Dirk Proske

Unbestimmte Welt

Dirk Proske
„Unbestimmte Welt“
Dirk Proske Verlag, Dresden • Wien 2006
ISBN-10: 3-00-019233-6
ISBN-13: 978-3-00-019233-3

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichnungen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie als solche nicht eigens markiert sind.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Autor keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Angaben die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Soweit in diesem Werk Verfahren oder Techniken erläutert werden, darf der Leser zwar darauf vertrauen, dass der Autor große Sorgfalt darauf verwandt hat, dass die Angaben dem Wissensstand bei Fertigstellung des Werkes entsprechen. Für die Anwendung kann jedoch keine Gewähr übernommen werden.

Für die Beständigkeit und den Inhalt von Internetseite, auf die im Buch verwiesen wird, kann keine Gewähr übernommen werden.

Dirk Proske

Unbestimmte Welt

Ich danke herzlich

Herrn Prof. Udo Peil von der TU Braunschweig,
Herrn Prof. Konrad Bergmeister von der BOKU Wien,
Herrn Prof. Han Vrijling &
Herrn Prof. Pieter van Gelder von der TU Delft,
Herrn Prof. Jürgen Stritzke von der TU Dresden,
Herrn Dr. Peter Gauer und Frau Dr. Suzanne Lacasse, NGI Oslo,
Frau Dr. Katrin Knothe, meiner Lektorin,
Frau Angela Heller,
Frau Helga Mai und
Frau Silke Scheerer
für die Unterstützung

und natürlich meiner lieben Frau Ulrike
und meinem lieben Ritter Wilhelm

"*Wer nicht die Idee der Physik (das heißt, nicht die physikalische Wissenschaft selbst, sondern das vitale Weltbild, das sie geschaffen), nicht die historische und biologische Idee, jenen philosophischen Weltenplan sich zu Eigen gemacht hat, der ist kein gebildeter Mensch. Und wenn keine außergewöhnlichen, spontanen Gaben diesen Mangel ausgleichen, so ist es mehr denn unwahrscheinlich, dass ein Mensch dieser Art ein wirklich guter Arzt, Richter oder Techniker zu sein vermag.*"

ORTEGA Y GASSET [59]

Inhaltsverzeichnis

Eine kleine Einführung 15
Was ist eine Definition? 17
Was sind Ordnung und Unordnung? 23
Was sind Systeme? 33
Was ist Zeit? 39
Was ist Unbestimmtheit? 43
Kann man Unbestimmtheit darstellen? 49
Was ist Zufall? 65
Was ist Komplexität? 69
Was ist Kausalität? 97
Zur Prognose komplexer Systeme 105
Was ist Optimierung? 109
Fazit 111
Literatur 117

Eine kleine Einführung

„*Ich weiß nicht, als was ich der Welt erscheine; mir selbst scheint, ich bin nur ein kleiner Junge gewesen, der am Meeresstrand gespielt und sich damit vergnügt hat, von Zeit zu Zeit einen etwas glätteren Stein oder eine etwas schönere Muschel als sonst zu finden, während der große Ozean der Wahrheit gänzlich unenträtselt vor mir liegt.*“

ISAAK NEWTON [28]

Die uns umgebende Welt wird durch Ordnung und Unordnung geprägt. Beide, Ordnung und Unordnung, scheinen inhärente Eigenschaften der Natur zu sein. Während Ordnungen Gesetzmäßigkeiten und damit Bestimmtheit wiederspiegeln, entziehen sich ungeordnete Zustände der Beschreibung durch Gesetze und vermitteln Unbestimmtheit. Ordnungen und die affinen Gesetzmäßigkeiten erlauben Rückschlüsse auf vergangene und zukünftige Zustände der Welt, die Unordnung mit ihrer Unbestimmtheit erschwert diese Rückschlüsse. Fast gewinnt man den Eindruck, als ob zwei Mächte einen Kampf über die Bestimmbarkeit der Welt austragen.

Dem Menschen, der von zielgerichteten Aktionen und Planungen vorangetrieben wird, ist diese Unbestimmtheit ein Dorn im Auge, er möchte sie zurückdrängen und möglichst ausschließen. Aber ist das überhaupt möglich? Ist Unbestimmtheit eine ureigene Eigenschaft, eine Kerneigenschaft der Welt? Die Bestätigung dieser Feststellung hätte weit reichende Auswirkungen für jeden einzelnen Menschen, für die Gesellschaft, eigentlich für alle Systeme, die eine Beschreibung der Natur erstreben.

Dieses Buch wird den Versuch unternehmen, zu belegen, dass Unbestimmtheit in der Tat eine Kerneigenschaft der Welt ist. Als solche kann sie nicht zerstört werden, es sei denn, man zerstört die Welt. Egal, wie viel Mühe wir uns geben werden, der Lauf der Dinge wird niemals vollständig bestimmt sein. Die Akzeptanz der Unbestimmtheit kann nur schmerzlich sein, denn der heutige Umgang der Menschen mit der Welt beruht auf der Idee, mittels Gesetzmäßigkeiten, mühsam erstellt mit dem Wissen aus der Vergangenheit, zukünftige Zustände der Welt vorherzusagen. Während die griechischen Philosophen Unbestimmtheit, also das Schicksal, als Kernelement des menschlichen Lebens ansahen, betrachtet

der moderne Mensch Unbestimmtheit als Rest einer Ideologie, die nur noch ihres Endes harrt. Aber in den letzten Jahren hat sich in vielen Fachgebieten die Meinung verfestigt, dass die Unbestimmtheit nicht aus dem Universum getilgt werden kann. So hat man gerade in der Mathematik verstärkt Bemühungen unternommen, Unbestimmtheit mathematisch zu beschreiben.

Die Erkenntnis, dass Unbestimmtheit in letzter Konsequenz nicht eliminiert werden kann und vielleicht sogar gar nicht eliminiert werden darf, setzt sich langsam durch. Über Begriffe wie Angst oder Freiheit wirkt Unbestimmtheit in unserem Alltag, ohne dass wir uns dessen letzten Endes bewusst werden. Dieses Buch befasst sich nun ausführlich mit der Frage, woher kommt Unbestimmtheit, wie kann man sie abbilden, was bedeutet Unbestimmtheit für das menschliche Leben, und vor allem was ist Unbestimmtheit.

Was ist eine Definition?

„So wenig ein Gebäude fertig ist, wenn sein Grund gelegt worden, so wenig ist der erreichte Begriff des Ganzen das Ganze selbst. Wo wir eine Eiche in der Kraft ihres Stammes und in der Ausbreitung ihrer Äste und den Massen ihrer Belaubung zu sehen wünschen, so sind wir nicht zufrieden, wenn uns anstelle dieser eine Eichel gezeigt wird."

GEORG WILHELM FRIEDRICH HEGEL: Phänomenologie des Geistes. [95]

Die Frage, was Unbestimmtheit ist, entspricht der Suche nach einer Definition des Begriffes. Nahezu alle wissenschaftlichen Bücher beginnen mit Definitionen oder Begriffserläuterungen. Es zeigt sich jedoch in vielen solcher Veröffentlichungen, dass Definitionen nicht abgeschlossen werden können. Es erscheint wichtig, auf diesen Sachverhalt etwas näher einzugehen, weil bereits hier eine Vorahnung über die Unbestimmtheit vermittelt wird.

Prinzipiell ist eine Definition die Zuordnung eines Inhaltes zu einem Begriff. In einer DIN-Norm heißt es dazu: Ein Begriff umfasst die wesentlichen Merkmale, die zu einer Denkeinheit gehören [14]. Das Ziel der Einführung einer Definition ist letztendlich die Erhöhung der Effizienz der Kommunikation: Dinge mit gewissen Eigenschaften werden gebündelt und abgekürzt. Man spricht bei einer Definition deshalb auch von einer Verdichtung der Merkmale [121]. Um diese Verdichtung zu erreichen, muss sich eine Definition dem Diktat der Kürze unterordnen. Häufig nützt es nichts, wenn eine Definition eines Begriffes mehrere Bücher umfasst. In solch einem Fall spricht man dann auch nicht mehr von einer Definition, sondern von einer Abhandlung. Oft lässt sich dies aber eben nicht vermeiden. Menschen, die viele Jahre in einem Forschungsgebiet tätig waren, fällt es schwer, ein Objekt aus diesem Forschungsbereich in aller Kürze zu definieren. Hier zeigt sich bereits ein starker Widerspruch innerhalb der Ziele von Definitionen: Sie sollen nicht nur kurz, sondern eben auch wahr, nützlich und fundamental sein [100]. Die gemeinsame Erfüllung dieser Forderungen ist oft nicht einfach umsetzbar.

Auf Grund dieser Probleme hat sich ein wissenschaftlicher Fachbereich mit diesem Thema befasst: Die Sprachwissenschaft. Innerhalb dieser hat man ver-

sucht, den unsichtbaren Aufbau von Definitionen zu ergründen. Dazu seien einige einleitende Bemerkungen hier angebracht.

Der Begriffsumfang beinhaltet alle Objekte, die zu einem Begriff gehören. Begriffe, die die Grundlage von Definitionen bilden, werden untereinander durch semantische Merkmale, kurz Sememe oder Semlisten, abgegrenzt. Die Sememe bilden die Begriffsinhalte, die Phänomene, welche durch Begriffe beschrieben werden. Dazu benutzen sie ein Wortfeld. Allerdings lässt sich eine Begriffsbildung durch Wortfelder nicht immer eindeutig bewerkstelligen. So gibt es Begriffspaare, die von ihren Sememen her Gegensätzliches und Gemeinsamkeiten aufzeigen. [116]

Die Begriffsbildung besitzt weiterhin innere und äußere Einflüsse. Als Denotat wird die eigentliche Bedeutung eines Wortes, also die außersprachliche Wirklichkeit, bezeichnet. Subjektive Wirkungen, wie z.B. Gefühle, werden hierbei ausgeschlossen. Im Gegensatz dazu berücksichtigt ein Konnotat neben der eigentlichen Bedeutung eines Wortes auch emotionale Wirkungen. Das Denotat für den Begriff „Sonne“ beinhaltet nur das physikalische Objekt, während das Konnotat „Sonne“ z.B. auch Helligkeit, hohe Temperatur etc. berücksichtigt. Daneben kennt die Sprachwissenschaft noch die „Benennung“ oder „Bezeichnung“ (Abb. 1). Eine Bezeichnung ist ein Kode, der auf einen Begriff verweist. Oft gibt es keinen Unterschied zwischen einem Begriff und einer Benennung oder Bezeichnung. Ein Beispiel für eine Bezeichnung ist ein Name. [116]

Nun fragt man sich, wozu solche detaillierten Beschreibungen für die Erstellung einer Definition notwendig sind. Eines der Ziele der Sprachtheorie ist z.B. die zukünftige Maschinenlesbarkeit des Internets, das so genannte Semantische Web. Ein bedeutendes Forschungsprojekt dazu hatte den gelungenen Namen „WonderWeb“ [126, 65]. Solche technischen Systeme, die richtige Verbindungen zwischen Begriffen erstellen müssen und damit die Sprache verstehen könnten, wären in der Zukunft Grundlage für elektronische Entscheidungs- und Wissensmanagementsysteme.

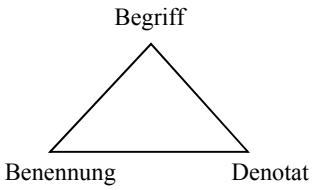


Abb. 1: Beziehung zwischen Begriff, Benennung und Denotat [116]

Ob sich diese Ziele allerdings umsetzen lassen, ist fraglich. So ist die Trennung von außersprachlicher Wirklichkeit und emotioneller Wirkung bei vielen Begrif-

fen nahezu unmöglich. Je komplexer die Objekte werden, umso schwieriger gelingt die Begriffsfindung und damit die Definition. Die Schärfung der Grenzen des Begriffes und die Abgrenzung von Begriffen durch Merkmale werden nahezu unmöglich. Vielmehr bilden die Begriffe Begriffslandschaften, in denen es scharfe Abgrenzungen in Form von steilen Tälern, aber auch sehr unscharfe Abgrenzungen in Form flacher Mulden gibt (Abb. 2) [89]. Es gilt: Je allgemeiner ein Begriff, umso weiter ist die Invarianz oder zu gut deutsch, umso geringer ist die Chance, den Begriff falsch anzuwenden. [59]

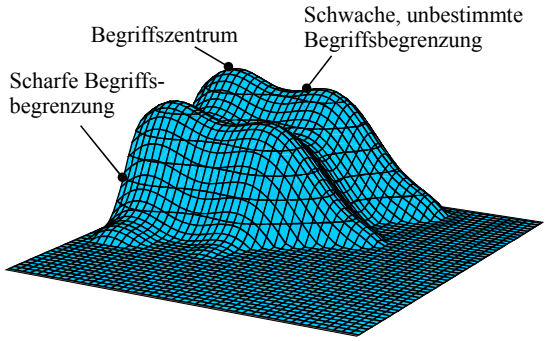


Abb. 2: Begriffslandschaft [89]

Diese mangelhafte Begriffsabgrenzung kann zu sehr kuriosen Situationen führen. Zwei Beispiele sollen das verdeutlichen. Im ersten Beispiel wird bewiesen, dass Arbeit für Menschen nicht zulässig ist und im zweiten Beispiel geht es um die Beurteilung einer Richtung:

① Beispiel	② Beispiel
Kinderarbeit ist verboten.	Gespräch zwischen Fahrer und Beifahrer
Jeder Mensch ist das Kind seiner Eltern.	Fahrer: Do I have to turn left?
Ergo: Kein Mensch darf arbeiten.	Beifahrer: Right! (heißt richtig und rechts)

Solche merkwürdigen Situationen lassen sich bei der Anwendungen der menschlichen Sprache beliebig fortsetzen:

- Was ist Glück?
- Wie groß darf ein kleiner Mensch maximal sein?
- Ab wann wird aus einer befruchteten menschlichen Eizelle ein Mensch?

Solche Fragen können von großer ethischer Bedeutung sein. Aber sind solche Fragen überhaupt abschließend zu beantworten?

In der Philosophie hat man erkannt, dass der Wahrheitsgehalt semantischer Ausdrücke unbestimmt sein kann. Um Begriffe besser beurteilen zu können, hat

man unter anderem die Theorie der Superevaluierung eingeführt [111] . Während bisher Aussagen nur wahr oder falsch sein konnten, können Aussagen jetzt superwahr, superfalsch, wahr oder falsch sein. Die Philosophen haben lange darüber gestritten, ob die Unbestimmtheit der Begriffe eine Eigenschaft der menschlichen Sprache oder eine Eigenschaft der Natur ist. Einige Objekte, wie z.B. Wolken, scheinen die letztere Annahme zu bestätigen. Auf dieses Beispiel wird zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal eingegangen. Andere Beispiele, wie z.B. die Frage nach der Fahrrichtung im Beispiel ②, scheinen eine Unbestimmtheit in der menschlichen Sprache zu belegen. In der philosophischen Literatur verwendet man für diese Art der Unbestimmtheit oft den Begriff Verschwommenheit oder Unklarheit, in anderen Fachbereichen spricht man von lexikalischer Unschärfe.

Im Folgenden seien weitere Gründe genannt, die die Grenzen des menschlichen Erkenntnishorizontes als Ursache für die Unbestimmtheit der Sprache nennen: Sprache kann niemals kulturfrei sein, denn in der Sprache spiegelt sich menschliche Erfahrung wider. Damit reflektierte eine Sprache immer die Geschichte eines Menschen und einer Kulturregion. LUDWIG WITTGENSTEIN hat das sehr schön formuliert: „*Die Grenzen meiner Sprache bedeuten die Grenzen meiner Welt.*“ Diese Kulturabhängigkeit der Sprache lässt sich sehr einfach an Beispielen belegen: Wandert man z.B. in ein anderes Land aus, bleibt man, selbst wenn man formell der Sprache mächtig ist, für eine gewisse Zeit ein Außenseiter, weil man viele Zusammenhänge in den Gesprächen nicht erfasst. Viele Witze bleiben unverständlich, weil das Hintergrundwissen fehlt. Ein zweites Beispiel sei eine Feier, deren Besucher überwiegend zwei verschiedenen Berufsgruppen angehören. Oft bilden sich dann Gesprächsrunden aus den jeweiligen Berufsgruppen, unabhängig davon, ob die Besucher sich kennen. Aber die Kommunikation zwischen den Mitgliedern der Berufsgruppe ist erleichtert, da sowohl die Probleme als auch die Begriffe bekannt sind.

Auf Grund der Weiterentwicklung der Kultur und Erfahrung ergibt sich eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Sprache und der Begriffe. Man sollte die Evolution der Begriffe, also ihre kontinuierliche Veränderung, nicht als Fehler ansehen, wie es häufig in der wissenschaftlichen Fachliteratur getan wird. Die „falsche“ Anwendung von Begriffen ist eher die Regel als die Ausnahme. Das gilt übrigens für jeden Menschen. Wenn Kinder sprechen lernen, verwenden sie zunächst die Begriffe unabhängig von deren Bedeutung und den grammatikalischen Regeln der Sprache. Spielerisch testen sie die Anwendung der Begriffe in verschiedenen Situationen. Anhand der Reaktionen der Umwelt lernen sie, die Begriffe immer zielgerichteter anzuwenden. So bildet sich allmählich ein Verständnis über den Begriff heraus, und zwar nicht per Definition, sondern per Realität [127, 49]. Die alte Regel, dass man Dinge tun sollte, bevor man darüber spricht, scheint sich hier zu bestätigen. Neben der Schärfung des Begriffes hat diese Form der Kommunikation noch einen zweiten Aspekt: Sie ist vordergründig auf Kon-

sens ausgerichtet. Beide, das Kind und auch der Erwachsene, passen die Begriffe dynamisch an, wobei natürlich der Hauptteil der Anpassung beim Kind erfolgt. Da Menschen aber dem Wachstum eines ihnen wohl gesonnenen komplexen Systems (dem Kind) grundsätzlich positiv gegenüberstehen, unterstützen Menschen diesen Entwicklungsprozess des Kindes. Später, als Jugendlicher, wird der Mensch Begriffe bewusst zur Abgrenzung verwenden, um seinen Entwicklungsstand zu belegen. Den Entstehungsprozess der Sprache kann man sowohl bei jedem Menschen beobachten als auch in einem ganz konkreten Fall für eine Sprache selbst. In Nicaragua haben taubstumme Kinder über mehrere Generationen und Jahrzehnte eine neue Gebärdensprache entwickelt[58]. Während sich sonst der Sprachwandel über Hunderte oder Tausende von Jahren vollzieht, konnte man hier im Zeitraffer die Entwicklung verfolgen. Etwas Ähnliches erlebte man auch bei den so genannten Pidgin- oder Kreolsprachen. Diese Sprachen besaßen oft nur eine Lebensdauer von einhundert Jahren, nämlich der Dauer der Kolonialzeit. Die letzte Entwicklung der Sprachen sind die Computersprachen. Und selbst hier findet man eine Vielzahl von Sprachen, Dialekten und Abweichungen. [49]

Man kann das heutige Wissen über Begriffe und Definitionen folgendermaßen zusammenfassen: In der menschlichen Begriffs- und Sprachverwendung können Begriffe im Allgemeinen nicht durch einfache Definitionen vollständig erklärt werden [123]. Aber um unser Wissen über die Welt rasch auszutauschen, sind Definitionen und Begriffe notwendig. Das Buch ist letztendlich nichts anderes als der Versuch einer Definition des Begriffes „Unbestimmtheit“, die allerdings die Forderung der Kürze aufgegeben hat.

Was sind Ordnung und Unordnung?

„*Es ist eigentlich merkwürdig, wie wenig Erstaunen die Tatsache geweckt hat, dass der Mensch gelernt hat, eine Ordnung seiner Tätigkeiten hervorzubringen, von der die Erhaltung eines großen Teils der heutigen Menschheit abhängt, die aber die Kenntnisse irgendeines Menschen oder alles, was je von einem individuellen Gehirn erfasst werden kann, weit übersteigt*."

FRIEDRICH VON HAYEK [79]

Um sich dem Begriff der Unbestimmtheit zu nähern, sollen zunächst zwei Begriffe in die Diskussion einbezogen werden, die bereits genannt wurden: Die Begriffe der Ordnung und Unordnung.

Menschen versuchen nicht nur ihren Alltag, sondern den Aufbau und Inhalt des uns bekannten Universums mithilfe von Ordnungen zu beschreiben und zu organisieren. Dem Begriff der Ordnung kann man sich zunächst nähern, indem man Teile, die nicht einer Ordnung unterliegen, ausschließt. Das sind zwei Extrema: perfekte Homogenität und vollständiges Chaos. Weder im Fall eines vollständigen Chaos, was einleuchtend ist, noch im Fall völliger Gleichheit, was zunächst nicht einleuchtend ist, könnte in der Natur eine Ordnung entdeckt werden. Da die vollständige Homogenität im Sinne von Gesetzmäßigkeiten eigentlich wünschenswert erscheint, muss erklärt werden, warum sie eben nicht für Ordnungen hilfreich wäre. Nimmt man an, dass im gesamten Universum vollständige Gleichheit oder Homogenität existieren, würde es nur eine Materieform geben, die den gesamten Raum ausfüllt. Aber dann wäre der Begriff des Raumes unnötig, denn da das Universum von jedem Punkt aus identisch wäre, gäbe es keinen Bezugspunkt. Ein Bezugspunkt muss sich durch irgendeine Eigenschaft auszeichnen, die nicht der verwendeten Ordnung unterliegt. Ein Beispiel: Man betrachtet einen Saal, in dem Stuhlreihen voller identischer Stühle im exakt gleichen Abstand stehen. Dieser Saal soll sich in alle Unendlichkeit erstrecken. Innerhalb dieses Saales möchte man einer zweiten Person einen bestimmten Stuhl zeigen. Dazu müsste man aber einen Bezugspunkt schaffen. Irgendwie muss ein Stuhl in diesem Meer an Stühlen markiert, verdreht, rausgenommen oder angemalt werden. Von diesem Stuhl aus kann man die Stühle zu dem Stuhl abzählen,

den man zeigen möchte. Natürlich kann man auch gleich diesen Stuhl markieren, aber das geht eben oft nicht. Man kann z.B. schlecht die Sonne oder einen anderen Stern markieren. Es muss also Objekte geben, die aus der Ordnung heraustreten. Nur wenn es Elemente gibt, die nicht einer Ordnung unterliegen, macht es Sinn, Ordnungen einzuführen. Existieren unterschiedliche Bereiche, unterschiedliche Materie oder unterschiedliche Elemente, so kann man den Begriff der Ordnung für diese verschiedenen Erscheinungsformen verwenden. Diese Ordnung besitzt Elemente, die Materie auf verschiedene Art und Weise repräsentiert, eben z.B. einen Stuhl. Diese verschiedenen Elemente müssen voneinander abgegrenzt sein. Auch diese Forderung wird später noch einmal aufgegriffen. Eine Eigenschaft der Abgrenzung soll aber schon jetzt von Bedeutung sein: Die Abgrenzung bedarf der Einführung des Konzeptes des Raumes. Raum beschreibt die Ausdehnung einer Ordnung und erlaubt die Abgrenzung der Elemente. Der Begriff des Raumes ist völlig wertlos bei vollständiger Unordnung und perfekter Homogentität (Abb. 3).
[17]

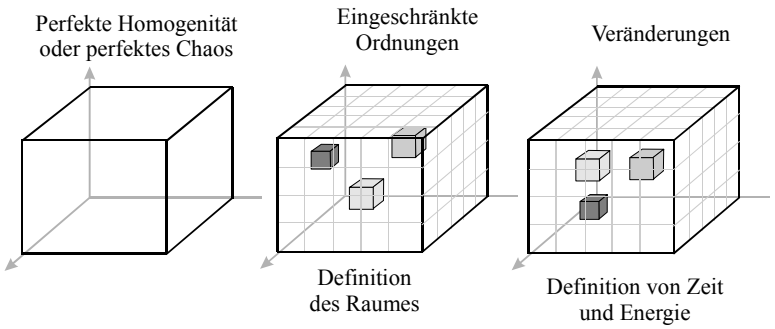


Abb. 3: Aufbau der Welt

Allerdings scheinen Ordnungen nicht statisch zu sein, sondern Ordnungen können in andere Ordnungen oder in Unordnungen übergehen. Will man nun die Veränderung von Ordnungen zulassen, also die Überführung einzelner Elemente in andere Elemente, so benötigt man dafür einen Motor. Der Motor der Umwandlung ist die Energie (Abb. 3). Mit Energie kann man Materie, also Ordnungen, verändern. Für die Beschreibung des Ablaufes der Veränderung benötigt man noch einen weiteren Parameter: die Zeit (Abb. 3). Auch die Zeit wird in einem späteren Kapitel noch einmal ausführlich behandelt. Die Beschreibung von Ordnungselementen über die Zeit entspricht einem weiteren Begriff: der Information. Information ist die Reduktion von Unbestimmtheit. Hier trifft man zum ersten Mal direkt auf den Begriff der Unbestimmtheit. Unbestimmtheitsmaße für Informationen werden ebenfalls noch in einem Kapitel ausführlich behandelt. Hier soll nur eine kurze Bemerkung zum Zusammenhang zwischen Information und Wis-

sen gegeben werden. Wissen ist eine Funktion der Information (Abb. 4), gelegentlich werden für die Umrechnung Formeln angegeben, wie z.B. Wissen entspricht dem Logarithmus der Information [87].

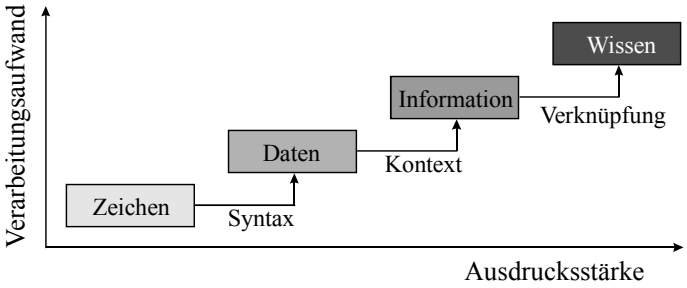


Abb. 4: Wissensbegriff [45]

Die bisherigen abstrakten Überlegungen über unsere Welt lassen sich auch auf Gesellschaften übertragen. Menschen sind soziale Wesen und tauschen als solche Materie, Energie und Informationen aus. Der Tausch dieser drei Dinge verläuft unterschiedlich. Materie kann durch Übergabe ausgetauscht werden. Energie wurde und wird üblicherweise in Materieform übergeben, z.B. in Form von Tieren, früher in Form von Sklaven, heute in Form von Brennstoff. Informationen können ebenfalls in Materieform übergeben werden, z.B. durch ein Buch, eine CD etc. Sie können in Wissen umgewandelt werden und daraus können dann wieder neue Informationen erzeugt werden.

Das langfristige dynamische Verhalten einer Gesellschaft wird durch Information und Wissen geprägt (wie erhält man Materie und Energie), das kurzfristige Verhalten durch Materie und Energie (was macht man mit der Materie und Energie). In komplexen Systemen, wie Menschen, menschlichen Gesellschaften, Lebewesen, werden Energie und Materie ständig der Umwelt entnommen und an die Umwelt abgegeben. Sie werden benötigt, um die Ordnung innerhalb der Systeme aufrecht zu erhalten. Man spricht hier auch vom Entropie-Export, weil die Systeme Unordnung abgeben, um eigene Ordnungen zu erhalten. Je höher, also komplexer die Ordnungen sind, umso mehr Unordnung muss an die Umwelt abgegeben werden (Abb. 5) [89].

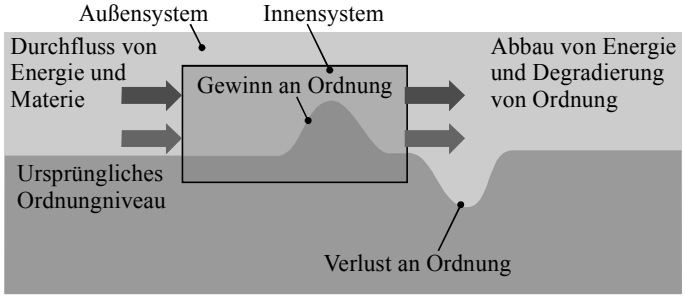


Abb. 5: Export von Unordnung zur Erhaltung von Ordnung in komplexen Systemen [89]

Die Notwendigkeit der Energie- und Materieübergabe an Systeme zur Erhaltung von Ordnung führt uns zu der Frage, ob die Ordnung in der Welt zu- oder abnimmt. Dabei scheint es zwei einander entgegengesetzte Kräfte zu geben.

Auf der einen Seite gibt es den mathematischen Satz der Ordnung in großen Systemen. Dieser Satz, auch RAMSEY-Satz genannt, besagt, dass sich in jeder genügend großen Struktur eine Ordnung findet. Unstrukturiertes Chaos ist damit unmöglich und Ordnung wird damit zu einer zwingenden Eigenschaft der Materie [24]. Beispielhaft kann man sich den RAMSEY-Satz an einem Blatt Papier vorstellen, auf das willkürlich Striche gezeichnet werden. Irgendwann sind neben den Strichen auch Dreiecke und mit ein bisschen Glück Vierecke zu entdecken. Grundsätzlich scheint die Natur damit einen gewissen Antrieb zu besitzen, höhere Ordnungen zu entwickeln.

Auf der anderen Seite besagt die Thermodynamik, dass Entropie, ein Maß für Unordnung, in geschlossenen Systemen nur steigen kann. Diese Gesetzmäßigkeit deutet darauf hin, dass Unordnung über die Zeit immer zunehmen muss. Das Maß an Unordnung kann deshalb auch als Zeitpfeil verwendet werden. Das griechische Wort Entropie bedeutet sinngemäß Verwandlungsgröße. Es wurde von dem deutschen Physiker RUDOLF CLAUSIUS 1850 eingeführt. Ihm zu Ehren wurde für die Entropie vormals die Einheit Clausius verwendet. Leider wurde diese Einheit abgeschafft. Heute wird die Entropie in Joule pro Kelvin angegeben.

Die These, dass Entropie in geschlossenen Systemen nur zunehmen kann, hat in der Physik zum Begriff des „Wärmetodes“ geführt. Irgendwann, etwa 10^{14} Jahre nach dem Urknall wird der Wasserstoff im Universum nahezu vollständig in Helium umgewandelt sein. Dann wird die zur Geburt des Universums vorhandene Ordnung vollständig aufgebraucht sein. Das Weltall wird dann ein dunkles Weltall sein. Es kommt aber noch schlimmer. Wenn die Lebensdauer von Protonen begrenzt ist, wie Wissenschaftler vermuten, und etwa 10^{33} Jahre beträgt, dann

dürften etwa nach 10^{34} Jahren alle Quarks und die aus ihnen bestehenden Elementarteilchen ausgestorben sein. Irgendwann wären dann nur noch Photonen und Neutrinos übrig (vollständige Homogenität) [101]. Ob dieses Szenario Wirklichkeit wird, ist allerdings mehr als strittig. Dazu muss noch einmal auf die Frage des „Willens der Natur zur Ordnung" eingegangen werden.

WALTER ELSASSER schätzte in einer Arbeit die Anzahl der Protonen im Universum auf 10^{85}. Anschließend schätzte er das Weltalter in Nanosekunden: 10^{25}. Im nächsten Schritt ging er davon aus, dass in jeder Nanosekunde ein Weltereigis stattfinden kann. Basierend auf den Zahlen ergeben sich 10^{110} mögliche Ereignisse in der Weltgeschichte. Jede größere Zahl könne dann nach ELSASSER keine physikalische Realität besitzen, wenn sie allein auf Zufallsgesetzen beruht. Die Fakultät eines Systems mit 80 Elementen beträgt aber bereits 10^{118}. Das bedeutet, Systeme mit mehr als 80 Elementen sind eigentlich ausgeschlossen. Lebewesen oder Ökosysteme zählen aber zu solchen Systemen [109]. Das heißt, neben dem puren Zufall muss es in der Natur Gesetzmäßigkeiten geben, die auf die Entstehung und Entwicklung höherer Ordnungen drängen. Ein zweites Beispiel beschreibt die Entstehung der DNS einer Bakterie Escherichia coli. Würde diese allein zufällig entstehen, benötigte man durchschnittlich $10^{2.400.000}$ Sekunden, wenn man jede Sekunde einen Versuch durchführt. Aber das Universum hat erst ein Alter von 10^{17} Sekunden. Auch hier zeigt sich wieder, dass Ordnung nicht allein durch Zufall aus Unordnung entsteht, vielmehr scheinen Naturgesetze höhere Ordnungen anzustreben. [10]

Die Frage, ob Ordnung oder Unordnung im Universum zunehmen, erscheint schwierig und kann nicht abschließend geklärt werden. In vielen Bereichen kann man beobachten, dass die Unordnung zunimmt und nur durch externe Energie wieder hergestellt werden kann. Gewisse Ordnungen scheinen sogar gewisse Unordnungen zu bedingen, um sich entwickeln zu können. So war kohlenstoffbasiertes Leben nur möglich, nachdem die Unordnung der Elemente durch das Verbrennen von Sternen zunahm.

Diese Tatsache stimmt auch mit den Überlegungen am Beginn dieses Kapitels überein, dass Ordnung und Unordnung zusammen auftreten müssen. Eine klassische Einteilung von Ordnungen beinhaltet deshalb auch Formen der Unordnungen, nämlich „*Unordnung*", „*Chaotische Ordnung*", „*Selbstorganisierte Ordnung*" und „*Regelgerechte Ordnung*". Innerhalb dieser Ordnungsräume bewegt sich die Natur meistens nichtlinear und metastabil. Die Nichtlinearität ist ein Zeichen für den sprunghaften Wechsel von einer Ordnungsform zu einer anderen. Hier spricht man auch von Ereignissen. Metastabilität bezeichnet die Gleichwertigkeit verschiedener Zustände. So können verschiedene Ordnungsformen gleichberechtigt möglich sein.

