

Hansotto Reiber

Die Komplexität biologischer Gestalt als zeit-unabhängiges Konstrukt im Zustandsraum.

Zum naturwissenschaftlichen Umgang mit Qualitäten

1. Einleitung

Die Komplexitätswissenschaft ist Ausdruck eines sich seit über hundert Jahren abzeichnenden Paradigmenwechsels vor allem in den Naturwissenschaften. Während in der Physik mit Quantenmechanik und Relativitätstheorie dieser Paradigmenwechsel vollzogen worden ist, tun sich die Wissenschaftler in der Biologie, Medizin, Soziologie, Ökonomie oder Ökologie schwer, aus den längst gewonnenen Einsichten Konsequenzen zu ziehen. Das mag mit am Dilemma einer reduktionistischen Naturwissenschaft liegen, die einerseits eine faszinierende Erfolgsgeschichte in der Technik aufweist und andererseits im Umgang mit Lebensprozessen scheitert. Die Technologie ist im Bereich eindeutiger Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge angesiedelt und dominiert die verwertungsorientierte Welt und Wissenschaft. Eine der erfolgreichsten wissenschaftlichen Theorien, Darwins Evolutionstheorie, zeigt exemplarisch dieses Problem. Leben ist danach auf die Frage nach den Eigenschaften von Genen und deren Produkten reduzierbar. Zu Recht fragt Brian Goodwin im Vorwort seines faszinierenden Buches zu Evolution und Komplexität¹: »Wo sind eigentlich die Organismen geblieben?« Er zeigt, wie die grundlegende Frage Darwins nach der Entstehung der Arten erst durch die Komplexitätswissenschaft

1 Brian C. Goodwin: *Der Leopard, der seine Flecken verliert. Evolution und Komplexität*, München 1997 (engl.: *How the Leopard Changed Its Spots: The Evolution of Complexity*, Princeton, NJ 2001).

eine naturwissenschaftliche Behandlung erlaubt. Die bislang fehlende Theorie zur Morphogenese (Gestaltbildung) der Organismen vermittelt ein besseres Verständnis der Emergenz der Arten. Damit verschiebt sich der Schwerpunkt der Betrachtung von Mechanismen der Vererbung und der natürlichen Auslese komplexer molekularer, von Genen gesteuerter Maschinen zur Betrachtung des Organismus als fundamentale und irreduzible Form, die aus selbstorganisierenden Prozessen zum Vorschein kommt.

Etwas Ähnliches ist auch in der molekular orientierten Medizin passiert. Durch die Fokussierung der Krankheitsforschung auf die molekularen Veränderungen oder auf die genetischen Prädispositionen ist der Patient, d.h. die Krankheit, als emergentes Ganzes aus den Augen geraten. Das Scheitern der Medizin an den chronischen Erkrankungen ist ein in diesem Beitrag diskutiertes Dokument für die Grenzen einer reduktionistischen molekularbiologischen Forschung.

Diese beiden Beispiele zeigen die Notwendigkeit eines neuen naturwissenschaftlichen Umgangs mit Qualitäten, Eigenschaften, mit Form und Funktion des Ganzen (Organismus, Krankheit).

In der Biologie und Medizin werden nun zunehmend nichtlineare Auswerteverfahren für Messreihen aus nichtinvasiven Untersuchungen angewandt, um die Eigenschaften von Systemen als Ganzes zu beschreiben. Dies geschieht z. B. numerisch als fraktale Dimension oder graphisch als Rekonstruktion eines Phasenportraits im Zustandsraum. Diese Rekonstruktion aus der gemessenen Zeitserie in rein räumlichen Dimensionen unter Elimination der Zeit-Dimension ist repräsentativ für den Wechsel von der zeitabhängigen quantitativen Analyse nichtlinearer Dynamik zur naturwissenschaftlichen Beschreibung von Qualitäten und deren Änderungen in biologischen Systemen. Dieser Schritt kann geradezu als Paradigmenwechsel in der naturwissenschaftlichen Forschung verstanden werden: Die naturwissenschaftliche Darstellung der Emergenz stabiler Gestalt im Gestaltraum revolutioniert die Evolutionsbiologie. Auch ein neues Verständnis einer chronischen Krankheit als stabiler Attraktor des Organismus, der sich von Gesundheit durch eine Zunahme der Ordnung in der Regulation unterscheidet, erlaubt es, völlig neue Therapiestrategien zu entwickeln.

Dieser Beitrag soll die Grundlagen und die allgemeine Anwendbarkeit dieser, wenngleich nur zögerlich verwendeten, aber wissenschaftlich längst fundierten Methoden der Komplexitätswissenschaften aufzeigen und auch das Verständnis der damit verbundenen erkenntnistheoretischen Bedeutung verbessern.

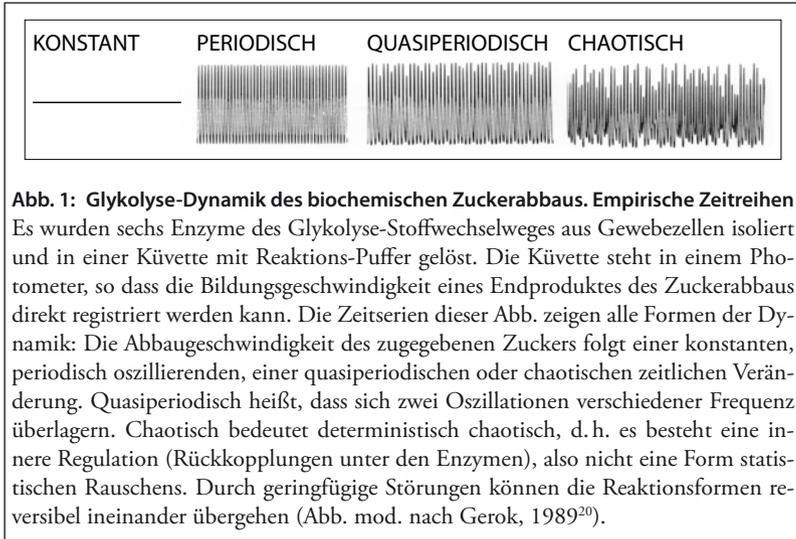
2. Komplexität, Chaos und Symmetrie in der Natur^{2, 3, 4, 5}

Umgangssprachlich wird das Wort komplex oft unspezifisch anstelle von kompliziert verwendet. Wissenschaftlich ist Komplexität aber als komplexer Ausdruck zu Ordnung zu verstehen. Damit ist auch eines der gängigen Missverständnisse des Begriffes Chaos geklärt: In der Komplexitätswissenschaft dreht es sich dabei um einen korrekterweise als »deterministisches Chaos« bezeichneten Ordnungsbegriff. Zeitlich aufeinander folgende Zustände haben einen inneren Funktionszusammenhang, durch den sich das deterministische Chaos in einer zeitlichen Messdatenfolge vom umgangssprachlichen Ausdruck Chaos als einer zufälligen Daten- oder Ereignisfolge (Rauschen) unterscheidet (Abb. 1). In der Komplexitätswissenschaft wird der nichtlineare Zusammenhang einander folgender Zustände behandelt. Im Folgenden sei auf einige für das Verständnis dieses Textes wichtige Begriffe der Komplexitätswissenschaft²⁻⁵ hingewiesen:

1. Die *Dynamik* biologischer Prozesse ist charakterisiert durch *nicht-lineare Funktionen* (Legende zu Abb. 2). Alle biologischen Systeme beruhen aufgrund ihrer inneren Regelmechanismen mit Rückkopplungen auf nichtlinearen Funktions-Zusammenhängen.

2. *Attraktor*⁶ (basin of attraction) ist der Bereich im Zustandsraum, der die Zustandsfolgen aller möglichen Anfangsbedingungen (z. B. einer nicht-

-
- 2 John Briggs und David F. Peat: *Die Entdeckung des Chaos. Eine Reise durch die Chaostheorie*, München 1997.
 - 3 Stuart Kauffman: *At home in the universe. The search for the laws of Self-Organization and Complexity*, Oxford 1995.
 - 4 Manfred Schröder: *Fraktale, Chaos und Selbstähnlichkeit*, Heidelberg 1994.
 - 5 Marc-Thorsten Hütt: *Datenanalyse in der Biologie*, Berlin 2001.
 - 6 Ein lebender Organismus existiert fernab des chemischen (thermodynamischen) Gleichgewichts und wird durch die (z. B. deterministischen) Wechselwirkungen seiner Elemente als Gesamtsystem stabil gehalten. Trotz extremster Schwankungen im Stoffwechsel einer Zelle (lokale Fluktuation) ändert sich deren Zelltyp aber nicht (globale Stabilität). Jede Zelle hat selbst wieder verschiedene stabile Stoffwechselzustände (Abb. 1), die stabil sind, aber auch in die anderen optionalen Attraktoren übergehen können. Stuart Kauffman³ lieferte ein entwicklungsbiologisches Beispiel für die Vielzahl stabiler Attraktoren eines Systems: Er fand durch Modellrechnungen heraus, dass die Zahl der stabilen Regelzustände (Attraktoren), die ein Keimbahn-Genom haben kann, etwa der Quadratwurzel aus der Zahl der Gene entspricht. Beim Menschen wird diese Zahl derzeit etwa mit 40000 angegeben. Dies bedeutet, dass es für das menschliche Genom ca. 200 stabile Regelzustände gibt. Diese Zahl entspricht interessanterweise etwa der Zahl verschiedener Zelltypen (Leberzelle, Nervenzelle etc.) im menschlichen Körper. Der einzelne Zelltyp kann damit als ein Attraktor aus der Gesamtzahl der möglichen



linearen Funktion) einschließt (sie sozusagen anzieht). Graphisch ist dieser Bereich als sog. Phasenportrait darstellbar (Abb. 4–6). Ein System, das trotz lokaler Fluktuation eine globale Stabilität⁶ hat, hat einen Attraktor.

