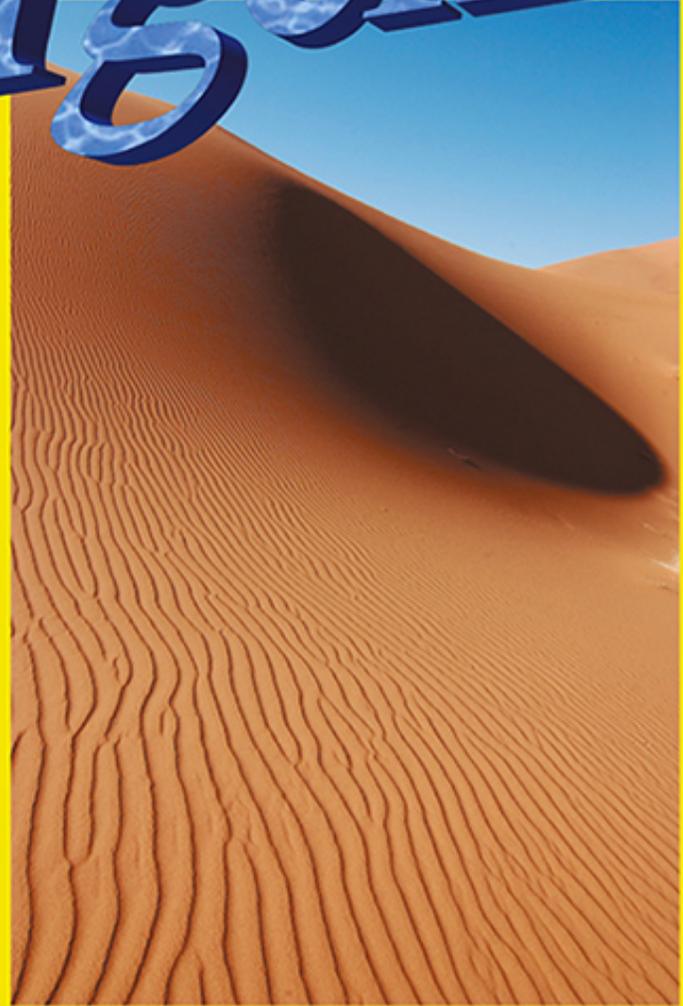


Klaus-Dieter Sedlacek et al.

# Emergenz

**Strukturen der  
Selbstorganisation  
in Natur und Technik**



Arbeits- und Handbuch

Der Autor Diplom-Mathematiker *Klaus-Dieter Sedlacek*, Jahrgang 1948, lebt seit seiner Kindheit in Süddeutschland. Er studierte neben Mathematik und Informatik auch Physik. Nach dem Studienabschluss im Jahr 1975 und einigen Jahren Berufspraxis gründete er eine eigene Firma, die sich mit der Entwicklung von Anwendungssoftware beschäftigte. Diese führte er mehr als fünfundzwanzig Jahre lang. In seiner zweiten Lebenshälfte widmet er sich nun seinem privaten Forschungsvorhaben. Er hat sich die Aufgabe gestellt, die Physik von Information, Bedeutung und Bewusstsein näher zu erforschen und einem breiteren Publikum zugänglich zu machen. Im Jahr 2008 veröffentlichte er ein aufsehenerregendes Sachbuch mit dem Titel »Unsterbliches Bewusstsein - Raumzeit-Phänomene, Beweise und Visionen«.

Webseite: [www.klaus-sedlacek.de](http://www.klaus-sedlacek.de)

## **Wichtiger Hinweis für Benutzer**

Der Herausgeber und die Autoren haben alle Sorgfalt walten lassen, um in den Beiträgen akkurate Informationen zu publizieren. Weder die Autoren noch der Herausgeber übernehmen irgendeine Gewähr oder Haftung für die Nutzung dieser Informationen gleich für welchen Zweck. Der Herausgeber hat sich bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte ihm gegenüber dennoch der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar gezahlt.

# Inhaltsverzeichnis

## 1. **EINFÜHRUNG**

1.1. Wie durch kollektive Organisation emergente Strukturen entstehen

1.2. Wozu dieses Arbeits- und Handbuch gut ist

## 2. **SELBSTORGANISIERENDE SYSTEME UND EMERGENZ**

2.1. Systemtheorie

2.2. Systeme

2.3. Selbstorganisation

2.4. Selbstreplikation

2.5. Evolution (Systemtheorie)

2.6. Emergenz

## 3. **STEUERUNGSMECHANISMEN UND MODELLIERUNG EMERGENTER SYSTEME**

3.1. Evolutionärer Algorithmus

3.2. Autopoiesis

3.3. Rekursion

3.4. Emergenz durch Chaos (Chaosforschung)

3.5. Künstliches Leben

3.6. Zellulärer Automat

3.7. Conways Spiel des Lebens

3.8. Ameise (Turingmaschine)

3.9. Water

3.10. Langton-Schleife

## **4. EMERGENTE PHÄNOMENE DER NATUR**

- 4.1 .Schwarmverhalten
- 4.2.Kollektive Intelligenz
- 4.3.Supraleiter
- 4.4.Kristall
- 4.5.Schnee

## **5. SELBSTORGANISATION UND EMERGENZ IM UNIVERSUM**

- 5.1 .Kosmologie
- 5.2.Urknall
- 5.3.Evolution

## **6. STICHWORTVERZEICHNIS**

## **7. ANHANG**

- 7.1 .Quellen und Bearbeiter der Artikel
- 7.2.Quellen, Lizenzen und Autoren der Bilder
- 7.3.GNU Free Documentation License (Lizenz)

---

# 1. Einführung<sup>1</sup>

---

*Von Klaus-Dieter Sedlacek*

## 1.1. Wie durch kollektive Organisation emergente Strukturen entstehen

Der französische Philosoph Voltaire schilderte, wie der englische Naturforscher Isaac Newton (1642-1726) unter einem Apfelbaum saß und vor sich hin grübelte. Als ein Apfel sich vom Zweig löste und auf Newtons Kopf fiel, wurde die moderne Physik geboren. Der Aufprall der Frucht soll dazu geführt haben, dass Newton den Grundstein für die Fallgesetze, die klassische Mechanik und die exakten Gesetze der Gravitation und Bewegung legte und in seiner Schrift *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* 1687 veröffentlichte.