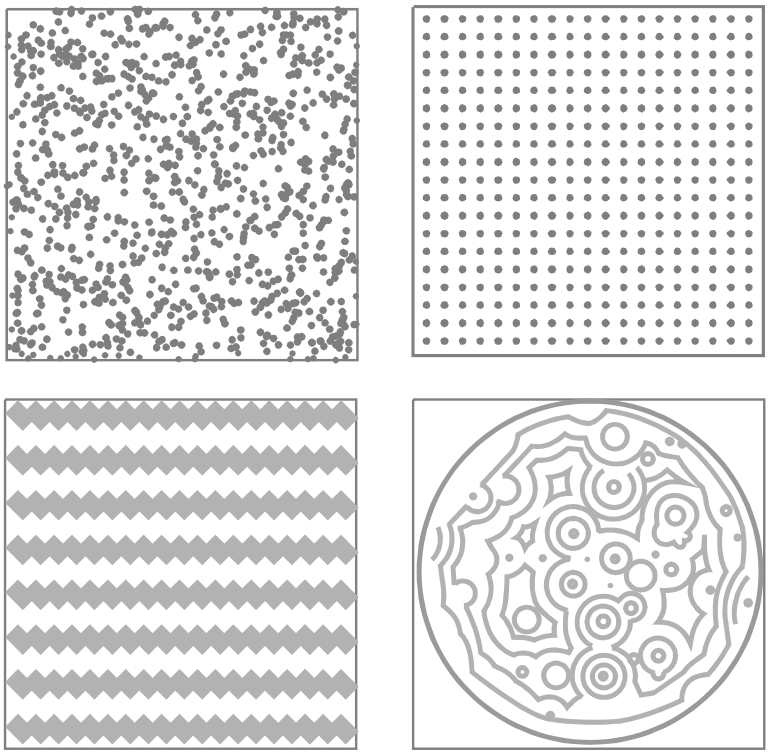


Abb. 6: Beispiele von Ordnungen

Bisher wurde aber überhaupt noch nicht darauf eingegangen, was denn nun eine Ordnung ist. Nach einer sehr einfachen Definition sind Ordnungsstrukturen Abkürzungen [10]. Betrachtet man Abb. 6, so kann man dort verschiedene Ordnungen erkennen. In Abbildung rechts oben scheint eine sehr hohe Ordnung gemäß der eingeführten Definition vorzuliegen. Wenn man nur drei Punkte zeigt und festlegt, dass die Abstände in *x*- und *y*-Richtung konstant bleiben, kann man das gesamte Bild zeichnen, ohne es jemals selbst gesehen zu haben. Völlig anders sieht es im Bild oben links aus. Es ist keine Ordnung erkennbar, damit kann auch keine Abkürzung oder Ordnungsregel eingeführt werden. Man muss also die gesamten Daten mitnehmen, wenn man das Bild übertragen möchte. Im Bild links unten wird die Ordnungsregel im Vergleich zum Bild oben rechts etwas komplizierter und im Bild unten rechts scheint eine Ordnung zu existieren, die aber nur schwer in einer Ordnungsregel zusammengefasst werden kann. Die Wahrnehmung einer Ordnung hängt also nicht nur von den objektiven Gegebenheiten ab, sondern auch

von der Fähigkeit, Ordnungen zu entdecken. Dazu zerlegt man die Natur oder Umwelt in einfachere Systeme. Auf diese Weise, so hofft man, findet man auf einfache Weise Ordnungen (Abb. 7). Es sei aber bereits hier darauf hingewiesen, dass die Vereinfachung, die z.B. im Kappen von Wechselwirkungen besteht, nur eine begrenzte Genauigkeit der Vorhersage des Systemverhaltens und damit der Ordnung erlaubt.

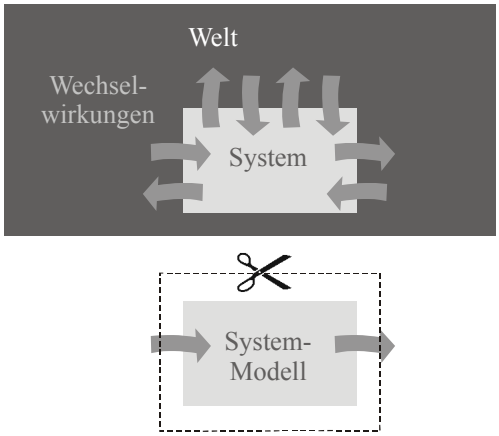


Abb. 7: Entwicklung eines Systemmodells, dabei werden Wechselwirkungen durchtrennt

Die Systematik der Erstellung von Ordnungen und Systemen geht weit über die bisher hier gegebenen Beispiele hinaus. In vielen Fachgebieten hat man komplizierte, teils komplexe Gebilde geschaffen, um Ordnungen wiederzugeben. Solche Gebilde sind z.B. in der Abstammungslehre Cladogramme (Abb. 8), in anderen Gebieten Blitzmuster oder Netzwerkmuster. Ordnungen scheinen unabhängig von den jeweiligen fachlichen Fragestellungen zu sein. So sehen die Bilder von Blitzen, Abbildungen von Computernetzwerken oder die Stammbäume von Tieren nahezu gleich aus. Immer gibt es einige Knoten, die mehr Verbindungen haben als andere. Die Netze sind nicht absolut zufällig, sondern bilden Muster. Ordnungsmuster findet man z.B. auch bei Zwillingen, in Kristallen oder allgemein bei Symmetrien [9].

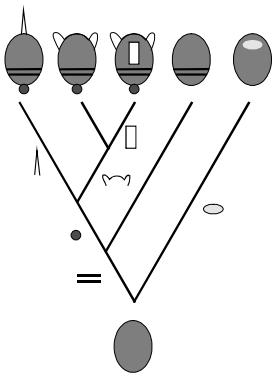


Abb. 8: Beispiel für ein Cladogramm [89]

Innerhalb solcher Ordnungsstrukturen scheinen sich nicht nur qualitative Eigenschaften zu wiederholen, sondern auch quantitative Werte. Als Beispiel sei hier die FIBONACCI-Reihe genannt. Die Reihe gilt z.B. für die Verzweigung von Ästen in Bäumen, für die Anzahl von Tannenzapfen usw. Die Reihe lautet: 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, wobei immer die letzten beiden Terme für das nächste Glied addiert werden. Die Verhältnisse der Terme nähern sich dem Wert 1,618 an. Dieser Wert entspricht dem Goldenen Schnitt: Der längere Teil verhält sich zum Ganzen, wie der kürzere Teil zum längeren. [10]

Menschen empfinden geometrische Strukturen, die dem Goldenen Schnitt entsprechen, als sehr harmonisch. Über die Gesetzmäßigkeit von Schönheiten gibt es zahlreiche interessante wissenschaftliche Arbeiten. 1933 führte BIRKHOFF den Begriff des Ästhetischen Maßes ein. Er definiert das Ästhetische Maß aus dem Quotienten der Anzahl der Ordnungsrelationen zur Komplexität. Man beachte den Begriff Komplexität, der in den folgenden Kapiteln noch eine große Rolle spielen wird. Die Idee hinter dem Ästhetischen Maß ist die Annahme, dass Menschen ein hohes Maß an ästhetischer Befriedigung bei einem ausgewogenen Verhältnis des Wahrnehmungsaufwandes für die Ordnung eines Objektes zur Komplexität des Objektes empfinden. Dahinter steht nun wieder die Idee: Schönheit ist Zweckmäßigkeit. [3, 80] Ein einfaches Beispiel sind historische Steinbogenbrücken. Diese Bauwerke besitzen eine geringe Anzahl von Ordnungsrelationen und eine geringe Komplexität. Und in der Tat, sie beweisen ihre Zweckmäßigkeit und Schönheit seit mehr als 2.000 Jahren. Auch der Goldene Schnitt scheint diesen Anforderungen nahe zu kommen.

Eine weitere solche universelle Zahl in Verbindung mit Ordnungen ist die Feigenbaumzahl. Sie lautet 4,66920166091… Diese Zahl wurde ursprünglich zuerst von S. GROSSMANN entdeckt, später aber detailliert von FEIGENBAUM untersucht. Sie spielt eine außerordentlich bedeutende Rolle beim Übergang von

Systemen in chaotische Bereiche, also beim Übergang verschiedener Ordnungsformen. Gelegentlich findet man Aussagen, die die Bedeutung der Feigenbaumzahl mit der Bedeutung der Zahl π vergleichen.

Was sind Systeme?

„*Gehorsam ist das Charakteristikum von trivialen Maschinen. Es scheint, dass Ungehorsam das Charakteristikum nicht-trivialer Maschinen ist. Aber auch die nichttriviale Maschine ist gehorsam, sie gehorcht nur einer anderen Stimme – ihrer inneren.*“

VON FOERSTER

Wenn man nun Ordnungen in Systemen finden möchte, so muss man festlegen, was denn nun Systeme sind. Dazu wenige einfache Definitionen: “*Ein System ist eine Art und Weise, die Welt zu betrachten*.” [117] Diese Definition erscheint zunächst wenig brauchbar, aber sie zeigt eine wesentliche Eigenschaft von Systemen. Systeme werden nämlich von Menschen willkürlich eingeführt. Für den einen Menschen ist eine Rohrleitung ein System, für den Nächsten ein Kraftwerk, für einen Weiteren ist ein Mensch ein System und so weiter. Die nächsten Definitionen lauten: „*Ein System kann als eine Menge von Elementen betrachtet werden, die in Interaktion miteinander stehen*.“ [75] und „*Systeme sind Objekte, die aus einzelnen Elementen bestehen, die als eine Einheit angesehen werden können. Systeme besitzen in der Regel eine Abgrenzung von der Umwelt.*“ [94]

Diese beiden Definitionen nennen verschiedene Eigenschaften, um den Begriff abzugrenzen. Beide Definitionen beinhalten aber die Aussage, dass Systeme in weitere Subsysteme, also Elemente, zerlegt werden können. Erstaunlicherweise ähnelt die Einführung von Systemen der Einführung von Begriffen. Die Anordnung und Verbindung der Elemente kann nun gewisse Ordnungsformen aufweisen, wie z.B. in Form von Netzwerken etc. Diese Ordnungsformen fasst man bei Systemen auf verschiedene Art und Weise zusammen und klassifiziert damit die Systeme.

Die einfachste Form eines Systems ist ein „*Ungeordnetes System*“. Ein ungeordnetes System bilden z.B. die Moleküle in der Luft. Welche Formen die Unordnung besitzt, wird später behandelt, hier sollen uns zunächst die Systeme mit einer gewissen Ordnung interessieren. [117]

Zu diesen zählt als erstes System das „*Triviale System“*. Ein triviales System ist durch eindeutige Relationen gekennzeichnet. Die Wirkungsketten sind

linear und unabhängig, also geradezu klassisch kausal. Die Reaktion des Systems ist bestimmbar. Das System besitzt eine regelmäßige Ordnung, meistens mit wiederkehrenden Strukturen. Solche Systeme werden auch als deterministische Systeme bezeichnet. Hier tummeln sich die klassischen analytischen Verfahren der Mathematik, wie z.B. die Differentialrechnung. Auch viele mechanische Systeme zählen zu den trivialen Systemen. [117]

Deutlich schwieriger zu handhaben sind *„Nichttriviale Systeme"*. Nichttriviale Systeme verhalten sich im Gegensatz zu den trivialen Systemen nichtlinear und sind nicht deterministisch. Die Nichtlinearität entsteht durch die Selbstreferenz der Systeme, das heißt Eingangsinformationen verändern das System und Ergebnisse werden wieder zu Eingangsgrößen. Solche Zustände werden auch als Kausalnexus bezeichnet, wenn eine Wirkung zugleich Ursache ist [97]. Auch wenn das System nur eingeschränkt vorhersagbar ist, so sind doch Ordnungen erkennbar. Ordnungen und Unordnungen sind gemeinsame Eigenschaften solcher Systeme. Die Unordnung muss auch nicht zufällig sein, andere Unbestimmtheitsformen sind möglich. Ein typisches Beispiel für ein nichttriviales System ist das Wetter. [117]

Eine Untergruppe der nichttrivialen Systeme sind *„Autopoietische Systeme"*. Systeme, die sich unter dem Ziel der Bewahrung selbst erneuern, bezeichnet man als autopoietische Systeme. Lebewesen, Wirtschaftssysteme und Sozialsysteme sind autopoietische Systeme. Autopoietische Systeme ergreifen aus sich selbst heraus Maßnahmen, um existenzbedrohende Situationen zu bewältigen. Autopoietische Systeme organisieren sich selbst. Das heißt, die Organisation zur Entwicklung und Aufrechterhaltung entwickelt und hält sich selbst aufrecht. Ein solches System muss sich in einem gewissen Umfang von der Umwelt abgrenzen können. Es muss störungstolerant sein und muss Dämpfungsregularien bei Störungen besitzen. Um sich aber wechselnden Umweltbedingungen anzupassen, muss ein solches System zwangsläufig auch Offenheit besitzen. Gleichgewicht bedeutet in der Regel den Zerfall eines autopoietischen Systems. [117] Beispiele für autopoietische Systeme sind das Klima, das Magnetfeld der Erde, Sonnenzyklen, Lebewesen, soziale Systeme. [30]

Solche Systeme besitzen weiterhin eine Eigenschaft, die als Emergenz bezeichnet wird. Emergenz (lat. emergere: auftauchen, hervorkommen, sich zeigen) ist ein im Bereich der Systemtheorie populär gewordener Begriff, der das „Erscheinen" von Phänomenen auf der Makroebene eines Systems meint, die erst durch das Zusammenwirken der Subsysteme, das sind die Systemelemente auf der Mikroebene, zustande kommen. Man spricht hier auch davon, dass die Summe mehr ist als die einzelnen Teile. Diese Eigenschaft wird noch im Kapitel Komplexität erörtert. [37, 75]

Die bisher eingeführten Systemklassen kann man in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern darstellen. Häufig verwendet man dazu die Parameter

Strukturreichtum und Eigendynamik [117]. Sehr schön wird in Abb. 9 deutlich, dass hoher Strukturreichtum mit hoher Eigendynamik korreliert. Strukturreichtum wird auch als Parameter für Komplexität verwendet, welches aber im Kapitel Komplexität ausführlich erläutert wird. Insgesamt aber zeigt sich, dass sich aus einfachen, ungeordneten Systemen immer höher geordnete Systeme entwickeln können, wenn diese Unordnung exportieren können (Abb. 5). Das heißt, das Universum musste mit einem hohen Maß an Ordnung beginnen, um die Entwicklung autopoietischer Systeme zu erlauben. Und in der Tat, der hohe Anteil an Wasserstoff und die Verbrennung von Wasserstoff in der Sonne liefert die energetische Grundlage für Leben auf der Erde, welches ein autopoietisches System ist.

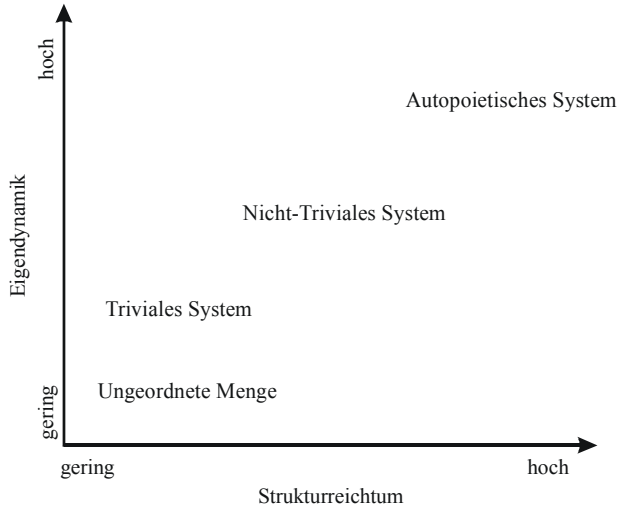


Abb. 9: Hierarchie der Systeme [117]

Die Verwendung von Energie wird auch für eine andere Einteilung von Systemen verwendet. Hier wird in Systeme im thermodynamischen Gleichgewicht und Systeme fern vom thermodynamischen Gleichgewicht unterschieden. Bei Systemen im thermodynamischen Gleichgewicht herrscht mikroskopisches Chaos bei makroskopischer Homogenität (z.B. Gase). Systeme fern vom thermodynamischen Gleichgewicht besitzen zwar mikroskopisch immer noch Chaos, aber sind in der Lage, makroskopisch Ordnungen auszubilden. Solche Strukturen, die z.B. oszillieren können, sind für Systeme im thermodynamischen Gleichgewicht undenkbar. [30]

Diese Systeme im Ungleichgewicht führen uns zum Begriff der komplexen Systeme: „*Komplexe Systeme bestehen gewöhnlich aus vielen Partikeln, Objek-*

ten oder Elementen, die entweder gleichartig oder verschieden sein können. Die einzelnen Komponenten sind untereinander durch mehr oder weniger komplizierte, im Allgemeinen nichtlineare Wechselwirkungen verbunden." [94]

Die mathematische Beschreibung solcher komplexen, häufig autopoietischen, Systeme ist mit außerordentlich großen Schwierigkeiten verbunden. Die Mathematiker PONTRAJEGIN und ANDRONOV gehen sogar davon aus, dass es im Prinzip undurchführbar ist, jedes nur denkbare dynamische System zu untersuchen und die mathematischen Gleichungen zu lösen. Die Diskussion oder Berücksichtigung jeder Ausnahme des Verhaltens dieser Systeme führt zu einem immer stärkeren Anwachsen des Aufwandes. Um dieses Problem zu lösen, schlagen sie ein mathematisches Verfahren vor, welches das typische oder generische Verhalten eines Systems beschreibt. Dieses Verfahren ist die Äquivalenzrelation. Zwei Systeme sind dann äquivalent, wenn es eine eindeutige und stetige Abbildung zwischen den beiden Systemen gibt. Diese einfache Aussage ist die Grundlage der wissenschaftlichen Forschungen in vielen Bereichen. In der Regel werden Messungen oder Versuche an Ersatzsystemen durchgeführt. Hier muss man aber die Eigenschaft der Emergenz betrachten, denn Wechselwirkungen werden bei vielen Ersatzsystemen gekappt. Wenn solche Ergebnisse aber nicht auf die Realität überführbar sind, dann sind die Versuche wertlos. Die Grenze zu finden, bis zu der eine solche Überführung stabil ist, ist dann auch die Gültigkeitsgrenze der Verfahren. Instabilität ist im Gegensatz dazu der Wechsel von einer Äquivalenzklasse in eine andere Äquivalenzklasse. [30]

Der Wechsel von Äquivalenzklassen tritt häufig bei Systemwechseln auf. Solche Systemwechsel stehen in Verbindung mit Ereignissen. Ereignisse sind durch plötzliche Änderungen von Wechselwirkungen gekennzeichnet. Auf eine wesentliche Eigenschaft von Ereignissen, nämlich die Instabilität und Unbestimmtheit, wird später noch eingegangen. Ein Beispiel für einen Systemwechsel ist z.B. die Änderung der Gangart eines Pferdes in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit [30]. Im Folgenden seien aber physikalische und chemische Systeme vorgestellt, die zur Klasse der nichttrivialen Systeme gerechnet werden können. Das sind die RAYLEIGH-BÈNARD-Zellen und die BELOUSOV-ZHABOTINSKY-Reaktion.

So genannte RAYLEIGH-BÈNARD-Zellen kann man erzeugen, indem man einen Wasserbehälter unten erhitzt und oben abkühlt. An der Grenzschicht wird das Wasser erwärmt bzw. abgekühlt und wandert von dort in die Mischungszone. Das warme Wasser steigt von unten auf und kaltes Wasser sinkt von oben herab. Die Schichtung bzw. stationäre Strömung des Wassers wird aber anschließend zunehmend instationär und zeigt sogar chaotisches Verhalten (Abb. 10). Dieses instationäre Verhalten zeigt sich durch Strömungsrollen. Diese treten aber nicht gleichmäßig auf, sondern in Form von lokalen Defekten. Sie sind nicht prognostizierbar. Ab einer bestimmten Größe der Störungen bildet sich wieder eine ein-

heitliche Strömung [98, 46]. Räumliche RAYLEIGH-BÈNARD-Zellen bilden klassische Muster (Wabenstruktur), die man z.B. bei Wolken finden kann.

1951 entdeckte der russische Wissenschaftler BELOUSOV einen chemischen Oszillator. Die Mischung aus Zitronensäure, Bromat und Salz wechselte periodisch zwischen gelber Farbe und klarer Flüssigkeit. Leider wurde die Veröffentlichung zu diesem Versuch durch den wissenschaftlichen Begutachter abgelehnt. Glücklicherweise aber befasste sich einige Jahre später ein weiterer Wissenschaftler mit dem Versuch. Der russische Biophysiker ZHABOTINSKY veränderte den Versuch leicht, indem er teilweise andere Chemikalien nutzte. Dabei entdeckte er, dass die Veränderung nicht homogen in dem Medium auftritt, sondern sich vielmehr in geometrischen Mustern wie Kreisen und Spiralen vollzieht (Abb. 11). Die Oszillation vollzieht sich also räumlich und zeitlich. Diese chemische Reaktion wird als BELOUSOV-ZHABOTINSKY-Reaktion bezeichnet. Diese oszillierenden chemischen Reaktionen sind heute von besonderem Interesse, da sie teilweise chaotisches Verhalten zeigen. Im Gegensatz zur Mehrheit der chemischen Reaktionen zeigen die BELOUSOV-ZHABOTINSKY-Reaktionen kein Gleichgewicht. [2, 41]

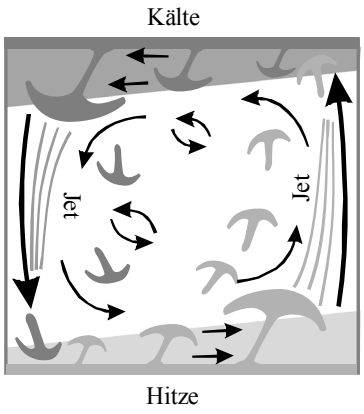


Abb. 10: Turbulente Strömung [129, 42]

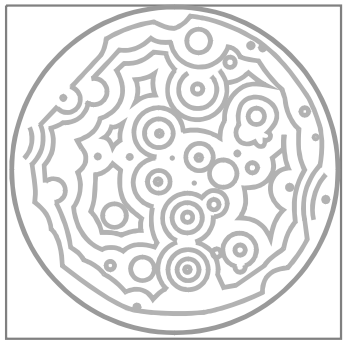


Abb. 11: BELOUSOV-Reaktion [41]

Fasst man die kurzen Ausführungen zusammen, dann zeigen Systeme aus verschiedenen Fachgebieten gleiche Eigenschaften. Dies führt zu der Frage, ob man nicht Systeme an sich untersuchen sollte. Die Untersuchung von Systemen, unabhängig vom spezifischen Fachgebiet, hat in den letzten Jahren rasant an Bedeutung gewonnen. Der Gründer der Systemtheorie war vermutlich der russische Wissenschaftler ALEXANDER A. BOGDANOV (1873-1928). Die Arbeiten von BOGDANOV über die Tektologie (Wissenschaft der Organisationen) wurden 1913

und 1927 veröffentlicht. Zwar wurden die Werke auch im Ausland (Deutschland) publiziert, aber die wissenschaftliche Gemeinschaft nahm diese Arbeiten nicht wahr. Dazu kam noch, dass LENIN die Arbeiten von BOGDANOV in Russland kritisierte, so dass die Arbeiten nicht weiter veröffentlicht wurden. Die Bedeutung der wissenschaftlichen Leistungen BOGDANOV's wurde erst zu Beginn der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts deutlich.

LUDWIG VON BERTALANFFY, der heute offiziell als der Vater der Systemtheorie gilt, veröffentlichte etwa ab den 40er Jahren des 20. Jahrhunderts mehrere Aufsätze zum Thema Systemtheorie. Die Arbeiten dieses österreichischen Biologen wurden 1968 in einem Buch mit dem Titel „Systemtheorie – Grundlagen, Entwicklung und Anwendung" gekrönt [112]. Dieses Buch galt und gilt auch heute noch als Fundamentalwerk der Systemtheorie. [77]

Die Wahrnehmung fachübergreifender Eigenschaften von Systemen wird heute durch die Wissenschaftslandschaft stark behindert. Die Wissenschaft ist im Wesentlichen auf die Lösung von Detailproblemen fokussiert, während die Forscher in der Renaissance noch einen Überblick über die verschiedenen Wissenschaftsbereiche besaßen. Allein dieses Beispiel zeigt, wie sich Ordnungen oder Systeme über die Zeit ändern. Bereits bei der Einführung über Ordnungen wurde auf den Begriff der Zeit eingegangen. Die Frage, was Zeit ist, blieb dabei aber offen.

Was ist Zeit?

„*In unserer Zeitvorstellung drückt sich der tiefgreifendste und allgemeinste Zusammenhang der Dinge aus*“.

ERNST MACH [74]

„*Wie ein gewaltiges, königliches Vermögen, wenn es an einen schlechten Herrn geraten ist, im Nu verschleudert wird, ein noch so bescheidenes jedoch durch Nutzung wächst, wenn es einem übergeben worden ist, der es gut behütet, so bietet unser Leben dem, der es gut einteilt, weiten Spielraum.*“

FRIEDRICH CRAMER: Chaos und Ordnung [10]

Dem obigen Zitat von ERNST MACH bleibt eigentlich nichts mehr hinzuzufügen. Und trotzdem ist die Zeit eine Dimension, deren Verständnis sich dem Menschen auf das hartnäckigste entzieht. Im Allgemeinen glaubt man, dass die Zeit selbst zeitlos ist und dass es sie schon immer gegeben hat. Aber bereits die alten griechischen Philosophen vermuteten: „*Die Zeit ist mit der Welt, die Welt nicht in der Zeit geschaffen.“* Wäre dies tatsächlich so, wäre das klassische kausale Weltbild der Menschen hinfällig. STEPHEN HAWKING hat die Frage nach dem Beginn der Zeit dahingehend beantwortet, dass er eine imaginäre Zeit eingeführt hat. Ein Beginn der imaginären Zeit wird in seinem Modell nicht mehr notwendig [97].

Zunächst soll uns interessieren, wie man die Zeit bestimmen kann. Die Zeit selbst kann man, genau wie den Raum, nur über Bezüge messen: Wählt man eine universelle mathematische Formulierung der Abhängigkeit eines Prozesses, so ist dieser Prozess eine Funktion einer Ausgangssituation y_0, eines Funktionsparameters P und dem besonderen Parameter Zeit t. Der Parameter Zeit wird aber allein über Referenzprozesse gemessen. Das bedeutet, dass neben dem einen ursprünglichen Prozess ein zweiter, unabhängiger Referenzprozess benötigt wird. Solch ein Prozess kann z.B. das Ticken einer Uhr oder der Umlauf der Erde um die Sonne sein. Nimmt man nun an, die Zeit sei in beiden Systemen identisch, so kann man die zweite Gleichung nach der Zeit umformen und in die erste Gleichung einsetzen. Die Grundlage dafür ist eine besondere Form der Kopplung.

Denn während der Referenzprozess eigentlich völlig unabhängig von dem ersten Prozess ablaufen muss, so scheint es doch die Kopplung der Prozesse über die Zeit zu geben. Es wird also eine Unterscheidung zwischen normalen Wechselwirkungen, z.B. der Gravitation, und der Kopplung über die Zeit, also eine übergreifende und universelle Kopplung, vorgenommen. [74]

Die Referenzprozesse verwenden in der Regel Bewegungsbeobachtungen. So kennen wir die Zeitlänge eines Tages oder eines Jahres, die an Bewegungen der Erde gebunden sind. Die Grundlage für Bewegungen ist die Existenz träger Massen. Gemäß EINSTEIN's Relativitätstheorie sind träge Massen und Gravitation identisch. Es handelt sich hier um eine Form der Wechselwirkung. Die Bewegung von trägen Massen muss in ein gewähltes Bezugssystem eingeordnet werden. Diese Eigenschaft ist in der den menschlichen Sinnesorganen wahrnehmbaren Umwelt immer erfüllt. [74]

Der Begriff der Bewegung für die Erfassung der Zeit ist allerdings unter Umständen nicht ausreichend. Umfassender wäre der Begriff der Veränderung. Diese wiederum kann generell nur durch Wechselwirkungen verursacht werden. Der Motor für Wechselwirkungen war die Energie. Wenn Wechselwirkungen Änderungen hervorrufen, dann sind Wechselwirkungen die Grundlage der Zeit. In anderen Worten, der übliche Parameter Zeit ist kein unabhängiger Parameter unserer Welt, er ist vielmehr an die Existenz von Wechselwirkungen in der Welt verbunden. Am besten eignen sich periodische Prozesse oder irreversible Prozesse, die eine eindeutige Festlegung der Zeit erlauben. [74]

Diese Gesetzmäßigkeiten sind die Grundlage für die übliche Vorstellung der Zeit und damit für die allen Systemen inhärente Eigenschaft der Zeit. Was aber geschieht, wenn diese Gesetzmäßigkeiten nicht mehr gültig sind? Gibt es keine Wechselwirkungen, keine Beschleunigungen, keine Veränderungen, so gibt es keine Zeit. Würde die Welt einhundert Jahre angehalten und keine Änderung (Wechselwirkungen) erfolgten, so gäbe es keine Möglichkeit, diese einhundert Jahre zu messen. [74]

Nun ist es nicht möglich, alle Prozesse einhundert Jahre zu unterbrechen. Aber was passiert, wenn man die Wechselwirkungen oder die Größenordnung der Wechselwirkungen ändert? Wenn man anstelle der Gravitation als Grundlage der Zeitmessung z.B. die Kernkraft nimmt. Die Gravitation (die Wechselwirkungskraft im astronomischen Bereich) und die Kernkraft unterscheiden sich um etwa 40 Größenordnungen. Diese großen Unterschiede führen tatsächlich auch zu Unterschieden bei der Behandlung der Zeit. Eben deshalb zeigen Quantenelemente oft ein aus unserer Sicht unerklärliches, unbestimmtes Verhalten. Die zeitliche Kopplung der Prozesse in unserer Welt und in der Mikrowelt verschwindet und damit der Parameter der Zeit. [74]

Nun gibt es aber doch zwischen allen Prozessen Wechselwirkungen. Der Physiker NEUENDORF hat den Zustand unserer Welt sehr treffend formuliert:

„Alles hängt irgendwie mit Allem zusammen und verändert sich in gegenseitiger Abhängigkeit. Es gibt kein System, welches nicht mit weiteren Systemen im Zusammenhang steht, aber nicht jedes System steht gleichzeitig in Verbindung zu jedem anderen System." [74]

Die Zeit kann nur dann richtig angegeben werden, wenn sie die einzige Verbindung zwischen zwei Prozessen ist. Die Uhr muss ungestört in einem Raum ticken, um die Zeit angeben zu können. Wenn sie davon abhängig ist, wie viel Menschen in dem Raum sind oder ob es regnet, wird die Uhr nicht viel Freude bereiten. Wenn aber die Aussage stimmt, dass alle Prozesse im Universum nicht nur über die Zeit, sondern auch über Wechselwirkungen miteinander gekoppelt sind, und zwar auf unterschiedlichen Skalenebenen, dann kann es keine absolute Zeit geben. Wenn es keine absolute Zeit gibt und außerdem möglicherweise einen Anfang der Zeit, dann können die Grundlagen der Kausalität, dass nämlich ausnahmslos nur die Vergangenheit Auswirkungen auf die Gegenwart hat, nicht mehr erfüllt werden. Dann muss in unserer Welt Unbestimmtheit auftreten.

Die Unbestimmtheit selbst ist an eine Einteilung der Zeit in die Formen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft gebunden. Der Begriff Zukunft beschreibt alle Ereignisse, die der Gegenwart folgen werden: Alle kommenden Ereignisse finden in der Zukunft statt. Basierend auf unserem Wissen und unseren Informationen versuchen wir, Ereignisse in der Zukunft zu prognostizieren, zu erraten. Diese Prognose gelingt jedoch nur zum Teil: Die Prognosemodelle besitzen Elemente der Unsicherheit, Unschärfe, Unklarheit, Unbekanntheit, Doppelsinnigkeit, Mehrdeutigkeit, Unwissenheit. Sie besitzen aber üblicherweise auch Elemente der Prognosesicherheit (Abb. 12).

Die Prognosesicherheit ist in der nahen Zukunft, also eigentlich in der Gegenwart, am größten. Hier kann man fast alles messen oder bestimmen. Je weiter man in die Zukunft blickt, umso dominanter wird der Anteil der Unbestimmtheit. Sicherlich kann man für die nahe Zukunft davon ausgehen, dass Menschen in Mitteleuropa einkaufen gehen werden. Dass mag vielleicht auch noch in 50 Jahren gelten, aber schon das Verhalten in wenigen Hundert Jahren lässt sich nur schwer prognostizieren, was in mehreren Tausend Jahren geschieht, kann man im Detail nicht vorhersagen. Genauso ist auch unser Blick in die Vergangenheit mit Unbestimmtheit behaftet. Es ist unmöglich zu bestimmen, wie das Leben im Detail vor Hunderten oder Tausenden von Jahren war.

Was passiert aber, wenn man spielerisch annimmt, dass die Zukunft keine Elemente der Unbestimmtheit besitzt? Im Fall einer Zeitreise wäre die unbekannte Komponente verschwunden. Die Zukunft wäre vollständig bekannt: Was würde dann geschehen? Gäbe es dann noch einen freien Willen, was wäre mit Selbstbestimmung? Unbestimmtheit ist die Grundlage für menschliche Entscheidungen, eine Vielzahl von menschlichen Aufgaben ist mit Unbestimmtheit verbunden. Würden Menschen noch ein Fußballspiel besuchen oder Karten spielen,

wenn alles bestimmt wäre? Wozu wäre die Welt da, wenn alle Geschichten schon geschrieben sind? Kann man dann überhaupt noch eine Unterteilung der Zeit vornehmen? Denn gemäß unserer vorigen Überlegungen ist die Gegenwart derjenige Zeitpunkt, der ein Minimum an Unbestimmtheit besitzt. Das heißt aber auch umgekehrt, Unbestimmtheit ist ein notwendiges Übel, ohne Unbestimmtheit keine Zeiteinteilung, ohne Unbestimmtheit keine Entscheidungsfreiheit. Unbestimmtheit wird deshalb auch als Offenheit und Sicherheit als Geschlossenheit beschrieben [100]. Unbestimmtheit und Zeit scheinen miteinander in Zusammenhang zu stehen.

Für die Erfassung der Unbestimmtheit gibt es viele Begriffe: Unsicherheit, Unschärfe, Unklarheit, Unbekanntheit, Doppelsinn, Mehrdeutigkeit, Unwissenheit, Zufall etc. Allgemein beschreiben wir das als Mangel an Wissen oder Information.

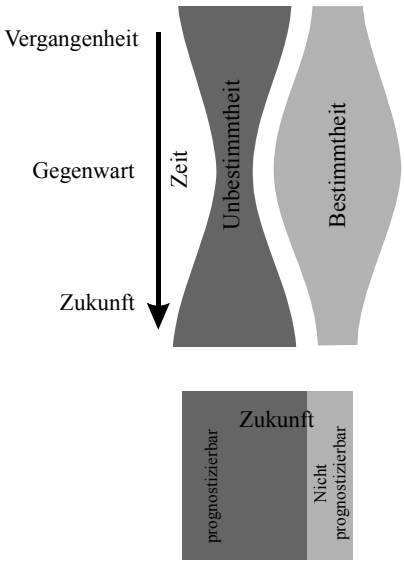


Abb. 12: Darstellung der Zeitformen als Verhältnis von Unbestimmtheit und Bestimmtheit. Das untere Bild zeigt einen Schnitt in der Zukunft. Unter der Annahme, dass die Gesamtfläche des Rechteckes gleich bleibt, verschieben sich die Verhältnisse von Unbestimmtheit und Bestimmtheit gemäß dem obigen Bild.

Was ist Unbestimmtheit?

„*Unsicherheit ist die dem Betrachter bewusste Abweichung des Modells von der Realität.*“

K.C. RANZE [57]

Alle genannten Termini für die Unbestimmtheit besitzen eigene Definitionen. So spricht man von Unkenntnis bei einem nicht wahrgenommenen Wissensmangel. Ungewissheit hingegen besteht bei einem bewussten Mangel an Wissen. Ungewissheit lässt sich in verschiedene Arten unterscheiden. [52]

- Nicht-Spezifität - eine Ungewissheit über die Bedeutung einer mehrdeutigen Aussage bzw. eines Zustands (Mangel an Informationsgehalt).
- Unschärfe - die Ungewissheit über die Bestimmtheit eines Grades (Mangel an Genauigkeit).
- Dissonanz - die Ungewissheit bei der Auswahl verschiedener Alternativen (Mangel einer Entscheidung).
- Verwirrung - die Ungewissheit, bei der nicht klar ist, worum es überhaupt geht (Mangel an Verständnis).

Bezieht man diese Unsicherheiten beispielsweise auf die Punktergebnisse bei einer Prüfung, so kann man die Ungewissheiten folgenden Fragen zuordnen:

- Liegt das Ergebnis im oberen, mittleren oder unteren Drittel aller Testteilnehmer (Nicht-Spezifität)?
- Wie genau ist die subjektive Einschätzung der eigenen Punktzahl?
- Hat die Person den Test bestanden oder nicht (Dissonanz)?
- Ach, es gab Punkte? Was für ein Test (Verwirrung)?