3. *Fraktale Dimension*⁷ ist ein Maß, das die Komplexität eines Attraktors⁶ numerisch charakterisiert. In der Natur sind keine geraden Linien (Dimension = 1) oder ebene Flächen (Dimension = 2) zu finden. Es gibt nur gebrochene, d. h. fraktale oder eben nicht ganzzahlige Dimensionen

Attraktoren des Keimbahn-Genoms interpretiert werden. Auch das Genom ist Gegenstand selbstorganisierender Prozesse.

- 7 Der Begriff der Dimension für fraktale Gebilde hat eine längere Geschichte mit unterschiedlichen Bedeutungen und Berechnungsformeln als Möglichkeiten die Komplexität eines Systems numerisch zu charakterisieren^{4,8}. Als erster hatte Hausdorff⁴ die Länge fraktaler Kurven beschrieben (Hausdorff-Dimension D_H). Häufig verwendet wird die Korrelationsdimension⁴ D_2 (Abb. 3b). Als theoretisch fundierter numerischer Ausdruck einer Aperiodizität ist der Lyapunov Exponent⁸ zu nennen, der aber in der Praxis durch die zur Auswertung notwendige große Datenmenge wenig praktikabel ist. Für kleine Datensätze (kurze Zeitreihen) ist die Methode der »Approximierten Entropie« entwickelt worden⁹. Als »Einbettungs«-Dimension bezeichnet man die Koordinatenzahl (ganzzahlig) für die graphische, topologische Darstellung des Attraktors, d. h. damit wird vorgegeben, in welchem Rahmen das Phasenportrait abgebildet wird, zweidimensional, $m=2$, als Diagramm (Abb. 4, 5) oder dreidimensional, $m=3$, als räumliche Abbildung (Abb. 6). Die Einbettungsdimension kann formal auch größer gewählt werden, $m>3$.

(z. B. 1,2; 2,8; 7,4 etc.). Es gibt eine Reihe unterschiedlicher Dimensionsbegriffe, welche die Komplexität charakterisieren^{7,8,9}.

4. *Rekonstruktion im Zustandsraum*¹⁰. Für jedes System, das es erlaubt, eine hinreichend lange Zeitreihe eines Parameters (Elektroenzephalogramm, Blutdruck, Lufttemperatur) zu messen, lässt sich dessen Komplexität graphisch als Phasenportrait charakterisieren. Aus einer gemessenen Zeitserie wird die Gestalt des Systems im Zustandsraum rekonstruiert. Dieser Vorgang entspricht der Rekonstruktion einer dreidimensionalen Skulptur aus einer Serie von zweidimensionalen Bildern dieser Skulptur. Das ist aber nur möglich, wenn man die Reihenfolge der rundum aufgenommenen Bilder beibehält. Die Beibehaltung der Sequenz der Daten spielt eine entscheidende Rolle. Dies ist ganz allgemein die entscheidende Voraussetzung aller nichtlinearen Auswerteverfahren^{9,10}.

5. *Selbstähnlichkeit*^{4,11}: Die in verschiedenen Größenordnungen einer Gestalt gefundene Ähnlichkeit wird als Selbstähnlichkeit oder Skalen-Invarianz bezeichnet. Diese spezielle Symmetrie durchzieht die gesamte Natur^{1,4} und ist Basis der fraktalen Geometrie¹¹. Das Romanesco-Gemüse stellt ein auf jedem Gemüsemarkt zugängliches anschauliches Beispiel dar. Selbstähnlichkeit ist die wichtigste Eigenschaft komplexer Systeme mit nichtlinearer Dynamik. Sie ist auch die Voraussetzung für die Rekonstruktion im Zustandsraum (Abb. 7) und wird als ein zentrales Ergebnis der Auswertung mit nichtlinearen Auswerteverfahren gefunden.

6. *Selbstorganisation*¹² beschreibt die spontane Entstehung von Ordnung

-
- 8 J. Doyno Farmer, Edward Ott, James A. Yorke: »The Dimension of chaotic attractors«. *Physica*. 7D, 1983, S. 153–180.
- 9 Steve Pincus: »Approximate entropy (ApEn) as a complexity measure«. *Chaos*, 1995; 5, S. 110–117.
- 10 Floris Takens: »Detecting strange attractors in turbulence«. *Lecture notes in mathematics*, No. 898, New York und Heidelberg 1981, S. 366–381.
- 11 Benoît B. Mandelbrot: *Die fraktale Geometrie der Natur*, Basel 1991.
- 12 Selbstorganisation ist Organisation ohne Organisator. Entwicklungsprozesse, wie die Entstehung eines Organismus, sind selbstorganisierende Prozesse. In der Biologie beschreibt der Begriff Epigenese diesen in Raum und Zeit ablaufenden Anteil der Gestaltentwicklung (Morphogenese), der nicht auf dem Genom zu finden ist und auch nicht vom Genom »gesteuert« wird.¹⁶ Als normativ für das Verständnis von Selbstorganisation werden von mir drei empirische Beispiele zugrunde gelegt: 1. Die Belousov-Zhabotinski-Reaktion^{13,14}, in der in einer chemischen Reaktion spontan Ordnung entsteht. 2. Die Zahl stabiler Regelzustände des Keimbahn-Genoms entspricht der Zahl verschiedener Typen von Körperzellen eines Organismus⁶. 3. Die Wirtl-Bildung bei *Acetabularia* ist als stabile Gestalt (als biochemischer Attraktor) charakterisierbar¹. In der Evolution ist sie

durch Interaktion der konstituierenden Elemente eines chemischen^{13,14} biologischen¹ oder physikalischen Systems. Selbstorganisation wird hier einfach als ein Mechanismus der Entwicklungsprozesse in der belebten und unbelebten Natur verstanden, der nicht zielorientiert (teleologisch) und auch nicht gesteuert (kreationistisch) wirkt. Selbstorganisation wird in diesem Beitrag nicht als Systemtheorie behandelt.¹⁵

7. Die *Emergenz* einer Gestalt, Form oder Funktion ist das Erscheinen, das Zum-Vorschein-Kommen einer neuen Eigenschaft aus selbstorganisierenden Prozessen eines physikalischen, chemischen oder biologischen Systems. Diese emergente Eigenschaft ist eine neue Qualität, die in keinem der konstituierenden Elemente oder deren Interaktionen zu finden oder daraus zu erklären ist, wenngleich sie daraus entsteht. Es gibt also keine materielle »Repräsentation« dieser Qualität in einem der konstituierenden Elemente oder Teilsysteme¹⁶. Der gravierende Unterschied zur Selbstähnlichkeit ist dabei zu beachten.

3. Die Zeitreihe

Die Veränderungen eines Messparameters, z. B. bei Luftdruckänderungen, Elektroenzephalogramm, Fieberkurve, Börsenkurs etc., die während einer bestimmten Messzeit registriert werden, werden als sog. *Zeitreihe*^{5,18} dargestellt. Dies ist eine häufige Form von Messergebnissen in den Naturwissenschaften. Die *Zeitreihen* können als kontinuierliche oder mit konstanten Zeitabständen gemessene Datenfolgen dargestellt sein (siehe Unterschied zwischen Abb.1 und Abb. 3a). Die zentrale Frage der *Zeitreihenanalytik* ist: Wie kann man biologische *Zeitreihen* charakterisieren und welche Information ist daraus zu gewinnen? Die übliche lineare Statistik mit Mit-

als robuste Durchgangsform in der Ontogenese trotz vieler Mutationen während der Phylogenese erhalten geblieben.

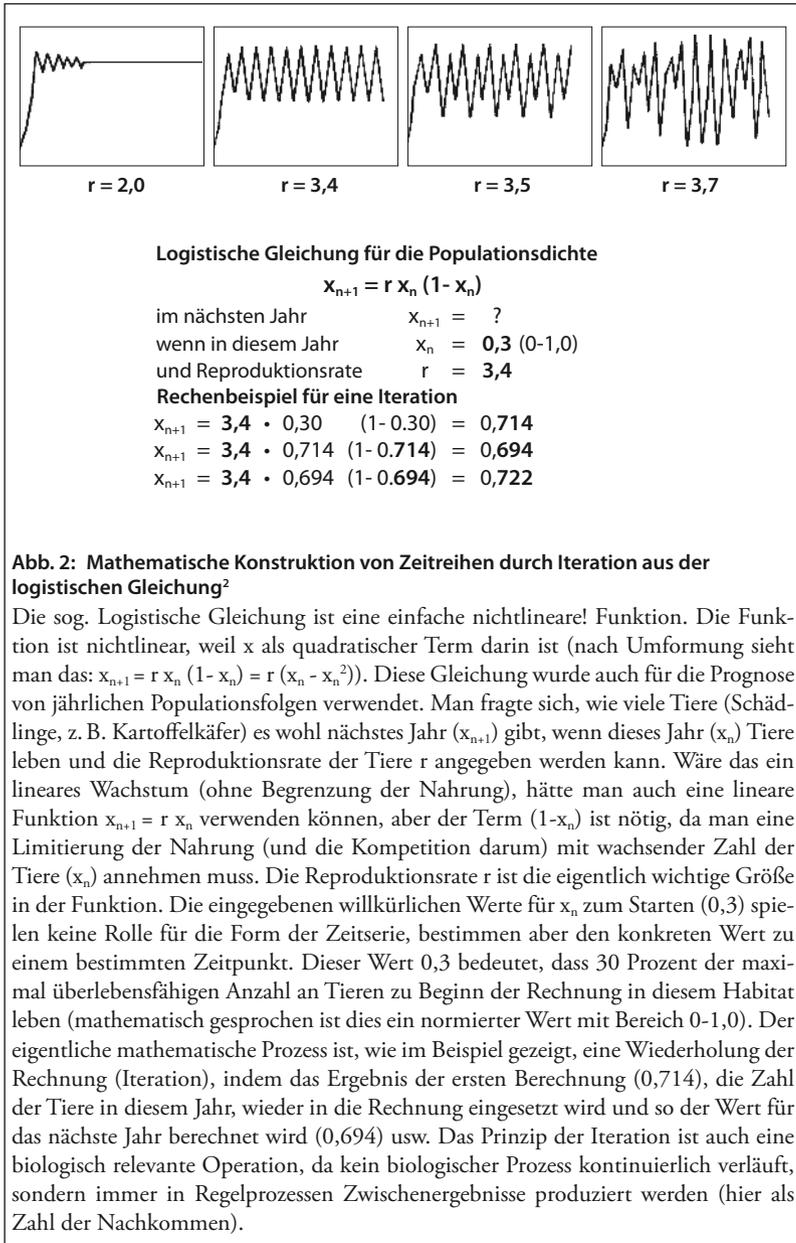
- 13 Hansotto Reiber: »Komplexitätswissenschaft und der naturwissenschaftliche Umgang mit Qualitäten. Ein Methoden-kritischer Beitrag zur neurobiologischen Hirn-Geist Diskussion«, in: Ulrich Joost (Hg.): *Lichtenberg Jahrbuch 2008*, Saarwellingen 2008.
- 14 Arthur T. Winfree: »Rotating chemical reactions«. *Sci Am*, 1974 ; 280, S. 82, 280.
- 15 Annette Schlemm: »Kann Selbstorganisationsdenken die Dialektik ersetzen?«, in: Doris Zeilinger (Hg): *VorSchein Nr.25/26, Jahrbuch 2004/2005 der Ernst-Bloch-Assoziation*, Nürnberg 2006.
- 16 Hansotto Reiber: »Die Entstehung von Form und Krankheit. Selbstorganisation oder genetisches Programm – zwei Paradigmen im Widerstreit«, in: Engels, Junker & Weingarten (Hg): *Ethik der Biowissenschaften*, Berlin 1998, S. 393–410.