Newtons Gesetze waren in der Tat umwälzend. Zwar wusste man seit der Antike, dass Regelmäßigkeit eines der Prinzipien der Natur ist. Die Prinzipien wurden jedoch weniger durch präzise Formeln ausgedrückt. Newton beobachtete nicht nur die Regelmäßigkeiten, sondern formulierte sie als Gesetze in exakter mathematischer Form.

Die simplen Regeln, die auch die Ellipse der Planetenbahnen mit der Sonne in einem Brennpunkt exakt beschrieben,

fürten dazu, dass das Universum wie ein ablaufendes mechanisches Uhrwerk erschien. Es gab niemand, der die Planeten ständig anschubste. Damit Objekte sich mit konstanter Geschwindigkeit auf gerader Bahn fortbewegen, ist nach Newtons Mechanik keinerlei äußerer Anstoß nötig.

Das unheimliche an Newtons Gesetzen war, dass sie mit allen Messungen exakt übereinstimmten. Als man glaubte, endlich einen Fehler zu entdecken, weil der Planet Uranus sich nicht an die vorausberechneten Umlaufbahnen hielt, entdeckte man Neptun. Die Abweichungen der Bahn des Uranus konnten daraufhin durch die bekannten Gesetze erklärt werden.

Die immer wieder bestätigte exakte Übereinstimmung von Messung und Vorhersage durch Formeln führte schließlich dazu, dass die Physiker glaubten, alle beobachtbaren Phänomene, auch solche im mikroskopischen Maßstab, könnten mechanisch erklärt werden. Die Welt hatte anscheinend eine allumfassende mechanische Ordnung.

Der Schock kam im frühen 20. Jahrhundert. Der Physiker Max Planck konnte es zunächst selbst nicht glauben, was er im Zusammenhang mit der Untersuchung elektromagnetischer Strahlung entdeckte. Er stellte fest, dass Energie nur in Form unteilbarer Päckchen (Quanten) ausgestrahlt wird. Dadurch begründete er die Quantenphysik und deren mathematischen Formalismus, die Quantenmechanik. Die Anwendung von Newtons Gesetzen auf Atome und atomare Größenordnungen führt dagegen auf hoffnungslos falsche Ergebnisse, weil Atome in den Formeln der klassischen Mechanik keine räumliche Ausdehnung haben und Feststoffe beim absoluten Temperatur-Nullpunkt riesige Wärmekapazitäten besitzen sollen.

Atome verhalten sich überhaupt nicht wie Billardkugeln. Obwohl sie ihre Energie wie Teilchen tauschen, bewegen sie

sich wie Wellen<sup>2</sup>. Und nicht nur Atome verhalten sich so, sondern alle Objekte. Flüssigkeiten und Feststoffe sind zwar ein Zusammenschluss von Quantenmaterie zu makroskopischen Substanzen, aber ihre Eigenschaften flüssig oder fest sind Erscheinungen **kollektiver Organisation**, die sich nicht von den zwei sich scheinbar widersprechenden Eigenschaften (wellenartig bzw. teilchenartig) der einzelnen Quantenobjekte ableiten lassen.

Wenn sich in einem System auf höherer Ebene durch kollektive Organisation Eigenschaften zeigen, die nicht durch Eigenschaften der Systemelemente erklärt werden können, dann spricht man von emergenten Eigenschaften. Der Vorgang der Herausbildung von emergenten Eigenschaften heißt **Emergenz**. Die Quantenphysik beweist die Emergenz von Newtons legendären Gesetzen. Diese sind ein für große Systeme gültiger Grenzfall der Quantenmechanik. Welch eine Überraschung, dass sich unsere Alltagswirklichkeit als ein emergentes Phänomen kollektiver Organisation erweist!

Wenn wir unseren Blick schärfen für das Prinzip der kollektiven Organisation und den daraus hervorgehenden emergenten Eigenschaften, entdecken wir in unserer Welt überall das Wirken von Emergenz. Während wir vielleicht noch vor kurzem glaubten, alles Wesentliche sei schon bekannt, tun sich auf einmal neue interessante Fragen auf.

Beispielsweise bestehen Schneeflocken aus sechseckigen symmetrischen Kristallen. Es gibt unzählig verschiedene Kristallformen, und zwar so viele, dass es heißt, es gäbe keine zwei gleichen. Wie sich aber Wassermoleküle kollektiv organisieren und miteinander kommunizieren, dass die eine Ecke des Kristalls weiß, welche Form die andere Ecke gerade annimmt, so dass Symmetrie entsteht, kann mit klassischer Physik nicht beantwortet werden.

Interessant wäre es auch herauszufinden, wo menschliches Bewusstsein als anscheinend emergentes Phänomen der Evolution seinen genauen Sitz hat. Bisher hat noch niemand Bewusstsein im Gehirn lokalisieren können. Aber vielleicht sind nur nicht alle Prinzipien kollektiver Organisation bekannt, die zur gewünschten Antwort führen. Mehr Wissen über Emergenz kann dabei helfen, die Antwort zu finden. Zum Thema Evolution kann man noch weitere Fragen stellen, wie: Welches sind die Regeln kollektiver Organisation, die aus toten Molekülen Leben emergieren?

Das sind Fragen, die dieses Buch natürlich nicht erschöpfend beantworten kann. Aber es kann Sie in die Themenstellung der Emergenz einführen und Ihnen zeigen, wie aus einfachsten organisatorischen Regeln komplexe emergente Strukturen entstehen.

## **1.2. Wozu dieses Arbeits- und Handbuch gut ist**

Bevor ich Ihnen beschreibe, wie ich selbst mit Büchern arbeite, möchte ich Ihnen einen kurzen Überblick über den Inhalt dieses Buchs geben.