Die Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung behandelt nur eine Form der Ungewissheit, nämlich die Dissonanz. Im Gegensatz dazu kann Fuzzy-Logik auch andere Formen der Ungewissheit beschreiben. [121]

Andere Autoren beschreiben Unklarheit/Verschwommenheit als Eigenschaft von Objekten, die: [48, 100, 16]

- eine Abgrenzung beinhalten,
- einen scheinbaren Mangel an Abgrenzung besitzen und
- anfällig für SORITES Paradoxon sind.

Abb. 13: Eine Regenwolke als Beispiel für SORITES Paradoxon

SORITES Paradox ist letztendlich die Zusammenfassung der Punkte 1 und 2. Es beschreibt den verschwommenen Übergang von Objekten an einfachen Beispielen. Diese Fragestellung führt uns zu der erwähnten Definition einer Regenwolke. Zunächst nimmt man an, dass eine Regenwolke aus einer Vielzahl von Wassertropfen besteht (Abb. 13). Wenn man nur einen Regentropfen entfernt, bleibt das Objekt erhalten, die Regenwolke ist immer noch eine Regenwolke. Entfernt man aber sehr, sehr viele Regentropfen, so verschwindet allmählich das Objekt Regenwolke und es bleibt eine Ansammlung von Regentropfen übrig. Der Übergang von der Regenwolke zur Ansammlung von Regentropfen ist verschwommen. Die Problematik der Abgrenzung findet sich auch bei anderen Dingen. Die Wahl der Grenzen für eine Menge steht in Zusammenhang mit dem Umfang der Ungewissheit oder Gewissheit über die Menge. Unter einer Menge versteht man gemäß CANTOR [78]: „*Unter einer Mannigfaltigkeit oder Menge verstehe ich nämlich allgemein jedes Viele, welches sich als Eines denken lässt, d.h. jeden Inbegriff bestimmter Elemente, welcher durch ein Gesetz zu einem Ganzen verbunden werden kann.*“ Sehr deutlich werden hier die Verbindungen zum „Begriff“.

Auf Grund von Widersprüchen, die z.B. im Abschnitt Definitionen oder aber hier am Beispiel der Regenwolke kurz aufgezeigt wurden, entwickelte man die CANTOR’sche Theorie der Mengen weiter, u.a. durch die Axiomatische Mengentheorie, die Theorie der Typen und die Theorie der Klassen. Weitere Entwicklungen sind die Mereologie, Alternative Mengentheorie oder die Penumbral Mengentheorie.

Im klassischen Sinne wird eine Menge durch ihre Elemente definiert. Das bedeutet, dass eine klare Regel existiert, die bestimmt, ob ein Element zur Menge gehört oder nicht. Die Bestimmung der Menge „schöne Bogenbrücken“ lässt sich jedoch nicht eindeutig beantworten, da die Eigenschaft „schön“ keine klare Regel darstellt. Die menschliche Sprache beinhaltet nun, wie bereits eingangs erwähnt, eine Vielzahl solcher unscharfer Abgrenzungen, also unscharfer Randgebiete der Mengen. GOTTLOB FREGE, einer der Gründer der modernen Logiktheorie, schrieb 1893 darüber [78]: *„Ein Begriff muss scharf eingegrenzt sein. Einem unscharf be-*

grenzten Begriff würde ein Bezirk entsprechen, der nicht überall scharfe Grenzlinien hätte, sondern stellenweise ganz verschwimmend in die Umgebung überginge. Das wäre eigentlich gar kein Bezirk; und so wird ein unscharf definierter Begriff mit Unrecht Begriff genannt. Solche begriffsartigen Bildungen kann die Logik nicht als Begriffe anerkennen; es ist unmöglich, von ihnen genaue Gesetze aufzustellen. Das Gesetz des ausgeschlossenen Dritten ist ja eigentlich nur in anderer Form die Forderung, dass der Begriff scharf begrenzt sei. Ein beliebiger Gegenstand x fällt entweder unter den Begriff y, oder er fällt nicht unter ihn: tertium non datur."

Das bedeutet, dass auf der einen Seite Unbestimmtheit Bestandteil der menschlichen Sprache und der menschlichen Kultur ist, auf der anderen Seite Unbestimmtheit aber aus Sicht der mathematischen Logik nicht geduldet wird. Die Mathematik muss dieses Problem anderweitig lösen.

Eine Möglichkeit, unbestimmte Mengen mathematisch dazustellen, sind Fuzzy-Mengen. Innerhalb dieser kann die Zugehörigkeit zu einer Menge durch eine Zugehörigkeitsfunktion beschrieben werden. Die Aussage, es handelt sich um eine Natursteinbogenbrücke, die nach klassischer Mengenlehre nur mit ja oder nein beantwortet werden kann, darf jetzt auch mit einem bestimmten quantitativen Betrag beantwortet werden. Die Theorie der Fuzzymengen verneint aber die klassische Mengenlehre nicht, sondern baut auf ihr auf. Verknüpfungen von Zugehörigkeitsfunktionen sind klar definiert und folgen damit den Regeln der klassischen Mengenlehre. Auch die Roughmengen (rough-grob, überschlägig) bauen auf der klassischen Mengenlehre auf. Im Gegensatz zu Fuzzymengen mit den Zugehörigkeitsfunktionen werden bei den Roughmengen Grenzen eingeführt. Es gibt weitere mathematische Ansätze, wie z.B. die Theorie der Grauen Systeme.

Wenn die Aussage stimmt, dass Unbestimmtheit von der Kultur abhängt, dann hängt Unbestimmtheit immer von dem einzelnen Menschen ab, der eine Situation beurteilt. Je mehr Informationen ein Mensch über eine Situation hat, umso geringer ist die Unbestimmtheit. Daher ist Unbestimmtheit objektiv nicht beschreibbar und eigentlich nicht messbar. Allerdings existieren Fälle, in denen die Unbestimmtheit für alle heute lebenden Menschen gleich ist. Vergleicht man z.B. über Generationen hinweg, dann sind heute andere Situationen unbestimmt, als vor einhundert Jahren. In diesem Sinne unterscheidet man zwei Arten von Unbestimmtheit: kategoriale und extrapolative. Kategoriale Unbestimmtheit beschreibt die Unbestimmtheit bei der Klassifikation eines Sachverhaltes. Extrapolative Unbestimmtheit erlaubt zwar die Identifikation des Sachverhaltes, ermöglicht aber keine Prognose des zukünftigen Verhaltens des Systems. Kategoriale Unbestimmtheit beinhaltet immer auch extrapolative Unbestimmtheit, denn über Objekte, die man nicht klassifizieren und damit auf Erfahrungswerte zurückgreifen kann, kann man auch keine Prognose über zukünftiges Verhalten geben. [39]

Die Unbestimmtheit lässt sich in diesem Schema weiter unterteilen in Neuartigkeit, Unerwartetheit, Unklarheit und Unbestimmtheit im engeren Sinne. Neuartigkeit beschreibt Situationen oder Sachverhalte, die dem Beurteilenden neu sind. Unerwartetheit beschreibt Sachverhalte, die in dem Kontext und den Randbedingungen bisher nicht beobachtet wurden. Bei der Unklarheit sind Sachverhalte unbekannt oder nicht genau identifiziert und bei der Unbestimmtheit im engeren Sinne sind Sachverhalte schlicht unbekannt. [39]

Allgemein versteht man unter Unbestimmtheit die „*Verzweigung des Erwartungshorizontes*“ [40]. Die Verzweigung des Erwartungshorizontes hängt maßgeblich von Ereignissen ab. Ereignisse sind plötzliche Änderungen von Wechselwirkungen. Je mehr Ereignisse stattfinden, umso unbestimmter wird die Zukunft. Im Gegensatz dazu stehen Prozesse, in diesen kann aus der Vergangenheit auf die Gegenwart und Zukunft geschlossen werden. [73]

Je mehr Ereignisse in Prozesse aufgelöst werden können, umso mehr kann die Unbestimmtheit zurückgedrängt werden. Damit hängt die Unbestimmtheit vom Wissens- und Informationsumfang desjenigen ab, der eine Unbestimmtheitsanalyse durchführt. Menschen versuchen in der Regel, die Unbestimmtheit zurückzudrängen.

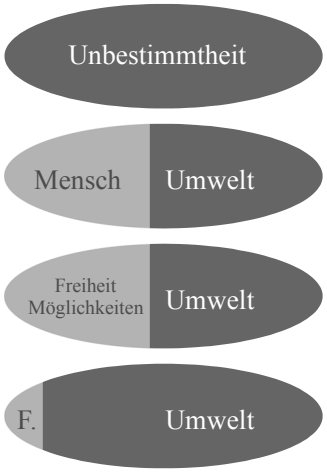


Abb. 14: Interne und externe Unbestimmtheit

Genau genommen gilt dies nur für die äußere Unbestimmtheit. Solche Unbestimmtheit kann beim Menschen Energie freisetzen. Unbestimmtheit zeigt mangelhafte Einflussnahme, sich ausgeliefert zu fühlen und unzureichende Macht. Eine der Grundlagen der menschlichen Reflektion der Natur ist das Kausalitäts-

prinzip. Wird dieses Prinzip durch Unbestimmtheit angegriffen, so sind der prinzipielle Umgang mit der Natur und damit die eigene Existenz in Frage gestellt.[40]

Dagegen lehnen Menschen interne Unbestimmtheit nicht ab. Abb. 14 versucht diese Überlegung darzustellen. Die Unbestimmtheit (oberste Ellipse) wird durch den Menschen in eine innere Unbestimmtheit und in eine äußere Unbestimmtheit zerlegt (zweite Ellipse von oben). Die eigene Unbestimmtheit entspricht Freiheiten oder Möglichkeiten. Im Falle von Angst wird die eigene Unbestimmtheit verringert. Menschen wollen also Unbestimmtheit in sich selbst und nur die Unbestimmtheit der Welt, zu einem gewissen Grade, unterdrücken. Man kann also Unbestimmtheit nicht prinzipiell als gut oder schlecht bewerten. Vielmehr muss man berücksichtigen, ob die Unbestimmtheit intern oder extern und ob sie langfristig als positiver Aktivator oder als negative Dämpfung wirkt.

Besonders deutlich wird die Unterscheidung von interner und externer Unbestimmtheit bei der Akzeptanz von Risiken. Hier spielen zahlreiche subjektive Faktoren eine wesentliche Rolle. Die wichtigsten sind Vertrauen, die Möglichkeit der eigenen Kontrolle und der Nutzen. Warum spielen diese Faktoren nun eine so große Rolle? Weil sie Prüfwerkzeuge für die Integration eines Systems in unser eigenes System sind und damit die äußere Unbestimmtheit in eine innere überführen. In wie vielen Filmen sagt der Held in einer schwierigen Situation: „Vertraue mir!“. Diese Aussage bedeutet, ich bin ein Teil von dir: die äußere Unbestimmtheit wird zur inneren Unbestimmtheit. Das gleiche gilt übrigens auch für Macht. Dieses Thema würde aber an dieser Stelle zu weit führen. Tatsächlich ist Vertrauen in der Lage, die subjektive Risikobewertung eines objektiven Risikos um mehr als das tausendfache zu verschieben [124]. Solche Faktoren sind zwingend zu berücksichtigen, wenn man Risikovergleiche durchführen möchte [83].

Einige Wissenschaftler gehen davon aus, dass Menschen nur Situationen mit hoher Unbestimmtheit positiv bewerten, die für die Menschen zweckfrei sind, also z.B. ein Abenteuer. Ob man einen Berg erklimmt ist in der Regel nicht lebensentscheidend. In solchen Fällen akzeptiert man die Unbestimmtheit, weil man umkehren kann. Anders sieht es aus, wenn man einen Pass überqueren muss, um z.B. Lebensmittel für seine Familie zu holen. Andere Verfasser sehen aber in der Besteigung eines Berges gerade die Erlangung von Kompetenz zum weiteren erfolgreichen Umgang mit Unbestimmtheit. [40]

Kann man Unbestimmtheit darstellen?

„Der große Kunstgriff, kleine Abweichungen von der Wahrheit für die Wahrheit selbst zu halten, worauf die ganze Differentialrechnung gebaut ist, ist auch zugleich der Grund unseres witzigen Gedanken, wo oft das Ganze hinfällig würde, wenn wir die Abweichungen mit philosophischer Strenge nehmen würden.“

GEORG CHRISTOPH LICHTENBERG [91]

Unbestimmtheit scheint also Teil der menschlichen Sprachkultur und der Umwelt zu sein. Interessant wäre nun der Versuch, Systeme aus mathematischer Sicht zu analysieren, um die Unbestimmtheit im Detail einzugrenzen. Diese Aufgabe gelingt, denn Unbestimmtheit kann selbst an einfachen mechanischen Systemen deutlich werden. In Abb. 15 ist ein Rad dargestellt, an dem Wasserbehälter drehbar angebracht sind. Diese Wasserbehälter haben unten eine Öffnung, so dass Wasser, welches von oben auf die Behälter fällt, die Behälter wieder verlassen kann. In Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Zuflusses des Wassers bilden sich nun charakteristische Drehbewegungen des Rades aus. Bei einer sehr geringen Zuflussmenge erfolgt überhaupt keine Bewegung. Das Wasser läuft in die Behälter und sofort wieder heraus. Die Reibungskräfte werden nicht überwunden. Auch wenn das Rad angeschoben wird, entsteht keine bleibende Bewegung. [91]

Wird der Zufluss verstärkt, geschieht zunächst ebenfalls nichts, wenn die Behälter symmetrisch angeordnet sind. Jedoch die oberen Behälter füllen sich stärker mit Wasser. Die Kopflastigkeit des Systems nimmt zu und ab einer bestimmten Stelle reicht eine kleine Abweichung von der Symmetrie und das Rad beginnt sich in eine Richtung zu bewegen. Dieser Punkt wird zwangsläufig erreicht, denn jede Zunahme der Kopflastigkeit ist eine Lupe für Störungen in der Symmetrie. Je kopflastiger das System, umso größer die Lupe. Am Ende mag die Bewegung eines Atoms für die Störung der Symmetrie ausreichen. Dann aber verlässt dieses hier beschriebene System unsere üblichen Dimensionen, es liegt eine Dimensionsbrücke vor. Man könnte auch formulieren, dass chaotische Eigenschaften die Ergebnisse von nicht maßstabstreuen Gesetzen sind. Und da alles

irgendwie mit allem wechselwirkt, gibt es solche Brücken aus der Mikrowelt in die Makrowelt genauso wie umgekehrt. Sie sind also die Ergebnisse von Prozessen aus einer anderen Welt, als wenn ein Schauspieler von einer Bühne auf eine andere Bühne kommt und die Bühnenbilder unterschiedlich sind. [91]

Die Geschichte mit dem Wasserrad ist aber noch nicht zu Ende. Dadurch, dass das Rad in Bewegung geraten ist, wandern die vollen Behälter nach unten und die leeren Behälter nach oben. Im Zuge dieser Wanderung werden die leeren Behälter gefüllt und die vollen Behälter leeren sich. Die Füllgeschwindigkeit hängt außerdem noch von der Geschwindigkeit des Rades ab. Kurzum, es existieren während der Bewegung Antriebs- und Dämpfungskräfte. Beide Kräfte verhalten sich jedoch qualitativ unterschiedlich. Während die Antriebskräfte über die Geschwindigkeit als linear angesehen werden können, entwickeln sich die Dämpfungskräfte nichtlinear. [91]

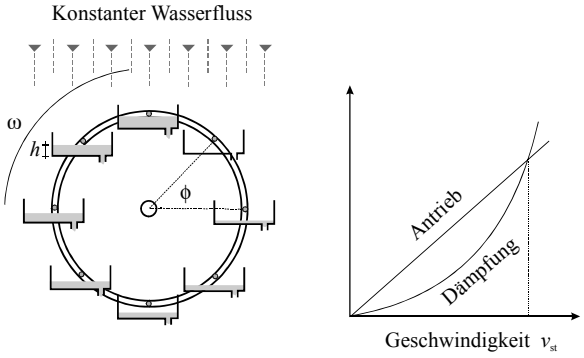


Abb. 15: Chaotisches Wasserrad [91]

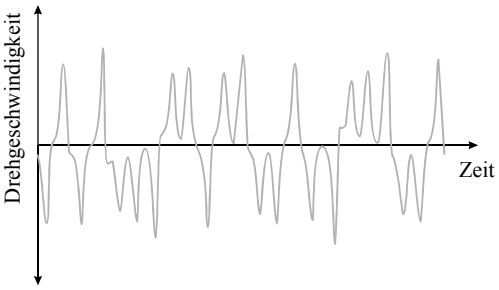


Abb. 16: Drehgeschwindigkeit des chaotischen Rades bei hohem Wasserfluss [91]

Diese Unterschiede beim Wachstum der Kräfte verursachen zwei Zustände: Einmal überwiegen die Antriebskräfte und einmal überwiegen die Dämpfungskräfte. Beide Kräfte bedingen einander, so dass die Kräfte in Wechselwirkung stehen. Wenn die Antriebskräfte überwiegen, verursachen sie eine Beschleunigung des Rades, was zu einem nichtlinearen Anwachsen der Dämpfungskräfte führt. Diese wiederum bremsen das Rad, so dass die Antriebskräfte wieder überwiegen können. Das Rad dreht sich in eine Richtung mit mehr oder weniger gleich bleibender Geschwindigkeit. Es entsteht ein sich selbst regelndes System. Es sei erwähnt, dass innerhalb dieses Rückkopplungssystems Ursache und Wirkung nicht mehr eindeutig identifizierbar sind [91]. Diese Eigenschaft wurde bereits bei den nicht trivialen Systemen aufgegriffen (Kausalnexus). Erhöht man den Wasserzufluss noch weiter, so entsteht chaotisches Verhalten, das Rad zeigt ungleichmäßige Drehungen und Richtungswechsel (Abb. 16). Die Behälter füllen sich stark und Dämpfungskräfte reichen nicht aus, das Rad zu stoppen, aber wenn die stark gefüllten Behälter auf der anderen Seite des Rades ankommen, bremsen auch sie mit. Die Frage, ob das Rad eine Umdrehung schafft, wird wieder von bisher unbedeutenden Werten abhängig. [91]

Während im Fall der konstanten Drehung der Zufall nur für die Wahl der Richtung von Bedeutung war, tritt der Zufall jetzt regelmäßig in Erscheinung. [91]

Diskussionen über vergleichbare Situationen, in denen der Zufall regiert, lassen sich sehr weit zurückverfolgen. Bereits im 14. Jahrhundert diskutierten Epikureer und Stoiker über Determinismus. Bekannt dürfte in diesem Zusammenhang das Beispiel des Philosophen BURIDAN sein. In diesem Beispiel wählt BURIDAN einen Esel, der zwischen zwei Heuhaufen verhungert, weil beide Heuhaufen identisch sind und in gleicher Entfernung zum Esel liegen. Auf Grund völliger Symmetrie kann der Esel sich nicht für einen Haufen entscheiden. In Abb. 17 wurden die Heuhaufen durch Apfelsinen ausgetauscht, was dem Esel aber auch nicht wirklich hilft. Eine kleine Störung der Symmetrie, etwa eine Fliege, der Sonnenstand oder die Windrichtung können jedoch die Entscheidung für den Esel erleichtern und so letztendlich zu einer Lösung führen. [91]

Ein weiterer Versuch, vergleichbar mit dem Wasserrad, ist der TAYLOR-Versuch. Innerhalb eines (meist durchsichtigen) Zylinders rotiert ein zweiter Zylinder. Zwischen den Zylindern befindet sich eine Flüssigkeit. Die Flüssigkeit bildet je nach Umdrehungszahl des inneren Zylinders Muster. Die Muster reichen von einfachen Wirbelmustern bis zu chaotischem Verhalten [30] . Selbst bei der Umströmung von Zylindern kann man in Abhängigkeit von der REYNOLDS-Zahl verschiedene Formen bis zum chaotischen, also hochgradig unbestimmten Verhalten finden. [30]

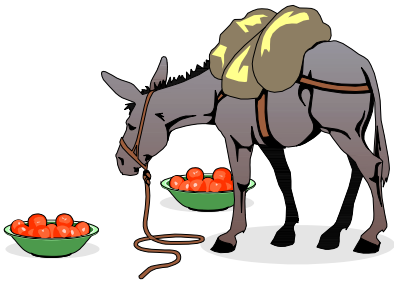


Abb. 17: BURIDAN'S Esel

Sehr gern wählt man für die Darstellung der Änderung von Ordnungsformen die rekursive Form [10] der VERHULT-Gleichung. VERHULST, ein belgischer Mathematiker, befasste sich mit dem Wachstumsverhalten von Populationen. Viele Pflanzen- und Tierarten zeigen exponentielles Wachstumsverhalten, wenn Sie ungestört wachsen können. Die Anzahl der Tiere im darauf folgenden Jahr kann man ermitteln, indem man die Anzahl der diesjährigen Tiere mit einem Faktor multipliziert: $p_{n+1} = k \cdot p_n$

Wählt man rein willkürlich $k = 2$, so verdoppelt sich die Anzahl in jedem Zyklus. Ein Zyklus kann ein Jahr oder ein Tag sein. Eine Verdopplung wäre ein sehr schnelles Wachstum. Ein noch schnelleres Wachstum erreicht man übrigens, wenn $k = p_n$ gesetzt wird, also $p_{n+1} = p_n^{\,2}$ oder anders geschrieben: $p(t) = t^t$, wenn die Anzahl der Lebewesen als Funktion der Zeit dargestellt wird. Diese Funktion wird sehr gern zu Beschreibung des Druckes bei Explosionen verwendet, sie soll aber hier nicht weiter berücksichtig werden.

Allerdings werden früher oder später immer Grenzen das exponentielle Wachstum einschränken. Dazu führte VERHULST einen Term ein, der das grenzenlose Wachstum behindert: $p_{n+1} = k \cdot p_n \cdot (1 - p_n)$. Wenn also p_n sehr groß wird, dann ist der neu eingeführte Term sehr klein. Da hier als Minuend 1 gewählt wurde, soll die Anzahl in Prozent, also kleiner 1 eingegeben werden. Man kann noch einen Startwert angeben, muss man aber nicht: $p_{n+1} = p_a + k \cdot p_n \cdot (1 - p_n)$

Diese Gleichung beschreibt sehr schön das Verhalten, wenn Grenzen des Wachstums mit berücksichtigt werden, allerdings zeigen die Ergebnisse der Berechnung, leider, chaotisches Verhalten. Dies gilt nicht, wenn das Wachstum langsam voranschreitet. Wachstumswerte um 150 % ($k = 1{,}5$) werden geduldet. Erreichen die Wachstumswerte aber über 250 %, so erhält man erstaunliche Ergebnisse. Zunächst beginnen die Ergebnisse zu schwanken, es gibt verschiedene Lösungslinien. Bei noch höheren Werten werden die Ergebnisse punktuell chaotisch und bei einem Wachstumswert von 300 % sind die Ergebnisse vollständig chaotisch.

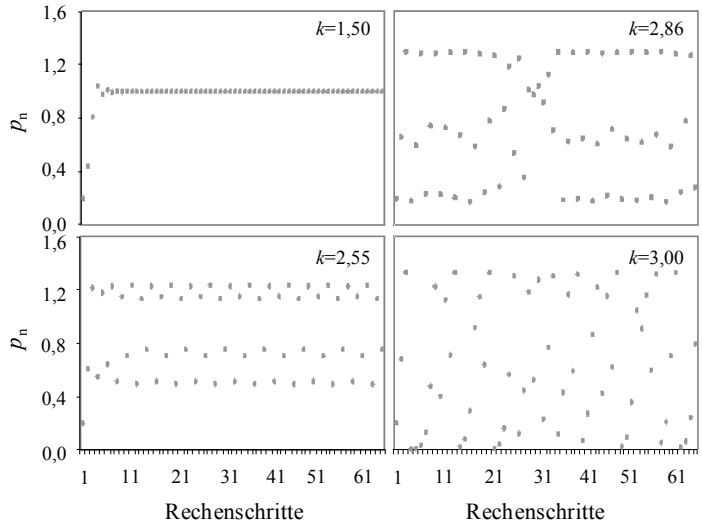


Abb. 18: Iterationsverhalten der rekursiven VERHULST-Gleichung. Die Werte hängen von den Startbedingungen ab.

Das beschriebene Verhalten ist in Abb. 18 dargestellt. Leicht kann man solche Diagramme mit der oben beschriebenen Formel selbst erstellen. Ändert man die Darstellungsweise und trägt nicht die Rechenschritte auf der Abszisse auf, sondern die Wachstumsrate, erhält man ein erstaunliches Bild. Alle horizontal liegenden Punkte in den Diagrammen in Abb. 19 sind jetzt vertikal liegende Punkte für einen *k*-Wert. Für die Betrachtung von Abb. 19 sollte man sich etwas Zeit nehmen. Zunächst sieht man sehr schön, dass in den Bereichen mit kleinen *k*-Werten die Werte relativ scharf auf den Betrag 1 fokussiert sind. Etwa ab einem Wachstum von 200 % gibt es zwei Lösungsbereiche. Über 260 % gibt es bereits Bereiche mit chaotischem Verhalten und zwischen etwa 270 % und 280 % besteht vollständiges chaotisches Verhalten. Interessant ist weiterhin das Loch bei etwa 280 %. Hier zeigt das System plötzlich wieder eine Ordnung. Die kleinen Linien, die den grauen Bereich vor und hinter dem weißen Loch verbinden, sind, wenn man sie stark vergrößert, identisch mit diesem Diagramm. Ein mit einem speziellen Programm hergestelltes Feigenbaumdiagramm ist in Abb. 20 dargestellt. Deutlich sieht man hier auch die Verzweigungspunkte, die der Feigenbaumzahl folgen.

Der Beginn der Chaostheorie wird oft mit den Arbeiten von POINCARÉ Ende des 19. Jahrhunderts in Verbindung gebracht. 1960 zeigte EDWARD LORENZ chaotisches Verhalten bei der Prognose des Wetters. In den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts entdeckte FEIGENBAUM die Feigenbaumkonstante.

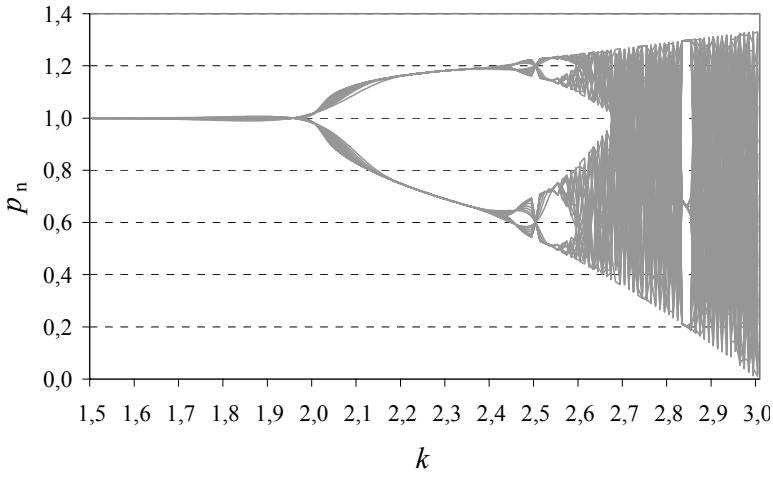


Abb. 19: Feigenbaumdiagramm erstellt mit Tabellenkalkulationsprogramm

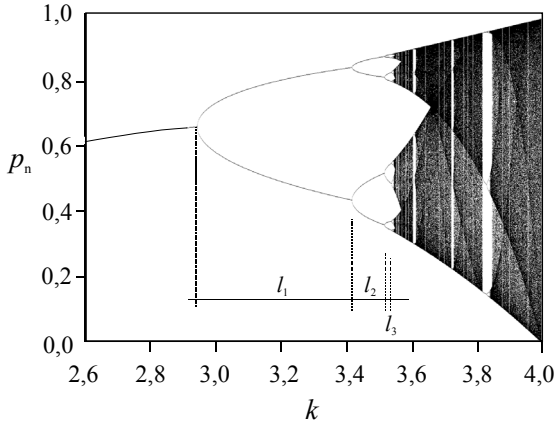


Abb. 20: Feigenbaumdiagramm erstellt mit dem Programm ChaosExplorer [90, 36]. Die Verhältnisse der Abstände der Verzweigungspunkte konvergieren gegen die Feigenbaumzahl.

Chaotische Systeme lassen sich in unglaublicher Vielfalt finden, ob nun bei chaotischem Strömungsverhalten, magnetischen Pendeln, Doppelpendeln oder LISSAJOU-Figuren. Überall führen kleinste Variationen der Eingangsgrößen zu nicht mehr prognostizierbarem Verhalten von Systemen. Interessant ist bei diesen Beispielen das Nebeneinander von Ordnung und Unordnung. Dies sei an einem einfachen mathematischen Beispiel gezeigt. Mittels dreier einfacher Formeln, auf die

a=-0,7
b= 1,0

a=-0,744
b= 0,972

a=-0,741
b= 0,974

a=-0,80
b= 0,95

Abb. 21: Muster in Abhängigkeit vom Parameter

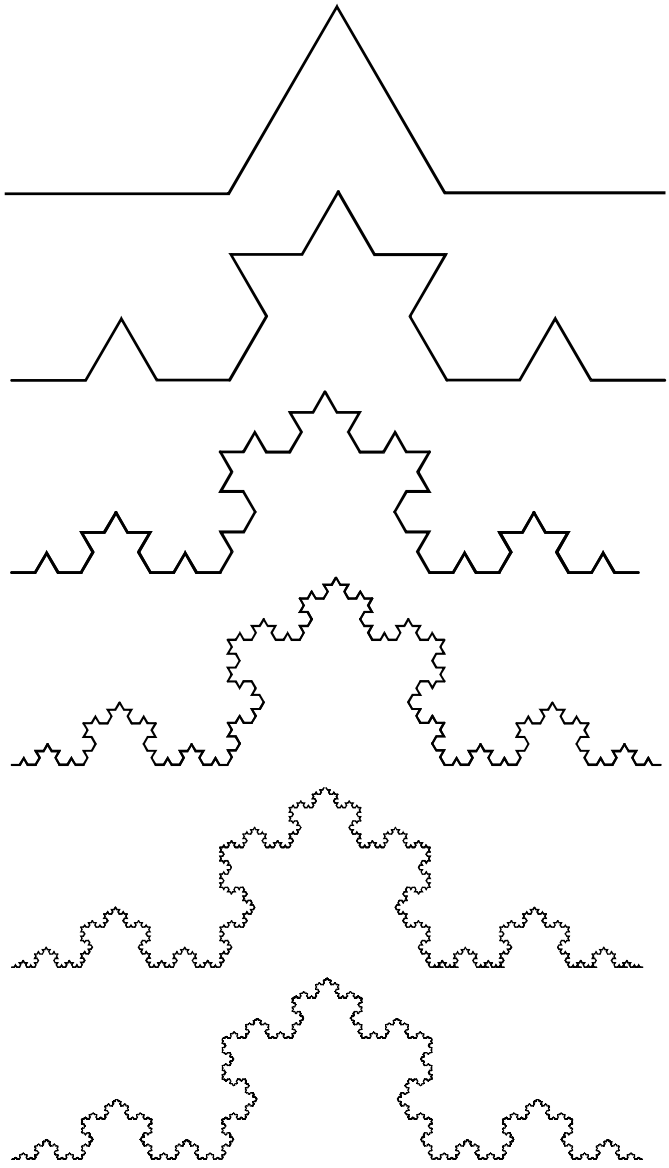


Abb. 22: KOCH-Kurve

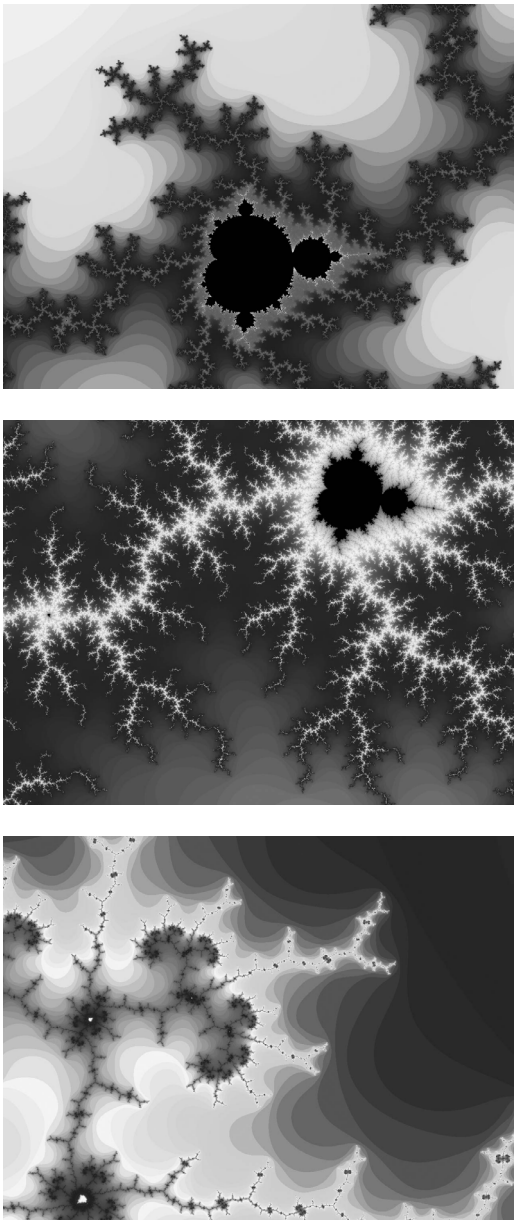


Abb. 23: Mandelbrotmengen (erstellt mit dem Chaosexplorer [90, 113])

hier nicht weiter eingegangen werden soll [1]: $F(x) = a \cdot x + (1-a) \cdot 2 \cdot x^2 / (1+x^2)$ $x_{n+1} = b \cdot y_n + F(x)$, $y_{n+1} = -x_n + F(x_{n+1})$. Damit wurden die Bilder in Abb. 21 erstellt, wobei allein der Parameter geändert wurde. Hier stellt man sich die Frage, ob die Komplexität der Figuren gleich ist, denn die Ordnungsstruktur, also die Regel ist für alle Bilder identisch? [1]

Solche Muster lassen sich auch mit anderen mathematischen Hilfsmitteln, z.B. den Fraktalen, erzeugen. Der Begriff des Fraktals wurde 1975 durch BENOÎT MANDELBROT eingeführt. Fraktale sind Gebilde, deren fraktale Dimension größer als ihre topologische Dimension ist. Eine Linie kann also eine fraktale Dimension haben, die größer als eins ist. In Abb. 22 wird eine KOCH-Kurve als bekanntestes Beispiel für ein Fraktal gezeigt. Die Dimension dieser Kurve liegt zwischen eins und zwei. Praktische Beispiele sind Küstenlinien oder Schwämme, deren Dimension zwischen eins und zwei bzw. zwei und drei liegt. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass hier eine Veränderung des Raumverständnisses erfolgt. Weitere Beispiele für Fraktale zeigt Abb. 23. Diese Bilder vermitteln bei vielen Menschen ein Gefühl der Schönheit. Wird also die Unbestimmtheit, die Tiefe der Welt als schön empfunden? Wahrscheinlich nicht, sondern die Mischung aus Ordnung und Unordnung. Diese Mischung aus Ordnung und Unordnung, aus Bestimmtheit und Unbestimmtheit stellt uns vor die Aufgabe, mit der Unbestimmtheit umzugehen. Dafür wurden verschiedene mathematische Techniken entwickelt, um Unbestimmtheit handhaben zu können.

