

Warum etwas wird.

Zur Selbstorganisation rekursiver Erprobungen im Möglichkeitsraum

1. Tempus item per se non est

Auch die Zeit ist nicht an sich, sondern nur von den Dingen selber folgt das Empfinden, erfolgt was ist in den Zeiten, dann was bevorsteht, weiter was folgt in der Reihe dahinter; und an sich spürt keiner die Zeit, das muss man gestehen, von der Bewegung der Dinge getrennt und friedlicher Ruhe.

Lukrez, *De rerum natura*¹

Das Opus Magnum des Lukrez, *De rerum natura*, ist die ausführlichste Darstellung der von Demokrit und Leukipp herrührenden Atomtheorie in der Antike. Obwohl es sich letztlich nicht gegen die idealistischen beziehungsweise nicht-materialistischen Systeme des klassischen Griechenland durchsetzen konnte, zählt der posthum von Cicero herausgegebene Text zu den großartigsten des europäischen Altertums überhaupt. Wie das einleitende Zitat illustriert, existiert für die Atomisten die Zeit nicht „an sich“ als von den Dingen losgelöste, autonome Wesenheit, sondern kann nur empfunden und in der Folge als Ordnungsmaß für die Abfolge der Dinge konstruiert werden.

Wenn von den Dingen, oder „über die Natur der Dinge“, die Rede ist, dann sind bei Lukrez damit in letzter (und letzt-begründender) Instanz die „Ursprungskörper“ angesprochen: Obwohl Lukrez das Wort „Atom“ nie verwendet, ist ja doch genau jenes Un-Teilbare ($\alpha\text{-}\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$) damit gemeint.² Aus diesem Grund, und weil Lukrez mit „natura“ nachweislich die atomare Verfasstheit meint, wird der Titel seines Werkes im Deutschen frei mit „Welt aus Atomen“ übersetzt.

Der im Stil eines epischen „Lehrgedichts“ verfasste umfangreiche Text besticht auch noch heute in seiner analytischen Schärfe. Dabei ist zu bedenken, dass des Autors Thema Dinge sind, die damals kein Mensch je gesehen hatte, doch deren (physische) Existenz mit klarem Verstand erschlossen werden kann:

Auf nun, da ja gelehrt ich, daß Dinge nicht können entstehen aus dem Nichts, noch, gezeugt, zu nichts je werden gemindert:
Daß du vielleicht nicht doch am Worte zu zweifeln beginnest,
weil mit den Augen erblickt nicht werden können Atome,

¹ Titus Lucretius Carus, *De rerum natura*. Welt aus Atomen, übers. u. hrsg. v. Karl Büchner, Stuttgart 1973, Erstes Buch, S. 38f.

² Dass wir heute von „sub-atomaren Teilchen“ sprechen, weist nur darauf hin, dass die heute so bezeichneten „Atome“ eben nicht jene kleinsten, unteilbaren Teilchen sind, für die der Name ursprünglich vorgesehen war.

höre zudem, was für Körperchen selber bekennen du musst doch,
dass in den Dingen sie sind und doch nicht geschaut werden können.³

In der Folge werden Meerflut, reißende Wirbel und heulende Stürme mit
eindrücklichen Bildern in Erinnerung gerufen, um danach den Schluss zu ziehen:

So muß also des Windes Wehen auch sich bewegen,
das, wenn es sich wie ein kräftiger Strom in beliebige Richtung
vorwärts geworfen hat, treibt vor sich her die Dinge und stürzt sie
durch seinen kräftigen Stoß, das manchmal in kreisendem Wirbel
auch sie packt und davonträgt reißend in drehendem Strudel.
Drum gibt's noch und noch verborgene Körper des Windes,
da nach Wesen und Tat als großer Ströme Rivalen
sie sich erfinden, die sind von offenliegendem Körper.⁴

Zwar ist hier nicht der Ort, um das gesamte Gedicht und seine ideengeschichtliche
Wirkung angemessen würdigen zu können, doch eine besonders bemerkenswerte
Passage muss noch hervorgehoben werden – zumal es sich dabei um ein Argument
handelt, das gerade heute (wieder) zentrale Bedeutung erhält.