Nach dem grundlegenden Kapitel 2, in dem wichtige Begriffe und Beispiele zur Emergenz erläutert werden, folgt das Kapitel 3, mit den Steuerungsmechanismen. Im gleichen Kapitel finden Sie auch Computer-Simulationen. Wenn Sie wollen, können Sie am PC selbst Experimente durchführen, indem sie die beschriebenen Programme aus dem Internet herunterladen. Schließlich runden zwei weitere Kapitel mit Beschreibungen emergenter Phänomene der Natur und des Universums das Buch ab.

Sie fragen sich bestimmt, wozu man eigentlich dieses Buch braucht, wenn man doch alles im Internet finden kann. Sicher findet man alles Mögliche im Internet. Aber es gibt gute Gründe, die für ein Buch sprechen.

Mir selbst ist ein Leitfaden in gedruckter Form wichtig, denn etwas Gedrucktes kann ich auch unterwegs in der Bahn, abends im Bett oder sogar in der Badewanne lesen. Zum ersten Einlesen in das Thema brauche ich nicht ständig zwischen Internetseiten hin und her zuhüpfen. Die dort verteilten Informationen erfordern ein unstetes Arbeiten. Stattdessen habe ich alles Nötige beisammen. Ein Buch ist deshalb förderlicher für den Lesefluss, als ein Computer.

Während ich ein Buch lese, habe ich immer einen Leuchtmarker oder einen Bleistift griffbereit. Mit dem Leuchtmarker streiche ich die Stellen an, die mir persönlich wichtig sind. Während ich das tue, fallen mir zum Text Anmerkungen ein, die ich mit Bleistift am Rand notiere. Zu dem Zweck ist ein breiter Rand sinnvoll. Weil man mit diesem Buch wie beschrieben arbeiten kann, firmiert es als Arbeitsbuch.

In einem zweiten Arbeitsschritt gehe ich dann auch ins Internet, um die Randnotizen zu recherchieren. Dazu sind Weblinks hinter jedem Unterkapitel hilfreich.

Wenn ich später einen Text zum Thema schreibe, benutze ich das Buch wie ein Handbuch. Hier sind Literaturangaben und ein Stichwortverzeichnis wichtig. Beim Zitieren kann ich mich außerdem auf das Buch beziehen. Zitate, die sich auf das Internet beziehen, sind dagegen wenig hilfreich, weil schon morgen die zugehörige Internetadresse verschwunden sein kann.

So erweist es sich, dass das Internet nur die Hälfte eines unschlagbaren Instruments ist, die andere Hälfte muss ein

gedrucktes Buch beitragen und ich glaube, dass dieses Buch deshalb gut und wichtig ist.

---

[1] Dies ist ein unveränderlicher Abschnitt, der nicht unter den Bestimmungen der GNU *Free Documentation License* steht.

[2] Vgl. Tipler, Mosca: *Physik*, 6. Aufl., Spektrum, S. 1336

---

## 2. Selbstorganisierende Systeme und Emergenz

---

### 2.1. Systemtheorie

**Systemtheorie** ist ein interdisziplinäres Erkenntnismodell, in dem Systeme zur Beschreibung und Erklärung unterschiedlich komplexer Phänomene herangezogen werden. Die Analyse von Strukturen und Funktionen soll häufig Vorhersagen über das Systemverhalten erlauben.

Die Begriffe der Systemtheorie werden in verschiedenen wissenschaftlichen Disziplinen angewendet, so in der Biologie, der Chemie, der Ethnologie, der Informatik, der Geographie, der Literaturwissenschaft, den Ingenieurwissenschaften, der Logik, der Mathematik, der Pädagogik, der Philosophie, der Physik, der Physiologie, der Politikwissenschaft, der Psychologie, der Robotik, der Semiotik, der Soziologie, der Sozialen Arbeit und den Wirtschaftswissenschaften. Die Systemtheorie ist sowohl eine allgemeine und eigenständige Disziplin als auch ein weitverzweigter und heterogener Rahmen für einen interdisziplinären Diskurs, der den Begriff System als Grundkonzept führt. Es gibt folglich sowohl eine allgemeine „Systemtheorie“ als auch eine Vielzahl unterschiedlicher, zum Teil widersprüchlicher und konkurrierender Systemdefinitionen und -begriffe. Es hat sich heute jedoch eine relativ stabile Reihe an Begriffen und Theoremen

herausgebildet, auf die sich der systemtheoretische Diskurs bezieht.

## ***Chronologie***

- um 1950 *Allgemeine Systemtheorie* (basierend auf Ludwig von Bertalanffy)
- um 1950 **Kybernetik** (William Ross Ashby, Warren Sturgis McCulloch, Walter Pitts, Arturo Rosenblueth, Norbert Wiener): Mathematische Theorie der Kommunikation, Steuerung und Regelung von lebenden, technischen und sozialen Systemen u. a. durch Rückkopplungsschleifen, verwandt ist die Kontrolltheorie
- um 1970 **Katastrophentheorie**: Dieser Zweig der Mathematik beschreibt plötzliche Veränderungen, die sich aus kleinen Impulsen ergeben.
- um 1980 **Chaostheorie**: Mathematische Theorie von nichtlinearen dynamischen Systemen, die Verzweigungen beschreibt, Attraktoren und chaotische Bewegungen.
- um 1990 **Komplexe adaptive Systeme** (John H. Holland, Murray Gell-Mann, Harold Morowitz, W. Brian Arthur): beschreibt Emergenz, Anpassung, und Selbstorganisation und beruht auf Arbeiten des Santa Fe Institute.