Die sicher erfolgreichste Technik ist hierbei die Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung. Diese Technik spielt in vielen Wissenschaftsbereichen eine große Rolle. So gibt in der Physik die so genannte SCHRÖDINGER Gleichung die Wahrscheinlichkeitsdichte des Aufenthaltsortes des Elektrons im Atom an [119]. In der Biologie basiert die ursprünglich von DARWIN aufgestellte Theorie über die Evolution der Tierwelt auf zufälligen Änderungen der Gene [23]. In der Medizin und Psychologie gibt man die Erfolgsquote von Medikamenten und Therapien in Wahrscheinlichkeiten an. Im Umweltschutz benötigt man die Statistik zur Entdeckung von Veränderungen von Umweltbedingungen [66]. Selbst in den Rechtswissenschaften spricht man von Wahrscheinlichkeiten z. B. bei „*mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit*“. Auch in der Wirtschaft sind Wahrscheinlichkeiten und die stochastische Beschreibung von Vorgängen ein wichtiges Hilfsmittel. So verfolgt man in der so genannten Konjunkturtheorie neben anderen Theorien auch stochastische Ansätze [55, 99]. Auch in der Versicherungswirtschaft wird das Versicherungsrisiko auf Grundlage von Wahrscheinlichkeiten ermittelt. Als weitere Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung sei die Spieltheorie genannt, die der Auslöser für die Entwicklung der Wahrscheinlichkeitsrechnung war. Bereits im 16. Jahrhundert erschienen Bücher über die Wahrscheinlichkeitsrechnung, z.B. von GEROLAMO CARDANO 1526 „Liber de ludo aleae“ und von

GALILEO GALILEI (1564-1642): „Sopra le scorpeste dei Dadi“ (ein Buch über die Wahrscheinlichkeiten beim Spiel mit drei Würfeln) [103]. Später wurde die Anfrage des Spielers ANTOINE CHEVALIER DE MÉRÉ (1610-1684) an den französischen Mathematiker und Philosophen BLAISE PASCAL (1623-1662) zu verschiedenen Zufallsspielen berühmt. Auf Grund dieser Anfrage kam es zu einem Briefwechsel zwischen PASCAL und dem Mathematiker PIERRE DE FERMAT (1602-1665) in den Jahren 1651 bis 1655, der als Beginn der modernen Wahrscheinlichkeitsrechnung angesehen wird. Weitere Bücher folgten in den nächsten Jahren von JAKOB BERNOULLI (1654-1705) „Ars Conjectandi“ (Kunst des Vermutens), PIERRE SIMON DE LAPLACE (1812) „Théorie analytique des probabilités“ oder THOMAS BAYES (1702-1761) „An essay towards solving a problem in the doctrine of chances“.

Die Wahrscheinlichkeitsrechnung und mit ihr die induktive Statistik haben eigentlich alle Wissenschaften durchdrungen. Die Mittelwertbildung gehört heute zum Allgemeingut eines durchschnittlich gebildeten Bürgers.

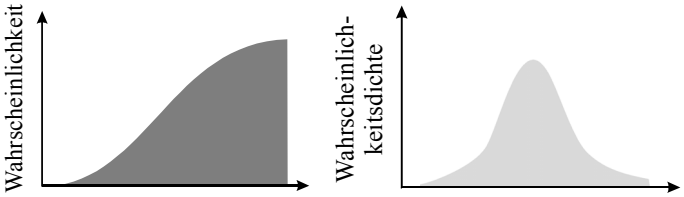


Abb. 24: Wahrscheinlichkeitsverteilung und -dichteverteilung

Wahrscheinlichkeiten geben eine quantitative Bewertung von Möglichkeiten [119]. In der Wahrscheinlichkeitsrechnung werden Zufallszahlen eingeführt. Dabei werden bestimmten Zahlenwerten Wahrscheinlichkeitswerte zugeordnet. Abb. 24 zeigt eine solche Wahrscheinlichkeitsverteilung und die dazugehörige Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung. Beide sind ineinander überführbar. Für die praktische Anwendung stehen zahlreiche Wahrscheinlichkeitsverteilungen zur Verfügung. Aber wie bereits im Kapitel Unbestimmtheit erwähnt wurde, kann die Wahrscheinlichkeitsrechnung nicht alle Formen von Unbestimmtheit erfassen, auch wenn dies versucht wird. Eine Erweiterung der Erfassung von Unbestimmtheiten sind die Fuzzy-Sets. Fuzzy-Sets wurden von 1965 von LOTFI ZADEH eingeführt [128]. Er konnte allerdings auf Vorarbeiten zurückgreifen, die den Wahrheitsgehalt von Aussagen bereits differenzieren konnten. Abb. 25 zeigt die Zuordnung von Funktionen z.B. zu dem Begriff sehr junger Mensch, junger Mensch, Mensch im besten Alter und älterer Mensch. Deutlich kann man erkennen, dass es Überschneidungen gibt. Diese sprachliche Unschärfe, die hier berücksichtigt werden kann, spielte bereits im Kapitel Definitionen eine Rolle.

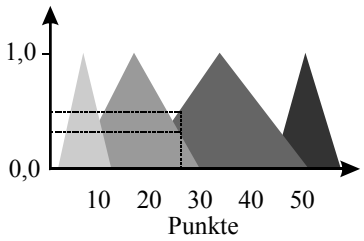


Abb. 25: Zugehörigkeitsfunktionen im Modell der Fuzzy-Sets

Ein weiteres mathematisches Verfahren sind die Rough-Sets. Rough-Sets (rough englisch für grob, roh) wurden in den 80er Jahren des 20. Jahrhunderts von ZDISŁAW PAWLAK entwickelt. Auch hier handelt es sich um ein mathematisches Verfahren zum Umgang mit Unbestimmtheit. Das Verfahren arbeitet u.a. mit so genannten Informationspixeln für die Abgrenzung von Begriffen (Abb. 26). Angewendet wird es z.B. für Spracherkennung, Mustererkennung und im Bereich der Künstlichen Intelligenz. [54, 78]

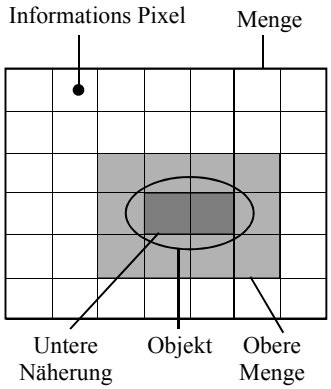


Abb. 26: Informationspixel im Modell der Rough-Sets

Das Verfahren der Grauen Systeme wurde Anfang der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts von DENG JULONG in China entwickelt. Das Verfahren ermöglicht Extrapolationen, aber auch Ansätze zur Entscheidungsfindung oder Identifikation von Veränderungen von Systemen. Da die Veröffentlichungen überwiegend in chinesischer Sprache erschienen, wurde diesem Verfahren zunächst wenig Aufmerksamkeit zuteil. Erst in letzter Zeit wird dieses Verfahren verstärkt verwendet. Auch hier werden Funktionswerte Zahlenbereichen zugeordnet. Abb. 27 zeigt eine solche Graue Zahl. [13, 84]

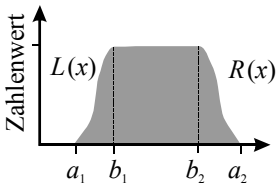


Abb. 27: Beispiel einer Grauen Zahl

Ein weiteres mathematisches Verfahren zur Berücksichtigung von Unbestimmtheit ist das Verfahren der künstlichen neuronalen Netze. Die Anfänge der Entwicklung künstlicher neuronaler Netze reichen bis in die 40er Jahre des 20. Jahrhunderts zurück. Seit ca. 1986 erlebt das Gebiet der Neuronalen Netze aber einen besonders lebhaften Aufschwung. Die Grundidee Neuronaler Netze ist die rechentechnische Adaption der Struktur und Informationsverarbeitung des Gehirns. Es werden Zellen gebildet, die miteinander in Verbindung stehen. Jede Zelle besitzt eine Transfer-Funktion und eine Aktivierungsfunktion. Dadurch entsteht eine Vielzahl von Freiheitsgraden, die zu einer optimalen Anpassung des Netzes an die Aufgabenstellung verwendet werden können. Abb. 28 zeigt den Aufbau eines künstlichen neuronalen Netzes, welches zur Bestimmung von Betoneigenschaften genutzt wurde. [105]

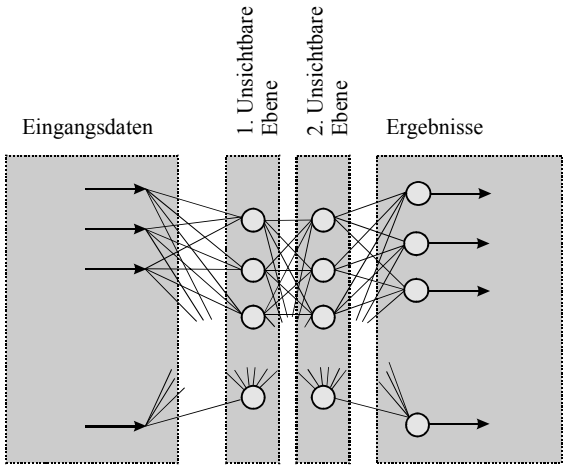


Abb. 28: Schema eines künstlichen Neuronalen Netzes [105]

Genetische Rechenaufgaben zählen zur Kategorie der evolutionären Lösungsverfahren mathematischer Entscheidungsprobleme. Das primäre Ziel der Anwendung solcher Verfahren ist die Verringerung des Rechenaufwandes, wenn die Zahl der zu bewertenden möglichen Kombinationen außerordentlich hoch ist. Deshalb werden Anfangsbedingungen zufällig geändert, bewertet und ausgewählt. [63]

Partikelschwärme, Schwarmintelligenz oder Ameisenkolonieoptimierungsverfahren sind Verfahren der künstlichen Intelligenz, in denen das Verhalten dezentralisierter, selbst organisierter Systeme nachgestellt und zur Lösung von Aufgaben genutzt wird. Der Begriff wurde 1989 von BENI & WANG eingeführt. Grundlage dieses Verfahrens ist die Idee, dass selbst einfachste Lebensformen, wie z.B. Bakterien auf äußere Einflüsse reagieren können [51, 32, 106, 29]. Dazu müssen sie die Einflüsse in gut und schlecht klassifizieren können. Die Fähigkeit zur Bewertung der Umwelt scheint eine Grundlage jeglichen Lebens zu sein. [51, 32]

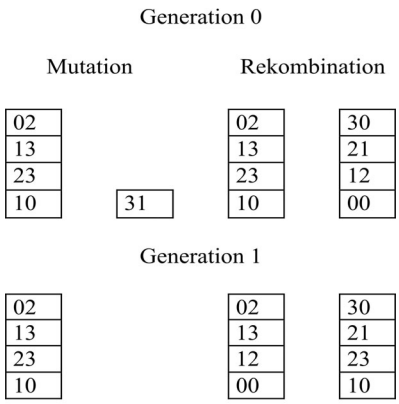


Abb. 29: Schema des Ablaufes bei einer genetischen Optimierung

Eine weitere Prognoseform ist die Delphi-Befragung. Diese wurde erstmals in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts eingeführt. Sie beruht auf dem Phänomen, dass der Durchschnitt der Meinung gleich kompetenter Beobachter eine zuverlässigere Aussage erlaubt, als die Vorhersage eines einzelnen.

In diesen Bereich gehören auch die Expertensysteme. Expertensysteme wurden erstmals in den 70er Jahren entwickelt. Die ersten professionellen Programme kamen in den 80er Jahren auf den Markt. Relativ neu ist das Data-Mining, wobei hier oft verschiedene Techniken verwendet werden.

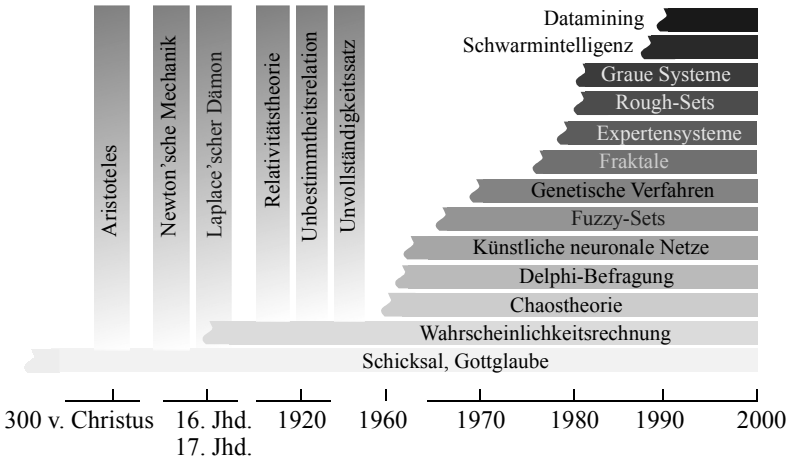


Abb. 30: Entwicklung mathematischer Modelle zur Beschreibung von Unbestimmtheit

Nun ist es nicht möglich, hier alle mathematischen Prognoseverfahren darzustellen. Verschiedene Autoren sprechen von über 300 mathematischen Verfahren zur Entwicklung von Vorhersagemodellen, die alle auf eine bestimmte Art und Weise Unbestimmtheit berücksichtigen müssen [120]. Das zeigt die intensiven Bemühungen der Wissenschaftler, einen geeigneten Umgang mit der Unbestimmtheit zu finden. Eine kurze Zusammenfassung der Entstehung der verschiedenen Verfahren zeigt Abb. 30. Da das erste wissenschaftliche Verfahren zum Umgang mit der Unbestimmtheit die Wahrscheinlichkeitsrechnung war, wird im folgenden Abschnitt noch einmal auf den Begriff des Zufalls eingegangen.

Was ist Zufall?

„*Es ist ganz offensichtlich, dass die Existenz instabiler Bedingungen die Vorhersage künftiger Ereignisse unmöglich macht, wenn unser Wissen über den gegenwärtigen Zustand nur ein angenähertes und kein genaues ist…*“ [79]

JAMES CLERK MAXWELL [79]

Die Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik sind von besonderer Bedeutung bei der Behandlung der Unbestimmtheit dieser Welt, da diese Verfahren nicht nur die Wissenschaft, sondern selbst den Alltag vieler Menschen durchdrungen haben. Grundlage für diese Verfahren ist der Begriff Zufälligkeit oder der Zufall. Allgemein spricht man vom Zufall, wenn etwas hochgradig unbestimmt ist. Wie kann man nun aber Zufall definieren?

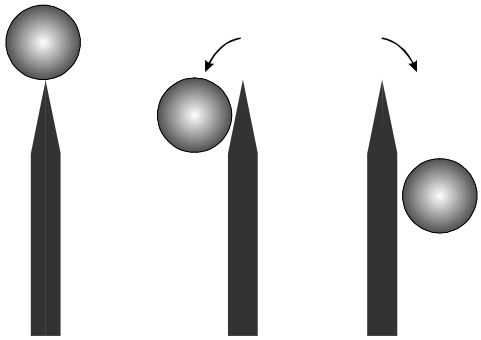


Abb. 31: Verzweigungsereignis [30]

Jede Beschreibung eines Systems, in dem Verzweigungen (Abb. 31) vorkommen, wird sowohl deterministische als auch zufällige Elemente beinhalten. Zwischen Verzweigungen können sich Systeme allein deterministischen Regeln (Prozesse) unterwerfen, aber in der Nähe von Verzweigungen (Ereignisse) bilden Fluktuationen eine wesentliche Rolle bei der Entscheidung, welcher Zweig weiterverfolgt wird. [10]

Ein System ist deterministisch, wenn seine Entwicklung durch eine endliche Zahl von Gleichungen beschrieben werden kann. Im klassischen Sinne ist Determinismus gleich wissenschaftlicher Objektivität. POINCARÉ hat allerdings gezeigt, dass die Beschreibung eines Systems durch eine endliche Zahl an Gleichungen nicht zwangsläufig der Prognostizierbarkeit des Systemverhaltens entspricht. [61]

Zufälligkeit ist im Wesentlichen auf Ereignisse, also plötzliche Wechselwirkungen beschränkt (Abb. 32 und Abb. 33). Ein Würfel fällt auf eine Unterlage, eine Kugel fällt auf eine Nadel, ein Rad fängt an sich zu drehen oder Erdbewegungen verursachen ein Erdbeben. Die zeitliche Auflösung eines Ereignisses kann die Zufälligkeit bis zu einem bestimmten Maße zurückdrängen.

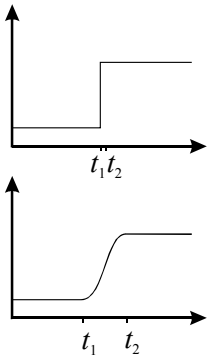


Abb. 32: Ereignis

Da der Name POINCARÉ bereits gefallen ist: Eine frühe Definition des Zufalls stammt von HENRI POINCARÉ aus dem 19. Jahrhundert: „*Eine sehr kleine Ursache, die wir nicht bemerken, bewirkt einen beachtlichen Effekt, den wir nicht übersehen können, und dann sagen wir, der Effekt sei zufällig*." Heute bezeichnet man das eher als Chaos. Periodizität, eigentlich besser Ordnung, wird als das Gegenteil von Zufälligkeit bezeichnet [61]. CHAITIN hat Zufälligkeit als Freiheit von Mustern angesehen [61]. LONGO bezeichnet Zufall als Verlust an Determinismus [61]. VON WEIZSÄCKER hat Wahrscheinlichkeitsrechnung als „*die Weise möglichen Wissens der Zukunft*" benannt [97]. EAGLE bezeichnet Zufall als Unbestimmbarkeit [15]. Manche meinen auch, dass es die Schwäche und Endlichkeit des menschlichen Geistes ist, die die Kategorie der Wahrscheinlichkeit erzwingt. [79]

Zwei weitere, besonders bedeutende Definitionen von Zufälligkeit seien genannt: VON MISES beschreibt Zufall als Unabhängigkeit und KOLMOGOROFF beschreibt Zufall als Komplexität. KOLMOGOROFF's Definition ist von außerordentlicher Bedeutung. Sinngemäß beinhaltet die Definition: Je komplexer etwas

ist, umso zufälliger ist es. Beispielhaft wählt man eine einfache Zahlenfolge: 0,12345678910111213141516171819202122…[110].

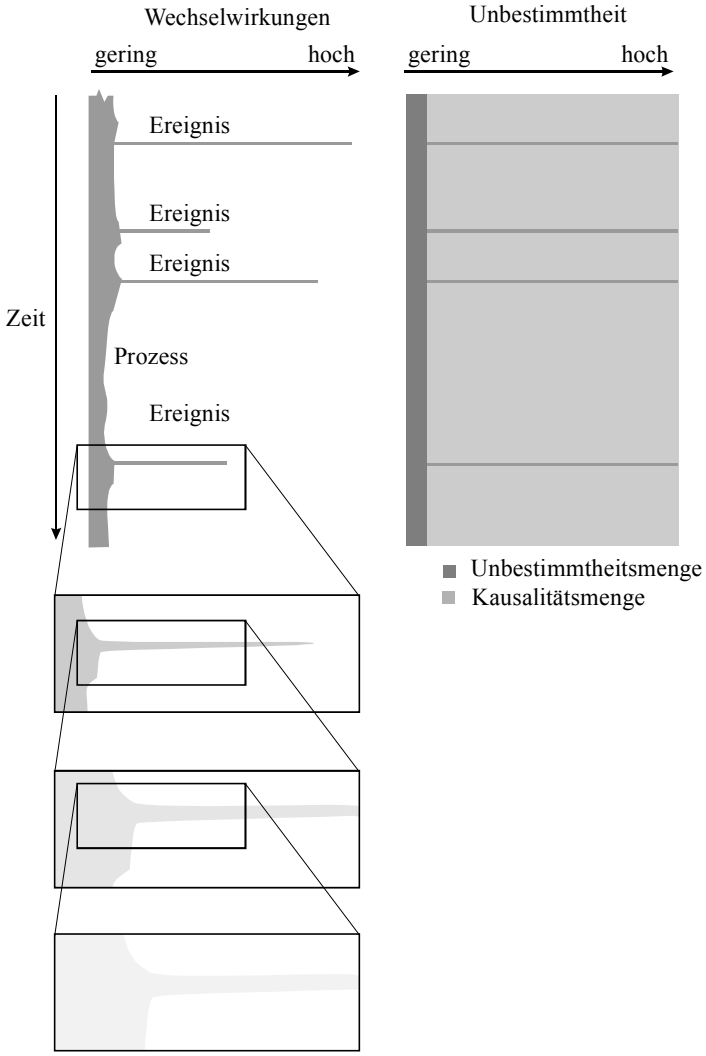


Abb. 33: Verknüpfung von Ereignis, Prozess, Zufälligkeit und Ereignisumwandlung. Während eines Ereignisses nehmen die Kausalitätsmenge ab und die Unbestimmtheitsmenge zu. Je mehr man versucht, das Ereignis in einen Prozess zu überführen, und damit Determinismus herzustellen, umso undeutlicher wird der Prozess.

Diese Zahlenfolge ist offensichtlich nicht zufällig, denn es gibt eine einfache, also nicht komplexe Regel, für die Erstellung diese Zahl. Wenn man diese einfache Regel oder Ordnung verwendet, kann man die Zahl mit einer viel geringeren Informationsmenge konstruieren, als die Zahl selbst besitzt. Die Zahl kann also durch eine Regel komprimiert werden, genau wie bei einer Definition. Bei einer Zufallszahl aber gibt es keine Regel, also keine Ordnung mehr. Deshalb sind Zufallszahlen, die mit einem Computer hergestellt werden, auch keine Zufallszahlen. Sie werden auch als Pseudo-Zufallszahlen bezeichnet. Die Regel zur Herstellung ist allerdings so komplex, dass man nicht ohne weiteres Erkennen kann, ob die Zahl zufällig ist. Die KOLMOGOROFF-Komplexität kann auch als Maß für die Zahl von Regeln aufgefasst werden, die notwendig sind, um gegebene Phänomene - z. B. konkrete Intelligenzleistungen - zu beschreiben oder zu erklären [35]. Zufällige Daten können nur mit einem Programm beschrieben werden, welches dem Umfang der Daten selbst entspricht [61, 35, 110].

Was ist Komplexität?

"*Wenn das Gehirn so einfach wäre, dass wir es verstehen könnten, könnten wir es nicht verstehen*."

LYALL WATSON

Nach KOLMOGOROFF ist Komplexität also Zufälligkeit, und Zufälligkeit ist nichts anderes als Unbestimmbarkeit. Die Annahme, dass Komplexität mit Unbestimmbarkeit einhergeht, scheint nicht unverständlich, aber was ist denn nun Komplexität? Diese Frage ist leider nicht leicht zu beantworten. Wenn Komplexität etwas ist, was sich der Vereinfachung entzieht, dann kann man Komplexität auch nicht in einer einfachen Definition festzurren. In der Tat lehnen verschiedene Wissenschaftler die Definition von Komplexität ab [89]. Sie gehen davon aus, dass Komplexität vielfältig, relativ und stets polymorph ist [89, 10]. Komplexität ist relativ, weil es von der Sichtweise abhängt: Ein Metzger beurteilt das Hirn eines Rindes als nicht komplex, während ein Neurobiologe dies tut. [22, 19]

Auch geschichtlich haben sich die Ansichten über Komplexität stark gewandelt. So standen am Anfang der wissenschaftlichen Betrachtungen sehr einfache Systeme, die für die damaligen Wissenschaftler durchaus als komplex angesehen wurden. Die Untersuchungen richteten sich häufig auf Probleme, die nur zwei Variablen besaßen. Erwähnt seien hier die Arbeiten von GALILEO GALILEI (Fallgesetze) um 1600, die Arbeiten von JOHANNES KEPLER zu den Planetenbahnen 1609 oder die Entdeckung der Grundgesetze der Mechanik durch ISAAK NEWTON 1687. Viele solcher historischen Probleme werden heute als gelöst angesehen und haben die Eigenschaft der Komplexität verloren [75 94]. Die Definition eines komplexen Systems hängt also ganz wesentlich vom Erkenntniszustand ab.

Etwa aber der Mitte des 19. Jahrhunderts beginnen Arbeiten zu Systemen, die eine Vielzahl von Variablen besitzen. Zwar ist das Verhalten der einzelnen Elemente nicht beschreibbar, aber das Verhalten des Systems kann erfasst werden. In diese Kategorie fallen z.B. die Arbeiten von LUDWIG BOLTZMANN zur statistischen Entropie. Man bezeichnet diese Systeme auch als unorganisierte Komplexität.

Zwischen diesen beiden Klassen, also den trivialen Systemen und Systemen mit unorganisierter Komplexität, taucht eine weitere Art von Systemen auf: Systeme mit organisierter Komplexität. Diese Systeme sind von besonderem Interesse und bildeten den Auslöser für die Komplexitätsforschung. [75]

Die Geschichte der eigentlichen Komplexitätsforschung lässt sich über 100 Jahre zurückverfolgen. Man versuchte hier, Erkenntnisse aus den Bereichen Physik, Mathematik, Biologie und Chemie zusammenzufassen. Wirtschaftswissenschaftliche Relevanz erreichte die Komplexität etwa um die Mitte des 20. Jahrhunderts mit der Entwicklung der Informations- und Automatentheorie, der Kybernetik, der allgemeinen Systemtheorie und der Selbstorganisationstheorie. Die Wahrnehmung dieser Komplexitätstheorie war jedoch relativ gering. Mitte bis Ende der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts schloss sich eine Konsolidierungsphase an. Sogar Gesellschaftswissenschaftler begannen, die Identität der Probleme in den verschiedenen Fachgebieten zu erkennen. Heute gibt es durch den massiven Einsatz der Rechentechnik eine Vielzahl von Verfahren, um das Verhalten komplexer Systeme beschreiben und vor allem darstellen zu können. [18]

Auf Grund der verschiedenen Fachgebiete hat sich die historische Vielfalt der Definitionen des Begriffes Komplexität bis heute gehalten. Inhalt des Begriffes sind ja gerade Systeme, die sich nicht reduzieren lassen, welches eine Grundbedingung für eine gute Definition ist. Da Komplexität oder komplexe Systeme sich einer Vereinfachung entziehen, wird der Begriff Komplexität durch die Eigenschaften der Systeme beschrieben: so etwa „komplexe Systeme besitzen …“. Die Explikation des Begriffes Komplexität fällt also leichter als die Definition. Die Explikationen berücksichtigen in der Regel immer die Anzahl der Elemente und die Verknüpfung der Elemente, teilweise auch die zeitliche Entwicklung der Struktur. Die Festlegung, was ein Element und was eine Verknüpfung ist, hängt häufig von der Fragestellung ab. Beides zusammen wird als Struktur bezeichnet. [18]

Der Begriff Komplexität selbst kommt aus dem Lateinischen von *complectari*, was soviel wie umarmen oder umfassen bedeutet [121]. Oft versucht der Mensch damit das Innere von Dingen zu beschreiben, die in ihrem Inneren multikausale Netzwerke entwickeln, die der Mensch schwierig erfassen und durchschauen kann [38]. Manche Autoren meinen, dass das eingeschränkte Verständnis von Systemen eine Eigenschaft der Komplexität ist. Projiziert man das auf den Menschen, so spricht man auch von begrenzter Rationalität, besser vielleicht begrenzter Wirklichkeitsaufnahme. [22]

Auf die Beschreibung des Begriffes Komplexität über die Auswahl und Zuordnungen von verschiedenen Eigenschaften wird noch ausführlich eingegangen. Doch zunächst seien hier einige einfache Definitionen gegeben, um einen Einstieg in das Verständnis der Komplexität zu erlauben.

Komplexität lässt sich z.B. vereinfacht definieren als ein vom System selbst erzeugter Überschuss an Möglichkeiten [114]. Andere beschreiben Komplexität als den Logarithmus der Anzahl der Möglichkeiten eines Systems [10]. Manche Autoren meinen, dass Komplexität an Dynamik gekoppelt ist [18]. Andere sprechen bei Komplexität von Gradienten von Kennzeichen [89].

Weit verbreitet ist die Definition, dass Komplexität die Anzahl der Elemente und ihre Verknüpfungen ist [92, 22]. Komplexitätsforschung untersucht Systeme, die aus einer Vielzahl unabhängiger Agenten bestehen, die wiederum auf vielen verschiedenen Wegen miteinander agieren [107]. Dabei werden die beiden Komponenten auf eine bestimmte Art verknüpft, wie z.B. Komplexität = Kompliziertheit × Interdependenz. Innerhalb dieser Definition gibt es verschiedene Unterformen von Komplexität, z.B. ergibt sich Komplexität aus der Anzahl der Komponenten und ihren Verbindungen. Bei der Strukturkomplexität dominiert die Anzahl der Komponenten, bei der Prozesskomplexität dominiert die Anzahl der Verbindungen [22].

Die verschiedenen Zugänge zu dem Begriff Komplexität auf Grund der verschiedenen Fachgebiete werden im Folgenden anhand ausführlicherer Beschreibungen des Begriffes Komplexität verdeutlicht. Um aber Komplexität oder komplexe Systeme beschreiben zu können, muss man zunächst eine Einteilung der Ebenen in komplexe Systeme vornehmen. Solche Ebenen können sein: [94]

- Soziale Strukturen als Bestandteil des Ökosystems,
- Menschen als Bestandteil einer sozialen Struktur,
- Zellen als Bestandteil eines Menschen,
- Moleküle als Bestandteil von Zellen,
- Atome als Bestandteil von Molekülen.

Die Einteilung komplexer Systeme in Elemente richtet sich in der Regel nach der Fragestellung. Dazu werden charakteristische Längen- und Raumskalen verwendet. Die hierbei hervortretenden Freiheitsgrade sind die aktiven oder relevanten Freiheitsgrade. Freiheitsgrade, die nicht in die gewählten charakteristischen Skalen fallen, sind so genannte irrelevante Freiheitsgrade. Tab. 1 nennt solche relevanten und irrelevanten Freiheitsgrade. Allerdings lassen sich die Skalen nicht vollständig voneinander entkoppeln. Vielmehr existieren immer Situationen, in denen aus irrelevanten Freiheitsgraden relevante Freiheitsgrade werden. Um nun eine Grundlage für die Auswahl der relevanten Freiheitsgrade, also der charakteristischen Längen- und Zeitskalen zu erhalten, gibt es die Möglichkeit der Trennung: Man schneidet das zu betrachtende komplexe System samt einem Teil der Umgebung des Systems aus der Umwelt heraus. Vergleicht man nun die Entwicklung eines solchen herausgeschnittenen Systems mit einem System, welches in der Umwelt verblieben ist, so kann man entweder eine identische Entwicklung feststellen oder Unterschiede wahrnehmen. Wenn keine Unterschiede

auftreten, so scheinen die gewählten Vereinfachungen die Lösung des zu betrachtenden Problems nicht zu behindern. [94]

Tab. 1: Freiheitsgrade für bestimmte Systeme [93]

System	Gehirn	Klimamodelle	Biologische Systeme	Verkehrsdynamik	Finanzmärkte
Relevante Freiheitsgrade	10^3-10^8	10^6-10^9	10^3-10^8	10^3-10^8	10^3-10^{10}
Irrelevante Freiheitsgrade	10^{25}-10^{27}	10^{45}-10^{52}	10^{30}-10^{40}	10^{30}-10^{40}	10^{40}-10^{52}
Charakteristische Zeitspanne der Relevanten [sek]	10^{-3}-10^9	10^0-10^{13}	10^1-10^{15}	10^0-10^7	10^0-10^8
Charakteristische Zeitspanne der Irrrelevanten [sek]	10^{-14}	10^{-14}	10^{-14}	10^{-14}	10^{-14}

In der Mathematik wird für Komplexität häufig die Definition von TURING verwendet. Dabei geht man davon aus, dass ein universeller Computer in der Lage ist, jedes vernünftig gestellte Problem zu lösen. Im Computer werden für die Lösung des Problems Algorithmen benötigt. Natürlich kann man ein und dasselbe Problem durch verschiedene Algorithmen lösen lassen. Es gibt aber einen Algorithmus, der die geringste Länge aufweist. Solch eine Länge kann man als ein Maß für die Komplexität eines Problems ansehen. Geht man weiter davon aus, dass hinter einem Problem immer auch ein zu beschreibendes System steht, so kann man also dadurch die Komplexität von Systemen beschreiben. [94]

Diese sehr elegante Definition hat allerdings einen Haken: Wie soll man den Algorithmus mit der minimalen Länge finden? Und noch schlimmer: Der Mathematiker KURT GÖDEL konnte beweisen, dass kein Verfahren existiert, um solche Algorithmen minimaler Länge zu entwickeln. Man kann also nur für Sonderfälle solche Algorithmen entfernen. [94]

Der Frage, warum klassische, also triviale, Konzepte bei der Beschreibung von komplexen Systemen versagen, kann man sich auf rein mathematischer Ebene nähern. Zunächst geht man davon aus, dass das Ziel der NEWTON'schen Mechanik die Beschreibung von Bahnkurven ist. Weiterhin soll gelten, dass anfänglich eng benachbarte Bahnkurven auch in der Zukunft nah beieinander liegen. Diese Annahme spielt eine wesentliche Rolle für die experimentelle Erschließung unserer Welt. Auch wenn man Verhältnisse nicht exakt simulieren kann, aber die Zustände sollen vergleichbar sein. Mathematische Untersuchungen zeigen nun, dass die Evolution solcher Bahnkurven durch so genannte LJAPUNOV-Exponenten kontrolliert wird. Kennt man also das Spektrum der LJAPUNOV-Exponenten, kann man die Entwicklung von Bahnkurven charakterisieren. [94]

Die LJAPUNOV-Exponenten sind komplexe Zahlen. In Abhängigkeit vom Vorzeichen des Realteils der Zahlen ergeben sich gewisse qualitative Eigenschaften der Bahnkurve. So bleiben Bahnkurven benachbart, wenn alle Realanteile der Exponenten negativ bleiben. Existiert aber zumindest ein positiver Realanteil, dann beginnen die Kurven, sich voneinander zu entfernen. Wenn sich die Kurven voneinander entfernen, verlieren die Kurven ihre Ähnlichkeit und die Prognose einer Kurve durch eine andere Kurve wird unmöglich. Solch ein Verhalten bezeichnet man als Chaos. Winzigste Unterschiede in den Ausgangsbedingungen zweier Kurven führen zu qualitativ unterschiedlichem Verhalten. Es schließt sich aber die Frage an, ob solche positiven LJAPUNOV-Exponenten überhaupt existieren. Die Invarianz mechanischer Gleichungen führt leider zu der Konsequenz, dass in jedem mechanisch reversiblen System zu jedem LJAPUNOV-Exponenten ein LJAPUNOV-Exponent mit entgegengesetztem Vorzeichen existiert. Das bedeutet, in jedem mechanischen System, in dem Wechselwirkungen zwischen Partikeln oder Elementen vorhanden sind, ist die Entwicklung eines chaotischen Verhaltens möglich. Das heißt, einfache triviale Systeme existieren überhaupt nicht. Diese Systeme zeichnen sich höchstens durch eine geschickte Modellbildung aus und besitzen vermutlich eine geringere Verknüpfung mit der Umwelt. [94]

Auch andere Autoren [118] beschreiben die Komplexität eines Problems als den geringsten möglichen Aufwand, der mit irgendeinem Algorithmus dafür erreicht werden kann. Dabei unterscheiden sie:

- Logarithmische Komplexität,
- Lineare Komplexität,
- Quadratische Komplexität,
- Exponentielle Komplexität.