Im Zuge seiner Überlegungen zur „Atomtheorie“ muss sich Lukrez wohl die Frage
gestellt haben, warum überhaupt etwas wird. Während die Frage, warum etwas ist
und nicht nichts, keine ist, die einer empirisch basierten (heute würden wir sagen:
„wissenschaftlichen“) Herangehensweise zugänglich ist, ließ sich dennoch fragen:
Warum bleibt die Welt, die Existenz von Atomen vorausgesetzt, nicht immer gleich?
Was führt dazu (auf atomarer Ebene), dass sie sich verändert, warum entsteht
unentwegt Neues? Wie noch zu zeigen sein wird, ist die Antwort des Lukrez von
einer von ihm selbst noch nicht abschätzbaren Tiefe, die erst heute ausgelotet
werden kann:

Wenn die Atome durchs Leere nach unten geradewegs stürzen
mit ihrem eigenen Gewicht, so weichen zu ungewisser Zeit
und an ungewissem Ort von der Bahn sie ab um ein Kleines,
so, dass du von geänderter Richtung zu sprechen vermöchtest.
Wären sie nicht gewohnt, so abzuschweifen, würde alles nach unten,
wie die Tropfen des Regens, fallen im grundlosen Leeren,
wäre nicht Anstoß entstanden noch Schlag von Atom an Atom
geschaffen worden.

So hätte nichts die Natur je schaffend vollendet.⁵

³ Lucretius, De rerum natura, wie Anm. 1, Erstes Buch, S. 25 ff.

⁴ Ebd., S. 26 ff.

⁵ Ebd., Zweites Buch, S. 100 f. In Abweichung von der Übersetzung durch Büchner verwende ich in der ersten Zeile das sinngemäß zutreffende Wort „Atome“ (statt „Körper“ bei Büchner). Um – wie in englischsprachigen Übersetzungen – dem physikalischen Sinn des Ursprungstextes näherzukommen, übersetze ich ferner „incerto“ mit „ungewiss“ (statt „schwankend“), „depellere“ mit „abweichen“ (statt „springen“), „declinare“ mit „abzuschweifen“ (statt „sich zu beugen“) und (erläuternd) „plaga principii“ mit „Schlag von Atom an Atom“ (statt „Schlag den Körpern“).

In seinem Buch über *Boltzmann's Atom*⁶ zitiert der Physiker David Lindley (nur) den ersten Satz dieser Passage. Dem ist eine Erläuterung vorangestellt, wonach Lukrez gegenüber seinem Lehrer auszeichne, dass er „vom Atomismus zum Atheismus“ gegangen sei, während Epikur noch an die Götter glaubte und deshalb den reinen Determinismus der atomistischen Theorie ablehnte. „Aus diesem Grund“, schreibt Lindley (und die Leserin fragt sich: Warum? Weil er seinen Lehrer besänftigen wollte?), führte Lukrez eine „rather odd idea“ ein – worauf der schon erwähnte erste Satz aus obigem Lukrez-Zitat folgt. Lindley schreibt danach weiter:

Lukrez setzt mit der Andeutung fort, dass diese „Abschweifungen“ in der Bewegung der Atome der Grund dafür sind, dass Atome größere Gebilde formen oder kollidieren oder auf sonstige Weise interagieren, um die bekannten natürlichen Phänomene zu erzeugen. Der Hauptgrund war aber offenbar der, einen strengen Determinismus zu umgehen, indem die Atome ihre Trajektorien spontan, ohne jeglichen unmittelbaren Grund, ändern könnten. Dies mag den freien Willen wieder einführen, oder eine Möglichkeit zur Einmischung der Götter, aber es trifft den modernen Leser als eine „unwissenschaftliche“ Hinzufügung zur Theorie.⁷