### **2.1.1. Grundlagen**

Die Systemtheorie (Ingenieurwissenschaften) wurde in den 1920er Jahren konzipiert.<sup>1</sup> Der Begriff Allgemeine Systemtheorie geht auf den Biologen Ludwig von Bertalanffy zurück<sup>2</sup>. Seine Arbeiten bilden zusammen mit der

Kybernetik (Norbert Wiener, William Ross Ashby) und der Informationstheorie (Claude Elwood Shannon, Warren Weaver) die grundlegenden Überlegungen dieses Wissenschaftsansatzes. Weitere wichtige Theorien stammen von Humberto Maturana und Francisco Varela (Autopoiesis), Stuart Kauffman (Selbstorganisation), Bronisław Malinowski und Alfred Radcliffe-Brown (Strukturfunktionalismus) sowie Talcott Parsons (Strukturfunktionalismus oder Systemfunktionalismus) und Niklas Luhmann (soziologische Systemtheorie).

## **2.1.2. Hauptströmungen der Systemtheorie**

Kulturgeschichtlich geht der Systembegriff bis auf Johann Heinrich Lambert zurück und wurde unter anderem von Johann Gottfried Herder übernommen und ausgearbeitet. Dies vollzieht sich vor allem an der Frage, wie man lebende Organismen und deren Selbsterhaltung und -organisation verstehen kann. Hieran entwickelt sich ein Vokabular, das „interne Gleichgewichte“ kennt, „Ausgleichsbewegungen“ und „Kraft“ als die Möglichkeit über sich hinauszugreifen, womit es dem System eine innere Dynamik gibt, eine Aktivität, die das System nicht darauf beschränkt passiv Impulse von außen zu empfangen. Der biologische Organismus wird als ein System aufgefasst, in dem keines der Teile die alleinige Herrschaft über andere hat, sondern sie in steter Wechselwirkung zueinander aufgefasst werden müssen. Wenngleich diese Überlegungen noch frei von dem Wunsch sind, eine Systemtheorie zu entwickeln, bilden sie den Nährboden für spätere Ansätze.

Die moderne Systemtheorie beruht auf unabhängig voneinander entwickelten Ansätzen, die später synthetisiert

und erweitert wurden: Der Begriff Systemtheorie bzw. Systemlehre stammt von Ludwig von Bertalanffy (vgl. „General Systems Theory“). Von Bertalanffy spricht von offenen Systemen und entwickelt den Begriff der organisierten Komplexität, der den dynamischen Austausch mit der Umwelt beschreiben soll. Erst mit der Ausformulierung des Informationsbegriffes ließ sich dieses Konzept jedoch weiter generalisieren. Bereits 1948 hatte Norbert Wiener mit „Cybernetics“ (Kybernetik) einen ebenfalls zentralen Ausdruck geprägt, der heute mit dem Systembegriff eng verbunden ist. Ein weiteres verwandtes Konzept ist die Tektologie Alexander Bogdanows.

## **Systemlehre (Ludwig von Bertalanffy)**

Ludwig von Bertalanffy führte ein neues wissenschaftliches Paradigma ein, das er als Gegenentwurf zur klassischen Physik positionierte. Er kritisierte deren deduktive Verfahren und die damit einhergehende isolierte Betrachtung von Einzelphänomenen. Für die Biologie sei diese Methode nicht adäquat. Anstelle von Einzelphänomenen, die in der Realität niemals isoliert aufträten, seien diese Phänomene in ihrer Vernetzung zu beschreiben. Daher setzte er der isolierten Einzelbetrachtung den Systembegriff entgegen, wobei dieser Begriff eine Menge von Elementen und deren Relation untereinander beschreiben soll. Als ein solches Modell betrachtete er die „organisierte Komplexität“. Während die klassische Wissenschaft „unorganisierte Komplexität“ erfolgreich beschrieben habe, stehe die theoretische Erfassung organisierter Komplexität vor neuen Herausforderungen. Organisierte Komplexität sei gegeben, wenn Einzelphänomene nicht schlicht linear logisch miteinander gekoppelt seien, sondern Wechselwirkungen unter ihnen bestünden. Sei dies der Fall, könne eine exakte Beschreibung der reziproken Vernetzungsbedingungen ein Bild von der *Einheit* der Summe jener Einzelphänomene

vermitteln. Die Systemlehre untersucht somit die Organisationsformen komplexer Wechselbeziehungen zwischen einzelnen Elementen jenseits linear darstellbarer Relationen und einfacher Kausalität. Dabei unterschied von Bertalanffy zwischen offenen und geschlossenen Systemen. Ein geschlossenes System wird als binnenstabil und über keine Wechselwirkungen mit der Umwelt verfügend beschrieben. In einem solchen System gibt es strenggenommen keine organisierte Komplexität, da sich die Elemente im Gleichgewichtszustand in mathematisch eindeutiger Weise zueinander verhalten. Ein offenes System dagegen verfügt über variabilisierte Relationen seiner Elemente, die durch nichtprognostizierbare Umwelteinflüsse verändert werden. Die interne Variabilität ermöglicht es dem System, sich in einem dynamischen Umfeld relativ zu stabilisieren (Fließgleichgewicht). Offene Systeme entfalten also im Austausch mit ihrer Umwelt eine Dynamik und variieren ihre Zuständigkeit, ohne dabei ihre Systemstrukturen vollständig ändern zu müssen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie nicht kausal von außen beeinflusst werden, sondern ihre interne Organisation bei Umweltveränderungen *selbst* umstellen („Black Box“-Theorem). Dies wird als *Selbstorganisation* bezeichnet und kann als Paradigma organisierter Komplexität gelten.

Gegen das „Newtonsche Weltbild“ setzte von Bertalanffy also seinen Gedanken einer allgemeinen, interdisziplinären Systemlehre. Auch in Wissenschaftsgebieten, die sich nicht in den Rahmen physikalisch-chemischer Gesetzmäßigkeiten einordneten - etwa der Biologie oder der Soziologie -, träten dennoch exakte Gesetzmäßigkeiten auf, die durch passend gewählte Modellvorstellungen abgebildet werden könnten.