Systeme, für deren Beschreibung der Algorithmus genauso lang ist, wie das System, sind praktisch unbestimmt. Die Frage ist allerdings, wann die Unbestimmtheit beginnt. Darf das Programm z.B. etwas kleiner als das System sein oder ist praktische Beschreibung erst möglich, wenn deutlich kleinere Programme (z.B. einige Zehnerpotenzen) das System beschreiben können. [10]

Die bisher vorgestellte Behandlung der Komplexität war sehr stark mit der Mathematik verbunden. Im Bereich der Biologie hat sich eine andere Sichtweise entwickelt, wie die nächsten Definitionen der Komplexität zeigen werden.

Zunächst geht man davon aus, dass Komplexität Formen von Ordnung enthält [89]. Wenn also Unbestimmtheit und damit Unordnung Komplexität ist, so zeigt sich hier eine deutlich andere Herangehensweise. Diese Entwicklung von Ordnungen hängt zusammen mit der Überschreitung der Verbindungskapazität von komplexen Systemen. Diese Eigenschaft wird noch erläutert. Die Überschreitung der Verbindungskapazität erfordert aber die Entwicklung von Viel-

schichtigkeit und Organisationsebenen, die diesen Nachteil kompensieren müssen. [85]

Weiterhin geht man davon aus, dass komplexe Systeme Entropie exportieren müssen, um eine Ordnung aufrechterhalten zu können (Abb. 34). Diese Eigenschaft wurde bereits im Kapitel Ordnungen und Unordnungen und im Kapitel System erwähnt. Man kann das sehr schön zusammenfassen: Komplexe Systeme brauchen „Futter“. [89] Der Energieumsatz selbst kann als Komplexitätsmaß gelten: Biologische Systeme sind umso komplexer, je mehr Energie sie umsetzen. Man kann hierbei die höhere Stoffwechselrate bei Säugetieren mit der von Reptilien vergleichen. Die konstante Körpertemperatur erlaubt die wetterunabhängige Bewegung des Organismus und erfordert Mechanismen, die zu höherer Komplexität führen. Energieangaben für verschiedene Systeme finden sich in Tab. 2. Ein weiterer Komplexitätsindikator ist die Anzahl verschiedener Zelltypen innerhalb eines Organismus. Damit wird eine Vorstellung über den Umfang verschiedener Funktionen innerhalb des Systems gegeben. Dies passt sehr gut zu einer der vorangegangenen Definitionen, die den Begriff der Möglichkeiten integrierte. Solche Ausdifferenzierungen findet man z.B. beim Aufbau der Wirbelsäule von den Fischen bis zu den Säugetieren.

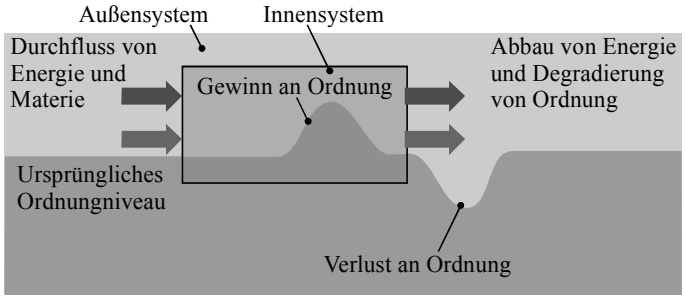


Abb. 34: Entropieexport eines komplexen Systems [89]

Zeitliche Evolution, wie hier die Weiterentwicklung der Wirbelsäule, ist ein Merkmal komplexer Strukturen [94]. Viele Systeme differenzieren sich mit der Zeit immer weiter aus. Dieser Prozess heißt Schismogenese. Um solche Differenzierungen durchzuführen, muss den komplexen Systemen Energie und Materie zugeführt werden [94]. Komplexität in diesem Sinne heißt auch Selektionszwang. [114] Es scheint generell so, dass evolutionäre Systeme Komplexität entwickeln. Biologische Systeme oder Strategien werden zunehmend komplexer. Die Komplexität hat aber auch einen Preis: Die Systeme werden anfälliger gegen Auflösungserscheinungen [60]. Darüber lässt sich allerdings streiten.

Tab. 2: Energieverbrauch für verschiedene Systeme

	(1 Wh = 3,6 kJoule, 1 Joule pro Sekunde = 1 Watt)
Gehirnenergieverbrauch	20 % des gesamten Körperenergieverbrauchs = 10…25 Watt pro Stunde = 36…90 k Joule pro Stunde
Weltenergieverbrauch	118×10^{15} Watt
Größte Wasserstoffbombe	$2{,}1 \times 10^{17}$ Watt
Tropischer Wirbelsturm	1×10^{14} Watt für zwei Wochen
Trägerrakete	1×10^{10} Watt für einige Sekunden
Jahresenergieempfang von der Sonne	180×10^{10} Watt (Joule pro Sekunde)
Sonnenproduktion	$3{,}8 \times 10^{26}$ Joule = $3{,}8 \times 10^{26}$ Watt
Supernova	10^{44} Joule
Universum	10^{46} Joule

Der Transport von Informationen durch ein System scheint für die Bildung von komplexen Strukturen ebenfalls notwendig zu sein [21]. So ist die Fähigkeit zur Informationsbewahrung und -verarbeitung aus biologischer Sicht ein wichtiges Komplexitätsmerkmal [60]. Die genetische Information des menschlichen Zellkerns, einem komplexen System, beträgt 10^9 Bits Informationen. Die biologische Informationsmenge eines Menschen beträgt übrigens 10^{28} Bit [89]. Der menschliche Geist produziert aber allein pro Jahr ca. 10^{18} Bits an Information. Wählt man anstelle der Einheit Bits die Anzahl der Wörter, so kann ein durchschnittlicher Leser 240 Wörter pro Minute in einem Druckmedium und ca. 200 Wörter pro Minute an einem Computer erfassen. Manche Wissenschaftler lesen 250 bis 350 wissenschaftliche Artikel im Jahr [67]. Dem stehen allerdings in vielen Fachgebieten mehrere zehntausend veröffentlichte Fachartikel pro Jahr gegenüber. Im Jahre 2004 erschienen allein im deutschsprachigen Raum 74.000 Bucherstausgaben. Die Anzahl der weltweit bisher erschienen Buchtitel liegt bei etwa 100 Millionen [122]. Die Verdopplungsgeschwindigkeit der Anzahl der Bücher liegt zwischen 10 und 20 Jahren. Das entspricht etwa einem exponentiellen Wachstum von 3,5 % pro Jahr, und das seit dem 17. Jahrhundert. [81] Noch rasanter aber nehmen Informationen durch die Nutzung von Computern zu. Allein im Jahre 2006 wurden weltweit 3 bis 5 Exabit ($3\text{-}5 \cdot 10^{18}$ Bits) Daten erzeugt und gespeichert, der überwiegende Anteil davon in digitaler Form. Dabei handelt es sich um Daten aus allen Bereichen des menschlichen Lebens, z.B. Überwachungsdaten, meistens automatisch erfasst, Daten bei der Bezahlung mit Kreditkarten, bei der Benutzung des Telefons und so weiter. Man vermutet, dass in den nächsten drei Jahren genauso viele Daten generiert werden, wie in der gesamten menschlichen Entwicklung zuvor. [50]

Damit ist die biologische Evolution von der Informationsmenge her betrachtet weiter hinter der geistigen Evolution zurückgeblieben [10]. Menschen sind also LAMARCK'sche Wesen: Frieren Menschen, so brauchen sie nicht mehr einige Generationen zu warten, bis sich ein Fell entwickelt hat, sie schneidern sich eine Jacke oder starten die Heizung, weil die Informationsaufnahme und -verarbeitung

im Gehirn deutlich schneller erfolgt als im biologische Informationssystem der Gene.

Aber auch bei den Genen gibt es unterschiedliche Informationsbewahrungssysteme. So hängt die Mutationsrate in Genen vom jeweiligen Organismus, der Länge des Genoms und der Zellteilungsrate ab. Bei primitiven Bakteriophagen tritt bei jeder 4.000 Base ein Fehler auf. Beim menschlichen Genom wird dieser Wert weit unterschritten. Das menschliche Genom besitzt etwa 10^{10} Basenpaare. Man schätzt, dass pro Jahr ca. 15 Basenpaaraustausche stattfinden. Das entspricht einer Genauigkeit von 1: 10^9. Dieser Wert kann nur durch hocheffiziente, komplexe Reparaturmechanismen erreicht werden, über die Bakterien z.B. nicht verfügen. Komplexe Systeme sind also in der Lage, Informationen zu gewinnen und zu bewahren. [10]

Um nun in dieser Vielfalt an Definition noch eine gewissen Ordnung zu finden, hat man in der Biologie Komplexitätsgrade eingeführt. Man wird später sehen, dass das nicht die einzigen Komplexitätsgrade sind. Die Komplexitätsgrade hier sind subkritische, kritische und fundamentale Komplexität (Tab. 3). [10]

Tab. 3: Systeme mit subkritischer, kritischer und fundamentaler Komplexität [10]

System	Ansteigende Komplexität		
	Subkritische	Kritische	Fundamentale
Mathematik			
Axiomatik	NEWTON'sche	quantenmechanische	GÖDEL'sche [1]
Programme	klein	Groß (kann aber alle Informationen bearbeiten)	Größe Programm = Größe komplexes System
Modelle	Differenzen	Differentialrechnung (theoretisch lösbar, aber praktisch mit Schwierigkeiten verbunden)	BERNOULLI-Systeme Bäcker-Transformation

[1] KURT GÖDEL bewies den Unvollständigkeitssatz, der besagt, dass eine Klasse von Formeln nicht vollständig innerhalb des von den Formeln gebildeten Formelapparates bewiesen werden kann: „*Alle widerspruchsfreien axiomatischen Formulierungen der Zahlentheorie enthalten unentscheidbare Aussagen*." Das bedeutet, dass z.B. die Richtigkeit der Mathematik nicht mit den Mitteln der Mathematik bewiesen werden kann. Es gibt einige sehr schöne klassische Beispiele aus dem Bereich der Sprache (Epimenides-Paradox). So sagt ein Kreter: „*Alle Kreter sind Lügner*." Hier ist das Problem sehr leicht erkennbar, während eine solche Aussage in der Mathematik den meisten nur schwer verständlich erscheinen würde. Da das Problem der Beweisbarkeit nicht nur im Bereich der Mathematik (Prinicipia Mathematica) oder anderer Wissenschaften von Bedeutung ist, kann man GÖDEL's Ergebnis auch wie folgt formulieren: „*Beweisbarkeit ist nicht Wahrheit*." Prinzipielle Lösungen werden damit unmöglich. [10]

Theorie			
Allgemeine Naturgesetze	Einfaches Gesetz	Statistisches Gesetz	Gesetz, welches genauso groß wie die experimentelle Datenmenge ist.
Prognose	Nicht nötig	Im Prinzip möglich	Unmöglich
Physik			
Schwingungen	Harmonische	Interferenzen	Nicht auflösbare Schwingungsbänder
Hydrodynamik	Wärmeleitung	BÉNARD-Zellen	Turbulenz
Statistische Physik	Newtonsche		Ergodische
Physikalische Chemie	Gleichgewicht	Dissipative Strukturen	Chaos
Biologie			
Moleküle	Kleine	Makromoleküle	Wechselwirkungen von Makromolekülen
Zelle	Zellorganellen	Bakterien, Amöben	Biologisch nicht realisierbar, da fundamentale Komplexität zum Tod führt
Zellverband	Aggregat	Vielzeller (Hydra)	
Organ	Einheitliche Funktion	Einordnung in Organismus	
Komplexes Lebewesen	-	Dem Ökosystem gerade noch angepasst	
Nervensystem	-	Einfache Steuerungen, Instinkte	Zentrales Nervensystem mit Bewusstsein
Evolution			
Darwinismus	Ursuppe	Einzelne Arten	Gesamtes Biotop
Replikation von Nuklein.		Makromolekül mit Information	Informationsverlust
Systeme außerhalb der Naturwissenschaft			
Wissenschaft	Phänomenologie, Beschreibung	Theorien, Reproduktion	Finalisierung der Wissenschaft, Zerstörung des Objektes (Unschärferelation)
Philosophie	Einfache Logik, Einsichten	Systeme	Transzendentale Philosophie
Ästhetik	Einfache Reproduktion	Stil-Bildung	Kunst
Sprache		Einfache Mitteilung, formale Sprache	Sprachdichtung
Religion	Gefühle	Naturreligion, dogmatisierte Religion	Offene Religionen, Religionen, die Freiheit ermöglichen (z.B. frühes und spätes Christentum)
Historie	Chronik, Anekdoten	Geschichtsschreibung, historische Systeme	Offene Geschichte nach POPPER

Systeme besitzen dann eine subkritische Komplexität, wenn sie durch geschickte Anwendung mathematischer Verfahren in deterministische Systeme überführt werden können. Systeme, die eine kritische Komplexität besitzen, bilden Strukturen. Der Prognostizierbarkeit sind praktische, keine theoretischen Grenzen gesetzt. Systeme mit fundamentaler Komplexität haben trotz deterministischer Ausgangsbedingungen indeterminierte und chaotische Lösungen. Die Prognose solcher Systeme ist nicht nur praktisch, sondern grundsätzlich nicht möglich. Der Übergang von kritischer zu fundamentaler Komplexität ist in der Regel nur schwierig oder gar nicht erfassbar. [10]

In diesen Definitionen zeigt sich also wieder eine Verbindung zwischen Unbestimmtheit und Komplexität. Das war auch der Ausgangspunkt der Überlegungen. Während bei der letzten Definition das Chaos jedoch eine wichtige Rolle spielte, soll jetzt wieder auf die Zufälligkeit zurückgegriffen werden. Eine Abhängigkeit zwischen Komplexitätsgrad und Zufälligkeit zeigt Abb. 35. Diese Abbildung steht zunächst im Widerspruch zu der ursprünglichen Aussage, dass Zufälligkeit Komplexität entspricht. Betrachtet man aber die Grenzkurve zwischen analytischen Lösungen bzw. trivialen Systemen und organisierter Komplexität, also nichttrivialen Systemen, so erkennt man, dass eine Regressionskurve gerade durch diese beiden Bereiche etwa im 45° Winkel laufen würde. Das würde einer starken Abhängigkeit entsprechen. Die Frage, ob die Grenze zwischen unorganisierter Komplexität und organisierter Komplexität noch dazugerechnet werden sollte, muss hier offen bleiben.

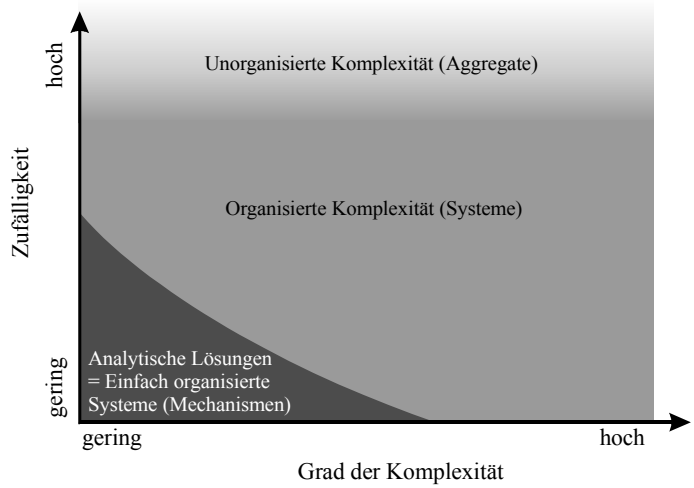


Abb. 35: Hierarchie der Systeme [117]

Umgangssprachlich ordnet man tatsächlich komplexe Strukturen zwischen vollkommen regelmäßigen und vollkommen zufälligen Strukturen ein. [21]

Bereits bei der kurzen Geschichte zur Relativität der Komplexität wurde eine Zuordnung verschiedener Arten von Komplexität zu verschiedenen Fachgebieten angedeutet. Abb. 36 zeigt diese Verknüpfung nun etwas deutlicher. Die Physik oder die Chemie befassen sich mit trivialen Systemen oder unorganisierter Komplexität. Je weiter die Fachrichtungen aber über die Biologie zur den Wissenschaften über den Menschen wandern, umso mehr behandeln diese Wissen-

schaften Systeme mit organisierter Komplexität. Im englischen Sprachraum spricht man auch von

- Alphawissenschaften (Geisteswissenschaften),
- Betawissenschaften (Naturwissenschaften) und
- Gammawissenschaften (Soziologie, Ökonomie).

Und je mehr sich die Fachgebiete mit Systemen mit organisierter Komplexität befassen, umso weniger spielen klare Kausalitätsbetrachtungen eine Rolle (Abb. 37). Die Systeme lassen sich auf Grund ihrer hohen Komplexität eben nicht mehr zerschneiden und im Labor prüfen. Gerade deshalb verstehen sich die Sozialwissenschaftler und Physiker kaum, weil sie auf Grund der untersuchten Probleme völlig verschiedene Herangehensweisen entwickelt haben.

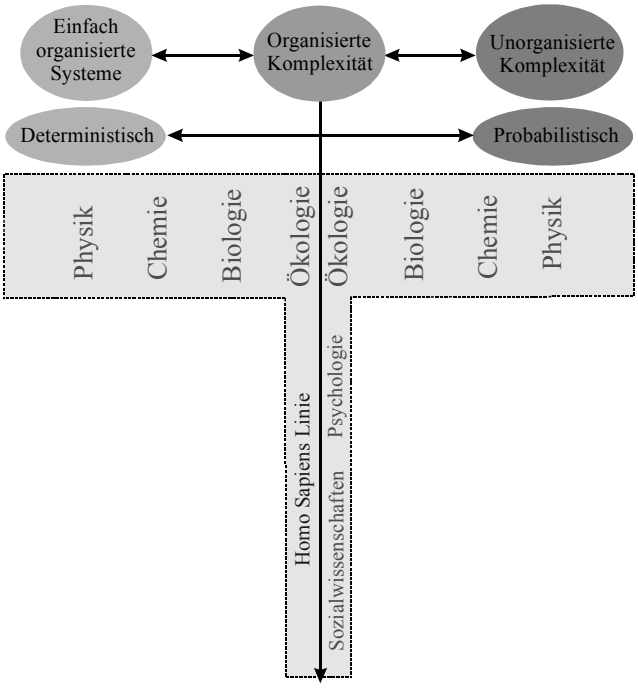


Abb. 36: Zuordnung von Fachgebieten und Komplexität. Die Homo Sapiens Linie beschreibt Wissenschaften, die sich mit dem Verhalten des Menschen befassen, wie z.B. die Ökonomie, die Sozialwissenschaften, Völkerkunde etc.

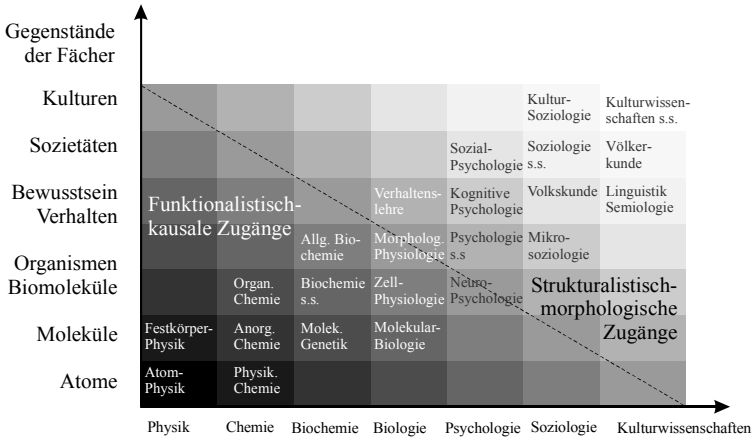


Abb. 37: Gruppierung von Fachgebieten nach der Komplexitätsebene ihres Gegenstandes. (s.s = sensu stricto = im strengeren Sinne) [89]

Dazu kommt, dass komplexe Systeme in verschiedenen Skalen agieren. Diese Form der Definition von komplexen Systemen wurde 1962 von SIMON eingeführt. Ein komplexes System kann also z.B. nicht allein über Längen- oder Raummaße angegeben werden. Andere Skalen, wie Zeit, Information, Energie sind notwendig. Weiterhin werden hier zwei verschiedene Arten der Komplexität unterschieden: Komplexität der Substanz und Komplexität der Muster. Die Frage der Komplexität der Substanz beschreibt die Konstruktionsregeln für die Entstehung von Mustern in Systemen mit einer großen Anzahl von Einzelelementen. Die Frage der Komplexität der Muster befasst sich mit der Multifunktionalität von Mustern oder Ordnungen in komplexen Systemen. Beide Bereiche beinhalten die Frage, warum aus einer Vielzahl möglicher Lösungen die eine Lösung gewählt wurde. [21]

Der Wissenschaftler PERROW beschreibt die Komplexität von Systemen als Grad der Interaktion in Zusammenhang mit dem Grad der Kopplung der einzelnen Elemente. Die Eigenschaften der Komplexität als Sonderfall der Interaktion (Tab. 4) und die Eigenschaften der Kopplung (Tab. 5) sind in Tabellen zusammengefasst. Deutlich sieht man bei dieser Behandlung der Komplexität die Herkunft aus dem Bereich der Betriebs- und Organisationsplanung. Am deutlichsten wird das aber in Abb. 38. Hier sind verschiedene gesellschaftliche und technische Organisationen hinsichtlich der Kopplung und Interaktion eingetragen. Die hier gezeigten komplexen Systeme folgen aber einer der ursprünglichen Definitionen, nämlich einer hohen Anzahl an Elementen und umfangreichen Verknüpfungen.

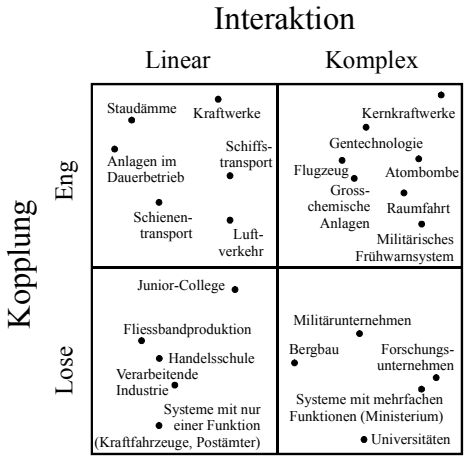


Abb. 38: Darstellung verschiedener Systeme in Abhängigkeit der Interaktion und dem Kopplungsgrad [70]

Tab. 4: Vergleich von komplexen und linearen Systemen [70]

Komplexe Systeme	Lineare Systeme
Enge Nachbarschaft	Räumliche Trennung
Common-Mode-Verknüpfungen	Festgelegte Verknüpfungen
Verknüpfte Subsysteme	Getrennte Subsysteme
Eingeschränkte Substitutionsmöglichkeiten	Kaum eingeschränkte Substitutionsmöglichkeiten
Rückkopplungsschleifen	Wenig Rückkopplungsschleifen
Interagierende Kontrollinstrumente mit Mehrfachfunktionen	Unabhängige Kontrollinstrumente mit nur einer Funktion
Indirekte Informationen	Direkte Informationen
Beschränkte Kenntnis	Umfassende Kenntnis

Tab. 5: Vergleich von Systemen mit enger und loser Kopplung [70]

Enge Kopplung	Lose Kopplung
Keine Verzögerungen im Betriebsablauf möglich	Verzögerungen des Betriebsablaufes möglich
Unveränderbarkeit des Ablaufs	Ablauf veränderbar
Produktionsziel nur mit einer Methode realisierbar	Alternative Methoden möglich
Geringer Spielraum bei Betriebsstoffen, Ausrüstung und Personal	Mehr oder weniger großer Spielraum verfügbar
Puffer und Redundanzen konstruktiv vorgeplant	Puffer und Redundanzen durch zufällige Umstände verfügbar
Substitution von Betriebsstoffen, Ausrüstung und Personal begrenzt und vorgeplant	Substitution je nach Bedarf möglich

In der Soziologie hat man ebenfalls eigene Definitionen für die Komplexität geschaffen: [18]

- Komplexität wird zunächst wieder über die Anzahl der Elemente und Relationen beschrieben. Dieser Begriff lässt sich aber auch wieder auf den Begriff der Möglichkeiten und der Vielfalt zurückführen. [18]
- Komplexität wird durch die Überschreitung der Verknüpfungskapazität der Elemente definiert. Nicht mehr jedes Element kann mit jedem anderen Element in Kontakt stehen. Nimmt man z.B. die Bürger eines Landes, so kann nicht mehr jeder Bürger direkt mit jedem anderen Bürger kommunizieren. [18,85]
- Komplexität wird durch die Anzahl der Möglichkeiten definiert.
- Komplexität erfordert Dynamik und zeigt hohe Änderungsraten auf. [18] Allerdings gilt dies nicht zwangsläufig für gesellschaftliche Systeme: Eine hohe Veränderungsgeschwindigkeit schädigt soziale Systeme. Aber die alleinige Nennung der Anzahl der Elemente und der Verknüpfungen wird nicht als ausreichend betrachtet. [18]
- Komplexität bedeutet Intransparenz. Ein komplexes System kann nicht vollständig beschrieben werden, in anderen Worten: Unbestimmtheit ist Teil des Verhaltens eines komplexen Systems. Komplexe Systeme, die versuchen sich selbst zu beschreiben und sich an ihrer eigenen Komplexität orientieren, nennt man hyperkomplexe Systeme [18, 114]. Es handelt sich hierbei um Menschen oder menschliche Gesellschaften. Solche selbstreferentiellen Systeme müssen unscharfe Bilder über sich selbst haben. Die vollständige Beschreibung des Verhaltens solcher Systeme wird ausgeschlossen [18]: „*Im Allgemeinen assoziieren wir Komplexität mit allem, was schwierig zu verstehen ist*." [19] . Eine weitere wesentliche Antwort auf diese Frage in Bezug auf die Modellierung der Welt lautet, dass für komplexe Systeme kein geschlossenes Modell entwickelt werden kann. Vielmehr können eine Vielzahl verschiedener Modelle für verschiedene Fragestellungen entworfen werden. Das dürfte aber in letzter Konsequenz bedeuten, dass die Anzahl der Modelle eines komplexen Systems unendlich ist. Dann aber ist die allumfassende Beschreibung unmöglich. Damit wird der LAPLACE'sche Dämon zum wiederholten Mal verdammt. Der LAPLACE'sche Dämon ist ein Geist, der alle Gesetze dieser Welt und alle Ausgangswerte besitzt. Er müsste nach LAPLACE in der Lage sein, die Welt bis in alle Ewigkeit vorhersagen zu können. Der LAPLACE'sche Dämon ist ein geistiges Kind der Erfolge des NEWTON'schen Weltbildes [71] . Aber das NEWTON'sche Weltbild hat eben Grenzen. Eine einfache Begründung wäre, weil es neben der materiellen Welt eine funktionale Welt gibt [71] . Man könnte auch von der Begrenztheit der Naturgesetze sprechen. [109]

Komplexe Systeme können sich in verschiedenen Zuständen befinden. Prinzipiell befinden sich komplexe Systeme nicht im Gleichgewicht, sondern in einem dynamischen Ungleichgewicht. Das Verhalten realer komplexer Strukturen kann deshalb über Bereiche indifferent, stabil und labil sein (Abb. 39). Aus diesen drei Bereichen können ganze Verhaltenslandschaften von komplexen Systemen entstehen (Abb. 40). Man sieht in der Abbildung, dass die Kugel zwar prinzipiell den Abhang hinunterrollen will, aber es doch immer wieder die Möglichkeit gibt, dass die Kugel hängen bleibt. Die Prognose, wie sich die Kugel verhalten wird, ist schwierig und hängt von den Flug- und Rolleigenschaften der Kugel ab. In vielen Bereichen wird man den Weg der Kugel bestimmen können, in anderen kommt die Unbestimmtheit des Verhaltens des komplexen Systems zum Tragen.

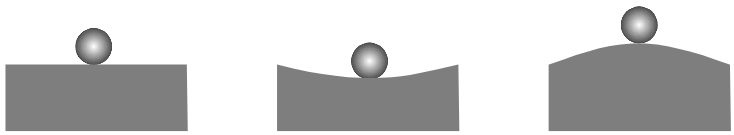


Abb. 39: Mögliche Zustände des komplexen Systems

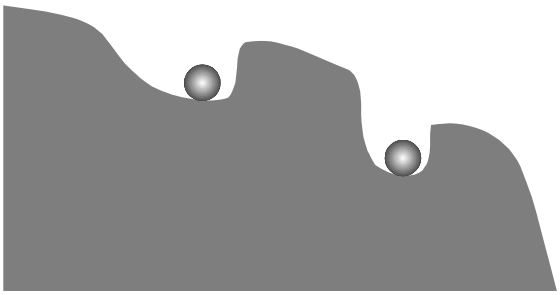


Abb. 40: Entwicklungsverlauf mit indifferenten, stabilen und labilen Bereichen

Um trotzdem mit komplexen Systemen interagieren zu können, verwenden Menschen komplexitätsreduzierende Maßnahmen, wie z.B. Modelle. Diese zeichnen sich dadurch aus, dass Abstraktionen eingeführt werden. Die Vereinfachung hängt von der Art der Komplexität ab. Hier wurden bereits die Prozess- und die Strukturkomplexität eingeführt. Abstraktion von Prozesskomplexität gestaltet sich jedoch schwieriger als die Vereinfachung von Strukturkomplexität. [22]

Neben Systemen können auch Handlungssituationen als komplex bezeichnet werden. Hier wird Komplexität als die Existenz vieler verschiedener, aber voneinander abhängiger Merkmale bezeichnet. In Abhängigkeit des Realitäts-

ausschnittes kann die Komplexität größer oder geringer ausfallen. Ein Realitätsausschnitt ist die Berücksichtigung nur eines Teiles der Umwelt im Modell. Je mehr Merkmale vorhanden sind und je höher die Verknüpfung zwischen diesen ist, umso komplexer ist die Situation. Ab einem bestimmten Komplexitätsgrad müssen komplexitätsreduzierende Maßnahmen ergriffen werden. Solche Maßnahmen sind Abstraktion, Gruppenbildung und Reduktion. [39]

Unter Abstraktion versteht man Entfernung unwesentlicher Merkmale bei einer bestimmten Fragestellung. Man unterscheidet hierbei relevante von unrelevanten Merkmalen. Innerhalb einer Untersuchung können solche Merkmale wandern. [39]

Unter Gruppenbildung versteht man die Einführung von Blöcken oder Elementen, die nicht weiter im Detail untersucht werden. Für Fragestellungen im Bereich der Soziologie betrachtet man Menschen als Elemente der Gesellschaft, wobei die Menschen als Systeme ohne weitere Subsysteme verstanden werden. Für einen Arzt dagegen besteht der Mensch sehr wohl aus einer Vielzahl von Subsystemen. Die Gruppen- oder Komplexbildung verringert also erheblich den Auflösungsgrad, gleichzeitig nimmt aber auch die Anzahl der Einzelelemente ab. Häufig geht die Komplexbildung mit der Reduktion von Merkmalen einher. [39]

Die Vernetzung der einzelnen Elemente lässt sich in der Regel nur schwierig vereinfachen. Ihre Aufhebung ist aber eins der wesentlichen Merkmale der Forschung. So ist die Abtrennung von Variablen und die Untersuchung möglichst nur einer Variablen ein wesentliches Kernelement der empirischen Wissenschaft. Tatsache ist jedoch, dass es kein System gibt, welches absolut entkoppelt werden kann. Neben der Schwierigkeit der Vernetzung besitzen komplexe Systeme Eigendynamik, dass heißt das System ist sowohl zeitabhängig als auch umweltabhängig. Die Einbettung in die Umwelt und die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Vernetzung bringt ein weiteres Problem mit sich: die Intransparenz. Viele innere Merkmale solcher Systeme sind gar nicht messbar oder nur verfälscht zu ermitteln. Das System ist also intransparent. Diese Eigenschaften führen dann wieder zu dem Ursprung unserer Diskussion: der Unbestimmtheit. [39]
Weitere Merkmale für kanonische komplexe Systeme sind: [6]

- Andauernde Neuigkeiten: Die Fähigkeit, den Beobachter immer wieder zu überraschen, unabhängig davon, wie lange dieser schon das System studiert.
- Hohe Belastbarkeit: Die Fähigkeit zur Selbstreparatur, anmutiger Alterung oder trotz Verletzung weiterzuleben und eben nicht zu sterben. [6]
- Auftauchen einer Ansammlung: Die Fähigkeit, ein Objekt zu bilden, welches aus einer Gruppe von Elementen besteht. [6]
- Formation von Individualität: Die Fähigkeit, trotz der Zugehörigkeit zu einer Klasse von Objekten oder Systemen individuelle Eigenschaften zu zeigen. [6]

- Interne Modelle: Die Fähigkeit, Modelle der Umwelt zu entwickeln und die Zukunft in einem gewissen Maße vorherzusagen. [6]
- Kein Nullsummenspiel: Die Fähigkeit, Erfolge nicht nur aus dem Verlust anderer Elemente zu gewinnen. [6]
- Eroberungskompromiss: Die Fähigkeit, eine Balance zwischen der Erhaltung des Systems und der Erschließung neuer Reserven und Fähigkeiten zu finden. [6]

Die vier Grundformen komplexer Ordnung in der Biologie sind Norm, Interdependenz, Hierarchie und Tradierung. [89]

- Norm bedeutet, dass einfache Elemente in einer sehr großen Anzahl, teilweise redundant, auftreten. Solche Massenelemente können z.B. Zellen in einem Menschen, Menschen in einer Gesellschaft, Computer im Internet, Gene in Chromosomen oder Lebewesen in einem Ökosystem sein. Wichtig ist, dass es sich aus der äußeren Sicht auf das zu untersuchende komplexe System um Elemente handelt, die stark vereinfacht werden können. Diese Massenbauteile finden sich über alle Dimensionen des Universums: Sprache, Moleküle, Lebendige Systeme besitzen Massenbauteile. [89]
- Interdependenz wurde bereits mehrmals als Merkmal komplexer Systeme genannt. Gemeint wird mit Interdependenz Wechselwirkung zwischen Elementen. In lebenden Organismen gibt es nur Elemente mit Wechselwirkung. Die Wechselwirkungen können auch dimensionsübergreifend sein, wie bereits angedeutet wurde: So kann eben ein Schmetterling ein Hochhaus beschädigen, wenn sein Flügelschlag einen Hurrikan auslöst. [89]
- Hierarchie umschreibt die Entwicklung von übergeordneten Strukturen. Der Aufbau des Menschen ist genau hierarchisch wie der Aufbau einer Galaxie. [89]
- Unter Tradierung versteht man die Bewahrung historischer Regeln und Strukturen. So ist Tradierung die Grundlage der Entstehung von Organismen. Der überwiegende Anteil von Informationen und Regeln wird von Generation zu Generation unverändert übernommen. Interessant sind in diesem Zusammenhang Atavismen oder Rudimente bei Menschen, wie z.B. Darwin-Höcker am Ohr, überzählige Brustwarzen oder Halsfisteln als Reste von Kiemenspalten. Noch deutlicher wird Tradierung bei der Embryonalentwicklung von Säugetieren. Aber auch in Kulturen finden sich Tradierungen (Kultur-Ethologie). Bei der Formgebung von Eisenbahnwagons im 19. Jahrhundert lehnte man sich stark an die Form der Postkutsche an. Elemente, wie geschwungene Kutschenfenster wurden lange bei Eisenbahnwaggons der 1. Klasse beibehalten. Ein zweites Beispiel ist die Halsberge, die Bestandteil der Ritterrüstung im Hochmittelalter war. Diese wurde in Form von Ringkragen bis zu symbolischen Ringkragen fortgeführt. Der Sinn der Tradierung ist relativ einfach verständlich. Man kann

zwar schnell Regeln zerschlagen, z.B. eine einfache Kultur durch einen Krieg vernichten. Der Aufbau einer neuen Kultur mit neuen Regeln erfordert jedoch Zeit. [89]

Komplexe Systeme sind sehr schwer zu erfassen. Zusammenhänge lassen sich eben nicht in einer kurzen Aufsichtsratssitzung oder in einer Talkshow ausreichend erläutern. Viele Forscher haben Jahre oder Jahrzehnte benötigt, um ein gewisses Verständnis für komplexe Systeme zu entwickeln. Heute ist es deshalb (LORENZ) „*viel pfiffiger an nette, einfache Tätigkeiten im Rahmen selbstregistrierender Automaten mit einem Maximum an Elektronik zu denken. Womit eine Fülle beeindruckender Daten gewonnen und noch eindrucksvollere mathematische Analysen vorgeführt werden können.*". Eben der Übergang zu den so genannten exakten Wissenschaften.