telwert und Standardabweichung ist nicht geeignet, die Variabilität¹⁷ einer Zeitreihe zu beschreiben. Das zeigt ein einfaches Gedankenexperiment: Beim Übergang von einer periodischen (z.B. Abb. 4 links oben) in eine aperiodische Zeitreihe durch Austauschen der Reihenfolge von Werten bleibt der Mittelwert und Variationskoeffizient mit Bezug auf den Mittelwert unverändert. Für die nichtlineare Analyse einer solchen Zeitreihe¹⁸ sind neben den theoretischen auch einige praktische¹⁹ Probleme zu lösen.

Die empirische Zeitreihe

Das Beispiel in Abb. 1 mit kontinuierlicher Aufzeichnung eines nichtlinearen Funktionszusammenhangs stammt aus der Biochemie des zellulären Zuckerabbaus²⁰. Bereits eine Kombination von nur sechs isolierten Enzymen des zellulären Glucose(Zucker)-Abbaus haben eine unerwartete Dynamik: Die Bildung eines Abbauproduktes der biochemischen Reaktionskette kann in seiner Geschwindigkeit sowohl konstant, rhythmisch oszillierend (periodisch), quasiperiodisch oder gar chaotisch (aperiodisch) variierend sein (Abb. 1). Der Übergang von einer in eine andere Regelungs-Dynamik ist durch kleinste Konzentrationsschwankungen bewirkbar und deshalb nicht voraussagbar. Diese verschiedenen Dynamiken stellen nur einen Bruchteil aller Regulationszustände einer biologischen Zelle mit insgesamt

-
- 17 Es gibt zwar auch gelegentlich Beispiele, die mit einer Veränderung des Variationskoeffizienten einhergehen, also durch eine traditionelle, lineare Varianz auswertbar sind. Eine im internationalen Rahmen linear definierte Variabilität der Herzregulation zeugt vom Unverständnis gegenüber nichtlinearen Funktions-Zusammenhängen. (Task Force of the European Society of Cardiology and North American Society of Pacing and Electrophysiology: »Heart Rate Variability – Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use«, *Circulation*, 1993, 93, S. 1043–1065).
 - 18 Holger Kantz: »Nichtlineare Zeitreihenanalyse in der Physik. Möglichkeiten und Grenzen«, in: Klaus Mainzer (Hg): *Komplexe Systeme und Nichtlineare Dynamik in Natur und Gesellschaft*, Berlin 1999, S. 74–88.
 - 19 Das Mess-Rauschen und die evtl. durch Unempfindlichkeit des Messvorgangs entstandene Impräzision können Probleme machen. Je nach Auswertverfahren ist die Stationarität der Datenfolge zu fordern. Manchmal sind Korrekturen möglich, aber in vielen Fällen zerstört die Überlagerung der nichtlinearen Funktion mit stochastischen Prozessen die Auswertbarkeit (Beispiel in Hütt⁵).
 - 20 Wolfgang Gerok: »Ordnung und Chaos als Elemente von Gesundheit und Krankheit«, in: Wolfgang Gerok, Hermann Haken, Harald zur Hausen (Hg.): *Ordnung und Chaos in der unbelebten und belebten Natur*, Stuttgart 1989, S. 19–41.



ca. 1000 Enzymen und Stoffwechselprodukten dar. Daraus wird deutlich, wie irrelevant es ist, die molekulare Dynamik in einer Zelle naturwissenschaftlich exakt zu beschreiben. Zum besseren Verständnis nichtlinearer Zeitreihen soll das folgende mathematische Beispiel beitragen (Abb. 2).

Die mathematisch konstruierte Zeitreihe mit nichtlinearem Algorithmus

Die aufgezeigten Übergänge zwischen Zeitreihen verschiedener Ordnung oder Komplexität in Abb. 1 lassen sich durch eine einfache, aber *nicht-lineare* mathematische Funktion, die sog. »logistische Gleichung« simulieren² (Abb. 2). Die geringfügige Änderung des Parameters r zeigt eine spannende Entwicklung mit unerwarteten Sprüngen von der konstanten über oszillierende bis hin zu unvorhersagbar erscheinenden chaotischen Werte-Folgen der Zeitreihe (Abb. 2). Bei $r = 3,0$ geht die konstante Populationszahl in eine periodisch schwankende, oszillierende über, bei ca. 3,45 in eine quasiperiodische (4er-Rhythmus), bei 3,55 in einen 8er-Rhythmus und bei 3,6 in eine chaotische Zeitreihe übergeht. Bei $r = 3,7$ haben wir eine chaotische Folge, bei der die Population von einem Jahr zum anderen zwischen 10 und 90 Prozent schwanken kann. Als Beispiele mit extremen Werte-Unterschieden sind unerwartet auftretende Mäuse- oder Insektenplagen wohlbekannt. Im Beispiel Abb. 2 wird der Verlauf der jährlichen Populationszahlen, die von einer verschwindend geringen Zahl im einen Jahr ($x_n = 0,1$) bis zur katastrophalen Plage im folgenden Jahr ($x_n = 0,9$) gehen können, als chaotisch wahrgenommen. Wie wir an diesem Beispiel sehen, kann hinter einer »Katastrophe« auch eine relativ einfache, aber nichtlineare Funktion (Algorithmus) stehen; wir sprechen hier vom »deterministischen Chaos«. Wäre die Reproduktionsrate r Teil einer linearen Funktion (Legende zu Abb. 2), dann würde z. B. der Sprung von $r = 3,55$ nach $r = 3,6$ nur unwesentliche (vernachlässigbare) Veränderungen nach sich ziehen, nicht aber den Wechsel in eine chaotische Zustandsfolge bedingen (Abb. 2).

Die Berechenbarkeit des jeweiligen Zustandes aus dem vorhergehenden Zustand (Iteration in Abb. 2) macht deutlich, wie chaotische Zeitreihen sich grundsätzlich von statistischem Rauschen unterscheiden: Die Reihenfolge der Werte der Zeitreihe darf nicht zerstört werden, sonst wird der innere funktionale Zusammenhang zerstört und aus der deterministisch chaotischen Zeitreihe entsteht Rauschen. *Grundvoraussetzung aller nichtlinearen Auswertungsverfahren von Zeitreihen ist die Berücksichtigung der Werte-Reihenfolge.*

Nichtlineare Auswerteverfahren von empirischen Zeitreihen

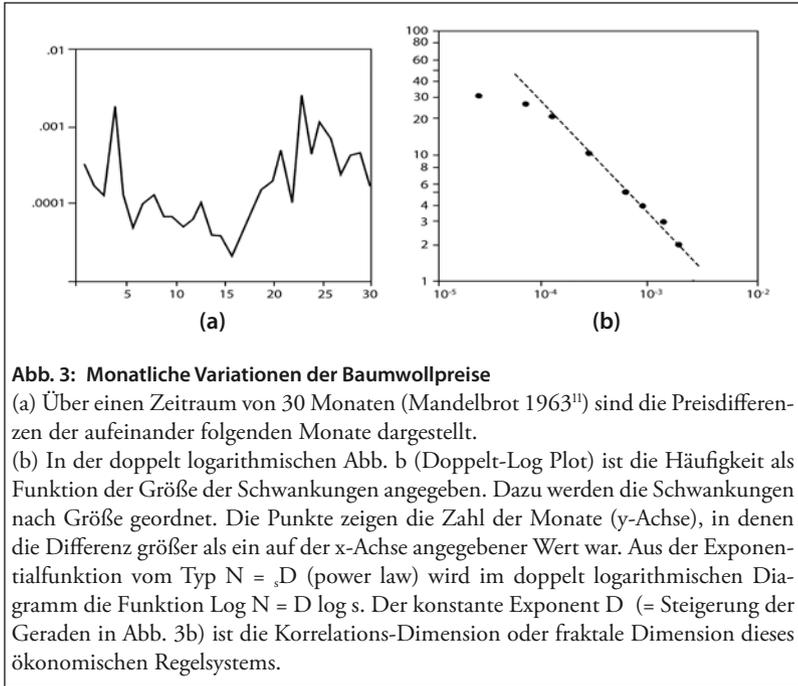
Wenn wir die biologischen Wechselwirkungen hinter einer Zeitreihe nicht kennen (was in der Praxis meist der Fall ist, wie z. B. in Abb. 1), können wir die mathematische Funktion nicht exakt bestimmen. Das ist aber auch gar nicht notwendig. Selbst wenn wir die Funktion inklusive aller Konstanten (r in Abb. 2) kennen würden, aber die Anfangsbedingungen²¹ unbekannt sind, ist eine Extrapolation auf den nächsten folgenden Wert oder Zustand nicht möglich. Diese grundsätzliche Unmöglichkeit der Extrapolation²¹ bei empirischen nichtlinearen Funktionen ist die eigentliche Provokation für das menschliche Gehirn mit einer erworbenen Vorliebe für lineare Extrapolation.