Die Systemlehre wurde als allgemeine Naturwissenschaft des Lebens konzipiert. In der Systemlehre werden energetisch offene Systeme beschrieben. L. von Bertalanffy argumentierte vor dem Hintergrund der physikalischen

Auffassung der Thermodynamik (Wärmemethod). Offene Systeme können Energie aus ihrer Umwelt aufnehmen und sich so zu höherer Ordnung entwickeln, also die globale thermodynamische Entropie lokal umgehen. Die Systeme der Systemlehre sind Lebewesen, der wesentliche Prozess ist die Osmose, die in einem Fließgleichgewicht (steady state) verläuft.

Die Informations- und Regelungsprozesse wurden von L. von Bertalanffy mathematisch formuliert.

## **Kybernetik**

Die Kybernetik behandelt operationell geschlossene (nach W. Asby "informationsdichte") Mechanismen. Sie wurde als Regelungs- und Kommunikationstheorie konzipiert. Der Fokus der Kybernetik liegt auf Regelung und Steuerung. Deshalb kommen in der Kybernetik als Systeme in erster Linie geregelte Mechanismen in Betracht. Die Regelung beruht immer auf Prozessen, die mit der mathematischen Systemtheorie der Technik beschrieben werden. L. von Bertalanffy hat sich gegen die Vermischung seiner Systemlehre und der Kybernetik ausgesprochen, weil er das mechanistische Denken der Kybernetik für die Beschreibung von Leben nicht als adäquat erachtete. Heute wird der Ausdruck „Systemtheorie“ aber beliebig für beides auf Drittes verwendet.

## **Generelle Erweiterungen der Kybernetik**

Als Systemtheorie 2. Ordnung bezeichnet man Systemtheorien, die in folgendem Sinne selbstbezüglich sind: Mit der jeweiligen Systemtheorie wird der Systemtheoretiker, der die Theorie macht, beschrieben. Der Kernbegriff ist deshalb *die Beobachtung des Beobachters*.

Heinz von Foerster hat den Begriff der 2. Ordnung eingeführt, er sprach von *secondorder cybernetics* oder von *cybernetics of cybernetics*. Die Systemtheorie 2. Ordnung ist eine erkenntnistheoretische Interpretation der Systemtheorie, in welcher untersucht wird, was der Systemtheoretiker als System theoretisch wissen kann. Systeme 2. Ordnung werden auch vom Radikalen Konstruktivismus (RK) benutzt.

Als Autopoiesis bezeichnet Humberto Maturana sowohl seine Systemtheorie wie auch den wesentlichen Prozess, den er mit seiner Theorie beschreibt, nämlich das Leben. Maturana beschreibt, grob gesehen, das gleiche wie von Bertalanffy in seiner Systemlehre, er argumentiert aber kybernetisch: er spricht von lebenden (autopoietischen) Maschinen, die operationell geschlossen sind.

Als Selbstorganisation bezeichnet man Prozesse, die wie die Autopoiese zu höheren strukturellen Ordnungen führen, ohne dass ein steuerndes Element erkennbar ist. Ein exemplarisches Beispiel ist der Laserstrahl, anhand dessen die Theorie von H. Haken auch entwickelt wurde .

Der Radikale Konstruktivismus wurde von Ernst von Glasersfeld entwickelt. Er hat dabei auf die Arbeiten von Jean Piaget zurückgegriffen. Die Denkweise von Piaget war konstruktivistisch und epistemologisch. Ernst von Glasersfeld argumentiert insbesondere auch mit der operationellen Geschlossenheit von Systemen.

Als System Dynamics bezeichnet man die Modellierung mit Regelkreisen. Bekannt gemacht hat das Verfahren Jay Wright Forrester durch das Weltmodell „World3“, anhand dessen in der Club of Rome-Publikation *Limits to Growth* (Die Grenzen des Wachstums, Dennis L. Meadows 1972) der globale Rohstoffverbrauch prognostiziert wurde.

## **Fachspezifische Erweiterungen der Kybernetik**

- Technologische Kybernetik (Automatik, Informatik, Systemtheorie der Technik)
- Biologische Kybernetik (biologische Autopoiesis, Biologische Kybernetik)
- Sozietale Kybernetik (Sozialkybernetik, politische Kybernetik)
- Ökonomische Kybernetik (Dynamische Systemmodelle in der Wirtschaftsmathematik und im Bereich Produktion+Logistik)

## **Theorie komplexer Systeme**

Die neueste Strömung ist die Theorie komplexer Systeme (Vertreter u. A. Stuart Kauffman). Ein komplexes System ist dabei ein System, dessen Eigenschaften sich nicht vollständig aus den Eigenschaften der Komponenten des Systems erklären lassen. Komplexe Systeme bestehen aus einer Vielzahl von miteinander verbundenen und interagierenden Teilen, Entitäten oder Agenten.

### **• Komplexe Adaptive Systeme**

Die Theorie der Komplexen adaptiven Systeme (John H. Holland, Murray Gell-Mann, Harold Morowitz, W. Brian Arthur) beruht vorwiegend auf den Arbeiten des Santa Fe Institute. Diese neue Komplexitätstheorie, die Emergenz, Anpassung, und Selbstorganisation beschreibt, basiert auf Agenten und Computersimulationen, die Multiagentensysteme (MAS) einschließen, die zu einem wichtigen Instrument bei der Erforschung von sozialen und komplexen Systemen wurden.

## **2.1.3. Verwandte Gebiete**

Diese vier Hauptrichtungen haben Vorläufer, Unterabteilungen, Entwicklungen, Anwendungen in den Fachdisziplinen.

## **Informationstheorie**

Die Informationstheorie wurde entwickelt von Claude Elwood Shannon und Warren Weaver. Wichtige Begriffe sind: Information, Entität, Entropie, Informationsübertragung, Datenkompression, Kodierung, Kryptographie, Komplexitätstheorie.