Der Übergang von den beschreibenden zu den exakten Wissenschaften hat alle Bereiche des gesellschaftlichen Lebens ergriffen [89]. Geblieben oder eher zugenommen hat der Eingriff in komplexe Systeme, ohne diese zu verstehen. Gerade diese Vorgehensweise wird durch die Wissenschaft legitimiert. Denn die Wissenschaft pickt sich nur allzu oft Details heraus, ohne das Gesamtverhalten zu verstehen. Das Übersehen von Wechselwirkungen, Phasenübergängen und rekursiver Kausalität ist zur schönen Gewohnheit geworden. [89]

Die Erlangung einer differenzierten Sicht auf die Welt, sorgsam in deren Komplexität einzudringen, Grenzen wahrzunehmen, sich der Welt anzupassen und eine gewissen Achtung gegenüber der Welt und ihren unerforschten Elementen zu bewahren, ist für den Umgang mit komplexen Systemen zwingend notwendig. Es scheint so, als ob eine solche Herangehensweise der heute üblichen überlegen ist. [89]

Als komplex werden „*Struktur- sowie Funktionszusammenhänge, gruppiert durch graduelle Abstufungen bestimmter Eigenschaften, gleich ob Naturdinge, Artefakte, Vorstellungs- oder Denkformen*" genannt. [89]

Weitere Eigenschaften komplexer Systeme sind, Agenten, Selbstorganisation, Emergence und Autokatalysmus.

Eine chemische Reaktion ist autokatalytisch, wenn die Endprodukte der Reaktion Katalysator für die Reaktion selbst sind. Solche Reaktionen sind schwer mit Kausalität in Übereinstimmung zu bringen. Erweitert man jedoch Kausalität nicht nur auf Raum und Zeit, sondern auch auf Ebenen und Skalen, dann kann man autokatalytische Reaktionen auch als kausal ansehen. Die Idee der Übertragung der Kausalität auf Skalen entstammt ARISTOTELES. Während in NEWTON's deterministischem Weltbild kein Platz für Unbestimmtheit existiert, kann das Model von ARISTOTELES damit umgehen. [109]

Bei der Beurteilung der Komplexität von Wirtschaftsystemen (Abb. 41) greift man meistens auf folgende Eigenschaften zurück [19]:

- Große Anzahl von Einzelelementen,

- Beträchtliche Interaktionen,
- Nichtlinearität,
- Asymmetrie,
- Nicht-holonome Zwangsbedingungen.

Für die Abbildung komplexer Wirtschaftsysteme existiert heute bereits eine Vielzahl verschiedener Programme [68]. Man unterscheidet in diesem Bereich auch zeitliche, organisatorische und kognitive Komplexität [27].

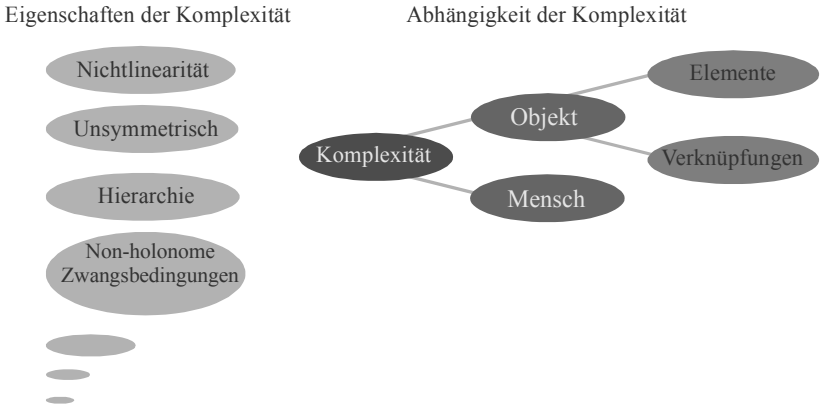


Abb. 41: Erfassung des Begriffes Komplexität in verschiedenen Ebenen [19]

Speziell zur Unterscheidung von komplizierten und komplexen Systemen seien die folgenden Abschnitte hilfreich.

In der linearen Weltanschauung wird ein kompliziertes System durch drei Dinge definiert:

- Das System wird verständlich, wenn man alle Einzelelemente des Systems kennt.
- Es besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung.
- Das Verhalten des Systems ist unabhängig vom Beobachter.

Im Gegensatz dazu stehen die komplexen Systeme der nichtlinearen Weltanschauung, für die mindestens eine der folgenden Eigenschaften gilt:

- Das System besitzt Eigenschaften, die sich nicht aus den Eigenschaften der Einzelsysteme ergeben. Dieses Wesen wird auch als holistisch bezeichnet. Der Satz, „*Das Ganze ist mehr als seine Teile und oft anders*." beschreibt diese Eigenschaft [71]. Als Beispiel sei das Gehirn genannt. Kein menschliches Neuron hat Bewusstsein, wohl aber das Gehirn. [60]
- Das System besitzt Anzeichen von chaotischem Verhalten – kleine Änderungen können große Auswirkungen hervorrufen.

- Einige Eigenschaften können nur subjektiv beurteilt werden. [47]

Oft wurde der Versuch unternommen, die Frage, warum das Ganze mehr als die Summe der Teile ist, zu beantworten. Die dabei teilweise gewonnene Antwort lautet: Diese emergenten Eigenschaften entstehen, weil die einzelnen Elemente neben ihren materiellen Eigenschaften auch funktionelle Eigenschaften besitzen, die erst aktiviert werden, wenn das Ganze verbunden wird. Diese Eigenschaft wurde bereits bei der Kritik des LAPLACE'schen Dämons genannt. [71]

Die Eigenschaft, dass das Ganze mehr als die Summe der Teile eines Systems ist, bezeichnet man auch als Emergenz. Dieser Begriff wurde 1875 von dem englischen Philosophen G.H. LEWES eingeführt. Er beschreibt das Auftreten neuer Eigenschaften bei der Entstehung komplexer Systeme. [75]

Tab. 6: Vergleich von komplexen und komplizierten Systemen [71]

Komplexes System	Kompliziertes System
Kein größtes Modell möglich	Größtes Modell möglich
Das Ganze ist mehr als die Summe der Teile	Das Ganze ist die Summe der Teile
Kausalitäten sind vielfältig und verflochten	Kausale Zusammenhänge sind klar
Gewöhnliche Elemente	Keine gewöhnlichen Elemente
Analyse ≠ Synthese	Analyse = Synthese
unteilbar	teilbar
Nicht berechenbar	Berechenbar

Einen weiteren Vergleich zwischen komplexen und komplizierten Systemen erlaubt Tab. 6.

Eine weitere Definition für Komplexität lautet: Eine Eigenschaft eines Systems, die die Beschreibung des Gesamtverhaltens des Systems selbst bei Informationsvollständigkeit der Einzelkomponenten und ihrer Wechselwirkungen begrenzt. Kompliziertheit ist dagegen nur ein Maß für die Anzahl der Einzelelemente, die in einem System verknüpft werden. [121]

Und trotz der Vielzahl verschiedener Eigenschaften hat die Natur ein System entwickelt, welches relativ erfolgreich mit komplexen Systemen umgeht:„*Unter allen Verrechnungsweisen, die der Struktur eines Gehirnes möglich sind, müssen sich jene durchgesetzt haben, die den Grundstrukturen dieser Welt am besten entsprechen*." [89]. Umso interessanter ist die Tatsache: „*Die Grundfunktion des menschlichen Gehirns ist die Reduktion von Komplexität*". [56]. Auf das Gehirn als ein sehr schönes Beispiel für ein komplexes System wird im Folgenden eingegangen (Abb. 42).

Das menschliche Gehirn besitzt etwa 10^{11}-10^{12} Elemente (Nervenzellen). Jedes dieser Elemente ist mit 100 bis 10.000 anderen Elementen verbunden. Die Elemente schalten ca. 1.000 mal pro Sekunde. Da nicht alle Elemente jede Sekunde aktiv sind, ist die Anzahl der Schaltoperationen im Gehirn nur eine Zehnerordnung größer als die Anzahl der Elemente: 10^{12}-10^{13} Schaltoperationen.

Man kann nun allein die Anzahl der Elemente mit anderen Systemen vergleichen: Flugzeuge besitzen 3 bis 5 Millionen Elemente. Moderne Prozessoren besitzen 20 bis 30 Millionen Elemente. Die Anzahl der Sterne in der Milchstraße und die Anzahl der Galaxien im Universum dürften die Anzahl der Nervenzellen im Gehirn erreichen.

Die Elemente des Gehirns lassen sich gemäß ihrer Aufgaben unterteilen: Elemente für die Gewinnung von Informationen (Sensoneuronen), Elemente für die Auswertung der Informationen (Interneuronen), Elemente für die Durchführung von Reaktionen (Motoneuronen). Die Anzahl der Elemente zur Auswertung der Informationen überwiegt deutlich.

Tab. 7: Eigenschaften des komplexen Systems Gehirn

Objekt	Anzahl bzw. Anzahl Elemente	Quelle
Sensoneuronen (Externe Verbindung)	10^7	[85]
Interneuronen (intern)	10^9-10^{11}	[85, 5]
Motoneuronen (Externe Verbindung)	10^6	[85]
Anzahl Verbindungen	10^{14}	[5]
Pentium IV	10^7	
Modernes Flugzeug	$4\text{-}5 \times 10^6$	[11]
Schaltoperationen per Neuron	10^3 pro Sekunde	[85]
Schaltoperationen pro Gehirn	10^{12}-10^{13} pro Sekunde	[85]
Verknüpfung pro Nervenzelle	100-10.000	[5]

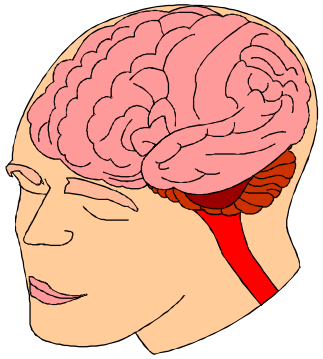


Abb. 42: Das Gehirn als komplexes System

Diese Eigenschaft ist eine wichtige Eigenschaft komplexer Systeme: Jedes ausreichend komplexe System wird sich abgrenzen. Das Gehirn wirbelt die Informationen aus der Umwelt auf vielfältigste Art und Weise durcheinander.

Ein Kind, das wächst, wird so komplex, dass es sich von seinen Eltern trennt. Dieser Abkopplungsprozess dauert beim Menschen viele Jahre. Auch Ver-

waltungen gehorchen dieser Regel. Eine Verwaltung mit mehreren Tausend Mitarbeitern wird in der Regel nicht mehr ihrer ursprünglichen Aufgabe folgen, sondern neue Aufgaben entwickeln und ursprüngliche Aufgaben vernachlässigen. Dieser Satz wird sicherlich auch für Computer gültig sein. Je komplexer die Rechentechnik wird, umso schwieriger wird ihr Verhalten zu prognostizieren sein. Das kann man schon heute erleben, wenn Computer abstürzen, weil sich zwei Programme „nicht vertragen". Im Rahmen eines Forschungsprojektes der Europäischen Union wurden numerische Unterschiede von Crashsimulationen an Parallelrechnern untersucht. Dabei zeigte sich, dass an identischen Rechnern mit identischen Programmen und identischen Rechenaufgaben teilweise deutliche Unterschiede in den Berechnungsergebnissen der Fahrzeugcrashsimulationen auftraten, weil während der Berechnung Ergebnisse in unterschiedlichen Speicherbereichen abgelegt wurden oder die Berechnung zwischen den Parallelprozessoren unterschiedlich ablief.

Um nicht erst anhand der Entwicklung eines Systems zu erkennen, ob es sich um ein komplexes System handelt, entwickelte man Komplexitätsmaße. Bereits die Anzahl der Elemente im Gehirn war ein einfaches Komplexitätsmaß. Auch die Anzahl der Verbindungen und die Anzahl der möglichen Zustände sind Komplexitätsmaße [19]. Tab. 8 nennt verschiedene Forderungen, die gute Komplexitätsmaße erfüllen sollten.

Tab. 8: Anforderungen an Komplexitätsmaße [86]

No.	Komplexitätsmaße sollten
1	unabhängig von der Art des Systems sein.
2	einen theoretischen Hintergrund besitzen.
3	verschiedene Komplexitätsebenen und Hierarchien berücksichtigen können.
4	stärker von der Verbindung zwischen Elementen als von der Anzahl der Elemente abhängen.
5	Sollen monoton steigen mit steigender Anzahl von Komplexitätseigenschaften
6	Übereinstimmen mit der intuitiven Idee der Komplexität besitzen.
7	nicht-isomorphe Systeme unterscheiden können.
8	nicht zu kompliziert sein.
9	für praktische Fälle anwendbar sein.

Maße für Komplexität existieren bei der Ermittlung von Informationsmengen von äquidistanten eindimensionalen Zeichenreihen [125]. Die Werte der Zeichen sind dabei vorher in der Regel in Form einen Alphabets festgelegt, z.B. als binäre Zeichen (0 und 1), als genetisches Alphabet oder als Textalphabet einer Sprache.

Die Berechnung der Information und Komplexität von Wörtern erfolgt über Teilsequenzen mit der Länge L (Abb. 43). Diese werden über die komplette Zeichenreihe geschoben. Von diesen Wörtern mit der L können dann die Auftretenswahrscheinlichkeiten ermittelt werden $p_{L,i}$. [125]. Weitere Variablen sind in Tab. 9 aufgelistet.

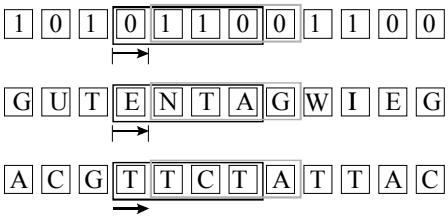


Abb. 43: Beispiel für eine Komplexitätsmessung

Tab. 9: Bedeutung der Variablen

Variable	Bedeutung
L	Wortlänge
i	Index des Wortes, i-tes Wort mit der Länge L
λ	Anzahl der Symbole eines Alphabetes
n	Anzahl der verschiedenen L-Wörter, maximal λ^L
p_i, $p_{L,i}$	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des i-ten L-Wortes
$p_{L,ij}$	Wahrscheinlichkeit für das gleichzeitige Auftreten des i-ten und j-ten L-Wortes. Das j-te L-Wort ist ein auf das i-te L-Wort folgendes Wort, wobei die Worte überlappen. Die beiden Worte haben L-1 Zeichen gemeinsam.
p_i, $p_{L,i\rightarrow j}$	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des j-ten L-Wortes nachdem vorher ein i-tes L-Wort aufgetreten ist.

SHANNON hat 1948 ein Maß für die Unvorhersagbarkeit von Nachrichten bzw. Informationen entwickelt, SHANNON's Entropie. Prinzipiell bedeutet SHANNON's Maß, dass je informationsreicher eine Nachricht ist, sie umso unvorhersagbarer ist. [125]

Dieser Begriff wird kurz erläutert. Man betrachtet die Informationsmenge unabhängig von der Bedeutung allein über die Anzahl der Zeichenelemente. Dazu muss zunächst ermittelt werden, wie viel Information in einem Zeichen steckt: $N = 2^i$. Hinter dieser Formel verbirgt sich die Wiederholung der Frage: Ist das Zeichen in der oberen Hälfte des Alphabetes oder in der unteren Hälfte? Die Formel beschreibt die geringste Anzahl solcher Fragen zur Ermittlung des Zeichens. Nun logarithmiert man die Formel, damit man I, also die Informationsmenge erhalten kann: $I = \log_2 N = \log_2(1/p)$, wobei N die Anzahl aller Zeichen und p die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Zeichens ist. In diesem Fall sei die Wahrscheinlichkeit für alle Zeichen gleich, was aber beim Alphabet nicht der Fall ist (Tab. 10). [20, 26]

Berücksichtigt man die unterschiedlichen Wahrscheinlichkeiten, so ergibt sich die Informationsmenge zeichenabhängig $I(z_i) = \log_2(1/p_i) = -\log_2 p_i$. Das bedeutet, dass unwahrscheinliche oder seltene Zeichen mehr Informationen enthalten als häufige Zeichen. Anders ausgedrückt ist der Informationsgehalt proportional zur Überraschung. Im Folgenden soll nun der Mittelwert der Informati-

onsmenge eines Alphabetes bestimmt werden. Dieser Wert wird ermittelt durch die Aufsummierung des Informationsgehaltes jedes Buchstabens multipliziert mit der Auftretenswahrscheinlichkeit des Buchstabens:

$$H = \sum_{i=1}^{N} p_i \cdot I(p_i) = -\sum_{i=1}^{N} p_i \cdot \log_2 p_i .$$

Tab. 10: Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Buchstabens

Zeichen	p_i
Leerzeichen	0,151
E	0,147
N	0,088
R	0,068
I	0,063
…	
Y	0,000173
Q	0,000142
X	0,000129

Das Produkt aus H und der Anzahl der Zeichen Z entspricht der Mindestmenge an Bits, um diese Zeichen zu übertragen. [20, 26]

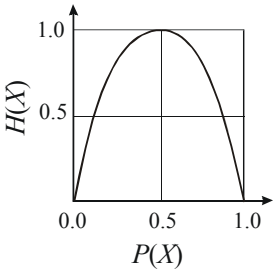


Abb. 44: Entropie in Abhängigkeit von der Wahrscheinlichkeit [121]

Bei einem sicheren oder einem unmöglichen Ereignis oder Zeichen ist die Entropie 0. Bei einem Zeichen, welches mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % auftritt, ist die Entropie 1. Der Verlauf der Entropie über die Wahrscheinlichkeit wird in Abb. 44 gezeigt. Ein einfaches Beispiel wäre das Ziehen einer Kugel aus einer Urne, in der Kugeln mit zwei verschiedenen Farben in der jeweils gleichen Anzahl liegen: $H = -0{,}5 \cdot \log_2 0{,}5 = -0{,}5 \cdot -1 = 0{,}5$. Die Anzahl der Kugeln kann aber auch ungleich sein. Im nächsten Beispiel liegen 99 weiße und 1 rote Kugel in der Urne. So ergibt sich $H = -0{,}99 \cdot \log_2 0{,}99 = -0{,}99 \cdot -0{,}1449957 = 0{,}01435$ für die weißen und $H = -0{,}01 \cdot \log_2 0{,}01 = -0{,}01 \cdot -6{,}6438 = 0{,}066438$ für die rote Kugel(n). Bei beiden Werten handelt es sich um relativ sichere bzw. relativ unsichere Ereignisse. Die Gesamtzufallsmenge ist dann kleiner als 1.

Bei einem Zufallsereignis mit mehreren Möglichkeiten kann die Entropie größer als 1 werden. Bei einem Würfel gibt es acht verschiedene Möglichkeiten. Dafür erhält man: $H = -0{,}125 \cdot \log_2 0{,}125 = 0{,}375$. Das ergibt eine Gesamtentropie von 3 ($8 \times 0{,}375$). Weitere Beispiele sind in Tab. 11 aufgelistet.

Tab. 11: Entropie in Abhängigkeit von der Wahrscheinlichkeit

Wahrscheinlichkeit	Einzelentropie
0,50	0,500
0,33	0,528
0,25	0,500
0,20	0,375

Da der Begriff Entropie verwendet wurde, stellt man sich automatisch die Frage, ob ein Zusammenhang mit der thermodynamischen Entropie besteht. In der Tat kann man Information und Thermodynamik verknüpfen: Eine Entropieerhöhung von $0{,}957 \cdot 10^{-23}$ JK^{-1} entspricht einem Bit Information. [20, 26]

SHANNON's Entropie kann normiert werden, so dass sie nicht mehr mit der Länge der Worte wächst. Diese Entropie nennt man metrische Entropie [125]. Die metrische Entropie ist null bei konstanten Folgen (nur ein Zeichen) und eins bei Zeichenfolgen mit gleichverteilter Zeichenhäufigkeit.

Eine Wichtung seltener oder häufiger Wörter kann durch die RÉNYI-Entropie erreicht werden [125]. Der mittlere Informationsgewinn, ein weiteres Entropiemaß, beschreibt die Kenntnis des auf ein Wort folgenden Symbols [125]. Der Begriff soll anhand eines Beispieles erläutert werden. Auf die Zeichenkette „INFO" wird mit großer Wahrscheinlichkeit ein „R" oder ein Leerzeichen folgen. Der Informationsgewinn für das nächste Zeichen ist also sehr gering. Wenn auf der anderen Seite die Zeichenkette „DIE _" lautet, so bestehen sehr viele Möglichkeiten für die Wahl des nächsten Zeichens und der Informationsgewinn ist sehr hoch. [125]

Basierend auf den bisher vorgestellten Maßzahlen zur Informationsmenge kann man Maßzahlen für die Komplexität von Informationen berechnen. Im Folgenden seien diese Maßzahlen kurz vorgestellt.

Die minimale Menge an Informationen, um eine optimale Vorhersage für das nächste Informationssymbol zu erreichen, kann mithilfe SHANNON's Entropie berechnet werden [125]: $C_{EM} \approx (L+1) \cdot H_S(L) - L \cdot H_S(L+1)$

Der mittlere Informationsgewinn wurde bereits eingeführt. Daneben existiert aber auch noch ein Informationsverlust, wenn z.B. das erste Zeichen eines *L*-Wortes beim Weiterwandern vergessen wird. Über einen gesamten Text heben sich Informationsgewinn und –verlust auf, jedoch die Schwankung darüber kann als Komplexitätsmaß verwendet werden [125].

Die RÉNYI-Komplexität stellt ebenso wie die Fluktuationskomplexität einen Wert zur Beurteilung der Dynamik dar. Im Gegensatz zu dieser ist sie jedoch sta-

biler. Die RÉNYI-Komplexität ergibt sich aus den Differenzen von RÉNYI-Entropien. [125]

Komplexität wird also als eine Eigenschaft definiert, viele Zustände oder Verhaltensweisen zu besitzen. Komplexität wird als Informationsmenge zur Beschreibung eines Systems und zur Auflösung der Unsicherheit in Verbindung mit dem System verstanden. In der Kybernetik wird Komplexität als Anzahl der möglichen Zustände des Systems ausgedrückt. Dieser Wert wird als Varietät bezeichnet. Diese berechnet sich bei *n* Anzahl der Elemente und *m* Anzahl der Beziehungen zu $V = m \cdot n \cdot (n-1)/2$ oder der Anzahl möglicher Zustände *z* je Element $V = z^n$. Im volkswirtschaftlichen Sinne wird Varietät auch im Sinne SHANNON's Entropie als $V = \log_2 n$ dargestellt. [96]

Volkswirtschaften können aber auch als Netzwerke verstanden werden. Solche Netzwerke bilden Gehirnzellen, das Internet, chemische Verbindungen oder Gene. Man spricht hier von topologischer Komplexität [4].

Erste Versuche zur quantitativen Beschreibung der Komplexität von Netzwerken aus Zellen, Organismen und Gesellschaften lassen sich bis in die 50er Jahre des 20. Jahrhunderts zurückverfolgen. Dabei wurde zunächst auf SHANNON's Entropie zurückgegriffen. Eine der ersten Ergebnisse dieser Untersuchungen, vor allem von RASHEWSKY, war der Ausschluss des Zufalls bei der Entstehung von Leben auf der Erde. Die Wahrscheinlichkeit für Leben ist einfach zu gering. Weitere Entwicklungen von Komplexitätswerten führten zur Kompositionskomplexität und zur topologischen Information, welche z.B. für chemische Elemente verwendet wurde. Bei letzterem wird die Anordnung von Elementen innerhalb eines Systems beurteilt. Für Kurven wurde weiterhin die kombinatorische Komplexität eingeführt. In der Mitte der 80er Jahre des 20. Jahrhundert entwickelte sich die Komplexitätstheorie als selbstständiges Feld. Innerhalb dieser Theorie wurden Verfahren entwickelt, um neue komplexe Strukturen, wie z.B. das Internet, Finanzmärkte oder Ökosysteme zu beschreiben. [4]

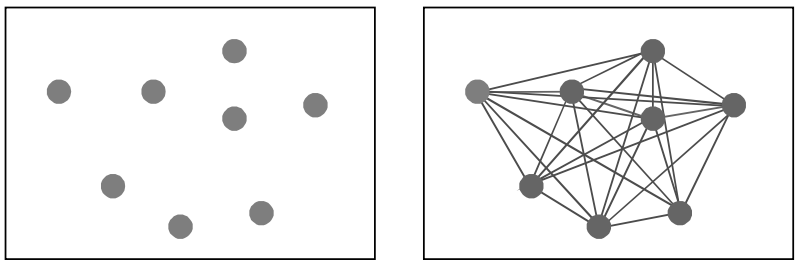


Abb. 45: Netzwerkbeschreibung [4]

Abb. 45 zeigt beispielhaft ein Netzwerk. Zunächst sind links nur die Elemente eingezeichnet. Hier erscheint das System noch überschaubar. Anschließend wurden die einzelnen Elemente gemäß ihren Abhängigkeiten verbunden. Das rechte Bild erscheint deutlich komplexer. [4]

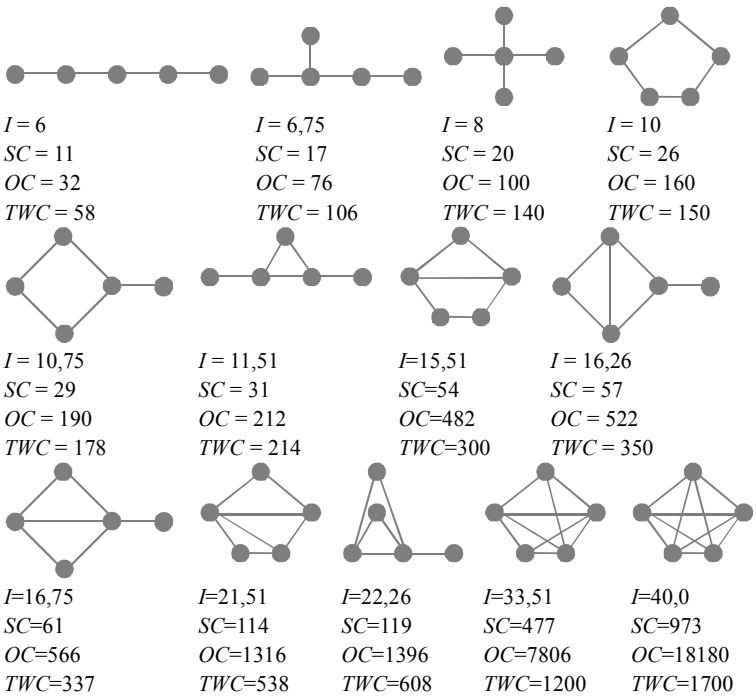


Abb. 46: 13 Beispiele für die Anordnung und Verbindung von fünf Punkten. Die Komplexität erhöht sich bei Schleifen stärker als mit der Anzahl der Verzweigungen. [4]

Die Frage ist nun, ob man die Komplexität von Netzwerken quantitativ, also durch Maßzahlen ausdrücken kann. Man spricht hier auch von magnitudebasiertem Informationsgehalt [4]. Abb. 46 zeigt 13 verschiedene Anordnungen von Elementen und Verbindungen. Für diese Netzwerke wurden anschließend verschiedene Netzwerk-Komplexitätsparameter ermittelt. Solche Parameter sind, ohne dass die Vorgehensweisen für die Berechnung hier gezeigt werden:

- Global Edge Complexity,
- Average Edge Complexity,

- Normalized Edge Complexity,
- Sub graph Count (*SC*),
- Overall connectivity (*OC*),
- Total Walk Count (*TWC*),
- A/D Index und
- Komplexitätsindex *B*.

Diese Komplexitätsparameter berücksichtigen die Abgrenzung und den Abstand, die Erreichbarkeit und die Verbindungsfähigkeit. Prinzipiell sind solche Netzwerke komplex, die eine hohe Verbindung von Eckpunkten und eine geringe Separation von Eckpunkten besitzen. [4] Es bleibt festzustellen, dass für die Beurteilung von Netzwerken Komplexitätsmaße vorliegen. [4]

Für die Beschreibung komplexer Systeme muss man diese modellieren. Hierbei stellt sich die Frage der Abtrennung des Systems von der Umwelt. Man hofft, dass sich das herausgetrennte System wie das Originalsystem verhält. Da aber im Kapitel Zeit darauf hingewiesen wurde, dass letztendlich alles irgendwie mit allem in Beziehung steht, kann man komplexe Systeme nicht aus der Umwelt herausreißen. Um die Welt zu modellieren, müsste man die gesamte Welt abbilden. Dazu benötigt man aber ein System, welches vermutlich sehr groß wäre, denn viele Informationen der Welt lassen sich nicht komprimieren, weil sie keine Regeln besitzen. Fazit: Allein die Definition von Komplexität scheitert an der Pluralität dieser Erscheinung. Es scheint sogar so, dass dieses Scheitern weniger mit den Grenzen der menschlichen Sprache, als vielmehr mit den objektiven Eigenschaften der uns umgebenden Welt begründet werden kann.

Was ist Kausalität?

„*Die Natur kommt nicht so sauber daher, wie wir sie uns theoretisch denken können*."

ALFRED NORTH WHITEHEAD [59]

Wenn Komplexität ein wesentlicher Bestandteil unseres Universums ist, und Komplexität tatsächlich Unbestimmtheit beinhaltet, ist damit die Grundidee der Prognostizierbarkeit, die Kausalität, verloren gegangen? Führen also Antecedensbedingungen (Ausgangsbedingungen) nicht zwangsläufig zu einem Explanadumereignis (Ergebnis) [104] ? Geht die Bestimmtheit der Welt verloren? Die Annahme, dass man die Welt vollständig bestimmen kann, bezeichnet man als Determinismus. Der Glaube an den Determinismus ist zum Wesentlichen auf den überwältigenden Erfolg der NEWTON'schen Mechanik, aber auch auf die ganz individuellen Erfahrungen jedes einzelnen Menschen zurückzuführen. Nur weil sich aus der Vergangenheit mittels Erfahrung Prognosen über die Zukunft aufstellen lassen, macht die Verarbeitung von Informationen Sinn und erbringt einen Gewinn.

Vereinfacht gesagt bedeutet Kausalität, dass Wunder ausgeschlossen werden, also etwas geschieht, für das es keinen Mechanismus gibt. Wunder bezeichnet man deshalb auch gern als Lücken in den Naturgesetzen. Tatsächlich aber sind solche Mechanismen und damit auch die Kausalität nicht zwangsläufig. Üblicherweise denkt man bei Kausalität an eine Ursache und eine Wirkung. Diese schöne und klare Formulierung lässt sich für reale Verhältnisse nicht aufrechterhalten. Die Wirklichkeit besitzt nämlich eine Vielzahl von Abhängigkeiten. Eigentlich ist sogar alles mit allem irgendwie verbunden, wie im Kapitel Zeit bereits festgestellt wurde. Damit verläuft das schöne Bild, dass *B* aus *A* folgt, denn *B* kann von vielen Faktoren abhängen. In Abb. 47 wird dieser Unterschied sehr einfach dargestellt. Links haben wir eine klare Abhängigkeit. Die Randbedingungen, quasi die Bühne (obere horizontale Linie), ist linear und beeinflusst in keiner Weise die Ursache. In der realen Welt aber ist die Bühne keine gerade Linie. Vielmehr gibt es Bereiche, wo die Linie gerade verläuft, in anderen zeigt die Linie eine Krümmung. Diese Krümmung entspricht nicht nur der Anzahl der Ursachen

(z.B. die Anzahl der Moleküle innerhalb eines Systems), sondern auch den Auswirkungen dieser Ursachen. Im rechten Bild haben solche kleinen Änderungen der Ursache große Auswirkungen. Hier ist die Bühne ein Kreis und keine Linie mehr. Die Aussage, wenn A_1 dann B_1, ist eigentlich nicht mehr aufrecht zu erhalten, weil man die Bühne kennen muss. POINCARÉ bezeichnete das als Zufall. Heute spricht man von chaotischem Verhalten. Tatsächlich ist ein solches System so komplex, dass wir Ursachen und Wirkungen nicht mehr klar erfassen können. Wir können also keinen Mechanismus entwerfen, und damit entgleitet uns die Kausalität.

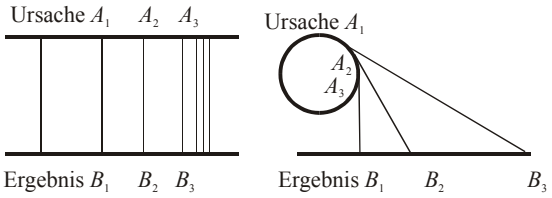
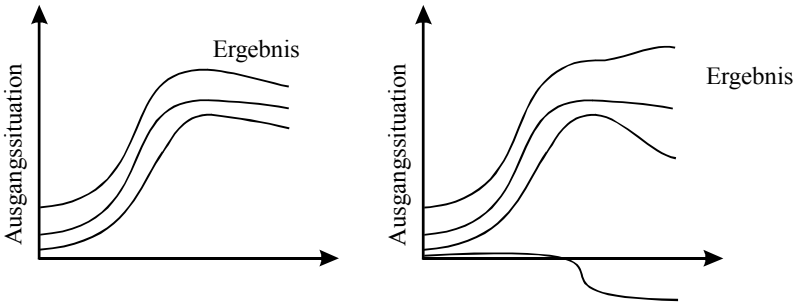


Abb. 47: klassische und sensible Systeme [12]



Ähnlichkeit, keine Sensibilität Keine Ähnlichkeit, hohe Sensibilität

Abb. 48: Klassische und sensible Systeme

Praktischerweise beschreibt man Kausalität als vorhandene Auswirkung einer Variablen bei Konstanthalten der übrigen Prädikatoren auf eine unabhängige Variable [44]. In der Wissenschaft werden Mechanismen nun dahingehend erforscht, indem man dieser Regel folgt. Leider kann man nur in den seltensten Fällen unter realen Bedingungen prüfen (dort kann man u.a. die anderen Faktoren nicht konstant halten). Deshalb prüft man an Ersatzsystemen, weil in der Regel gilt: „*Ähnliche Ursachen haben ähnliche Wirkungen*“ [79]. Abb. 48 zeigt dies beispielhaft. Wir können zwar nicht direkt die Ziellinie verfolgen, aber eine Ersatzlinie, die sich vergleichbar verhält (Abb. 48 links). Wenn aber eine kleine Änderung eine

große Auswirkung besitzt, wie kann man dann mit einer Ersatzlinie arbeiten? Antwort: Gar nicht. Allerdings zeigen nicht alle Systeme ständig solch ein Verhalten.

