

Glossar

aus: Klaus Mainzer, Komplexität, UTB 3012, Paderborn 2008, S. 118 – 125

(Verwendete Begriffe des Glossars werden mit ↑ gezeichnet.)

Algorithmus: Formales Verfahren zur Berechnung einer Funktion bzw. eines Problems. Der A. einer berechenbaren Funktion bzw. eines berechenbaren Problems kann durch ein Computerprogramm (↑Turingmaschine) realisiert werden.

Algorithmische Komplexität: Maß für die ↑Komplexität eines Problems als Größe des kürzesten Computerprogramms, das ein Problem berechnet oder eine vollständige Beschreibung des Problems liefert.

Attraktor: Zustand, in den ein ↑dynamisches System langfristig hineingezogen wird. Ein Gleichgewichtszustand entspricht einem Fixpunkt-Attraktor, der sich im Lauf der Zeit nicht mehr verändert (»fixiert bleibt«). Im ↑Phasenraum laufen ("konvergieren«) dann alle Entwicklungslinien (Trajektorien) zu diesem Punkt als Endzustand. Lineare Systeme (↑Linearität) besitzen nur Fixpunkt-Attraktoren. Nichtlineare Systeme (↑Nichtlinearität) besitzen auch Grenzyklen (↑Grenzyklus), in denen sich Zustände periodisch wiederholen, oder im Fall von Turbulenz Chaosattraktoren (↑Chaos), bei denen sich die Entwicklungslinien völlig irregulär und nicht-periodisch in einem begrenzten Gebiet des Zustandsraums verdichten. Wenn sie dabei ein ↑Fraktal bilden, spricht man von einem »seltsamen« Attraktor (*strange attractor*).

Bifurkation: Verzweigung einer Zustandsentwicklung an einem Instabilitätspunkt (↑Instabilität) eines ↑dynamischen Systems, wenn der ↑Kontrollparameter des Systems verändert wird.

Binärzahl: Darstellung einer Zahl mit den binären Ziffern 0 und 1 zur Basis 2 anstelle z.B. einer Dezimaldarstellung mit den Ziffern 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9 zur Basis 10. Beispiel: Die Binärzahl $101 = 1 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$ entspricht der Dezimalzahl $5 = 5 \cdot 10^0$.

Bit: Abkürzung für englisch *binary digit*. Bezeichnung für die kleinste Darstellungseinheit für Daten und Information mit Binärzahlen (↑Binärzahl): Ein Bit kann entweder den Wert 0 oder 1 einnehmen.

Brownsche Bewegung: Zufallsbewegungen von z.B. Molekülen oder Börsendaten, die voneinander so unabhängig sind wie die Münzwürfe einer fairen Münze.

Chaos: Deterministisches C. ist der ↑Attraktor eines nichtlinearen dynamischen Systems (↑Nicht-linearität, ↑Dynamisches System), das sich irregulär und nichtperiodisch (»chaotisch«) entwickelt, obwohl seine Zustände durch ein Entwicklungsgesetz eindeutig determiniert sind (↑Determinismus). Die Entwicklung eines chaotischen Systems hängt empfindlich von kleinsten Veränderungen der Anfangsbedingungen ab (↑Schmetterlingseffekt, ↑Lyapunov Exponent) und ändert sich bereits nach wenigen Schritten. Daher sind nur kurzfristige Zukunftsprognosen möglich (z.B. Wetter). Der Rechenaufwand für langfristige Prognosen wächst exponentiell (↑Komplexität).

Chromosom: DNS-Strang (↑DNS) aus Millionen von Nukleotiden, den Bausteinen von Nukleinsäuren, die der Speicherung und Übertragung genetischer Information dienen.

Determinismus: Ein ↑dynamisches System heißt deterministisch, wenn jeder Zustand durch sein Entwicklungsgesetz eindeutig bestimmt ist.

Dissipatives dynamisches System: Offenes ↑dynamisches System, das im Stoff- und/oder Energieaustausch mit seiner Umgebung ist und dabei Wärmeenergie freisetzen kann (z.B. Dissipation von Wärmeenergie bei Reibung). Durch wachsende Energiezuführung kann es vom thermischen Gleichgewicht fortgetrieben werden und neue Ordnungen und Strukturen aufbauen, die durch Attraktoren (↑Attraktor)

bestimmt sind. Beispiel: Strömungsbilder in einem Fluss, Wachstum eines Organismus.