Kurioserweise wird auch heute manchmal, im Kontext der Quantentheorie, die Ansicht vertreten, dass der Determinismus der Theorie auf statistischer Ebene (d. h. die durch die Schrödinger-Gleichung o. dgl. vorgegebene deterministische Entwicklung der „Wellenfunktion“) durch einen grundsätzlichen Indeterminismus auf der Ebene des Einzelereignisses zu komplettieren wäre – so, als ob die „Zufälligkeiten“ auf mikroskopischem Niveau nicht auf Grund unkontrollierbarer Fluktuationen zustande kämen, sondern wegen einer unergründlichen (jedoch angeblich „objektiven“) „Irrationalität“ der Natur.⁸ Dies soll uns aber hier nicht weiter beschäftigen.

Interessant ist hier bloß, dass Lindley eine solche – im Grunde rein metaphysische – „Hinzufügung zur Theorie“ als „unwissenschaftliche“ einstuft, was einerseits für heutige Theorie-Varianten zutreffen mag, aber andererseits gerade das Beispiel des Lukrez nicht treffen muss. Denn die oben aus *De rerum natura* zitierte Passage lässt sich durchaus anders lesen. Dazu genügt das Wissen, dass Lukrez seinen Atomen durchaus „individuelle“ Züge zugesteht – nicht nur jene der Unteilbarkeit, sondern auch ihrer Ausgestaltung: So können sie etwa verschieden geformt und von unterschiedlichem Gewicht sein.⁹

Sind aber die Atome individuell geformt und (mindestens) zwei davon auch nur ein einziges Mal (etwa auf Grund leicht unterschiedlicher Drehmomente) in Kontakt zueinander getreten, so ist damit ein irreversibler Vorgang permanenter Interaktionen („Stöße“ etc.) eingeleitet, der stets durch kleinste Abweichungen von zuvor noch „geraden Trajektorien“ charakterisiert werden kann.¹⁰ Die Bahnen der Atome können also „um ein Kleines“ von geraden Trajektorien „abweichen“, ohne dass dabei gleich

⁶ David Lindley, *Boltzmann's Atom. The Great Debate that launched a Revolution in Physics*, New York 2001.

⁷ Ebd., S. 7 (m. Ü.).

⁸ Vgl. dazu etwa Gerhard Grössing, „Quantentheorie und Irrationalität“, in: *Der Standard* (19.3.1999), S.17. Der Text ist auch auf der Webpage von „museum in progress“ verfügbar: <http://www.mip.at/de/werke/329.html>.

⁹ Bemerkenswert ist hier auch ein Vorgriff auf das Gesetz vom freien Fall: Eineinhalb Jahrtausende vor Galileo schrieb Lukrez: „Darum muß auch alles hindurch durch das ruhige Leere gleichschnell, obschon mit Gewichten ungleich, erregt sich bewegen.“ (*De rerum natura*, Zweites Buch, wie Anm. 1, S. 100 f.)

¹⁰ Das „Gottesproblem“ ist somit auf einen ersten Anstoß („primum movens“) zurück-verschoben, doch kannte die Antike auch die Vorstellung eines ewigen Weltalls – dass also die Welt (auch auf Atom-Ebene) schon von jeher existiert und somit der Verzicht auf ein „primum movens“ denkmöglich ist.

der Finger eines Gottes im Spiel sein müsste. (Diese Interpretation ist sowohl für das Lukrezsche Gedankengebäude, als auch für Interpretationen der heutigen Quantentheorie¹¹ zulässig, ja naheliegend.)

Darüber hinaus ist gerade heute der Themenbereich der „Abweichungen“ oder „Fluktuationen“ von zentraler Bedeutung in all jenen wissenschaftlichen Disziplinen, die in ihren systemischen Modellen lineare Näherungen durch „nichtlineare“ zu verbessern trachten.