Die völlig andere Information aus der nichtlinearen Auswertung mit numerischen und graphischen Verfahren wird im Folgenden inhaltlich und methodenbezogen vorgestellt.

Numerische Auswertung als fraktale Dimension

Benoit Mandelbrot¹¹ beobachtete erstmals, dass etwas so Komplexes, Unvorhersagbares wie die monatliche Änderung des Baumwollpreises (Abb. 3a) über lange Zeiträume einer Gesetzmäßigkeit folgt: Durch ein nichtlinea-

21 Für nichtlineare Systeme ist eine exakte Prognose (z. B. des Wetters, Börsenkurses, zeitlichen Abstands des nächsten Herzschlags) nie exakt möglich. Wie in Abb. 2 gezeigt, ist die nichtlineare Funktion Ursache dafür, dass minimale Änderungen der Konstanten r zur Folge haben kann, dass ein prinzipiell anderer Attraktor entsteht. Außerdem ist in der Natur eine exakte Bestimmung aller Daten des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt (Anfangsbedingungen) grundsätzlich nicht möglich. Man müsste alles kennen, bis hin zu den atomaren Eigenschaften mit dem Spin jedes Elektrons. Eine solche Anfangsbedingung ist der Anfangswert von $x = 0,300$ in Abb. 2. Durch Änderung von x (z. B. zu $x = 0,301$) verschiebt sich die Zustandsfolge innerhalb desselben Attraktors. Die ständige Wiederholung (Iteration) des Rechenprozesses (Legende zu Abb. 2) macht bei einer nichtlinearen Funktion diese kleine Störung das Ergebnis des Prozesses nach wenigen Iterationen unvorhersagbar. Im Insektenbeispiel der Abb. 2 wäre z. B. eine solche Veränderung der Anfangsbedingungen durch Fressfeinde oder Schädlingsbekämpfungsmittel gegeben. Dagegen ist in linearen Funktionen eine so kleine Abweichung der Ausgangsbedingungen für das Ergebnis vernachlässigbar. So wie in der Physik die Unmöglichkeit eines Perpetuum mobile (keine Energie aus dem Nichts) naturwissenschaftlich belegbar ist, so ist in der Komplexitätswissenschaft die zeitliche Prognose (Extrapolation auf zukünftige Zustände) als grundsätzlich unmöglich aufgezeigt worden.



res Auswerteverfahren für die Zeitreihe der monatlichen Preisdifferenzen (Abb. 3a) wird deutlich, dass das ökonomische System, das die Baumwollpreise beeinflusst, skalen- oder größeninvariant, d. h. selbstähnlich ist. Mandelbrot charakterisierte die gefundene, nicht ganzzahlige Steigung der Geraden im Diagramm (Abb. 3b) als »fraktale« Dimension⁷. Diese konstante Dimension weist darauf hin, dass das ökonomische System über den Messzeitraum eine gleich bleibende Ordnung, d. h. einen Attraktor hat. Mit dieser Erkenntnis ist jedoch keine Prognose für den Baumwollpreis im nächsten Monat zu machen, dafür erhalten wir aber eine Information über die Komplexität der Regulation des Gesamtsystems²² und seine Stabilität gegenüber den weltweiten ökonomischen Fluktuationen⁶.

22 Wenn sowohl große als auch kleinere Wertedifferenzen derselben Exponentialfunktion folgen, d. h. die Steigung der Geraden D konstant ist, wird das System in seiner Erscheinung als skaleninvariant oder auch als selbstähnlich bezeichnet. Das System hat einen einheitlichen, stabilen Regelmechanismus definierter Komplexität. Auch für Erdbeben gilt diese Skaleninvarianz: Tektonische Verschiebungen können zu Erdbeben verschiedener Stärke führen, aber die Relation aus Häufigkeit und Stärke (Richterskala) folgt auch hier einem Potenzgesetz. Die

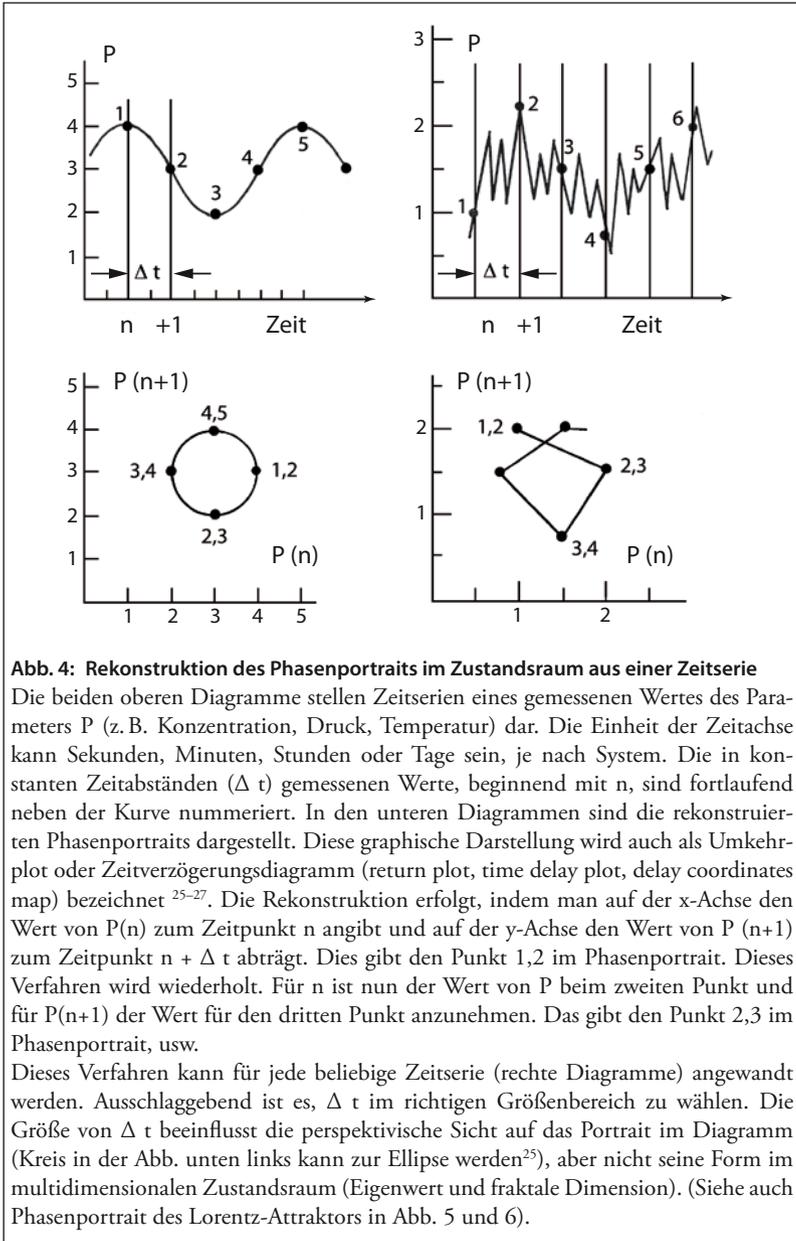


Abb. 4: Rekonstruktion des Phasenportraits im Zustandsraum aus einer Zeitserie

Die beiden oberen Diagramme stellen Zeitserien eines gemessenen Wertes des Parameters P (z. B. Konzentration, Druck, Temperatur) dar. Die Einheit der Zeitachse kann Sekunden, Minuten, Stunden oder Tage sein, je nach System. Die in konstanten Zeitabständen (Δt) gemessenen Werte, beginnend mit n , sind fortlaufend neben der Kurve nummeriert. In den unteren Diagrammen sind die rekonstruierten Phasenportraits dargestellt. Diese graphische Darstellung wird auch als Umkehrplot oder Zeitverzögerungsdiagramm (return plot, time delay plot, delay coordinates map) bezeichnet²⁵⁻²⁷. Die Rekonstruktion erfolgt, indem man auf der x-Achse den Wert von $P(n)$ zum Zeitpunkt n angibt und auf der y-Achse den Wert von $P(n+1)$ zum Zeitpunkt $n + \Delta t$ abträgt. Dies gibt den Punkt 1,2 im Phasenportrait. Dieses Verfahren wird wiederholt. Für n ist nun der Wert von P beim zweiten Punkt und für $P(n+1)$ der Wert für den dritten Punkt anzunehmen. Das gibt den Punkt 2,3 im Phasenportrait, usw.

Dieses Verfahren kann für jede beliebige Zeitserie (rechte Diagramme) angewandt werden. Ausschlaggebend ist es, Δt im richtigen Größenbereich zu wählen. Die Größe von Δt beeinflusst die perspektivische Sicht auf das Portrait im Diagramm (Kreis in der Abb. unten links kann zur Ellipse werden²⁸), aber nicht seine Form im multidimensionalen Zustandsraum (Eigenwert und fraktale Dimension). (Siehe auch Phasenportrait des Lorenz-Attraktors in Abb. 5 und 6).