DNS: Desoxyribonukleinsäure. Zwei Stränge DNS bilden eine spiralförmige Doppelhelix, die durch Basenpaare verbunden sind und dabei an eine Wendeltreppe erinnern. In der DNS sind alle Informationen für die Entwicklung eines Organismus kodiert.

Dynamisches System: System von Elementen, die in bestimmten Zuständen (z.B. Bewegungszustand eines Moleküls, Feuern einer Nervenzelle, Entwicklungszustand eines Aktienkurses) sind und deren Dynamik durch ein zeitabhängiges Entwicklungsgesetz beschrieben werden kann. Je nach Art der Gleichung des Entwicklungsgesetzes kann es sich um ein deterministisches oder stochastisches System (↑Determinismus, ↑Stochastik) handeln.

Dynamische Komplexität: ↑Komplexität von dynamischen Systemen (↑Dynamisches System), deren Attraktoren (↑Attraktor) von der einfachen geometrischen Struktur eines Fixpunkts über Grenzzyklen (↑Grenzzyklus) bis zur komplexen Struktur eines Chaosattraktors (↑Chaos) reichen. Im ↑Zufallsrauschen sind alle Strukturen zerfallen.

Emergenz: Emergente Eigenschaften sind makroskopische Eigenschaften eines ↑dynamischen Systems, die weder in den mikroskopischen Systemelementen auftreten noch daraus ableitbar sind. Man sagt: Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile (↑Nichtlinearität). Beispiele: Wassermoleküle sind nicht feucht wie Wasser. Neuronen können nicht denken wie Gehirne.

Entropie: Maß für den Grad der Zufälligkeit und Unordnung eines ↑dynamischen Systems. Sie entspricht der Anzahl der verschiedenen Möglichkeiten, die mikroskopischen Zustände der Systemelemente anzuordnen, um denselben makroskopischen Systemzustand zu erzeugen. Beispiel: Verschiedene Anordnungsmöglichkeiten von Wassermolekülen, um dieselbe Wassertemperatur zu erzeugen.

Evolutionärer Algorithmus: ↑Algorithmus, der die Dynamik der Evolution mit ↑Mutation, Selektion und Adaption simuliert, um optimale Lösungen in der Lösungsmenge eines Problems zu finden.

Fourier-Analyse: Nach dem französischen Mathematiker J. Fourier lässt sich jedes stetige Signal endlicher Dauer als Überlagerung (Superposition) von periodischen Oszillationen mit verschiedener Frequenz und Amplitude darstellen. Die verschiedenen periodischen Komponenten werden durch das Signalspektrum gemessen.

Fraktal: Geometrisches Objekt, das durch Selbstähnlichkeit bestimmt ist, d.h. Teile eines F.s sind bei entsprechender Vergrößerung ähnlich zum Ganzen. Beispiele: Küstenlinien von Ländern und Kontinenten, aber auch chaotische Zeitreihen (↑Zeitreihe) haben statistische Selbstähnlichkeit. Seltsame Attraktoren (↑Attraktor) sind ebenfalls F.e.

Gen: DNS-Abschnitt (↑DNS), das die gesamte genetische Information beinhaltet und deren Bearbeitung steuert.

Genetisches Programmieren: Anwendung eines ↑evolutionären Algorithmus in einem Computerprogramm, das insbesondere die Genetikgesetze simuliert.

Gesetz der großen Zahl: Vergrößert man bei einer ↑Zufallsfolge, bei der die Ereignisse voneinander unabhängig sind (z.B. Münzwurf), die Stichproben immer weiter, so wächst die Wahrscheinlichkeit, dass das Verhältnis von z.B. Kopfwürfen zur Gesamtzahl der Würfe in einer Stichprobe einer Grenzzahl (z.B. 1 : 2 bei einer idealen Münze) beliebig nahe kommt.