2. Geschlossene und offene Systeme

Das Programm der antiken Atomisten blieb über zwei Jahrtausende ein ideengeschichtliches Epiphenomen, bis es in der Hochblüte der sogenannten „klassischen Physik“ im auslaufenden 19. Jahrhundert zu seiner formalen Ausgestaltung gelangte, allen voran durch Ludwig Boltzmann und James Clerk Maxwell. Die in dieser Zeit begründeten Disziplinen von statistischer Mechanik und Thermodynamik gehören bis heute zum Grundwerkzeug von Physikern sowie zur unverzichtbaren Basis weitverzweigter Themenbereiche in der Physik.¹² Insbesondere der „Zweite Hauptsatz der Thermodynamik“, das sogenannte *Entropiegesetz*, gehört zu den Grundpfeilern der Physik: In einem (thermodynamisch) abgeschlossenen System kann die Gesamt-Entropie (salopp gesprochen: das Maß für die Unordnung des Systems) nur gleich bleiben oder anwachsen, nie aber abnehmen.

Um ein idealisiertes Bild zu geben: Eine Sandburg am Meeresstrand (als Beispiel „sehr hoher Ordnung“ unter Myriaden von Sandkörnern) kann nicht von selbst entstehen, doch sie zerfällt selbst bei Windstille stets weiter, bis letztlich eine Gleichverteilung (in diesem Kontext als „höchste Unordnung“ umschreibbar) erreicht wird. Hier ist unter anderem die idealisierte „Windstille“ eine unerreichbare Vorgabe – aufgrund kleiner Fluktuationen der Luftmoleküle, die selbst bei vermeintlicher „Windstille“ existieren und zum Ordnungs-Abbau beitragen.

Da die Entropie komplexer nichtlinearer Systeme aber oft nur für den Grenzfall des Gleichgewichts berechnet werden kann, kann sie dann nur an zwei Extrempolen einer Systementwicklung berechnet werden – am Zustand höchster Ordnung (der „Sandburg“) und am Zustand höchster Unordnung (des „Meeresstrands“). Diese Extrempunkte sind dann jeweils als an sich ruhende Gleichgewichtszustände zu denken. (Die „Thermodynamik“ ist in diesen Fällen eher als „Thermostatik“ zu verstehen.) Dessen ungeachtet wird aber für ein betrachtetes System mit dem Zweiten Hauptsatz ein unidirektionaler „Zeitpfeil“ festgelegt, nämlich der in Richtung ansteigender Entropie: Während etwa ein Film zurückgespult werden kann, sodass der gefilmte Zerfall einer Sandburg in einen virtuellen Vorgang, nämlich in ihre wie durch magische Hand bewirkte Re-Konstruktion, transformiert wird, ist eine derartige Zeitumkehr in der physikalischen Welt unmöglich.

¹¹ Vgl. dazu die sogenannte „stochastische Interpretation“ im Gefolge von de Broglie, Bohm oder Bell.

¹² Hier ist nicht zuletzt wieder die Quantentheorie zu nennen, deren historische Ausgangspunkte (bei Planck wie bei Einstein) letztlich an Boltzmann anknüpfen. Vgl. dazu Gerald Holton, *Thematic Origins of Scientific Thought*, Cambridge 1988.

Den „Zeitpfeil“ spürt jedes Lebewesen – im Prozess des Alterns. Dies gesagt, stellen sich aber gleich die naheliegendsten Fragen: Wie kann es denn überhaupt zur hochkomplexen, dynamischen Ordnung von lebenden Systemen kommen, wenn das Entropiegesetz universal gilt? Wie kann man dann die Systementwicklung zwischen den beiden statischen Extrempunkten beschreiben?