Der Streit, ob nun chaotische Systeme allein deterministisch sind, ist insofern falsch, weil diese Systeme nur ausreichend komplex sein müssen, um die Forderung der Stochastik zu erfüllen. Eine Definition für deterministische Prozesse lautet nach NEUNDORF: *„Sind voneinander relativ unabhängige Prozesse korreliert, so gelten diese als determiniert."* Hier wird unter Unabhängigkeit verstanden, dass sich die Prozesse nicht gegenseitig beeinflussen. Das heißt, innerhalb eines solchen Prozesses kann man aus der Vergangenheit die zukünftigen Zustände ermitteln. Und trotzdem gibt es eine Verbindung zwischen Prozessen, die in diesem Fall als Korrelation bezeichnet wird. Diese Verbindung ist die Zeit. Denn bei der Kausalität wird unterstellt, dass die Veränderung der unabhängigen Variablen zeitlich der Veränderung der abhängigen Variablen vorausgeht [44] . NEUNDORF dazu*: „Unter ganz bestimmten Voraussetzungen ist es erlaubt, die konkreten Prozesse durch einen einheitlichen Parameter namens Zeit zu ersetzen. Damit sind alle über die Zeit beschriebenen Prozesse determiniert."* [73] Wenn nur diese eine Verbindung zwischen den Prozessen existiert, dann kann man die Verbindung allein durch den Parameter Zeit darstellen.

Nach der Erfassung deterministischer Vorgänge kann man im Folgenden die Kausalität eingrenzen. Dazu noch einmal NEUNDORF: *„Eine Kausalreaktion mindestens zweier Systeme liegt vor, wenn eine spontane Veränderung des Wechselwirkungsverhaltens dieser Systeme nachweisbar ist, die darin besteht, dass die Wechselwirkungen zwischen diesen Systemen auftreten, die vor der Kausalbeziehung nicht bzw. in qualitativ oder quantitativ anderer Form bestanden. Potentielle Ursache und potentielle Wirkung müssen vor dem Eintreten einer Kausalreaktion unabhängig voneinander existieren und dürfen keine wesentliche Einheit bilden! ... Determinierte Prozesse führen dann – und zwar nur dann – auch zu determinierten Ergebnissen, wenn sie entweder nicht voneinander abhängig sind oder durch eine objektive Zeit synchronisiert werden. Das heißt Prozesse können determiniert sein, aber nicht Ergebnisse. Je mehr Prozesse von Kausalketten bestimmt werden, desto stärker sind solche Prozesse vom Zufall geprägt."* [73]

In diesen Zeilen zeigen sich die Grenzen des deterministischen Weltbildes sehr klar. Die Überlegungen seien noch einmal dargestellt: Es wurde festgestellt, dass Zeitprozesse determiniert sind. Aber eigentlich sind alle Prozesse zeitabhängig. Damit wären alle Prozesse determiniert, wenn denn eine objektive und unabhängige Zeit existiert. Diese Annahme lässt sich aber widerlegen. Alle Ereignisse stehen neben der Abhängigkeit der Zeit auch anderweitig in Wechselwirkungen. Damit ist die Zeit kein übergeordneter, besser überirdischer, Prozess, sondern besitzt Abhängigkeiten und Wechselwirkungen. Das heißt, die Stetigkeit und Determiniertheit von Prozessen verschwindet. Man kann aber die Zeitspanne so

wählen, dass die ursprüngliche Annahme der Kausalität wieder hergestellt wird: Also eine charakteristische Zeitspanne. Diese mag von verschiedenen Dingen abhängen, z.B. von den Größenverhältnissen, also den Skalen. Und genau an dieser Stelle kann man erklären, warum sich Elemente des Mikrokosmos, z.B. Quanten, aus unserer Sicht nicht deterministisch verhalten müssen: Sie besitzen eine andere charakteristische Zeitspanne: Die charakteristische Zeitspanne im Bereich des Atomkerns dürfte bei 10^{-20} Sekunden liegen, Menschen leben etwa 2×10^9 Sekunden und das Universum mag ein Alter von 3×10^{17} besitzen. Die Zeitverhältnisse lauten 10^{-29}:1:10^8. Diese Verhältnisse zeigen, wie stark sich die Mikrowelt den Grundlagen unseres Alltages entzieht [73]. Zusammenfassend kann man sagen, Determinismus setzt unveränderliche Abhängigkeiten, eine gewisse Form der Unabhängigkeit, voraus. Diese Unabhängigkeit kann aber niemals gewährleistet werden. Also muss man Zeit- oder Raumfenster schaffen, in denen die Unabhängigkeit existiert. Dann, und nur dann gelten der Determinismus und die Kausalität.

Und weiter: Wenn man unter Determiniertheit die eindeutige Bestimmung des Zustandes eines Systems durch seinen Anfangszustand versteht, dann besteht die Pflicht zur unendlich exakten Erfassung der Ausgangszustände. Das aber ist unmöglich. Man kann nicht alles kontrollieren: weil die Kontrolle das System selbst ändert! Damit wird es unmöglich, unverfälschte, sprich exakte, Eingangsgrößen zu ermitteln. Bei üblichen linearen Systemen mag das nicht von Bedeutung sein, aber das lineare Verhalten ist eben nur ein Sonderfall in der uns umgebenden Welt. Überwiegend verhält sich die Welt nichtlinear und hier können kleine Änderungen des Ausgangszustandes große Auswirkungen haben. Diese Änderungen mögen zunächst in einem stetigen, also deterministischen Prozess wachsen, werden aber zwangsläufig zu einem Ereignis und damit zur Akausalität führen. Da aber auch Prozesse von Ereignissen abhängen, werden früher oder später auch die Prozesse ihre Determiniertheit verlieren. Diese Erkenntnisse gelten nicht nur in der reinen Physik. Im Folgenden zeigt ein Zitat des Genforschers LEWIS THOMAS, das auch in anderen Fachgebieten diese Fragestellung auftritt: *„Angenommen, man will einen prominenten, besonders erfolgreichen Diplomaten klonieren... Dazu muss man ihm eine Zelle entnehmen. Dann muss man die Embryonalentwicklung abwarten und mindestens noch weitere 40 Jahre... Außerdem muss man seine Umwelt rekonstruieren, vielleicht bis ins letzte Detail. >Umwelt< ist ein Begriff, der praktisch >Mitmenschen< bedeutet, so dass man also sehr viel mehr Menschen klonieren muss als nur den Diplomaten selbst... Was das Wort Umwelt wirklich bedeutet, sind andere Menschen, ... die dichte Menge von nahestehenden Leuten, die einen Menschen ansprechen, ihm zuhören, ihn anlächeln oder finster anblicken, ihm geben oder vorenthalten, ihm heimlich oder offen stoßen, ihn liebkosen oder verdreschen. Unabhängig vom Informationsgehalt des Genoms haben diese Leute eine Menge mit der Formung des Cha-*

rakters zu tun. Ja, wenn man nur das Genom hätte und keine Leute drum herum, dann würde man nur ein bestimmtes Wirbeltier aufziehen, mehr nicht. Zunächst müsste man natürlich die Eltern klonieren... Deren Eltern natürlich auch... Die ganze Familie muss kloniert werden... Und die Mitmenschen aller Familienangehörigen. Man muss die ganze Welt klonieren, nicht weniger.“ [25]

Da wir die Einflüsse nicht kennen und niemals auf Grund der Komplexität des Systems kennen werden, müssen wir die gesamte Welt nachbauen, aber das übersteigt unsere Fähigkeiten. Offensichtlich ist Kausalität also in der Physik und der Genetik nicht umsetzbar. Wenn aber die Kausalität maßgeblich auf der NEWTON’schen Beschreibung des Sonnensystems basiert, lohnt sich die Frage, wie es mit der Kausalität dort steht.

Zunächst sei völlig willkürlich angenommen, dass im Sonnensystem 100.000 Körper (Sonne, Planeten, Monde, Planetoiden, Asteroiden etc.) vorhanden sind (Abb. 49). Um das Verhalten dieser Körper zu beschreiben, wären circa $10^{30.000}$ Gleichungen zu lösen. NEWTON vernachlässigte zunächst alle „kleinen Körper“. So benötigt man nur noch ca. 1.000 Gleichungen. Während der Zeit von ISAAK NEWTON war die Lösung einer solchen Menge Gleichungssysteme unmöglich. Deshalb musste NEWTON weitere Vereinfachungen finden. NEWTON verwendete weiterhin das Superpositionsprinzip. Die Körper konnten allein paarweise betrachtet werden: Mond und Erde, Erde und Sonne, Mars und Sonne etc. Dadurch konnte er die Anzahl der Gleichungen auf ca. 45 verringern. Da die Sonne die mit Abstand dominierende Masse im Sonnensystem ist, vernachlässigte NEWTON alle Gleichungen, die nicht die Sonne enthielten, z.B. Mond und Erde. Die noch existierenden wenigen Gleichungen wurden dadurch gelöst, dass NEWTON jetzt jede Gleichung für sich betrachtete. [117]

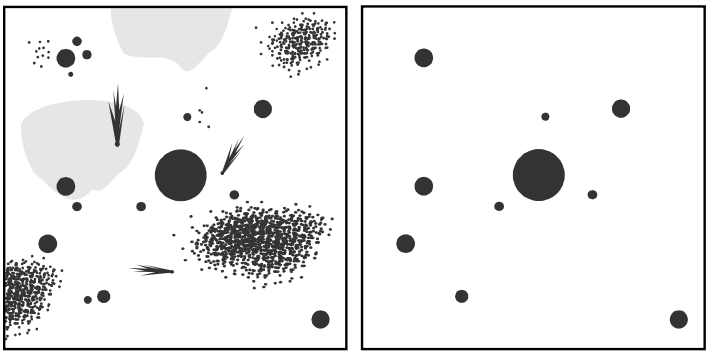


Abb. 49: Sonnensystem (links) und Sonnensystem nach NEWTON (rechts)

Die Lösung NEWTON's ist in der Tat korrekt, sie beschreibt aber nicht unser Sonnensystem. Dazu ein Zitat über den Astronomen SHOEMAKER, der sich mit der Entdeckung von Asteroiden befasste: *„In seiner Vorstellung war das Sonnensystem nicht der ewige, unveränderliche Mechanismus, den Isaac Newton gesehen hatte, sondern eher ein kosmisches Karnevalstreiben: eine dynamische, sich ständig verändernde Trümmerwolke, filigranartig durchsetzt mit Granatsplittern, voll von Materiebrocken, die zu Ellipsen und Schleifen geformt werden, außerdem lange, chaotisch schwingende Umlaufbahnen, auf denen überall Geschosse umherirren – Planetoiden, die hin und wieder auf einen Planeten aufprallen und eine starke Explosion verursachen. Shoemaker soll gesagt haben: Da draußen ist eine Herde von wilden Tieren."* [82]

Um also das Verhalten des Sonnensystems zu beschreiben, ist die Beobachtung und Beschreibung aller im Sonnensystem und auch in der Umgebung vorhandenen Körper notwendig. Denn es kann ja ein kleiner Asteroid einen größeren stoßen, der dann einen noch größeren stößt und der wiederum einen Planeten, was dann das ganze Sonnensystem durcheinander wirbelt. Das heißt, das geforderte konstant halten aller anderen Variablen bei der Untersuchung einer Abhängigkeit, also der Projektion eines *x* auf ein *y* ist praktisch unmöglich. Aber genau das hat NEWTON gemacht, indem er maßgeblich vereinfacht hat. Diese Vereinfachung funktioniert zu überwiegendem Teil hervorragend. Sie ist aber keineswegs in der Lage, dass Sonnensystem vollständig zu erklären.

In den Sozialwissenschaften hat man die Grenzen der Abbildung durch einfache mathematische Zusammenhänge seit langem erkannt. Dort arbeitet man anstelle von Kausalitäten mit Korrelationen, einer quantitativen Beschreibung von Abhängigkeiten [104]. Denn das Verhalten von Menschen ist von einer Vielzahl von Größen abhängig. Natürlich kann man die Meinung vertreten, dass alles nur eine Frage des Aufwandes ist: Man kann alle Objekte des Sonnensystems erfassen und beobachten, genau wie man einen Menschen nach allen wichtigen Größen fragen kann. Nur leider stimmt dies eben nicht. Allein die Fragen würden den Menschen beeinflussen. Etwas Ähnliches findet man auch in der Physik.

HEISENBERG hat für kleine Größen die so genannte Unschärferelation entdeckt. Sie sagt aus, dass unterhalb bestimmter Skalen, verschiedene Erscheinungen nicht gleichzeitig mit absoluter Genauigkeit gemessen werden können. Diese kleinen Skalen liegen unterhalb der PLANCK-Zeit (10^{-43} sek) und der PLANCK-Länge $L_P = \sqrt{(h \cdot G)/(2 \cdot \pi \cdot c^3)} = 1{,}6 \cdot 10^{-33}$ cm. Die PLANCK-Konstanten lassen sich sehr einfach aus den drei Naturkonstanten Wirkungsquantum, Gravitationskonstante und Lichtgeschwindigkeit berechnen. Sie ergeben sich aus einer Verbindung von NEWTON's Gravitationstheorie und PLANCK's Strahlungsformel. Außerdem können Sie mithilfe der COMPTON-Wellenlänge und des SCHWARZSCHILD-Radius berechnet werden. Die PLANCK-Konstanten bezeich-

nen die Grenze der Relativitätstheorie. Unterhalb dieser Größen wird eine Quantentheorie der Gravitation notwendig. [97]

Unser klassisches Verständnis bricht also unterhalb der PLANCK-Größen zusammen, weil in diesen Bereichen auf Grund der HEISENBERG'schen Unschärferelation beliebig kleine Längen- und Zeitmessungen zu beliebig großen Fluktuationen führen. Daher sind diese Bereiche messtechnisch abgeschirmt. In diesen Bereichen existiert also auch keine Kausalität mehr, weil Ursachen nicht mehr erfasst werden können. Der genannte Effekt mag ein Grund sein, warum im Vakuum spontane, also ursachenfreie Quanteneffekte auftreten können. Möglicherweise ist dieser Effekt sogar die Grundlage für das Universum, denn verschiedene Physiker gehen davon aus, dass die Gesamtenergie des Universums Null ist. Dann wäre des Universum „*einfach so entstanden*" und letztlich eine Fluktuation des Vakuums, da der positiven Energie die negative Energie der Gravitation entgegensteht. Dies mag auch ein Grund sein, warum es so schwer fällt, die verschiedenen Kräfte zu einer einheitlichen Kraft zusammenzuführen. [97]

HEISENBERG stellt am Ende seiner Untersuchungen über die Unbestimmtheitsrelation fest: „*Wenn wir die Gegenwart genau kennen, können wir die Zukunft berechnen, ist nicht der Nachsatz, sondern die Voraussetzung falsch. Wir können die Gegenwart in allen Bestimmungsstücken prinzipiell nicht kennen lernen. Deshalb ist alles Wahrnehmen eine Auswahl aus einer Fülle von Möglichkeiten und eine Beschränkung des zukünftig Möglichen. Da nun der statistische Charakter der Quantentheorie so eng an die Ungenauigkeit aller Wahrnehmung geknüpft ist, könnte man zu der Vermutung verleitet werden, dass sich hinter der wahrgenommenen statistischen Welt noch eine "wirkliche" Welt verberge, in der das Kausalgesetz gilt. Aber solche Spekulationen erscheinen uns, das betonen wir ausdrücklich, unfruchtbar und sinnlos. Die Physik soll nur den Zusammenhang der Wahrnehmungen formal beschreiben. Vielmehr kann man den wahren Sachverhalt viel besser so charakterisieren: Weil alle Experimente den Gesetzen der Quantenmechanik und damit der Gleichung der Unbestimmtheitsrelation unterworfen sind, so wird durch die Quantenmechanik die Ungültigkeit des Kausalgesetzes definitiv festgestellt.*" [43]

Sowohl die Bestimmung einzelner Größen als auch ihre Verknüpfung sind zumindest teilweise unbestimmt. Und noch schlimmer: Versuche, egal welcher Art, sind nicht wiederholbar, weil sich die beeinflussenden Prozesse weiterentwickelt haben, weil „*alles irgendwie mit allem verbunden ist*" [73]. STEFAN ZWEIG schrieb treffend: „*Aber in der Geschichte wie im menschlichen Leben bringt Bedauern einen verlorenen Augenblick nicht wieder, und tausend Jahre kaufen nicht zurück, was eine einzige Stunde versäumt.*" Die Welt ist nicht wiederholbar. Computerprogramme mit Algorithmen sind aber wiederholbar, also können Computerprogramme nicht die Welt beschreiben. Um die Welt oder ein anderes komplexes System zu beschreiben muss das Programm oder derjenige, der das

System beschreibt, exakt die Lage in Zeit und Raum einnehmen, die das System einnimmt. Man muss zu dem zu untersuchenden Objekt werden, quasi hineinkriechen. Niemand kann aber die Aufgaben eines komplexen Systems übernehmen und das System beobachten. Das kann man sich sehr schön an einem Buch vorstellen. Man schreibe ein Buch, in dem das Buch, welches man schreibt, beschrieben wird. Man kann zunächst den Umschlag des Buches beschreiben, dann beginnt man zu beschreiben, wie man das Buch beschreibt. Aber man ist dazu verdammt, diese Aufgabe bis in alle Ewigkeit fortzuführen. [61]

Das heißt, die vollständige Prognose des zukünftigen geschlossenen Verhaltens komplexer Systeme ist zwangsläufig zum Scheitern verurteilt. Wozu sollen also noch Prognosen erstellt werden?

Zur Prognose komplexer Systeme

„*Ich werde keinen Plan für neue Arbeiten und Kriegsmaschinen mehr zur Kenntnis nehmen, denn die Technik hat ihre Grenzen erreicht, und ich habe keine Hoffnung, dass sie weiter verbessert werden kann.*“

SEXTUS JULIUS FRONTIUS, Beamter unter Kaiser VESPASIAN (69-79 n. Chr.) [33]

Wenn also Unbestimmtheit eine unabänderliche Eigenschaft der Welt ist, macht es dann noch Sinn, Prognosen über das Verhalten komplexer Systeme zu wagen? Dazu seien zunächst einige erfolgreiche Prognosen genannt. In dem Buch „Die Welt in 100 Jahren“ [7], welches 1910 von 18 Wissenschaftlern verfasst wurde, findet sich eine Prognose über das Leben im Jahre 2010. Darin heißt es: *„Jedermann wird sein eigenes Taschentelefon haben, durch welches er sich mit wem er will verbinden kann, einerlei, wo er auch ist… Monarchen, Kanzler, Diplomaten, Bankiers, Beamte und Direktoren werden ihre Geschäfte erledigen, ihre Unterschriften geben… Sie werden sich sehen, miteinander sprechen, ihre Akten austauschen und unterschreiben, als wären sie zusammengekommen an einem Orte.“* [7] 1974 sagte ANDREJ AMALRIK den Fall der Sowjetunion für das Jahr 1990 voraus. 1999 wird in der Zeitschrift „The Futurist“ in einem Artikel über Superterrorismus auf dem Gebiet der USA vorausgesagt: „*Die Art und Weise des Terrorismus ändert sich – Die USA werden innerhalb der nächsten fünf Jahre Opfer eines Hochtechnologie-Terroranschlages auf ihrem eigenen Gebiet sein.*“ VAN GELDEREN und DE WOLFF prognostizieren 1913 bzw. 1921 die späteren KONDRATIEFF-Wellen, so genannte technologische Wellen, die man bei der Entwicklung der Dampfmaschine, des Webstuhles, der Einführung des Stahlbaus, der Eisenbahn, der Entstehung der chemischen Industrie oder beim Aufstieg des Internet erleben konnte. JULES VERNE hat 1865 den Flug zum Mond vorausgesehen. Etwa 1290 soll ROGER BACON prognostiziert haben: „*Wagen werden ohne Pferde mit unglaublicher Geschwindigkeit verkehren.“*

Betrachtet man aber die jährlichen Wirtschaftsprognosen für Deutschland, so entdeckt man darin ein erhebliches Maß an Unbestimmtheit. Auch in dem bereits genannten Buch „Die Welt in 100 Jahren“ scheitert die Prognose der kulturellen Entwicklung völlig. Weder die Gleichberechtigung von Mann und Frau

noch das Ende der Kolonialzeit werden vorausgesagt. Handelt es sich bei den ausgewählten Beispielen um Glückstreffer? Vielmehr scheint die konkrete Vorhersage des Verhaltens eines einzelnen Systems in einer ganz bestimmten Situation ausgeschlossen. Oft kann man aber generelle Verhaltensmuster angeben. Dies führt nicht zu einem Ausschluss der Unsicherheitskomponente der Zukunft, aber man kann sie verringern. Selbst wenn dies nur wenige Prozente ausmacht, so schien der Aufwand in der bisherigen Menschheitsgeschichte gerechtfertigt. Allerdings führt dies zu einem Dilemma: Zwar macht die Anhäufung von Wissen Prognosen einfacher, aber die Entwicklung komplexer Modelle erschwert wiederum die Prognosen.

Alle in den letzten Kapiteln behandelten Verfahren hatten das Ziel, zukünftige Ereignisse oder Geschehnisse basierend auf historischen Daten oder Kenntnissen zu prognostizieren. Das erscheint zunächst einmal sinnvoll. Wem ist aber geholfen, wenn man eine Flut oder ein Erdbeben vorhersagt und anschließend abwartet, ob die Vorhersage eintritt? Vielmehr dienen Prognosen dazu, mögliche Entwicklungen in der Zukunft zu beschreiben und anschließend quasi vorab zu reagieren. Prognosen dienen also gar nicht dazu, die Zukunft zu beschreiben, sie dienen dazu, die Zukunft zu gestalten. Das primäre Ziel ist die Gestaltung der Zukunft, nicht die Prognose der Zukunft. [108]

Und das Ziel der Gestaltung, eigentlich aller menschlichen Handlungen, ist wiederum die Verbesserung unserer Welt (für irgendjemanden). KARL POPPER hat dies auf eine sehr einfache Art formuliert: „*Alles Lebendige sucht nach einer besseren Welt*“. Bereits ARISTOTELES kam zu demselben Ergebnis: „*Unsere Vorfahren sehen wir als einfach und barbarisch an. Griechen liefen mit Schwertern umher und kauften Frauen von einander. Und es gab sicherlich noch mehr solcher Traditionen, die außerordentlich dumm waren. Allgemein kann man sagen: Menschen suchen nicht das Leben ihrer Vorfahren, sondern sie suchen ein gutes Leben.*“ [76]

Die Aussage, dass jede Form von Leben nach Verbesserung sucht, mag möglicherweise sogar als Definition für Leben gelten. Die Fähigkeit zur Bewertung wird als Grundlage für jegliche Form des Lebens angesehen. Menschen suchen nützliche Wechselwirkungen, nützliche Elektronen, nützliches Wetter, nützliche Planeten, nützliche Gefühle, nützliche Welten [32]. Die Bewertung erlaubt Reaktionen und Handlungen. Planmäßiges Handeln ist eine wichtige Eigenschaft von Intelligenz. Die Reaktionen bzw. das Handeln folgt dem Ziel der Verbesserung, mindestens aber dem Ziel der Bewahrung. Komplexe Systeme, wie Menschen, wollen in der Regel am Leben bleiben. Sie wollen keinen Schaden nehmen und versuchen, sich selbst zu schützen. Diese bezeichnet man auch als Lebenserhaltung und führt zum Begriff der Daseinsvorsorge.

Risiko wird häufig als die Möglichkeit des Eintrittes von Schäden, Verlusten oder Nachteilen verstanden. Im Gegensatz dazu wurde die Verbesserung der

eigenen Situation in den letzten Jahren eng mit dem Begriff der Lebensqualität gekoppelt: Lebensqualität kann neben vielem anderen auch als Zugriff auf Verbesserungen angesehen werden. Demnach stehen Lebensqualität und Risiko in einer engen Beziehung. Das eine ist die Möglichkeit der Verbesserung, das andere die Möglichkeit der Verschlechterung. Allerdings, und hier treten wieder die Grenzen der Prognosefähigkeit zutage: was heute ein Vorteil ist, kann morgen ein Nachteil sein und umgekehrt. Abb. 50 zeigt, wie sich ein anfänglicher Vorteil in einen Nachteil wandelt. In solchen Fällen versucht man sich oft dadurch zu helfen, indem man Optimierungen als die Suche nach der besten Lösung bezüglich eines oder mehrerer Kriterien durchführt.

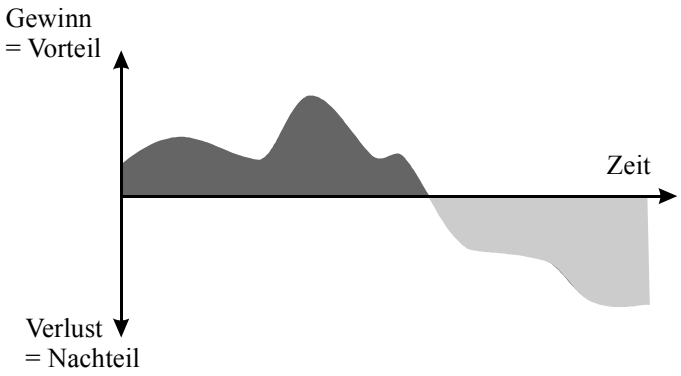


Abb. 50: Beispielhafter zeitlicher Verlauf von Vorteil und Nachteil

Was ist Optimierung?

"*Numerische Modelle sind am besten für Probleme geeignet, bei denen man den Lösungsraum kennt*."

M.F.M. YOSSEF, Delft 2005

Als Optimierung wird der mathematische Prozess der Bestimmung einer extremalen Lösung aus einem Lösungsraum hinsichtlich verschiedener Randbedingungen bezeichnet. Klassischerweise geht man dabei davon aus, dass man sowohl den Lösungsraum als auch die Randbedingungen kennt. In vielen Fachgebieten ist die Frage der Optimierung von großer Bedeutung. So hat man z.B. im Fahrzeugbau bei der Suche nach technischen Lösungen über viele Jahre nach diesem Prinzip gearbeitet.

Unter realen Bedingungen zeigte sich jedoch häufig, dass diese optimalen Lösungen aus dem Labor in keiner Weise optimalen Lösungen in der Realität entsprechen. Denn die Randbedingungen muss man prognostizieren können! Wenn aber die Randbedingungen nicht so eintreten, wie sie erwartet wurden, so wird aus der optimalen Lösung eine suboptimale Lösung. [62, 8]

Tatsächlich kennt man nämlich für reale Bedingungen weder den Lösungsraum noch die Randbedingungen. Das heißt, diese Optimierungen sind quasi mathematische Trockenübungen, die relativ wenig mit den realen Ereignissen gemeinsam haben. Optimieren kann man nur etwas, was man kennt.

In den letzten Jahren ist man deshalb dazu übergegangen, so genannte Ersatzparameter wie Robustheit oder Fitness zu verwenden. Diese Parameter beschreiben eine hohe Fehlerresistenz eines Systems. Treten also nicht erwartete Situationen oder Effekte ein, so bleibt das System zum überwiegenden Teil noch funktionstüchtig. Hier spielt die Frage der Redundanzen eine wichtige Rolle. Im Sinne von Optimierungen werden Redundanzen häufig abgebaut, z.B. weil sie Geld kosten. Tatsächlich kostet es eine Firma mehr Geld, wenn sie verschiedene Technologien oder Lösungsmöglichkeiten vorhalten muss [88]. Wenn allerdings eine Ausnahmesituation eintritt, mag die Redundanz das Überleben der Firma sichern. Ein zweites Beispiel sei der Verkehr in einer Stadt. Verzichtet man auf parallele Straßen oder alternative Verkehrswege, so mag kurzfristig eine Einspa-

rung beim Unterhalt der Straßen spürbar sein. Bei einem Unfall, der zu einer Absperrung der Straße führt, bricht jedoch das komplette Straßensystem zusammen. Redundanzen sind deshalb in vielen Systemen vorhanden und notwendig. Sie sind die stille Reserve, die das Überleben eines Systems in Zuständen sichert, die die Optimierung eben nicht berücksichtigt hat. Diese Entwicklung ist bei sozialen Systemen besonders sichtbar. Hier geht es im Wesentlichen darum, dass diese Systeme funktionstüchtig bleiben. Soziale Ordnungen, wie Faschismus oder Diktaturen sind zwar für die Ziele solcher Gebilde optimal, sie sind aber nicht robust. Kleine Änderungen, wie z.B. der Tod des Diktators, können zu schweren Krisen des sozialen Systems führen. Deutlich wurde dies z.B. in Deutschland während und nach dem 2. Weltkrieg oder im heutigen Irak. Derartige Entwicklungen können in der Regel nur sehr langsam korrigiert werden. Darauf wurde schon im Kapitel Komplexität hingewiesen. Man muss erkennen, dass die Eigenschaft der Unbestimmtheit Auswirkungen darauf hat, wie Menschen Probleme lösen können.

Fazit

„*Wir haben (...) das Land des reinen Verstandes nicht allein durchreist, und jeden Teil davon sorgfältig in Augenschein genommen, sondern es auch durchmessen, und jedem Dinge auf demselben seine Stelle bestimmt. Dieses Land aber ist eine Insel und durch die Natur selbst in unveränderlichen Grenzen eingeschlossen. Es ist das Land der Wahrheit, umgeben von einem weiten und stürmischen Ozeane, dem eigentlichen Sitz des Scheins, wo manche Nebelbank, und manches bald weg schmelzende Eis neue Länder lügt, und indem es den auf Entdeckungen herumschwärmenden Seefahrer unaufhörlich mit leeren Hoffnungen täuscht, ihn in Abenteuer verflechtet, von denen er niemals ablassen, und sie doch auch niemals zu Ende bringen kann.*“

IMMANUEL KANT: Kritik der reinen Vernunft [10]

„*Wir leben auf einer Inselwelt, auf Inseln der Ordnung, auf Inseln der physikalischen Gesetze, auf Inseln der Ideen, auf Inseln des Vertrauens: Wir leben auf unserer Insel… Es mag andere Inseln geben – einen ganzen Archipel. Dort mögen die Ordnungen anders geartet sein, wir müssen sie als gleichberechtigt gelten lassen, da wir nun die Pluralität der Welt kennen.*“

FRIEDRICH CRAMER: Chaos und Ordnung [10]

„*Unser Wissen ist Stückwerk…*“

PAULUS VON TARSUS: 1. Brief an die Korinther [10]

Die Überlegungen in diesem Buch kann man vereinfacht zusammenfassen: Es gibt viele Arten von Unbestimmtheit. Eine Art der Unbestimmtheit, den Zufall, kann man als Komplexität verstehen. Das heißt umgekehrt, komplexe Systeme müssen zu einem gewissen Teil unbestimmt sein. Die Welt ist das System mit der höchsten Komplexität, welches wir kennen. Also muss Unbestimmtheit eine zwingende Eigenschaft der Welt sein. Ist die Welt zu Teilen unbestimmt, dann gilt diese Eigenschaft auch für zahlreiche ihrer Elemente, mindestens für die

komplexen Systeme. Als solche sind Menschen und ihre Organisationsformen anzusehen, die damit Elemente der Unbestimmtheit besitzen. Diese Unbestimmtheit manifestiert sich auch in den menschlichen Zielen, einschließlich solcher Dinge wie Gerechtigkeit oder ihre formalistische Umsetzung, wie Gesetze. Diese sind immer nur begrenzt umsetzbar, da sie teilweise unbestimmt sind. Recht und Gerechtigkeit kann es nur geben, wenn alle Zustände der Welt bekannt wären. Übrigens lässt sich das Gleiche auch für eine Steuererklärung sagen. Die Steuergesetzgebung in nahezu jedem Land besteht aus Tausenden von Gesetzen. Diese werden von Tausenden von Bearbeitern angewandt, die sich wiederum mit den unterschiedlichsten Sachverhalten auseinandersetzen müssen. Dies alles führt wieder zu einem hohen Maß an Verknüpfungen, zu Komplexität und letztlich zu Unbestimmtheit. Nicht zuletzt deswegen erklären jedes Jahr Steuervereine, dass eine große Zahl von Steuerklärungen falsch ist. Die Frage ist nur, wie sieht eine richtige Steuererklärung aus. Diesen Vergleich zwischen den Grenzen der Gesetze und den Grenzen der Physik beschreibt auch EUGEN WIGNER [117]: "*Physik versucht nicht, die Natur zu erklären. Tatsächlich basieren die großen Erfolge der Physik auf der Beschränkung von realen Objekten. Die Physik versucht die Regelmäßigkeiten des Verhaltens von Objekten zu beschreiben. …diese werden manchmal als Naturgesetze bezeichnet. Dieser Name ist übrigens sehr passend gewählt. Genauso wie juristische Gesetze, die Tätigkeiten und Verhalten unter bestimmten Bedingungen regeln, aber nicht alle Umstände erfassen können, beschreiben die Gesetze der Physik das Verhalten von Objekten nur für ganz bestimmte gut definierte Bedingungen und lassen viel Freiraum für die anderen Bedingungen.*"

Unbestimmtheit schafft aber nicht nur Grenzen. Sie ist notwendig, um komplexen Systemen Freiheiten und damit Entscheidungsmöglichkeiten einzuräumen. Nur weil Unbestimmtheit existiert, gibt es Komplexität. Fördert man also die Entwicklung eines komplexen Systems, welches selbstständig Aufgaben lösen soll, so muss man sich darauf einstellen, dass sich dieses irgendwann unbestimmt verhält, dass es sich entkoppelt. Selbstständigkeit erfordert Freiheit und Komplexität. Und letztere führt zu Unbestimmtheit. Ist das System dagegen nicht ausreichend komplex gestaltet und mit ungenügender Freiheit ausgestattet, so kann die Unbestimmtheit auch Ängste wecken. Freiheit bedeutet nämlich, dass man in der Lage ist, mit der Unbestimmtheit der Welt umzugehen. Ist dem nicht so, empfinden Menschen die Unbestimmtheit als Angst. Angst wird definiert als „*Erregungszustand, der durch Bedrohung des Wohlgefühls hervorgerufen wird*" oder „*eigentümliches, unbestimmtes, nicht gerichtetes, sondern gegenstandsloses Gefühl des Bedroht seins*" [31]. Hauptsächlich dient Angst dem kurzfristigen Überleben. Ressourcen werden so verteilt, dass nur wesentliche Aufgaben erfüllt werden können. Alle langfristig notwendigen Maßnahmen zur Lebenssicherung verlieren dagegen an Bedeutung. In einer sicheren Umgebung dagegen können Res-

sourcen sowohl für kurzfristige, als auch für langfristige Maßnahmen verwendet werden (Abb. 51). Man kann Eisessen gehen oder sein Geld für die Rente zurücklegen. Je sicherer Menschen sich fühlen, umso freier können Ressourcen verwendet werden, umso größer ist ihre eigene Unbestimmtheit (Abb. 52). Im Gegensatz zur Angst bezeichnet Sicherheit einen Zustand der „*Beruhigung des Geistes, aus der Überzeugung heraus, dass keinerlei Katastrophe oder Unglücksfall droht*“, einen „*Zustand des Unbedroht seins*“ oder „*in Erfahrung gegründetes und sich bestätigendes Gefühl, von gewissen Gefahren nicht vorrangig getroffen zu werden*“ [34, 72]. Menschen wollen bis zu einem gewissen Grade äußere Sicherheit. Das bedeutet aber nicht vollständige Bestimmtheit. Sicherheit heißt vielmehr, in der Lage zu sein, die Unbestimmtheit der Welt zügeln zu können. Und hier kommt wieder die Komplexität zum Tragen. Heutige Angst kann morgen zu Sicherheit führen. Heutige Sicherheit kann morgige Angst bedeuten, denn Angst kann die Augen für Werte öffnen. So stellte KARL POPPER fest: „*Die stets gegenwärtige Gefahr, das Leben zu verlieren, hilft uns, den Wert des Lebens zu begreifen*.“

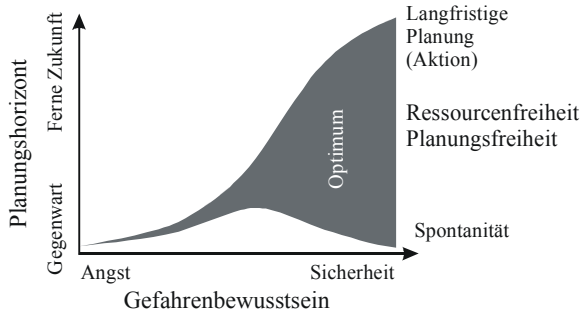


Abb. 51: Gefahrenbewusstsein und Planungshorizont

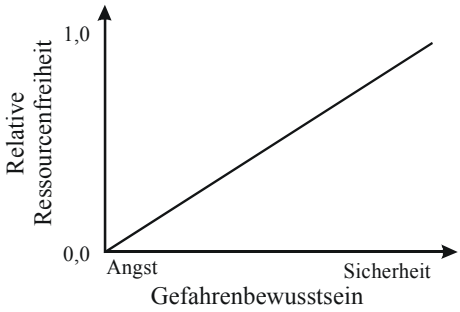


Abb. 52: Gefahrenbewusstsein und Ressourcenfreiheit

Offensichtlich benötigen Menschen manchmal leichte Formen von Unwohlsein, um sich weiterzuentwickeln. Wie bereits gesagt, haben Menschen Angst vor Situationen, mit denen sie nicht umgehen können. Menschen werden also gezwungen, sich mit neuen Situationen auseinanderzusetzen. Sie lernen. Heute können wir auf Grund der Möglichkeit der Speicherung von Informationen nicht nur auf die Erfahrung einzelner Menschen zurückgreifen, sondern auf Menschheitswissen. Dieses Menschheitswissen ist jedoch trotz seiner Fülle nur eine eingeschränkte Reflektion der vorhandenen Welt. Unendlich viele Ereignisse mögen außerhalb des Erfahrungshorizontes der Menschheit liegen. So könnte es möglich sein, dass das Perpetuum Mobile, welches das Universum letztendlich ist, plötzlich abgeschaltet wird.