## **Chaostheorie**

Die Chaosforschung (David Ruelle, Edward N. Lorenz, Mitchell Feigenbaum, Stephen Smale, James Yorke) beschäftigt sich mit bestimmten nichtlinearen dynamischen Systemen, die eine Reihe von Phänomenen aufweisen, die man Chaos (genauer: *chaotisches Verhalten*) nennt. Eines dieser Phänomene ist der Schmetterlingseffekt, der besagt, dass kleine Änderungen unerwartet große Effekte haben können. Benannt wurde der Effekt von Edward N. Lorenz. Weitere Vertreter sind Benoît Mandelbrot und Henri Poincaré. Chaotische Systeme seien ihrer Meinung nach zum Beispiel Wetter, Klima, Plattentektonik, Turbulenz, Wirtschaftskreisläufe, Internet und das Bevölkerungswachstum.

## **Katastrophentheorie**

Die Katastrophentheorie (René Thom, Erik Christopher Zeeman) ist ein Zweig der Mathematik, der sich mit den Verzweigungen von dynamischen Systemen beschäftigt und beschreibt plötzliche Veränderungen, die sich aus kleinen Veränderungen von Umständen ergeben.

## **Konnektionismus**

Der Konnektionismus versteht ein System als Wechselwirkungen vieler vernetzter, einfacher Einheiten. Die meisten konnektionistischen Modelle beschreiben die Informationsverarbeitung in Neuronennetzen. Sie bilden eine Brücke zwischen biologischer Forschung und technischer Anwendung.

### **weitere**

- **Medizinische Kybernetik**

1. Die Medizinische Kybernetik umfasst die Anwendung systemtheoretischer, nachrichtentheoretischer, konnektionistischer und entscheidungsanalytischer Konzepte für biomedizinische Forschung und klinische Medizin.

- **Medizinische Systemtheorie**

1. Das Ziel der Medizinischen Systemtheorie ist es, die komplexen Zusammenhänge des physischen Systems und deren spezifische vernetzte Funktionsweise besser zu verstehen. Dabei werden physiologische Dynamiken im gesunden und erkrankten Organismus identifiziert und systemtheoretisch modelliert.

- **Philosophie lebender Systeme**

1. Die „Philosophie lebender Systeme“ interpretiert menschliches Verhalten als Resultat zweier gegensätzlicher Gruppen von Regelkreisen. Regelkreise mit negativer Rückkopplung steuern die Selbsterhaltungsprozesse (Stoffwechsel), Regelkreise mit positiver Rückkopplung steuern Wachstumsprozesse. Diese belohnen den erwünschten Effekt: der sexuelle Orgasmus belohnt das Verhalten, das zum Wachstum des Systems höherer Ordnung führt (Bevölkerungswachstum). Erst der Mensch ist

durch seine geistigen Fähigkeiten in der Lage, dieser biologischen Steuerung entgegenzuwirken.<sup>3</sup>

## 2.1.4. Universalitätsanspruch

Ein Charakteristikum dieser theoretischen Ansätze ist der Anspruch, eine formale Theorie zu erarbeiten, die möglichst umfassend anwendbar ist. Dieser Anspruch geht vor allem aus Ludwig v. Bertalanffys Werk *Allgemeine Systemtheorie* hervor: „Wenn wir ... den Begriff des Systems entsprechend definieren, so finden wir, daß es Modelle, Prinzipien und Gesetze gibt, die für verallgemeinerte Systeme zutreffen, unabhängig von der Natur dieser Systeme.“ Auch heute ist es diese Ausrichtung, die systemtheoretische Ansätze attraktiv erscheinen lässt, auch wenn das Ziel bislang unerreicht ist. So verbindet etwa das Santa Fe Institute mit seiner „Theorie komplexer adaptiver Systeme“ einen universellen Erklärungsanspruch.

Die „Theorie Sozialer Systeme“ Niklas Luhmanns teilt diese Ausrichtung nicht unmittelbar, weil sie sich auf stabile soziale Systeme beschränkt und vor allem die Mechanismen ihrer Selbstreproduktion (Autopoiesis) untersucht.

## 2.1.5. Begriffe der Systemtheorie

Der zentrale Grundbegriff der Systemtheorie ist das System (nach gr. *to systeme* = Zusammenstellung). Die Annahme, es gäbe Systeme, kann als Grundaxiom dieses Ansatzes betrachtet werden.

Ein System ist etwa wie folgt definiert:

1. Ein System ist begrenzt und abgrenzbar (System/Umwelt-Differenz). Es besteht aus einer

Systemgrenze („Boundary“), einem Systemkern, Systemelementen, dem Zusammenwirken dieser Elemente sowie aus Energie oder Signalen. Wird etwas über die Systemgrenzen hinweg transportiert ist dieses System ein offenes, sonst ein geschlossenes System. Alles außerhalb der Systemgrenze Liegende ist nicht Teil des Systems, sondern dessen Umwelt.

2. Ein System ist eine Menge von Elementen, die in einem abgegrenzten oder abgrenzbaren Bereich so zusammenwirken, dass dabei ein vollständiges, sinnvolles, zweck- und zielgerichtetes Zusammenwirken in einem funktionellen Sinne erzielbar wird.
3. Aufbau und Funktionsweise eines Systems hängen von dem Standpunkt des Betrachters ab.

## 2.1.6. Beispiele

Im Folgenden einige Beispiele für systemtheoretisches Denken aus der Ingenieurwissenschaft. Diesen Beispielen ist gemein, dass sie sich mit *derselben* Art von Differentialgleichungen lösen lassen. Diese Verwendung eines universellen Werkzeugs zur Lösung verschiedener, zunächst nicht verwandt erscheinender, Probleme ist Teil des „systemtheoretischen“ Denkens.

- Beschreibung von Schwingungen (und deren Fortpflanzung), zum Beispiel:
  1. Luft (Akustik),
  2. Wärme (Thermodynamik),
  3. Elektronen (Elektrotechnik),
  4. elektromagnetische Wellen,

5. quantenmechanische Objekte (im Sinne der Schrödinger Wellenmechanik),
  6. Geräten (zum Beispiel mechanischen Federn),
- Beschreibung des Verhaltens elektrischer Schaltkreise,
  - Beschreibung mechanischer Vorgänge (zum Beispiel Verteilung von Kräften).