Rekonstruktion im Zustandsraum – das Phasenportrait

Graphische Verfahren vermitteln in anschaulicher Weise, wie aus einer Zeitserie ein für das jeweilige System typisches mehrdimensionales Phasenportrait im Zustandsraum rekonstruiert werden kann. Die direkte Korrelation aufeinander folgender Werte aus der Zeitserie im sog. Umkehr-Plot (return plot, Abb. 4) ergibt das individuelle Phasenportrait der möglichen Zustände des Systems im Zustandsraum. Weitere, systematische Beispiele für die unterschiedliche Gestalt von Zeitreihen und den daraus rekonstruierten Phasenportraits werden in Abb. 5 mit der Einbettungsdimension⁷ $m=2$ (Fläche, Diagramm) gezeigt. Mit derselben Technik (Abb. 4) kann die Rekonstruktion auch auf drei Dimensionen (Einbettungsdimension $m=3$) als Darstellung im Raum erweitert werden (Abb. 6). Eine Erweiterung der Darstellungsdimensionen (Einbettungsdimension⁷, nicht zu verwechseln mit fraktaler Dimension) bringt eine weitere Entfaltung der Gestalt des Attraktors mit sich (vergleiche Lorenz-Attraktor in Abb. 5 und Abb. 6). Dies könnte so weitergehen, bis die Gestalt durch weitere Vergrößerung der Einbettungsdimension sich nicht mehr verändert: Es wird so der Eigenwert, die fraktale Dimension des Systems erreicht.

Für das Phasenportrait kann zum Vergleich von Veränderungen (z. B. in Abb. 8b) die fraktale Dimension ebenfalls numerisch bestimmt werden²³. Allerdings bietet das Phasenportrait mehr Information als nur die fraktale Dimension an. So kann z. B. daraus auch unmittelbar die Zustandsdichtenverteilung im Attraktor erkannt werden. Außerdem vermittelt das Phasenportrait mit der Darstellung von Trajektorien (Abb. 5) den Grund dafür,

Verschiebungsmechanismen sind trotz unterschiedlicher Stärke dieselben, da der Exponent in der graphisch dargestellten Exponentialfunktion über mehrere Größenordnungen der Erdbebenstärke konstant ist.⁴ Selbstähnlichkeit, die hier im wesentlichen als Grundlage der nichtlinearen Auswerteverfahren beschrieben wurde, ist eine wichtige Eigenschaft vieler fraktaler Naturphänomene wie Blitz oder Blutgefäßsystem des Körpers oder auch direkt in biologischer Gestalt zu sehen (z. B. wunderschön im Romanesco-Gemüse).

- 23 Die numerische Charakterisierung der Komplexität des Systems als fraktale Dimension kann auch aus der graphischen Darstellung (Abb. 4–7) durch eine Felderausählmethode^{4, 5} in der zweidimensionalen Darstellung des Phasenportraits gewonnen werden. Damit lassen sich eventuell graphisch nicht gut erkennbare Veränderungen zwischen Portraits (z. B. in Abb. 8b) eindeutiger diskriminieren. Dies ist aber umständlicher als die direkte Bestimmung der fraktalen Dimension im Doppelt-Log Plot. Die Felderausählmethode ist allerdings für viele Systeme erfolgreich angewendet worden, z. B. um die Rauigkeit von Küstenlinien zu charakterisieren^{4, 5}.

warum minimale Störungen mit einem Wechsel der Trajektorien so gravierende Konsequenzen haben. Am Beispiel der diskontinuierlich auftretenden Krankheitsschübe bei Multipler Sklerose könnte dies diskutiert werden.²⁴

Die Skalen- oder Größeninvarianz ist eine wichtige Voraussetzung für eine Rekonstruktion im Zustandsraum: Die für die Darstellung im Umkehrplot zu wählende Verzögerungszeit (delay time, Δt) kann dadurch in einem größeren Zeitbereich gewählt werden. In Abb. 7 ist dies für die Herzschlag-Variabilität gezeigt. Die in verschiedenen großen Zeitbereichen gemessenen Zeitreihen ergeben dieselbe fraktale Dimension und dasselbe Phasenportrait. Die Darstellungsperspektive im Diagramm ist allerdings nicht unabhängig von der Wahl der Größe²⁵ von Δt (z. B. in Abb. 8b). Dies erlaubt die Feststellung, dass die Herzschlagregulation selbstähnlich, d. h. skaleninvariant ist. Das muss nicht für jedes biologische System erfüllt sein, d. h. dass die Skaleninvarianz eventuell nur über einen sehr eingeschränkten Größenbereich (Größenordnung) angenähert werden kann oder gar nicht existiert.

24 Die Phasenportraits in Abb. 5 zeigen auch direkt die unterschiedliche Dichte von Trajektorien im Zustandsraum an. Damit wird deutlich, dass es eine unterschiedliche Wahrscheinlichkeit für verschiedene Zustände innerhalb desselben Attraktors gibt. Diese Dichte wird zwar theoretisch behandelt⁸, hat aber keine Bedeutung für die praktische Analyse der Zeitserien. Allerdings wird in der Zustandsfolge als Trajektorie eine Voraussetzung den nichtlinearen Zeitserienanalyse deutlich: Sowohl die Rekonstruktion des Phasenportraits im multidimensionalen Zustandsraum (Abb. 6) als auch die Herleitung von numerischen Auswerteverfahren⁹ basieren auf der Vorstellung von räumlicher Nachbarschaft einander folgender Zustände. Im Zusammenhang mit der Multiplen Sklerose ist eine entsprechende Betrachtungsweise des Immunsystems äußerst spannend. Als störungsbedingter Übergang zwischen Trajektorien in Abb. 6 könnte das räumlich und zeitlich diskontinuierliche Auftreten von Schüben bei der MS und deren verschiedene Auslöser als Störungen im Zustandsraum (Hormonsturz, Stress, Impfung etc.) erklärt werden.

25 Grenzen für Δt sind lediglich durch die für das jeweilige System relevanten Zeitbereiche gegeben. So kann Δt z. B. nicht kleiner als die Herzschlagabstände in Abb. 8a sein. Die Wahl von Δt beeinflusst aber die Drehung des Portraits im Phasenraum⁵ und damit die Anschaulichkeit der Darstellung, nicht aber seine prinzipielle Gestalt. Es kann also eventuell nötig sein Δt zu vergrößern oder zu verkleinern, um eine bessere Darstellung des Phasenporträts zu bekommen. Der in Abb. 4 dargestellte Kreis, geht durch eine Halbierung von Δt (doppelt so viele Messpunkte in der Sinuskurve) in eine Ellipse über.

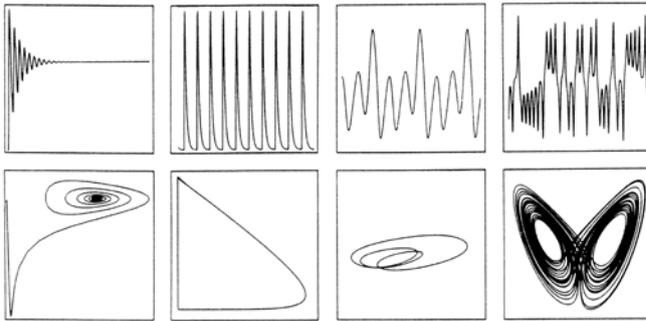


Abb. 5: Beispiele verschiedener komplexer Zeitserien (obere Reihe) und deren Phasenportraits (untere Reihe)

Von links nach rechts: Gerade und Punkt-Attraktor; Oszillation und Ringzyklus-Attraktor; Dreier-Rhythmus und Ringzyklus-Attraktor; chaotische Zeitserie und »seltsamer« (strange) Attraktor (hier Lorenz-Attraktor). Die graphische Auswertung macht deutlich, dass die Folge von Zuständen (als Trajektorien bezeichnet, das sind die Linien in den unteren Phasenportraits) durch kleinste Störungen eines Zustands und damit verbundenem Wechsel auf eine benachbarte Trajektorie in eine sich exponentiell entfernende Zustandsfolge münden.

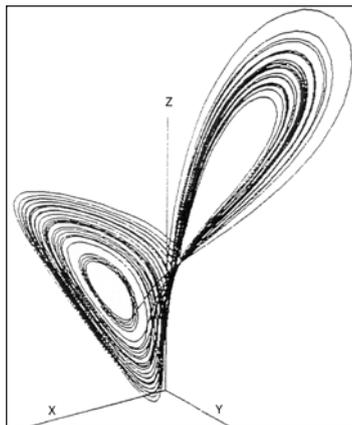


Abb. 6: Multidimensionale Darstellung des Phasenportraits im Zustandsraum

Der Wechsel der Einbettungsdimension von $m=2$ zu $m=3$ macht für den Lorenz-Attraktor aus der zweidimensionalen Darstellung in Abb. 5 die hier gezeigte Gestalt. Diese Gestalt in der dritten Dimension ist mit derselben Technik der Zeitverzögerung, wie in Abb. 4, zu rekonstruieren: wenn auf der x-Achse die Werte für n , auf der y-Achse die Werte für $n+1$ (Δt) und auf der z-Achse die Werte zu der Zeit $n+2$ ($2 \Delta t$) aufgetragen werden.

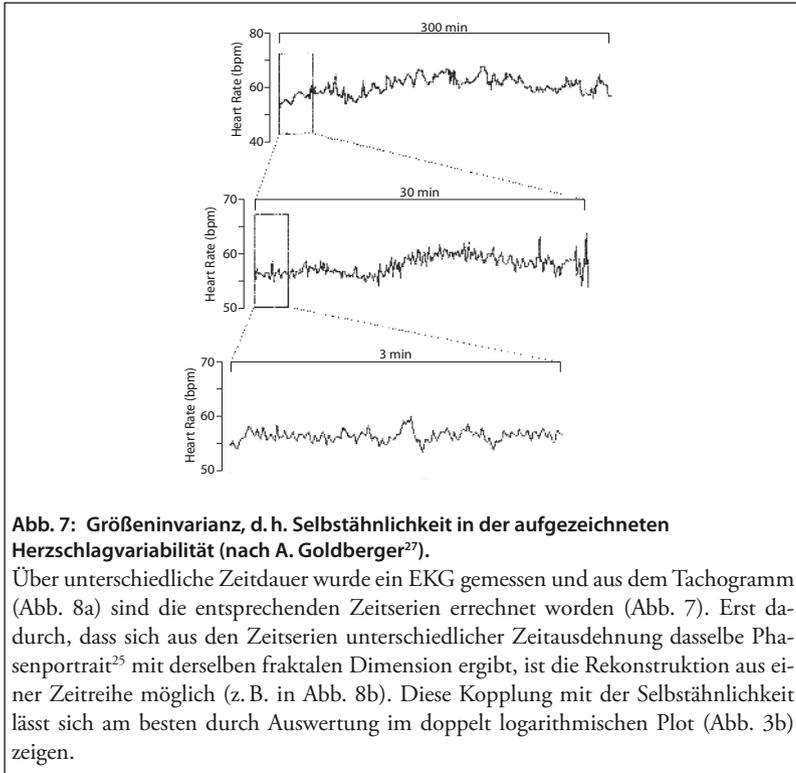


Abb. 7: Größeninvarianz, d. h. Selbstähnlichkeit in der aufgezeichneten Herzschlagvariabilität (nach A. Goldberger²⁷).