- Grenzyklus:** Periodisches Verhalten eines \uparrow dynamischen Systems, bei dem sich Zustände regelmäßig wiederholen (z.B. Pendelschwingung). Es zeigt sich im \uparrow Phasenraum in einer geschlossenen Kurvenbahn, die G. genannt wird. Unabhängig von den Anfangsbedingungen mündet die Entwicklungslinie (Trajektorie) eines periodischen Systems in einen G.
- Hedging:** Absicherung von Wertpapieren z.B. durch Berechnung ihrer Risiken mit der Black-Scholes Formel.
- Hurst-Koeffizient:** Koeffizient H nach dem britischen Hydrologen H.E. Hurst, mit dem sich der Grad der Unabhängigkeit von Ereignissen messen lässt. Eine Ereignisfolge mit $H = \frac{1}{2}$ entspricht \uparrow mildem Rauschen wie bei der \uparrow Brownschen Bewegung. Bei $H > \frac{1}{2}$ treten Trendmuster (\gg Gedächtnis \ll) auf wie beim \uparrow Joseph-Effekt, bei $H < \frac{1}{2}$ abrupte Änderungen wie beim \uparrow Noah-Effekt.
- Information:** Der Informationsgehalt einer Zeichensequenz wird in \uparrow Bit gemessen. Die Biteinheiten 0 und 1 lassen sich durch alternative Zustände dynamischer Systeme (\uparrow dynamisches System) realisieren (z.B. alternative Spannungszustände von Schaltern in einem Computer, Feuern oder Nicht-Feuern einer Nervenzelle im Gehirn).
- Instabilität:** Stationärer Zustand eines \uparrow dynamischen Systems, in dem eine kleine Störung eine Veränderung des gesamten Systemzustands auslösen kann (\uparrow Phasenübergang).
- Joseph-Effekt:** Biblisches Bild, mit dem anschaulich ein Trend (\gg Marktgedächtnis \ll) in der Entwicklung einer ökonomischen \uparrow Zeitreihe (z.B. Börsendaten) bezeichnet wird.
- Komplexität:** In der Informatik bezieht sich K. auf den Aufwand von Zeit, Beschreibung und Größe des Computerprogramms zur Berechnung einer Funktion bzw. eines Problems. Die K. der Beschreibung und Größe des Computerprogramms wird durch die \uparrow Algorithmische Komplexität bestimmt. Die Einteilung der K. nach der Laufzeit hängt von der entsprechenden mathematischen Zeitfunktion ab, die linear, quadratisch, polynomiell oder exponentiell wachsen kann. In der Physik bezieht sich K. auf dynamische Systeme (\uparrow Dynamische Komplexität), deren Attraktoren (\uparrow Attraktor) von der einfachen geometrischen Struktur eines Fixpunkts bis zur komplexen Struktur eines Chaosattraktors (\uparrow Chaos) reichen.
- Konservatives dynamisches System:** Abgeschlossenes \uparrow dynamisches System, dessen Entwicklungslinien (Trajektorien) im \uparrow Phasenraum Volumen erhalten ("konservieren \ll ") - im Unterschied zu einem \uparrow dissipativen dynamischen System. Daher können sie keine Regionen im Phasenraum ausbilden, wo Trajektorien z.B. in einem Fixpunkt (\uparrow Attraktor) zusammenlaufen (konvergieren). Allerdings können sie chaotisch (\uparrow Chaos) werden und empfindlich von den Anfangsbedingungen abhängen. Beispiel: Abgeschlossenes System der Himmelsmechanik mit wenigstens drei Himmelskörpern, das instabil und chaotisch werden kann.
- Kontrollparameter:** Parameter, von dem ein \uparrow dynamisches System abhängt und dessen Veränderung zur \uparrow Selbstorganisation (\uparrow Emergenz) von neuen Strukturen, aber auch zu \uparrow Chaos führen kann.
- Lernalgorithmus:** \uparrow Algorithmus, der in einem \uparrow neuronalen Netz schrittweise ein Lernziel realisiert. Ein Lernziel kann im Phasenraum des neuronalen Netzes durch einen \uparrow Attraktor dargestellt werden, dem sich die Trajektorie der Zustandsentwicklung schrittweise nähert. Man unterscheidet überwachtes Lernen (z.B. Backward-Propagation) und nicht-überwachtes Lernen (z.B. Kohonen-Netz). Ein L. ist ein Beispiel für \uparrow Selbstorganisation von Neuronen, bei der spontan ein makroskopisches Muster wiedererkannt oder neu entdeckt wird.
- Linearität:** In linearen dynamischen Systemen ist die Dynamik durch ein lineares

Entwicklungsgesetz bzw. eine lineare Gleichung bestimmt. Dann sind Ursache und Wirkung proportional. Beispiel: Kleiner Stoß eines Pendels führt zu kleinem Schwung, großer Stoß zu großem Schwung.