## **Literatur**

### **Klassische Literatur**

- Norbert Wiener: *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*. Hermann Editions, Paris 1948.
- Ludwig von Bertalanffy: *Zu einer allgemeinen Systemlehre, Biologia Generalis*. 195, MIT Press/Wiley & Sons, New York/Cambridge 1948, S. 114-129.
- Claude Shannon, Warren Weaver: *A mathematical theory of communication*. Illinois 1949, ISBN 0252725484.
- William Ross Ashby: *Introduction to Cybernetics*. 1956.
- Ludwig von Bertalanffy: *Allgemeine Systemtheorie*. In: *Deutsche Universitätszeitung*. Nr. 12, 1957, S. 8-12.
- Ludwig von Bertalanffy: *General System Theory*. New York 1976.
- Georg Klaus, *Wörterbuch der Kybernetik*, Berlin (Dietz), Frankfurt (Fischer Taschenbuch, 1968
- Rolf Unbehauen: *Systemtheorie Bd. 1*. 8. Auflage, Oldenbourg 2002, ISBN 3486259997.
- Rolf Unbehauen: *Systemtheorie Bd. 2 - Mehrdimensionale, adaptive und nichtlineare Systeme*.

- Oldenbourg 1998, ISBN 3486240234.
- George Spencer-Brown: *Laws of Form*. 1969, ISBN 0045100284.
  - Ervin László: *Introduction to Systems Philosophy*. 1973, ISBN 0061317624 (Vorwort von Ludwig von Bertalanffy).
  - Gerald M. Weinberg: *An Introduction to General Systems Thinking*. 1991, ISBN 0932633498 (Silver Anniversary Edition).
  - Humberto R. Maturana, Francisco J. Varela: *Autopoiesis and Cognition The Realization of the Living*. 1980, ISBN 9027710163.
  - Ernst von Glasersfeld: *Wissen, Sprache, Wirklichkeit*. 1987.
  - Anatol Rapoport: *Allgemeine Systemtheorie*. Darmstädter Blätter, Darmstadt 1988.
  - Joël de Rosnay : *Das Makroskop: Systemdenken als Werkzeug der Ökogesellschaft. Mit e. Vorwort von Frederic Vester*. Rowohlt, Reinbek 1979, ISBN 3-499-17264-X

## **Aktuelle Literatur**

- Heinz von Foerster: *Wissen und Gewissen*. Suhrkamp, 1993.
- Thomas Allgeier: *Kommunikationswissenschaftliche Systemanalyse: Eine kommunikationswissenschaftliche Integration systemtheoretischer und einstellungstheoretischer Konzepte zur empirischen Analyse des Gesellschaftssystems der Bundesrepublik Deutschland*. Diss. Univ. München, 1995.

- Heinz von Foerster: *Cybernetics of Cybernetics, The Control of Control and the Communication of Communication*. 1995, ISBN 0964704412.
- David J. Krieger: *Einführung in die allgemeine Systemtheorie*. Stuttgart 1996, ISBN 3825219046.
- Fritjof Capra: *The Web of Life - A new Scientific understanding of Living Systems*, Anchor, 1997 (deutsch als *Lebensnetz - Ein neues Verständnis der lebendigen Welt* Scherz Verlag/Knaur-München, 1999.)
- Georg Hörmann (Hrsg.): *Im System gefangen - zur Kritik systemischer Konzepte in den Sozialwissenschaften*. 2. Auflage, Klotz, Eschborn 1997, ISBN 3-88074-278-2.
- John Biggart, Peter Dudley, F. King: *Alexander Bogdanov and the Origins of Systems Thinking in Russia*. In: *The Proceedings of a Conference at the University of East Anglia*. Ashgate Publishing Group, 1998, ISBN 185972678X.
- Norbert Bischof: *Struktur und Bedeutung. Eine Einführung in die Systemtheorie für Psychologen*. 2. Auflage, 1998 ISBN 3456830807 (mit einer Einführung in die Methoden der mathematischen Systemanalyse - einschließlich Z-Transformation - nur mit Abiturmathematik als Voraussetzung)
- Helmut Willke: *Systemtheorie, I. Grundlagen, II. Interventionstheorie, III. Steuerungstheorie* 3. Auflage, Stuttgart 2001, ISBN 3825218406
- Gerald M. Weinberg: *An Introduction to General Systems Thinking*. (25th Anniversary Edition), 2001, ISBN 0932633498.
- Heinz von Foerster: *Understanding Systems: Conversations on Epistemology and Ethics*. 2002, ISBN

0306467526.

- Andreas Häuslein: *Systemanalyse*. 2003, ISBN 3800727153,
- Dieter M. Imboden, Sabine Koch: *Systemanalyse*. Berlin 2003, ISBN 3540439358,
- Christian Schuldt: *Systemtheorie*, Hamburg: Europäische Verlagsanstalt, 2003, ISBN 3434461841.
- Dominique Aubier: *Die Entschlüsselung der Gehirnstruktur* 2 Bände, Viamala-Verlag Ch., 2003, ISBN 3952166421.
- Rudi Zimmerman: *Das System Mensch. Konstruktion und Kybernetik des neuen ganzen Menschen*. Berlin 2003, ISBN 3-00-012784-4.
- Bernhard Poerksen: *The Certainty of Uncertainty*. 2004, ISBN 0907845819.
- Thomas Frey, Martin Bossert: *Signal- und Systemtheorie*. 2004, ISBN 3519061937.
- Diederich Hinrichsen, Anthony J. Pritchard: *Mathematical Systems Theory*. Springer 2005, ISBN 978-3-540-44125-0.