Über unterschiedliche Zeitdauer wurde ein EKG gemessen und aus dem Tachogramm (Abb. 8a) sind die entsprechenden Zeitserien errechnet worden (Abb. 7). Erst dadurch, dass sich aus den Zeitserien unterschiedlicher Zeitausdehnung dasselbe Phasenportrait²⁵ mit derselben fraktalen Dimension ergibt, ist die Rekonstruktion aus einer Zeitreihe möglich (z. B. in Abb. 8b). Diese Kopplung mit der Selbstähnlichkeit lässt sich am besten durch Auswertung im doppelt logarithmischen Plot (Abb. 3b) zeigen.

4. Fraktale Dimension und Stabilität – die biologische Relevanz

Die zeitlichen Abstände der Herzschläge im EKG des Gesunden stellen eine chaotische Schlagfolge dar (Tachogramm in Abb. 8a), aus der die Zeitserie berechnet wird (Abb. 7 und 8b) und mit dem Umkehrplot ein Phasenportrait im zweidimensionalen Diagramm erstellt werden kann^{26, 27} (Abb. 8b). Die Veränderung der chaotischen Zeitserie des gesunden Menschen zu einer Oszillation (F1 in Abb. 8b) oder gar zur geraden Linie (F2 in Abb. 8b) wird mit der Rekonstruktion im Zustandsraum graphisch dokumentiert

26 Ary L. Goldberger, D. R. Rigney: »On the nonlinear motions of the heart: fractals, chaos and cardiac dynamics«, in: Ders. (Hg.): *Cell to Cell signalling: From Experiments to theoretical models*, London 1989, S. 541–550.

27 Ary L. Goldberger: »Applications of Chaos to physiology and medicine«, in: Kim Jong Hyun, John Stringer (Hg.): *Applied chaos*, Hoboken (USA) 1992.

Herzschlag-Variabilität beim Gesunden und bei Patienten mit verschiedenen Herzerkrankungen^{26, 27}

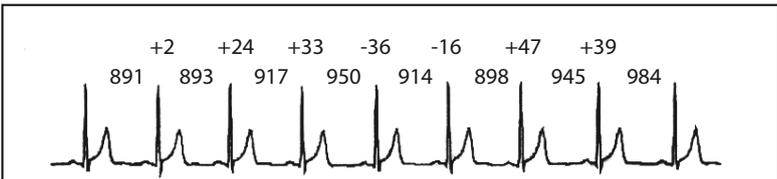


Abb. 8a) Elektrokardiogramm mit der Darstellung der Abstände (Tachogramm in Millisekunden) zwischen aufeinander folgenden Herzschlägen beim Gesunden. Die oberste Zahlenreihe zeigt die Unregelmäßigkeit der chaotischen Herzschlagfolge. Aus dem Tachogramm lässt sich direkt die Variabilität der Herzschlagfrequenz errechnen und als Zeitserie darstellen (Abb. 7).

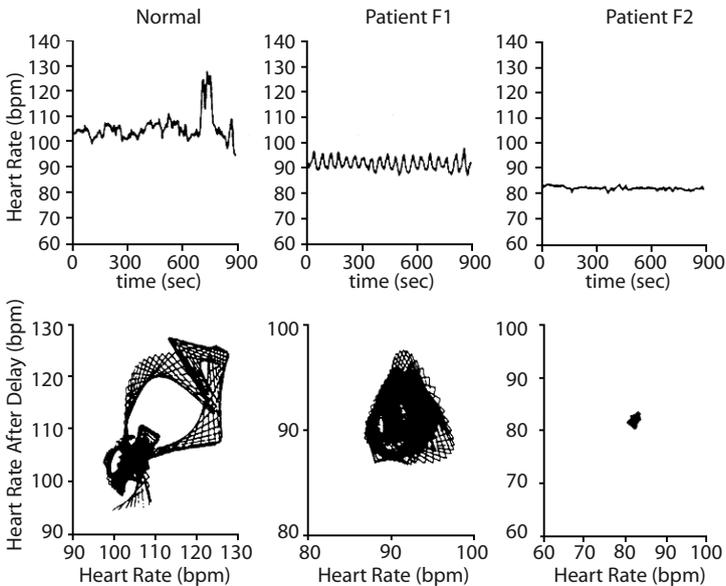


Abb. 8b) Zeitserien (obere Diagramme) und rekonstruiertes Phasenportrait (untere Diagramme) für eine gesunde Normalperson und zwei Patienten mit Herzerkrankungen. Patient F1 zeigt eine Oszillation statt chaotischer Variation der Herzschlagfrequenz, entsprechend einer Abnahme der Stabilität der Regulation (er verstarb an spontan aufgetretenem Kammerflimmern). Bei Patient F2 mit einer Polyradikulitis Guillain-Barré ging die Variabilität der Herzschlagfrequenz völlig verloren (Patient ist unter intensivmedizinischer Kontrolle). Der chaotische Attraktor des Gesunden geht bei den Beispielen in einen anderen, bei F2 gar in einen Punkt-Attraktor über.

und kann auch durch die Änderung der fraktalen Dimension^{22, 23} als eine Zunahme an Ordnung in der Regulation numerisch bestimmt werden.

Diese Beobachtung führt zu einem völlig neuen Verständnis²⁸ im Umgang mit chronischen Erkrankungen, an denen die Medizin bislang scheitert¹⁶:

1. Krankheit wird als stabiler Zustand der Regulation, als Attraktor des Organismus erkannt.

2. Krankheit lässt sich durch die Zunahme der Ordnung (entsprechend einer Abnahme der Komplexität) der Regulation charakterisieren.

Das ist nur mit den nichtlinearen Auswerteverfahren zu zeigen, nicht aber mit linear definierten Varianzkonzepten¹⁷.

Jedes komplexe System hat mehrere mögliche stabile Regelzustände²⁹. Gesundheit wie Krankheit¹⁶ sind mögliche stabile Zustände eines Organismus, die jedoch eine unterschiedliche fraktale Dimension und damit eine unterschiedliche Stabilität haben: Die Zunahme der Ordnung (oder Abnahme der Komplexität) der Herzregulation beim Patienten F1 der Abb. 8b ist mit einer lebensbedrohlichen Instabilität des Herzens, einem Risiko zum Kammerflimmern, verbunden (der Patient F1 in Abb. 8b verstarb in einem unbewachten Augenblick wenige Tage nach der Untersuchung). Der Wechsel in einen anderen Attraktor des Systems ist ein Ausdruck einer dauerhaften stabilen Änderung in der Regelung im System, im Gegensatz zu einer nur vorübergehenden Veränderung im Rahmen einer Zustandsfolge innerhalb desselben Attraktors. Ein Einzelzustand (Kam-

28 In der derzeitigen Krankheitsforschung wird die Suche nach der Ursache häufig auf die Suche nach genetischen oder molekularen Defekten reduziert. Diese Reduktion auf Elemente geht mit drei schlichten Fragen einher: Ist im Organismus ein Element zu wenig (Insulin beim Diabetes), ein Element zu viel (Autoantikörper bei Autoimmun-Krankheiten) oder ist ein Element verändert (beta-Amyloid Struktur bei der Alzheimer Erkrankung). Dass wir mit diesem Defizit durch eine reduktionistische Biologie und Naturwissenschaft ganz offensichtlich an Grenzen der Erkenntnis stoßen, wird gerade in der Medizin besonders deutlich. Die Vorstellung, dass ohne Veränderung der Zahl der konstituierenden Komponenten sich der Regelzustand des Systems zu einem neuen Attraktor verändern kann, ist ein wesentlicher Erkenntnisbeitrag aus der Wissenschaft nichtlinearer dynamischer Systeme. Bei den chronischen Erkrankungen, die den größten Teil der Erkrankungen in Europa und den USA ausmachen, bleibt die Medizin bezüglich des Verständnisses der Entstehung und auch bezüglich einer kausalen Therapie völlig erfolglos¹⁶.

29 Eine Konsequenz dieser Sicht ist eine systemtheoretisch begründete Unmöglichkeit einer gezielten Gentherapie, die trotz des großen wirtschaftlichen Erfolgsdruckes nicht in einem einzigen Fall gelungen ist, was für den Systemtheoretiker jedoch nicht unerwartet ist.

merflimmern) kann jedoch in eine Zustandsfolge in verschiedenen Portraits gehören. Wenn sich das Portrait als Ganzes ändert, ändert sich neben der Dimensionalität des Systems auch die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines bestimmten Zustandes²⁴, wie z. B. den des Kammerflimmerns.