Lyapunov Exponent: Exponent, mit dem die empfindliche Abhängigkeit eines \uparrow dynamischen Systems von kleinsten Veränderungen seiner Anfangsdaten gemessen wird.

Mastergleichung: Stochastische Differentialgleichung, mit der die Dynamik eines stochastischen Systems (\uparrow Stochastik), d.h. die zeitliche Veränderung einer statistischen Verteilungsfunktion als Systemzustand, modelliert wird. Universelle Anwendung auf stochastische Systeme in Natur und Gesellschaft.

Metabolismus: Stoffwechsel eines Organismus als komplexes \uparrow dynamisches System, der der Aufnahme, dem Einbau, Abbau, der Verbrennung oder dem Ausscheiden von Substanzen dient.

Mildes Rauschen: Weißes \uparrow Rauschen wie bei Zufallspfaden der \uparrow Brownschen Bewegung.

Mutation: Veränderung der genetischen Information, die auch zufällig eintreten kann.

Noah-Effekt: Biblisches Bild, mit dem anschaulich eine abrupte Veränderung (\gg Crash \ll) in einer ökonomischen Zeitreihe (z.B. Börsendaten) bezeichnet wird.

Neuronales Netzwerk: Komplexes Netzwerk von Nervenzellen (Neuronen), die durch Synapsen verbunden sind. Die Architektur und Dynamik von technischen N.N.en sind nach dem Vorbild lebender Gehirne konzipiert. Es handelt sich um komplexe dynamische Systeme (\uparrow Dynamisches System, \uparrow Komplexität), deren Dynamik durch Lernalgorithmen (\uparrow Lernalgorithmus) modelliert wird.

Nichtlinearität: In nichtlinearen dynamischen Systemen (\uparrow dynamisches System) ist die Dynamik durch ein nichtlineares Entwicklungsgesetz bzw. eine nichtlineare Gleichung bestimmt. Dann sind Ursache und Wirkung nicht mehr proportional wie im Fall von \uparrow Linearität. Es kommt zu Rückkopplungen und komplexen Wechselwirkungen der Systemelemente, die \uparrow Selbstorganisation (\uparrow Emergenz) von neuen Strukturen, aber auch \uparrow Chaos auslösen können.

NP-Problem: Klasse aller Funktionen bzw. Probleme, die von einer nichtdeterministischen Turingmaschine (\uparrow Turingmaschine) in polynomieller Laufzeit berechnet werden können.

Ordnungsparameter: makroskopischer Parameter eines komplexen \uparrow dynamischen Systems, der eine neue makroskopische Struktur des Systems charakterisiert, die durch \uparrow Selbstorganisation (\uparrow Emergenz) nach einem \uparrow Phasenübergang des Systems entstanden ist.

Phasenraum: Mathematischer Raum, der durch die Zustandskoordinaten eines \uparrow dynamischen Systems aufgespannt wird. Beispiel: Der Zustand eines Pendels (Oszillator) ist durch Ort und Geschwindigkeit bestimmt, die als Koordinaten einen zweidimensionalen P. definieren. Ein Punkt im P. repräsentiert den Zustand des Systems zu einem Zeitpunkt. Zeitliche Zustandsveränderungen entsprechen Entwicklungskurven (Trajektorien), die in Attraktoren (\uparrow Attraktor) konvergieren können.

Phasenübergang: Abrupter Zustandswechsel in einem \uparrow dynamischen System. Beispiele der Physik: Festkörper-Flüssigkeit-Gas-Plasma. In der Theorie komplexer dynamischer Systeme ist ein P. mit der \uparrow Selbstorganisation (\uparrow Emergenz) einer neuen Struktur, aber auch mit der Entstehung von \uparrow Chaos verbunden.