## **Weblinks**

- Geschichte des Systemdenkens und des Systembegriffs  
(<http://www.muellerscience.com/SPEZIALITAETEN/System/systemgesch.htm>)
- Systemtheorie Hausarbeit (<http://www.neurop.ruhr-uni-bochum.de/~porr/luhmann3/luhmann3.html>)
- Glossar „Vernetztes Denken und Handeln“ (<http://glossar.lindig.de/>)

- Skriptum Einführung in die Systemwissenschaft, Universität Osnabrück (<http://www.usf.uos.de/archive/~vberding/syswi/skript10.pdf>)

## 2.2. Systeme

Ein **System** (von griechisch σύστημα, altgriechische Aussprache *sýstema*, heute *sístima*, „das Gebilde, Zusammengestellte, Verbundene“; Plural *Systeme*) ist eine Gesamtheit von Elementen, die so aufeinander bezogen sind und in einer Weise wechselwirken, dass sie als eine aufgaben-, sinn- oder zweckgebundene Einheit angesehen werden können und sich in dieser Hinsicht gegenüber der sie umgebenden Umwelt abgrenzen.

Systeme organisieren und erhalten sich durch Strukturen. *Struktur* bezeichnet das Muster (Form) der Systemelemente und ihrer Beziehungsgeflechte, durch die ein System entsteht, funktioniert und sich erhält. Eine *strukturlose* Zusammenstellung mehrerer Elemente wird hingegen als *Aggregat* bezeichnet.

### 2.2.1. Allgemeines zu Systemen

Ein System ist ein nach Prinzipien geordnetes Ganzes.

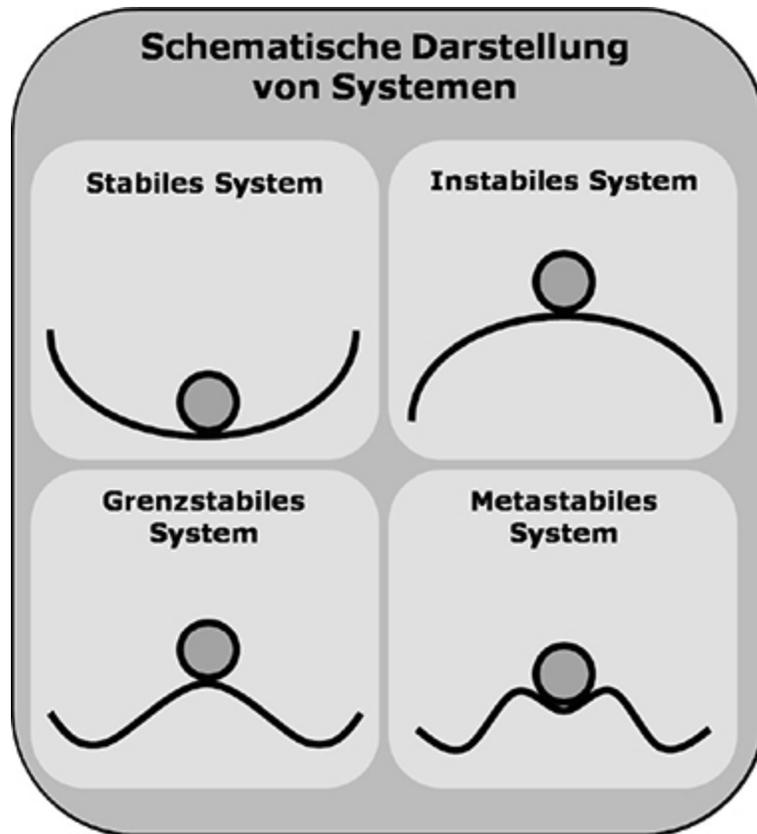


Abb. 1: Darstellung verschiedener Systeme - Grafik CC-by-sa Grochim

1. Jedes System besteht aus Elementen (Komponenten, Subsystemen), die zueinander in Beziehung stehen. Meist bedeuten diese Relationen ein *wechselseitiges* Beeinflussen - aus der Beziehung wird ein Zusammenhang.
2. Ein System in diesem Sinn lässt sich durch die Definition zweckmäßiger Systemgrenzen von seiner Umwelt (den übrigen Systemen) weitgehend abgrenzen, um es modellhaft isoliert beobachten und das Geschehen reflektieren zu können. Diese (vorübergehende) Einschränkung ist zweckmäßig, weil das menschliche Bewusstsein in seiner Auffassungsgabe systemischer Abläufe begrenzt ist.
3. Bei Systemen unterscheidet man die Makro- und die Mikroebene: Auf der Makroebene befindet sich das

System als Ganzes. Auf der Mikroebene befinden sich die Systemelemente.

4. Strukturierung, Eigenschaften und Wechselwirkungen der Elemente auf der Mikroebene bestimmen die Eigenschaften des Gesamtsystems auf der Makroebene. Diese von der Mikroebene bestimmten Eigenschaften des Gesamtsystems bilden zugleich strukturelle Rahmenbedingungen, die steuernd auf die Elemente der Mikroebene einwirken.
5. Die Beziehungen (Relationen) zwischen den Elementen der Mikroebene sind Wirkungen von Austauschprozessen, wie zum Beispiel Stoff-, Energie- oder Informationsflüssen.
6. Auf der Makroebene lassen sich Beobachtungen machen, die aus dem Verhalten der Elemente auf der Mikroebene nicht erklärbar sind. So lassen sich beispielsweise Konvektionszellen, die beim Erwärmen einer Flüssigkeit entstehen können, nicht aus dem Verhalten einzelner Moleküle der Flüssigkeit ableiten. („*Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile!*“). Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Emergenz.
7. Das System selbst ist wiederum Teil eines Ensembles von Systemen und bestimmt mit ihnen die Eigenschaften eines übergeordneten Systems.
8. Viele Systemtheoretiker verstehen ein System nicht als realen Gegenstand, sondern als Modell der Realität. Ein Modell ist nicht richtig oder falsch, sondern mehr oder weniger zweckmäßig.
9. Die Abgrenzung von Systemen gegeneinander, das Herausgreifen bestimmter Elemente und bestimmter Wechselwirkungen und das Vernachlässigen anderer Elemente und Beziehungen und damit die Identifikation eines bestimmten Systems und seiner Umwelt ist stets