Wenn Krankheit als ein stabiler Attraktor des Organismus gesehen werden kann, dann erfordert dies auch andere Therapiekonzepte. Statt sich mit einer üblichen Unterdrückung der Symptome zufrieden zu geben³⁰, kann qualifizierter, über den Eingriff in die selbstorganisierende Regulation und die Möglichkeit der Veränderung der Stabilität eines pathologischen Zustands nachgedacht werden¹⁶. Einem mechanistischen Reparaturmodell steht allerdings nach wie vor die grundlegende Charakteristik der Selbstorganisation biologischer Prozesse entgegen: Der Zusammenhang zwischen (deterministischen) Detailmechanismen und emergenter Eigenschaft des Gesamtsystems (z. B. seine Stabilität) ist nicht deterministisch, also der Erfolg einer die Selbstorganisation beeinflussenden Änderung der Rahmenbedingungen nicht mit einem einfachen Ursache-Wirkungs-Modell oder Dosis-Wirkungs-Modell voraussagbar.

Diese systemtheoretische Betrachtung der Krankheit kann auch auf andere Systeme angewandt werden. So erlaubt diese Art der Auswertung auch eine klare Aussage in der aktuellen umstrittenen Interpretation des Klimawandels. Ist die beobachtete globale Erwärmung eine irreversible Änderung in einen anderen Attraktor oder nur Teil einer Zustandsfolge innerhalb desselben Regelsystems, desselben Attraktors, das auch schon in früheren Zeiten Warmphasen bescherte? Letzteres würde bedeuten, dass die »Klimakatastrophe« Ausdruck eines größeninvarianten Regelmechanismus mit chaotischen Schwankungen zwischen niedrigen Temperaturen (Eiszeit) und extremer Erwärmung (Dürre) ist. Mit nichtlinearen Auswertungsverfahren der Zeitserie globaler Temperaturschwankungen (z. B. im Doppelt-Log-Plot) würde eine irreversible Änderung der Klimaregulation in einen anderen Attraktor als Änderung der fraktalen Dimension von heute gegenüber der vor hundert Jahren unmittelbar sichtbar werden.

Die Anwendung in der Hirnforschung ermöglicht die Darstellung der Zunahme der Ordnung im Elektrokardiogramm im Falle eines epileptischen Anfalles. Die Änderung eines Phasenportraits als Ausdruck eines Lernvorganges beim Geruchslernen zeigt die Unspezifität der Reaktion im

30 Bei plötzlich entstandenem, stabilem Bluthochdruck wird der Istwert durch Medikation gesenkt (eingeschränkt, hohe Werte quasi unterdrückt). Es wird aber nicht die innere Regulation (Zielwert) zu einem niedrigeren Wert geändert, das System bleibt trotz Behandlung im selben, pathologischen Attraktor.

neuronalen Netzwerk. Die intrazelluläre Calcium-Konzentrationsfluktuation wird mit dieser Methodik als chaotischer Attraktor beschreibbar, der bei Lernprozessen, extern getriggert, in einen anderen Attraktor, d. h. in einen anderen intrazellulären stabilen Regulationszustand übergeht.

Diese verschiedenen Beispiele zeigen, dass, praktisch gesehen, der absolute Wert der Komplexität (eines Attraktors) nicht so relevant ist, wie die Beobachtung eines Wechsels der fraktalen Dimension als Ausdruck einer stabilen Veränderung der Systemregulation.

5. Wissenschaft der Qualität – ein Paradigmenwechsel

Die Behandlung nichtlinearer dynamischer Prozesse durch einen Wechsel von der zeitabhängigen Darstellung (Zeitreihe) zur zeitunabhängigen Darstellung als räumliche Gestalt im Zustandsraum (Phasenportrait) ist mehr als eine Methode zur nichtlinearen Auswertung von Zeitserien.

Die Darstellung der Dimensionalität als räumliches Konstrukt hat eine normative Bedeutung für die naturwissenschaftliche Beschreibung des Zusammenhangs von zeitabhängiger Quantität im Handlungsraum (beschreibbar durch Modelle) und zeitunabhängiger Darstellung von Eigenschaften (Qualitäten) im Zustandsraum. Hier wird u. a. die Relevanz der gängigen Konzepte physikalisch-mathematischer Beschreibungs-Modelle für die Funktion biologischer Systeme grundsätzlich in Frage gestellt.

Im Folgenden werden die vor allem an Beispielen aus der Medizin dargestellten Konsequenzen und deren erkenntnistheoretische Aspekte dargestellt. Der wissenschaftspolitische Aspekt eines notwendigen, nur zögerlich stattfindenden Paradigmenwechsels in der »Natur«-Wissenschaft bedarf ebenfalls einiger Bemerkungen.

Erkenntnistheoretischer Aspekt in sieben Punkten

Eine Zeitserie gibt die zeitliche Veränderung der Messwerte eines Einzelparameters wieder. Da diese in einem komplexen System auch von allen anderen durch Interaktionen vernetzten Komponenten des Systems abhängt, spiegelt die Zeitserie die Dynamik des gesamten Systems wider. Das bedeutet, dass jeder andere Einzelparameter des Systems dieselbe Information über das Gesamtsystem enthält.

1. Es ist also nicht kritisch, welchen Parameter man auswählt, um aus dessen empirischer Zeitserie das System als Ganzes zu charakterisieren.

Die Zustands(Werte)-Folge in einer Zeitreihe wird durch die (unbekannten) Algorithmen der Interaktionen im Gesamtsystem bestimmt.

2. Die Dynamik des Systems ist aus der Zeitserie nur charakterisierbar, wenn bei der Auswertung die Folge der Zustände (Messwerte) nicht zerstört wird.

Wir verbleiben aber noch in der reduktionistischen Interpretationswelt, wenn wir mit Modellen die Zeitserie simulieren, um eine (näherungsweise) Prognose der nächsten Werte der Zeitserie zu bekommen. Wie gut oder schlecht das beim Wetter gelingt, wissen wir und dass wir die Börsenkurse prinzipiell²¹ nicht simulieren können, sehen wir daran, dass selbst die Wissenschaftler des *Santa Fe-Institutes zur Untersuchung der Komplexität ökonomischer Regelmechanismen* nicht reich geworden sind. Auch die Elementarisierung oder Physikalisation der Biologie³¹, als ein die gesamte naturwissenschaftliche Forschung durchziehendes reduktionistisches Konzept, behindert die Erkenntnis einer emergenten Qualität des Systems.

Erst mit der paradox erscheinenden zeitunabhängigen Darstellung der Dynamik wird auf das erkenntnistheoretisch Besondere der Rekonstruktion im Zustandsraum hingewiesen:

3. Die nichtlineare Analyse ist nicht reduktionistisch, sondern verlangt geradezu als Voraussetzung die Untersuchung des ungeteilten Ganzen. Dadurch sind diese Untersuchungen meist auch nichtinvasiv!³²

Generell bekommt man auch völlig andere, wesentlichere Informationen:

4. Skaleninvarianz (Selbstähnlichkeit) erlaubt die Rekonstruktion eines Phasenportraits und die Bestimmung der fraktalen Dimension eines Attraktors, der eine zeitunabhängige individuelle Eigenschaft eines Systems beschreibt. Der Nachweis einer fraktalen Dimension weist auf die Einheitlichkeit (nicht auf deren Details) der zugrunde liegenden Mechanismen

31 Das quantenmechanische Modell des Bewusstseins, das der Physiker Roger Penrose (Roger Penrose: *The Large, the Small and the Human Mind*, Cambridge University Press 1999) entwickelt hat, ist ein Beispiel dafür. Die Quantenphysik hat zwar das Weltbild der Physik und die Vorstellung über Kausalität verändert, aber sie ist prinzipiell nicht notwendig, um emergente Qualitäten des Gehirns zu erklären. Ganz im Gegenteil: Der naturwissenschaftliche Ansatz aus der Komplexitätswissenschaft zeigt die erkenntnistheoretischen Grenzen reduktionistischer Forschung auf und eröffnet den Blick für eine veränderte Fragestellung im naturwissenschaftlichen Umgang mit Qualitäten¹⁶.

32 Nichtinvasive Analytik ist einerseits ein ethisch meist gut akzeptierbarer experimenteller Ansatz, aber oftmals auch eine Limitierung der Zugänglichkeit der Information (z. B. Immunsystem).

trotz extremster Variationen in der Erscheinungsform hin (z. B. Erdbeben²²).

5. Das Phasenportrait beschreibt Zustandsfolgen und deren Dichteverteilung im Zustandsraum. Daraus werden neue Vorstellungen über die Zustandsvariationen und deren Anfälligkeit für minimale Veränderungen der Anfangsbedingungen gewonnen (z. B. »spontane« Krankheits-Schübe²⁴).

6. Der Wechsel der fraktalen Dimension eines Systems ist, gegenüber dem Absolutwert dieser Dimension, die wichtigere Information. Er zeigt den anders nicht erkennbaren Wechsel in der Regulation eines Systems an und sagt damit auch Wesentliches über die Änderung der Stabilität des Systems aus. Dies ermöglicht im Beispiel des Wechsels von Gesundheit in Krankheit³³ eine im System beobachtbare Veränderung der Regulation und organischen Stabilität. Dies steht im Gegensatz zur Suche nach molekularen Defekten²⁸ als ein grundsätzlich anderes Konzept, das als Ergebnis auch eine andere, wertvolle Information bietet. Es wird so auch sichtbar, dass ein System mehrere stabile Attraktoren⁶ haben kann.