Portfolio: Zusammenstellung von verschiedenen Aktien, um die Risiken von Gewinn und

Verlust zu verteilen. Ein P. ist effizient, wenn es bei kleinstem Risiko den höchsten Profit hervorbringt.

Potenzgesetz: Gesetz, das von der Potenz a einer Größe abhängt, d.h. die Form $f(x) = k \cdot x^a$ hat (z.B. Paretos Einkommenskurve). Es gilt unabhängig von seiner Skalierung (Skaleninvarianz). P.e sind typisch für komplexe Strukturen des Lebens wie z.B. Organismen und der Gesellschaft wie z.B. Wirtschaftssysteme.

P-Problem: Komplexitätsklasse aller Funktionen bzw. Probleme, die durch einen polynomial zeitbeschränkten \uparrow Algorithmus berechnet werden können (\uparrow Komplexität).

Rauschen: Folge von ungeordneten Signalgeräuschen, die sich graphisch in Zeitreihen (\uparrow Zeitreihe) zeigen. Allgemein spricht man vom $1/f^b$ -Rauschen (\uparrow Potenzgesetz) in Datenmustern und unterscheidet weißes Rauschen ($b = 0$ mit Normalverteilung wie bei der \uparrow Brownschen Bewegung), rosa Rauschen ($b = 1$), rotes Rauschen ($b = 2$) und schwarzes Rauschen ($b = 3$).

Schmetterlingseffekt: Anschauliches Bild für die empfindliche Abhängigkeit eines chaotischen Systems bei kleinsten Veränderungen der Anfangsdaten: Der Flügelschlag eines Schmetterlings kann im Prinzip im Fall einer instabilen Wetterlage eine globale Wetterveränderung auslösen.

Selbstorganisation: \uparrow Emergenz einer makroskopischen Struktur, die durch nichtlineare Wechselwirkung (\uparrow Nichtlinearität) vieler Systemelemente in einem komplexen \uparrow dynamischen System (\uparrow Komplexität) in der Nähe eines Instabilitätspunktes (\uparrow Instabilität) ausgelöst wird und mit einem \uparrow Phasenübergang verbunden ist.

Soziodynamik: Theorie komplexer sozialer Systeme (\uparrow Dynamisches System, \uparrow Komplexität), mit der soziale und wirtschaftliche Dynamik in Phasenübergängen (\uparrow Phasenübergang) modelliert wird. \uparrow Chaos, Zufall und Katastrophen, aber auch Innovationsschübe und Wachstumstrends werden durch Attraktoren (\uparrow Attraktor) darstellbar und erklärbar. Mathematisch kommen dazu häufig Mastergleichungen (\uparrow Mastergleichung) zur Anwendung.

Spieltheorie: Mathematisch-ökonomische Theorie zur Auswahl optimaler Verhaltensweisen von Systemen aus der Menge der möglichen Verhaltensstrategien in Konfliktsituationen. Im mathematischen Modell werden die Verhaltensstrategien als Spielstrategien aufgefasst. In der evolutionären S. werden evolutionäre Strategien von Populationen untersucht, die optimale Selektionen in evolutionär stabilen Gleichgewichtssituationen erlauben. Sie entsprechen der Untersuchung von Gleichgewichtssituationen und Attraktoren (\uparrow Attraktor) bei Phasenübergängen (\uparrow Phasenübergang) von komplexen dynamischen Systemen (\uparrow Dynamisches System, \uparrow Komplexität).

Stochastik: Mathematische Theorie stochastischer Prozesse und Systeme, deren Dynamik durch zeitabhängige Gleichungen für stochastische Zustände, d.h. durch die zeitliche Veränderung einer statistischen Verteilungsfunktion (z.B. \uparrow Mastergleichung) bestimmt wird. So wird der makroskopische Zustand eines Gases durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung seiner Moleküle bestimmt. Der makroskopische Zustand einer sozialen Gruppe ist durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung sozialer Faktoren und Eigenschaften (z.B. Geschlecht, Beruf, Alter) in einer Soziokonfiguration bestimmt (\uparrow Soziodynamik).

Thermodynamik: Physikalische Theorie, in der es um Wärme, Arbeit, Energie, Entropie und ihre Wechselbeziehungen in einem dynamischen System und seiner Umgebung geht.