Dieses Buch erzeugt aber nun Vorbehalte gegen solche Überlegungen. Natürlich ist die Unbestimmtheit eine Eigenschaft komplexer Systeme, aber die Natur besitzt eben auch jenen „Willen zur Ordnung“. Solchen Willen zur Ordnung finden wir selbst in unserer Nähe, z.B. in der Ökonomie. Die Ökonomie ist im Grunde ein Regelmechanismus zur Effizienzbewertung der Teilnehmer dieses Systems. Dieser Regelmechanismus besitzt jedoch zahlreiche Fehler. Zwei seien hier kurz genannt: Erstens gibt es Systeme außerhalb der Ökonomie, deren Ressourcen unbewertet integriert werden, das heißt, die Ökonomie ist kein geschlossenes System. So wird die Kindererziehung in Familien nicht vom Staat oder der Ökonomie bezahlt, aber die Ökonomie kann in wenigen Jahrzehnten ohne diese Kinder nicht funktionieren. Auch für die Sonne oder für den Sauerstoff in der Atmosphäre zahlt niemand. Zweitens sind die verwendeten Leistungsparameter in der Regel sehr kurzfristig ausgerichtet. Die Leistung wird also jährlich, monatlich, manchmal sogar täglich abgerechnet. Aber Dinge, die heute unwirtschaftlich sind, können morgen wirtschaftlich sein. Hier ist die Ökonomie ein Opfer der Unbestimmtheit. Auch die angesprochenen Grenzen von Optimierungsprozessen werden deutlich. Vielleicht sollte die Wirtschaft mit Fitnessparametern arbeiten? Und obwohl die Wirtschaftsmodelle erhebliche Mängel aufweisen und von Unbestimmtheit geprägt sind, man denke hier nur an die alljährlichen unzureichenden Wirtschaftsprognosen, funktioniert das Wirtschaftssystem zumindest in einer Vielzahl der Länder der Erde einigermaßen zufrieden stellend.

Heute verfügt ein Mensch in den entwickelten Industriestaaten eben auf Grund einigermaßen funktionstüchtiger gesellschaftlicher Strukturen in der Regel über deutlich mehr Ressourcen (Energie, Materie, Informationen) als in früheren Zeiten. Während z.B. im Mittelalter der Großteil der Bevölkerung nur kurze Entfernungen zurücklegen konnte, ist die Bewegung eines Menschen heute über tausende von Kilometern durchaus üblich. Dies führt zu einem Mehr an Komplexität, da die Interaktionen von gesellschaftlichen Elementen, also Menschen, Betrieben, Computernetzwerken oder Verwaltungseinrichtungen zunehmen. Ein besonders aktuelles Beispiel dafür ist die Globalisierung. Dieser Begriff steht

letztendlich für nichts anderes als eine zunehmende Verknüpfung der Elemente der Erde (Menschen, Kulturen, Tierarten, Pflanzenarten, Maschinen etc.): Wohl steigt die Anzahl der Elemente, aber der Umfang der Interaktionen wächst geradezu explosionsartig. Also nimmt die Komplexität der menschlichen Gesellschaft im Augenblick dramatisch zu. Man darf gespannt sein, wie bisherige Mechanismen zur Regulierung menschlicher Gesellschaften diesem Umstand Rechnung tragen und ob der Wille zur Ordnung vorhanden bleibt. Fazit: Mit der Komplexität steigt die Unbestimmtheit. Ein schönes Beispiel für die Unbestimmtheit sozialer System ist die Wiedervereinigung Deutschlands. Der Untergang der DDR war so nicht vorhersagbar. Deutlich wird dabei auch wieder die Bedeutung von Ereignissen im Vergleich zu Prozessen. Beim Fall der Mauer handelt es sich um ein Ereignis: extrem schnelle Entwicklungen führten zu massiven Veränderungen. Und bei Ereignissen ist Akausalität möglich.

Egal, ob unser eigenes Leben, die Natur, der Sternenhimmel oder ein Buch, alles repräsentiert in einem gewissen Maße Bestimmtheit und Unbestimmtheit. Während der Wille der Natur zur Ordnung die Bestimmtheit repräsentiert, tritt uns die Unbestimmtheit wie ein Schatten in allen Winkeln der Welt entgegen. Die Unbestimmtheit der Welt ist letztendlich ein Maß für die Anzahl von Elementen, vor allem aber für den Umfang der Verknüpfungen. Diese Verknüpfungen mögen sich auf gleiche Elemente beziehen, oder aber eben auf etwas völlig anderes. Viele Verknüpfungen sind Brücken in andere Skalen. Wir Menschen agieren in bestimmten charakteristischen Skalen. Aber es existieren andere Skalen und zwischen diesen Skalen existieren Verbindungen, Brücken, und immer, wenn man auf eine große Zahl solcher Brücken stößt, wird die Welt unbestimmt. Je mehr Verknüpfungen, umso höher das Ausmaß an Unbestimmtheit. Betrachtet man das Wetter, abhängig vom Wind, der Sonne, den Wolken, den Menschen, dem Meer, dem Wald, ja selbst von einem Vogel im Wald. Nehmen wir an, dieser Vogel sei ein Specht und der Specht beschädigt einen Baum, dieser stürzt um, verursacht einen Wirbel und anschließend einen Wirbelsturm, der das Wetter für einige Tage beeinflusst. Attraktiv mag der Baum für den Specht geworden sein, weil irgendein Ereignis das Holz weicher gemacht hat. Hier ist die Skalenbrücke erkennbar. Ruhende Wechselwirkungen werden aktiv und verändern das System. Es bilden sich geradezu Wechselwirkungskaskaden. Nach dem Sturm fällt einem Fußgänger ein Dachziegel auf den Kopf, weil der Wirbelsturm den Dachziegel lockerte. So etwas bezeichnen wir als tragisches Unglück, auch als Schicksal. Wir sind nicht in der Lage, alle diese Verknüpfungen zu überwachen, ohne das System selbst zu verändern. Wir mögen alle Spechte überwachen, aber es gefällt ihnen nicht und sie verlassen den Wald. Anschließend vernichten Insekten, die die Spechte normalerweise gefressen haben, den Wald. Nachdem der Wald abgestorben ist, verändert sich das Wetter, und so hat die Überwachung das System geändert. Aber sprechen wir an dieser Stelle noch von Schicksal? In dem Punkt,

wo Menschen aktiv in ein System eingreifen, übernehmen sie auch die Verantwortung. Wir sprechen dann nicht mehr von Schicksal. Der Begriff des Schicksals war bereits früher gefallen. Es spiegelt eine der ersten Beschreibungsformen der Unbestimmtheit der Welt wieder. Unter Schicksal verstanden die alten Griechen das Wirken einer unausweichlichen, manchmal personifizierten, Macht. Heute ist diese Macht nicht mehr außerhalb von Menschen personifiziert, aber sie ist noch vorhanden. Sie steckt in den tiefsten Gesetzen der Natur. Und damit auch in uns Menschen. Die vollständige Beschreibung der Ordnung der Natur wird wohl für alle Zeit ein unerfüllter Traum bleiben.

Literatur

[1] Aleksic, Z.: Artificial life: growing complex systems. Terry R.J. Bossomaier & David G.Green: Complex Systems. Cambridge University Press. Cambridge 2000

[2] Aspaas, A.; Stanley, L.: The Belousov-Zhabotinski Reaction, 12.4.2000, http://ed.augie.edu/~awaspaas/inorg/bz.pdf, 2006

[3] Birkhoff, G. D.: Aesthetic Measure. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1933

[4] Bonchev, D.; Buck, G.A.: Quantitative Measures of Network Complexity. Complexity in Chemistry, Biology and Ecology. Edr. Danail Bonchev & Dennis H.Rouvray, Springer Science + Business Media, New York, 2005, Seite 191-235

[5] Bossomaier, T.: Complexity and neural networks. Eds. Terry R.J. Bossomaier & David G.Green: Complex Systems. Cambridge University Press. Cambridge 2000

[6] Bradbury, R.H.; Green, D.G.; Snoad, N.: Are ecosystems complex systems? Terry R.J. Bossomaier & David G.Green: Complex Systems. Cambridge University Press. Cambridge 2000

[7] Brehmer, A. (Hrsg.): Die Welt in 100 Jahren. Verlagsanstalt Buntdruck GmbH, Berlin 1910, Nachdruck Hildesheim 1988

[8] Bucher, C.: Robustness analysis in structural optimization. 3rd Probabilistic Workshop – Technical Systems – Natural Hazards. Schriftenreihe des Departments für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien, Nr. 7 – November 2005, Hrsg. Bergmeister, Rickenmann & Strauss, Seite 31-40

[9] Chaitin, G.J. : To a mathematical defintion of "life". ACM SICACT News, No. 4, January 1970, Seite 12-18, http://cs.umaine.edu/~chaitin/sicact.pdf, 2006

[10] Cramer, F.: Chaos und Ordnung – Die komplexe Struktur des Lebendigen. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1989

[11] Crossley, W.A.: System of Systems: An Introduction. Purdue University – Schools of Engineering's Signature Area, 2006

[12] Davies, P. ; Gribbin, J. : Auf dem Weg zur Weltformel – Superstrings, Chaos, Komplexität: Über den neuesten Stand der Physik. Deutscher Taschenbuchverlag, München 1996

[13] Deng, J.: Essential Topics on Grey Systems. Theory and Applications, China Ocean Press, Bejing 1988

[14] DIN 2330: Begriffe und Benennungen. Allgemeine Grundsätze März 1979

[15] Eagle, A.: Randomness is Unpredictability. Exeter College, Oxford. British Journal for the Philosophy of Science. Volume 56, Number 4, Seite 749-790

[16] Edgington, D.: Vagueness by degrees. Eds. Keefe & Smith, 1999, Seite 294-316

[17] European Commission: The Archaeomedes Project. Understanding the natural and anthropogenic causes of land degradation and desertification in the Mediterranean basin. Research report. Luxembourg, 1998

[18] Fehling, G.: Aufgehobene Komplexität: Gestaltung und Nutzung von Benutzungsschnittstellen. Dissertation an der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Eberhard-Karls-Universität zu Tübingen, 2002

[19] Flood, R.L.; Carson, E.R.: Dealing with Complexity – An introduction to the Theory and Application of System Science. Second Edition, Plenum Press, New York, 1993

[20] Föll, H.: Entropie und Information. http://www.techfak.uni-kiel.de/matwis/amat/mw1_ge/kap_5/advanced/t5_3_2.html, 2006

[21] Freund, A.M.; Hütt, M.-T.; Vec, M.: Selbstorganisation: Aspekte eines Begriffs- und Methodentransfers. 2006
[22] Funke, J.: Wie bestimmt man den Grad von Komplexität? Und: Wie sind die Fähigkeiten des Menschen begrenzt, damit umzugehen? http://www.wissenschaft-im-dialog.de/faq_detail.php4?ID=130&Example_Session=, 2006
[23] Gaardner, J.: Sophies World, Phoenix Paperback, London, 1999
[24] Ganter, B.: Die Strukturen aus Sicht der Mathematik – Strukturmathematik. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 53 (2004), Heft 3-4, Seite 39-43
[25] Geissler, E.: Der Mann aus Milchglas steht draußen vor der Tür – Die humanen Konsequenzen der Gentechnik. Vom richtigen Umgang mit Genen. E.-P. Fischer und W.-D. Schleuning (Hrsg.), Serie Piper Band 1329, Piper München 1991
[26] Gesamtzufallsmenge = Entropie der Mathematik. http://www.madeasy.de/2/zufallgz.htm#Orginaltexte, 2006
[27] Goldmann, U.: Der Zusammenhang von Entwicklung und Erziehung aus systemtheoretischer Sicht. Dissertationsschrift an der Friedrich-Alexander-Universität in Erlangen-Nürnberg, Fakultät Erziehungswissenschaften, 2001
[28] Grijorjew, W.I.; Mjakischew, G.J.: Die Kräfte der Natur. MIR Verlag Moskau – Urania Verlag Leipzig, 1978
[29] Guntsch, M.: Ant Algorithms in Stochastics and Multi-Criteria Enviroments. Dissertation im Fachbereich Wirtschaftswissenschaften an der Universität Karlsruhe, 2004
[30] Haken, H.: Wunderlin, A.: Die Selbststrukturierung der Materie – Synergetik in der unbelebten Welt. Vieweg, Braunschweig 1991
[31] Hasenbeck, J.: Angst und Leistung in Abhängigkeit vom elterlichen Erziehungsverhalten. Studienfacharbeit im Bereich Pädagogik der Universität der Bundeswehr Hamburg, März 1999
[32] Hildebrand, L.: Grundlagen und Anwendungen der Computational Intelligence, Informatik I, Universität Dortmund, http://ls1-www.cs.uni-dortmund.de/~hildebra/Vorlesungen, 2006
[33] Hochschule Mittweida, Fachbereich Soziale Arbeit: Wirtschafts- und Sozialgeschichte. http://www.htwm.de/~sa/, 2006
[34] Hof, W.: Zum Begriff Sicherheit. Beton- und Stahlbetonbau 86 (1991), Heft 12, Seite 286-289
[35] Hoffmann, A.: Komplexität einer künstlichen Intelligenz. Dissertation, Technische Universität Berlin 1993, http://www.cse.unsw.edu.au/~achim/Research/Philosophie/node88.html, 2006
[36] http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:LogisticMap_BifurcationDiagram.png, 2006
[37] http://de.wikipedia.org/wiki/Emergenz, 2006
[38] http://kaufwas.com/bk/wissen/sys_th/index.htm
[39] http://web.uni-bamberg.de/ppp/insttheopsy/glossar/MerkmaleKomplexerHandlungssituationen.html, 2006
[40] http://web.uni-bamberg.de/ppp/insttheopsy/glossar/Unbestimmtheit.html, 2006
[41] http://www.hermetic.ch/pca/bz.htm, 2006
[42] http://www.physicstoday.com/pt/vol-54/iss-8/images/p34fig4.jpg&imgrefurl=http://www.physicstoday.com/pt/vol-54/iss-8/captions/p34cap4.html&h=261&w=400&sz=21&tbnid=fiv8-PDyMlpDeM:&tbnh=78&tbnw=120&hl=de&start=5&prev=/images%3Fq%3DRayleigh-Benard-Cell%26svnum%3D10%26hl%3Dde%26lr%3D%26sa%3DG
[43] http://www.physik.tu-berlin.de/~dschm/lect/heislek/html/unbestimmt.html, 2006

[44] Hummel, H.J.; Jagodzinski, W.; Langeheine, R.: Kausalanalyse. Techniken der empirischen Sozialforschung. 8. Band, R. Oldenbourg Verlag München, München 1986
[45] Husemeyer, U.: Heuristische Diagnose mit Assoziationsregeln. Fachbereich Mathematik/Informatik der Universität Paderborn, Dissertation, 2001
[46] Jakobi, E.: Rayleigh-Bénard Konvektion – Selbstorganisation und das Entstehen von Strukturen – Vortragsnotizen, 8. Dezember 2003, http://www.fkp.tu-darmstadt.de/grewe/staff/eberhard/rbkonv.pdf, 2006
[47] Kastenberg, B.: Assessing and Managing the Security of Complex Systems: Shifting the RAMS Paradigm. 29th ESReDA Seminar Title: Analysis for a More Secure World. Theme: Application of System Analysis and RAMS to Security of Complex Systems. Oktober 25.-26. 2005, Joint Research Centre, IPSC, Ispra, Italien
[48] Keefe, R.; Smith, P. (Eds). Vagueness: A Reader. Cambridge, Massachusetts: MIT Press 1997
[49] Kegel, G.: Der Turm zu Babel – oder vom Ursprung der Sprache(n). http://www.psycholinguistik.uni-muenchen.de/index.html?/publ/sprachursprung.html, 2006
[50] Keim, D.A.: Datenvisualisierung und Data Mining. Datenbank Spektrum, vol. 1, no. 2, Jan 2002
[51] Kennedy, J.; Eberhart, R. C.: Swarm Intelligence. Morgan Kaufmann, San Francisco, 2001.
[52] Klir, G.J.; Folger, T.: Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information. Prentice Hall. 1988
[53] Klir, G.J: Complexity: Some general observations. Systems Research, 2 (2) 1985, Seite 131-140
[54] Köllner, C.: Seminar Rough Sets Presentation. http://www.ipd.uka.de/~ovid/Seminare/IMPWS03/Vortraege/OVID-IMPWS03_RoughSets.pdf, 2006
[55] Krelle, W.: Grundlagen einer stochastischen Konjunkturtheorie. Zeitschrift für die gesamte Staatswissenschaft 115 (1959), S. 472-494
[56] Krüger-Brand, H.: Generation Research Program: Die unbekannte Generation plus. Deutsches Ärzteblatt, 1-2/2006, A26-A28
[57] Kruse, R.; Gebhardt, J.; Klawonn, F.: Foundations of Fuzzy Systems. Wiley, 1994
[58] Langenbach, J.: Linguistik: Die Geburt einer Sprache. Die Presse, 17.09.2004
[59] Laszlo, E.: Systemtheorie als Weltanschauung – Eine ganzheitliche Vision für unsere Zukunft. Eugen Diederichs Verlag, München 1998
[60] Lewin, R.: Komplexitätstheorie – Wissenschaft nach der Chaosforschung. Knau, München 1993
[61] Longo, G.: Laplace, Turing and the "imitation game" impossible geometry: randomness, determinism and programs in Turing's test. In cognition, meaning and complexity, Roma, June 2002, CNRS et Dépt. d'Informatique. École Normale Supérieure, Paris et CREA, École Polytechnique, http://www.di.ens.fr/users/longo, 2006
[62] Marczyk, J.: Does optimal mean best? In: NAFEMS-Seminar: Einsatz der Stochastik in FEM-Berechnungen, 7.-8. Mai 2003, Wiesbaden
[63] Marquardt, H.-G.; Schulze, F.: Systematische Untersuchungen von Materialfluß-strukturen, 1998, Erfahrungen aus der Zukunft, Frauenhofer–Institut für Produktions-anlagen und Konstruktionstechnik (IPK), Berlin
[64] Marschall, L.: A world that slipped away. The Sciences 34 (5), 1994, Seite 45-46
[65] Masolo, C.; Borgo, S.; Gangemi, A.; Guarino, N.; Oltramari, A.; Schneider, L.: The WonderWeb Library of Foundational Ontologies, Preliminary Report, Padova, Italy, 2002

[66] McBean, E.A.; Rovers, F.A.: Statistical Procedures for Analysis of Environmental Monitoring Data & Risk Assessment. Prentice Hall PTR Environmental Management & Engineering Series, Volume 3, Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, 1998.

[67] McEntire, R.: Knowledge Management in the Pharmaceutical Industry. Workshop Knowledge-Based Bioinformatics, Hosted by the Genome Québec funded project: Ontologies, the semantic web and intelligent systems for genomics, September 21st - 23rd 2005, Montréal, Québec, Canada

[68] Mertens, A.: Unternehmen als komplexe nichtlineare Systeme unter dem Aspekt des Wissensmanagements (Wissensmodellierung und Wissenssimulation), 4th Arcanum

[69] Metzler, W.: Nichtlineare Dynamik und Chaos. Eine Einführung. B.G. Teubner, Leipzig 1998

[70] Metzner, A.: Die Tücken der Objekte – Über die Risiken der Gesellschaft und ihre Wirklichkeit. Campus-Verlag: Frankfurt/New York, 2002

[71] Mikulecky, D.C.: The circle that never ends: can complexity made simpler. Edr. Danail Bonchev & Dennis H. Rouvray, Springer Science + Business Media, New York, 2005, Seite 97-153

[72] Murzewski, J.: Sicherheit der Baukonstruktionen. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, DDR, 1974

[73] Neundorf, W: Wie zufällig ist der Zufall. http://www.neuendorf.de/zufall.htm, 2006

[74] Neundorf, W: Wieso weiß die Uhr, wie spät es ist? http://www.neuendorf.de/zeit.htm, 2006

[75] Noack, A.: Systeme, emergente Eigenschaften, unorganisierte und organisierte Komplexität, 28.11.2002, http://www-sst.informatik.tu-cottbus.de/~db/Teaching/Seminar-Komplexitaet-WS2002/Thema1-Slides_Andreas.pdf

[76] Nussbaum, M.: Non-Relative Virtues: An Aristotelian Approach. The Quality of Life, Martha C. Nussbaum and Amartya Sen (Eds.), Clarendon Press, 1993 Oxford, Seite 242-269

[77] Olsson, M.-O.; Sjöstedt, G.: Systems and Systems Theory. In Systems Approaches and Their Applications: Examples from Sweden. M.-O. Olsson & G. Sjöstedt (Eds.), Kluwer Academic Publishers, 2004, Seite 3-29

[78] Pawlak, Z.: Some Issues on Rough Sets. J.F. Peters et al. (Eds.): Transactions on Rough Sets I, Springer-Verlag, Berlin 2004, Seite 1-58

[79] Peitgen, H.-O.; Jürgens, H.; Saupe, D.: Chaos – Bausteine der Ordnung. Springer-Verlag, Klett-Cotta, Stuttgart 1994

[80] Piecha, A.: Die Begründbarkeit ästhetischer Werturteile. Fachbereich: Kultur- u. Geowissenschaften, Universität Osnabrück, Dissertation 1999

[81] Plinke, M.: Handbuch für Erst-Autoren. Vierte, erweiterte Auflage, Autorenhaus Verlag, Berlin 2004

[82] Preston, R.: Das erste Licht – Auf der Suche nach der Unendlichkeit. Knaur, München, 2003

[83] Proske, D.: Katalog der Risiken – Risiken und ihre Darstellung. Dirk Proske Verlag, Dresden 2004

[84] Proske, D.; van Gelder, P.: Analysis about extreme water levels along the Dutch north-sea using Grey Models: preliminary analysis. ESREL 2006 Conference, September 2006, Portugal

[85] Pulm, U.: Eine systemtheoretische Betrachtung der Produktentwicklung. Dissertation, Lehrstuhl für Produktentwicklung der Technischen Universität München. 2004

[86] Randić, M.; Guo, X.; Plavšić, D.; Balaban, A.T.: On the complexity of fullerenes and nanotubes. Edr. Danail Bonchev & Dennis H.Rouvray, Springer Science + Business Media, New York, 2005, Seite 1-48

[87] Rescher, N.: Priceless knowledge? Natural science in economic perspective. Rowman and Littlefield. Lanham, 1996
[88] Richter, U.R.: Redundanz bleibt überflüssig? LACER (Leipzig Annual Civil Engineering Report) 8, 2003, Universität Leipzig, Seite 609-617
[89] Riedl, R.: Strukturen der Komplexität – Eine Morphologie des Erkennens und Erklärens. Springer Verlag, Heidelberg, 2000
[90] Riegel, R.: Programm ChaosExplorer 1.0.0., http://www.roland-riegel.de/chaosexplorer, 2006
[91] Schlichting, J.: Die Strukturen der Unordnung. Essener Unikate 11/1999, Seite 8-21
[92] Schmidt, K.: Pilotstudie – Reisen und Gesundheit. Dissertation, Universität Bielefeld, Fakultät für Gesundheitswissenschaften, 2003
[93] Schulz, M.: Statistische Physik komplexer Systeme, Universität Ulm, http://theotp1.physik.uni-ulm.de/~schu/komplex/lec1.html, 2006
[94] Schulz, M.: Statistische Physik und ökonomische Systeme – Theoretische Econophysics. 3. Juni 2002
[95] Schulz, U. (Hrsg.): Lebensqualität – Konkrete Vorschläge zu einem abstrakten Begriff. Aspekte Verlag, Frankfurt am Main 1975
[96] Schwaniger, M.: Systemtheorie – Eine Einführung für Führungskräfte, Wirtschafts- und Sozialwissenschafter, 3. Auflage, No 19 – Dezember 2004, Universität St. Gallen, Institut für Betriebswirtschaft
[97] Seemann, F. W.: Was ist Zeit? Einblicke in eine unverstandene Dimension. Wissenschaft & Technik Verlag, Berlin 1997
[98] Siefert, M.; Renner, C.: Rayleigh-Bénard-Konvektion – Wärmetransport in konvektiven Strömungen. Fortgeschrittenen-Praktikum, Universität Oldenburg, Fachbereich Physik, http://www.physik.uni-oldenburg.de/hydro/anleitung.pdf, 2006
[99] Slutzky, E.: The Summation of Random Causes as the Source of Cyclic Processes, Econometrica 5 (1937), S. 105-146
[100] Smith, N.J.J.: Vagueness. PhD. Thesis, Princeton University, November 2001
[101] Spiering, C.: Auf der Suche nach der Urkraft. Kleine Naturwissenschaftliche Bibliothek, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft Leipzig 1989
[102] Springer, M.: Wille und Wissen, Spektrum der Wissenschaft, Februar 2006, Seite 110-113
[103] Statistik-Skript: Fachhochschule Gelsenkirchen, FB Wirtschaft/Abt. Bocholt Münsterstraße 265
[104] Stegmüller, W.: Historische, psychologische und rationale Erklärung. Kausalitätsprobleme, Determinismus und Indeterminismus. Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie – Band 1: Wissenschaftliche Erklärung und Begründung. Studienausgabe Teil 3, Springer Verlag Berlin 1969
[105] Strauss, A.; Bergmeister, K.; Novák, D.; Lehký, D.: Stochastische Parameteridentifikation bei Konstruktionsbeton für die Betonerhaltung. Beton- und Stahlbetonbau 99 (2004), Heft 12, Seite 967-974
[106] Stützle, T. G.: Combinatorial Problems - Analysis, Improvements and New Applications. Dissertation am Fachbereich Informatik der Technischen Universität Darmstadt, Darmstadt 1998
[107] The Exploratorium: http://www.exploratorium.edu/complexity/lexicon/complexity.html, 2006
[108] Torgersen, H.: Wozu Prognose. Beitrag zu den Salzburger Pfingstgesprächen 2000: Ist das Ende absehbar? - Zwischen Prognosen und Prophetie. 6.8.2000

[109] Ulanowicz, R.E.: The complex Nature of Ecodynamics. Complexity in Chemistry, Biology and Ecology. Edr. Danail Bonchev & Dennis H.Rouvray, Springer Science + Business Media, New York, 2005, Seite 303-329
[110] van Lambalgen, M.: Randomness and infinity. In H.W. Capel, J.S. Cramer, O. Estevez-Uscanga, C.A.J. Klaassen, and G.J. Mellenbergh, editors, Chance and Uncertainty, Amsterdam University Press, Amsterdam, 1995, Seite 9-27
[111] Varzi, A.C.: Supervaluationism und Paraconsistency. Edr. Diderik Batens, Chris Mortensen, Graham Preist & Jean-Paul Van Bendegem: Frontiers in Paraconstent Logic. Studies in Logic und Computation Series 8, Research Studies Press, Baldock, 2000, Seite 279-297.
[112] von Bertalanffy, L.: General System Theory. George Braziller, New York, 1968
[113] Waggoner, D.: Program: Dynamical Systems. http://archives.math.utk.edu/software/msdos/complex.variables/dy-syst/.html, 2006
[114] Wasser, H.: Sinn Erfahrung Subjektivität – Eine Untersuchung zur Evolution von Semantiken in der Systemtheorie, der Psychoanalyse und dem Szientismus. Königshausen & Neumann, Manuskript 1994
[115] Weaver, W.: Science and Complexity. American Scientist, 36, 1048, Seite 536–544
[116] Weber, W.K.: Die gewölbte Eisenbahnbrücke mit einer Öffnung. Begriffserklärungen, analytische Fassung der Umrisslinien und ein erweitertes Hybridverfahren zur Berechnung der oberen Schranke ihrer Grenztragfähigkeit, validiert durch einen Großversuch. Dissertation, Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München, 1999
[117] Weinberg, G. M.: An Introduction to General Systems Thinking, Wiley-Interscience, 1975
[118] Weiss, M.: Data Structures & Problem Solving Using Java.
[119] Weißmantel, C.; Lenk, R.; Forker, W.; Linke, D. (Hrsg.): Kleine Enzyklopädie: Struktur der Materie. VEB Bibliographisches Institut Leipzig 1982
[120] Wen, K.-L.; Chang, T.-C.: The research and Development of Completed GM(1,1) Model Toolbox using Matlab. International Journal of Computational Cognition, Volume 3, No. 3, September 2005, Seite 41-47
[121] Wikipedia. Die freie Enzyklopädie: Definition. http://de.wikipedia.org/wiki/Begriffsbestimmung, 2006
[122] Wikipedia: http://de.wikipedia.org/wiki/Scientometrie, 2006
[123] Wittgenstein, L.: Philosophische Untersuchungen. Blackwell, Oxford, 1953, Nachdruck: Suhrkamp, Frankfurt, 1984
[124] Wojtecki, J.G. Jr.; Peters, R.G.: Communicating organizational change: Information technology meets the carbon-based employee unit. Center for Risk Communication, New York, 2006, www.centerforriskcommunication.com/pubs/crc-p3.pdf
[125] Wolf, F.: Berechnung von Information und Komplexität in Zeitreihen – Analyse des Wasserhaushaltes von bewaldeten Einzugsgebieten. Dissertation. Universität Bayreuth. Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften. 2000
[126] WonderWeb: Ontology Infrastructure for the Semantic Web, http://wonderweb.semanticweb.org/, 2006
[127] Wulf, I.: Wissen schaffen mit Quantencomputern, http://www.heise.de/tp/r4/artikel/15/15398/1.html, 21.08.2003
[128] Zadeh, L.A.: Fuzzy sets. Information and Control 8 (1965), Seite 338–353
[129] Zhang, S. Childress, A. Libchaber, Phys. Fluids 9, 1034 (1997)

Dirk Proske:
Katalog der Risiken –
Risiken und ihre Darstellung
Deutsche Erstausgabe 2004
372 Seiten
130 Abbildungen
101 Tabellen
ISBN 3-00-014396-3
Preis: 20 €
Softcover
Dirk Proske Verlag
Goetheallee 35
01309 Dresden
Deutschland
dirk.proske@boku.ac.at
http://homepage.boku.ac.at/dproske/

Im „Katalog der Risiken“ werden zunächst die verschiedenen Arten von Risiken, denen ein Mensch im Laufe seines Lebens ausgesetzt ist, an Beispielen beschrieben. Im zweiten Teil werden diese Risiken mit verschiedenen Parametern dargestellt und verglichen. Dabei wird der Entwicklung von einfachen Risikoparametern zu komplexeren Parametern gefolgt. Das Buch beweist, dass soziale Risiken die höchsten Risiken für Menschen darstellen und dass der Kampf gegen diese für eine humanistische Gesellschaft zwingend ist. Zum Abschluss wird am Beispiel der Verstärkung historischer Brücken gegen Schiffsanprall die praxisnahe Anwendung der Risikoparameter verdeutlicht.

Silke Scheerer • Dirk Proske:
Stahlbeton for Beginners
Einführung in den Stahlbetonbau
Deutsche Erstausgabe 2005
206 Seiten (mit Anhang)
106 Abbildungen
35 Tabellen
Umfangreicher Anhang mit Übungsaufgaben
ISBN 3-00-015523-6
Preis: 25 €
Softcover
Dirk Proske Verlag
Goetheallee 35
01309 Dresden
Deutschland
dirk.proske@boku.ac.at
http://homepage.boku.ac.at/dproske/

Stahlbeton war der erfolgreichste Baustoff im letzten Jahrhundert. Und er wird es auf absehbare Zeit auch bleiben. Für die richtige Anwendung dieses Materials benötigt man jedoch umfangreiche Kenntnisse. Dieses Buch vermittelt die Grundlagen für die Berechnung und Bemessung von Stahlbetonbauteilen. Neben diesen Regeln werden auch die mechanischen Grundlagen und die Wirkungsweise des Verbundwerkstoffes erläutert.

Beim Verfassen des Buches wurde viel Wert auf gute Verständlichkeit gelegt, denn sehr oft wird die Bemessung dieses Verbundwerkstoffes von Lernenden als schwierig empfunden. Zusätzlich zu den theoretischen Erläuterungen finden sich im Anhang des Buches auch einfache Bemessungsaufgaben.

Dirk Proske • Peter Lieberwirth • Pieter van Gelder
Sicherheitsbeurteilung historischer Steinbogenbrücken
Deutsche Erstausgabe 2006
311 Seiten
139 Abbildungen
112 Tabellen
ISBN 3-00-018131-8
Preis: 25 €
Softcover
Dirk Proske Verlag
Goetheallee 35
01309 Dresden
Deutschland
dirk.proske@boku.ac.at

Historische Steinbogenbrücken bilden einen wesentlichen Bestandteil der europäischen Brückenlandschaft. Einige dieser Brücken erfüllen ihre Aufgabe seit Hunderten von Jahren. Veränderte Einwirkungen und Alterungserscheinungen führen häufig zu der Frage, inwieweit diese Bauwerke den heutigen Sicherheitsanforderungen noch genügen. Dieses Buch befasst sich deshalb ausführlich mit der Beurteilung der Sicherheit dieser Kulturgüter.