7. Die Qualitäten des zum Vorschein gekommenen Ganzen (Emergenz) sind grundsätzlich nicht aus den Eigenschaften der Einzelelemente und deren Interaktionen ableitbar, obwohl sie daraus entstehen. Diese Eigenschaften des Ganzen sind wiederum auch nicht in den Eigenschaften der Einzelelemente oder Teilsysteme repräsentiert³. Es gibt keinen deterministischen Zusammenhang zwischen der in der Zeit charakterisierten Dynamik der selbstorganisierenden Interaktionen von konstituierenden

33 In der Krankheitsforschung wird nun Krankheit als Attraktor, d. h. als stabiler Zustand darstellbar, was zu völlig neuen Konsequenzen für Analytik, Untersuchung der Pathomechanismen und Therapieentwicklung führt. Dass Krankheit als einer von verschiedenen möglichen stabilen Zuständen des Organismus gesehen werden kann, trägt auch zum Verständnis der Entstehung mancher chronischer Erkrankungen bei: Äußere temporäre Einflüsse (Infekt, Hormone oder Morphogene in der Entwicklung) können zum Wechsel von einem in einen anderen Attraktor des Systems, d. h. zur Entstehung der Krankheit führen, ohne dass die Zahl der Elementarteile des Attraktors verändert wurde. Es muss also gar keine Spur der verändernden Ursache im System selbst mehr zu finden sein. Als Beispiel ist der bei manchen Frauen durch Antikonzeptiva bewirkte Bluthochdruck zu nennen. Trotz Absetzen der »Pille« bleibt der Bluthochdruck jedoch bestehen. Die klassische ineffiziente Therapie ist beschrieben worden³⁰. Grundsätzlich können zwei verschiedene Wirkungen erreicht werden: Symmetriebrechender Übergang von Gesundheit in Krankheit oder aber Trajektorienwechsel bei bereits bestehender Krankheit. Das erschwert ja auch das Verständnis der (spontanen) Entstehung einer Krankheit. Da wird schon mal eine göttliche Strafe oder genetische Prädisposition als Ursache der Krankheit akzeptiert.

Elementen oder Teilsystemen und der emergenten Gestalt, Form, Funktion des Ganzen (Zelle, Organ, Kolonie, Gruppe, aber auch Verhalten¹³). Biophysikalische Modelle biologischer Systeme (Hyperzyklus der Evolutionstheorie, Immunologisches Netzwerk, etc) können faszinierende Erklärungen beobachteter biologischer Phänomene liefern. Dies darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass es keine »bottom-up« Erklärungen des emergenten Ganzen gibt, d.h. es gibt nur »top-down« Modelle, die ausgehend von der Beobachtung einer Systemqualität ideengesteuerte Experimente und biophysikalische Rechenmodelle als Interpretation anbieten. Dies ist bereits Gegenstand der alten wissenschaftstheoretischen Diskussion um das Induktionsmodell.⁴⁰

Die Charakterisierung einer Qualität auf der Ebene des Gesamtsystems repräsentiert, zusammen mit dem Mechanismus der Selbstorganisation¹², ein neues Denken, das sich von den klassischen Kausalitätsvorstellungen, dem linearen Ursache-Wirkungs-Modell¹², verabschiedet und den Blick für eine völlig veränderte Fragestellung im naturwissenschaftlichen Umgang mit Qualitäten eröffnet.

Bei den Komplexitätswissenschaften mit der Beschreibung des Zusammenhangs von Quantität und Qualität dreht es sich um einen generellen wissenschaftlichen Paradigmenwechsel, der auch Anlass für eine umfassendere Weltbild-Diskussion ist^{15, 34}. Mit der Anwendung des Selbstorganisationskonzeptes (»Organisation ohne Organisator«)¹² in verschiedensten Wissenschaftsgebieten, von Astrophysik (»Schöpfung ohne Schöpfer«)³⁴, Soziologie³⁵, Psychiatrie, Medizin¹⁶, Theorie der Geschichte bis hin zur Theologie wird dieser Eindruck verstärkt. Der fehlende Paradigmenwechsel wird auch überall dort deutlich, wo für die Ausbildung von Eigenschaften (Farbe einer Pflanze, Bildung multizellulärer Organismen, Fähigkeit zu fliegen) teleologische Begründungen gegeben werden, so als gäbe es ein Ziel einer Entwicklung in der Evolution. Weder die gängige Begründung durch Darwins Evolutionstheorie mit dem Mutations-/Selektions-Modell, noch die kreationistische Vorstellung von der Schöpfung Gottes sind naturwissenschaftliche Argumente. In einem faszinierenden Buch schildert Brian Goodwin¹, Biologe und Mathematiker, die Komplexitätswissenschaft als die Basis einer naturwissenschaftlichen Erweiterung der Evolutionstheorie von Gestalt, Form und Funktion. Damit wird erst-

34 Gerhard Börner: *Schöpfung ohne Schöpfer? Das Wunder des Universums*, München 2006.

35 Patricia Shaw: *Changing Conversations in Organizations. A complexity approach to change*, London und New York 2002.

mals das diskutiert, was Darwin primär vor Augen hatte: Die Entstehung neuer Arten und nicht nur ein Optimierungs- und Anpassungsmodell vorhandener Arten.

Der aufgezeigte naturwissenschaftliche Umgang mit Qualitäten macht deutlich, dass es keine kausale Erklärung für die Gestalt der Welt gibt und geben kann. Im Gegenteil, und dies mag anarchistisch klingen: Jedes kausale Erklärungsmodell ist eine Behinderung im Versuch des Menschen, adäquat³⁶ in der Natur und vor allem als konstituierender Teil derselben³⁷ zu leben. Auch die Emergenz von zeitgeistbedingten Ideen über die Welt ist nicht materialistisch fundierbar, wie dies die aktuelle Hirn-Geist-Diskussion suggerieren will¹³.

Inwieweit die Komplexitätswissenschaft eine ähnliche Rolle für die Biologie spielt wie die Relativitätstheorie und Quantenphysik für die Physik vor hundert Jahren, bleibt abzuwarten.

Wissenschaftspolitischer Aspekt

Dass das neue Paradigma der nichtlinearen Dynamik das reduktionistische alte Paradigma nicht ohne weiteres ablöst, hat u. a. einen Grund in dem immer noch andauernden Siegeszug der Technologie als Ausdruck einer Naturwissenschaft, die auf dem linear-kausalen Ursache-Wirkungs-Prinzip beruht. Beispiele einer erfolglosen Anwendung dieser technologischen Machbarkeitsvorstellung finden wir seit Jahrzehnten in der Medizin, z. B. als *Gentechnologie* und *Biotechnologie*. Trotz des offensichtlichen Scheiterns der Gentherapie^{13, 28} und auch zunehmend der Stammzelltherapie werden die mechanistischen Konzepte nicht verlassen. Auch die Forschungs-Förderpolitik, die molekulare Forschung in der Medizin präferiert, und der zunehmende ökonomische Verwertungsdruck auf die Forschenden mag wesentlich zur Behinderung des Paradigmenwechsels beitragen. Diese wertungsorientierte universitäre Forschung mit einer zunehmenden Trennung von Staat und Wissenschaft, zumindest auf der Finanzierungsebene

36 »Adäquat« steht für ein sich wandelndes Verständnis der Welt und der Funktion des Menschen in der Noosphäre³⁷. Entsprechende Ausdrücke des aktuellen Zeitgeistes sind »nachhaltig« oder »partizipativ«³⁵.

37 Wolfgang Hofkirchner und Rolf Löther: »Vladimir I. Vernadskij – Klassiker des globalen Denkens«, in: Wolfgang Hofkirchner (Hg): *Vladimir I. Vernadskij. Der Mensch in der Biosphäre. Zur Naturgeschichte der Vernunft*, Frankfurt am Main 1997, S. 7–22.

der Forschung, hat zu einem zunehmenden Einfluss der Industrielobby³⁸ mit rein kapitalistischen Interessen geführt. Die von Feyerabend⁴⁰ geforderte Trennung von Staat und Wissenschaft soll keinesfalls rückgängig gemacht werden, aber die Wissenschaft darf nicht zum Besitz des Kapitals verkommen. Diese von Feyerabend angestellten wissenschaftskritischen und wissenschaftspolitischen Betrachtungen wurden inzwischen bezüglich des nationalstaatlichen Aspekts durch die Dynamik der Globalisierung und durch die neuen Kommunikationsformen im Internet drastisch modifiziert. Die aktuelle selbstorganisierte Entwicklung des Internet mit samt den gesellschaftlichen Konsequenzen³⁹ ist ein interessanter Prozess und könnte auch ein Modell für eine selbstorganisierte herrschaftsfreie Wissenschaft werden. Dass die Veränderung der Wissenschaft, als Abbild unserer Gesellschaft, aber nur mit einer gleichzeitigen Veränderung der Gesellschaft einhergehen kann, macht Feyerabend⁴⁰ drastisch deutlich, indem er Wissenschaft, Voodoo-Kult und Prostitution in einem Atemzug als gleich zu behandelnde Einrichtungen unserer Gesellschaft nennt.

Die Geschichte wissenschaftlicher Erkenntnis ist untrennbarer Teil der allgemeinen Ideengeschichte der Menschheit und bedarf einer permanenten kritischen Überprüfung, so wie ein Bemühen z. B. um Entideologisierung⁴¹ oder Demokratisierung die allgemeine Entwicklung der menschlichen Gesellschaft bestimmt.

38 Da die Medizin, aber auch die universitäre Forschung in zunehmendem Maße von der Industrie finanziert wird, ist das Erkenntnisinteresse verstärkt verwertungsorientiert. Die Auswahl der von der Industrie geförderten Projekte wird klar vom Kriterium der Gewinnmaximierung dominiert: Impfstoffentwicklung ist weniger interessant als Entwicklung von Medikamenten, die bei chronischen Krankheiten über längere Zeiträume gebraucht und verkauft werden. Besonders behindernd für den medizinischen Fortschritt ist die Informationspolitik der Industrie. Die kostenlos an die Ärzte verteilten Hochglanzbroschüren sind Umfragen zufolge die Hauptinformationsquelle der meisten niedergelassenen Ärzte.

39 Wolfgang Hofkirchner in diesem Band.

40 Paul K. Feyerabend: *Wider den Methodenzwang*, Frankfurt am Main 1995.

41 Die Debatte um das Curriculum in Schulen der USA, die eine Darwinsche Evolutionstheorie der kreationistischen christlichen Lehre gegenüberstellen, ist ein offensichtliches Beispiel. Der teleologische Sprachgebrauch vieler scheinbar säkularisierter Naturwissenschaftler ist ein weniger offensichtliches, aber umso kritischeres Erkenntnishindernis¹³.