Turingmaschine: Logisch-mathematisches Maschinenmodell für einen \uparrow Algorithmus.

Nach der Churchschen These ist eine T. Prototyp eines berechenbaren Algorithmus. Eine universelle T. kann im Prinzip jede spezielle T. simulieren. Technisch wird eine universelle T. heute annähernd durch einen Vielzweckcomputer (*general purpose computer*) realisiert, auf dem (wie z.B. auf einem PC) viele Computerprogramme (als Beispiele spezieller T.en) laufen können. In einer nichtdeterministische T. gibt es auch Zufallsbefehle («Orakel«).

Volatilität: Kursänderungen an der Börse. Klassisch wird V. durch statistische Varianz und Standardabweichung von der Normalverteilung (↑Mildes Rauschen) gemessen. Tatsächlich kann die V. aber turbulent und durch ↑wildes Rauschen bestimmt sein (↑Joseph-Effekt, ↑Noah-Effekt).

Wahrscheinlichkeit: Grad der Möglichkeit des Eintritts eines Ereignisses (objektive W.) oder Grad der Gewissheit oder Glaubwürdigkeit einer Aussage (subjektive W.). Sowohl subjektive als auch objektive W. lassen sich äquivalent axiomatisch definieren.

Wildes Rauschen: ↑Rauschen aufgrund von Potenzgesetzen (↑Potenzgesetz) wie z.B. rosa $1/f^b$ -Rauschen, das vom ↑milden Rauschen abweicht.

Zeitreihe: Datenreihe entlang der Zeitachse, insbesondere Zustandsänderungen eines dynamischen Systems. In einer Z.n-Analyse lassen sich Datenmuster feststellen, die Attraktoren (↑Attraktor) entsprechen und die ↑Komplexität des ↑dynamischen Systems charakterisieren. Damit sind unterschiedliche Grade der Prognostizierbarkeit der Z. verbunden. Beispiele: EKG-Kurve, EEG-Kurve, Börsendaten.

Zellulärer Automat: komplexes System von Zellen (anschaulich z.B. Felder eines Schachbretts), die endlich viele Zustände (z.B. Schwarz- und Weißfärbung) einnehmen können. Seine Dynamik wird durch Regeln bestimmt, wonach sich der Zustand einer Zelle in Abhängigkeit von gewissen Zellzuständen ihrer Nachbarschaft ändert. Z.A.en erinnern daher an zelluläre Organismen der Evolution. Tatsächlich können sich einige Z.A. selber reproduzieren. Sie erzeugen emergente Muster (↑Emergenz) durch ↑Selbstorganisation und simulieren die Attraktordynamik (↑Attraktor) komplexer dynamischer Systeme (↑Komplexität, ↑Dynamisches System) in einem digitalen Modell.

Zufallsfolge: Regellose Folge ohne algorithmisches Bildungsgesetz (↑Algorithmus).

Zufallssequenz: Endliche Sequenz von Symbolen, für die es keine kürzere Beschreibung gibt als die Sequenz selber, d.h. ihre ↑algorithmische Komplexität entspricht der Länge der Sequenz.

Zufallsnetz: Netz mit Knoten, deren Kantenverbindungen zufallsverteilt sind.

Zufallsrauschen: Zerfall aller Korrelationen zwischen Daten und Signalen von Ereignissen (z.B. im Muster einer ↑Zeitreihe). Alle Ereignisse sind unabhängig, so dass selbst kurzfristige Ereignisse (wie z.B. bei ↑Chaos) nicht mehr prognostizierbar sind. Z. entspricht in diesem Fall einer ↑Zufallsfolge oder einer ↑Brownschen Bewegung mit Normalverteilung und ist nur ein extremer Fall des ↑Rauschens von Signalen, die z.B. in ↑Zeitreihen von Natur und Gesellschaft auftreten.

Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik: Gesetz der ↑Thermodynamik, nach dem die ↑Entropie eines abgeschlossenen Systems, das nicht im Stoff-, Energie- oder Informationsaustausch mit seiner Umgebung steht, stets wächst oder (im Fall des thermischen Gleichgewichts) konstant bleibt.