Die Antwort dazu wird seit etwa dem letzten Drittel des 20. Jahrhunderts im Rahmen der Theorien von „Selbstorganisation“ beziehungsweise „Emergenz“, „nichtlinearer dynamischer Systeme“ u. dgl. studiert.¹³ Dabei gilt als Grundvoraussetzung, dass von der dem Entropiegesetz eigenen Annahme eines geschlossenen (Gleichgewichts-) Systems abzugehen ist. Geht man davon aus, dass lebende Systeme thermodynamisch offen sind (d. h. im Energieaustausch mit der Umwelt stehen), so lässt sich die Emergenz von Ordnungsstrukturen in einer großen Reihe unterschiedlichster Systeme fernab vom thermischen Gleichgewicht nachweisen. Frühe Wegbereiter dieser Disziplinen sind etwa Heinz von Foerster, Ilya Prigogine, Hermann Haken, oder Edward Lorenz.¹⁴

Betrachtet man die Entwicklung der (Natur-)Wissenschaften der letzten Jahrzehnte, so ist eine eindeutige Entwicklungslinie sicherlich darin auszumachen, dass die Komplexität der studierten Systeme (nicht zuletzt auf Grund stets steigender Rechnerleistungen) graduell zunimmt. Da dies praktisch alle Wissenschaftsbereiche betrifft, in denen systemisches Denken anwendbar ist, sind auch die abstrakten Werkzeuge moderner Systemtheorien in vielen (und sehr unterschiedlichen) Bereichen nützlich. In der Folge soll deshalb hier versucht werden, mögliche Anwendungsbereiche des Gebiets „nichtlinearer dynamischer Systeme“ zu erkunden, und zwar primär solche, die von den „relativ niedrig-komplexen“ physikalischen Bereichen wegführen, hin zum Studium von biologischen oder sozialen Systemen.

Doch hier ist gleich auch wieder eine Warnung vor allzu schnell gefassten Vorurteilen auszusprechen: Tatsächlich zeigt die neuere Erforschung selbst der nichtorganischen Materie eine kaum erwartete Variabilität, ja „Kreativität“.¹⁵ Es soll im Folgenden daher unter Anderem gezeigt werden, wie nichtlineare Dynamiken im biologischen und sozialen Bereich bereits in vielfacher und oft erstaunlicher Weise in der Welt der „unbelebten Materie“ präfiguriert sind.

¹³ Vgl. Rainer Paslack und Peter Knost, Zur Geschichte der Selbstorganisationsforschung. Ideengeschichtliche Einführung und Bibliographie (1940-1990), Bielefeld 1990.

¹⁴ Letzterer, ein Meteorologe, gilt als einer der Väter jenes Teilbereichs, der seit den 1970er-Jahren den modischen Namen „Chaostheorie“ führte. Vielleicht ist es sinnvoll, hier als neutralsten Oberbegriff für alle genannten Bereiche den Terminus „nichtlineare dynamische Systeme“ anzuführen, dessen Wurzeln bis zu den Arbeiten Henry Poincarés zu Beginn des 20. Jahrhunderts zurückreichen.

¹⁵ Vgl. dazu folgende Bemerkung von Dirk Baecker: „Selbst ein Sandkorn enthält auf der Ebene der Vernetzung seiner Atome und Moleküle Informationsverarbeitungskapazitäten, von denen wir uns, mit unserem eigenen Gehirn noch unvertraut, keine Vorstellung machen können.“ Aus: Dirk Baecker, Wozu Systeme?, Berlin 2002, S. 21.

3. Nichtlineare Geschichte

Manuel de Landa hat in einem bemerkenswerten Buch mit dem Titel *A Thousand Years of Nonlinear History*¹⁶ auf vielfältige Weise versucht, systemische Gemeinsamkeiten der inorganischen, organischen und sozialen Welten herauszuarbeiten. Allgemein gesagt, studiert er in naturgeschichtlichem wie geschichtlichem Kontext die „Flüsse“ von „Energie“ beziehungsweise „Material“ sowie die möglichen dabei entstehenden Verfestigungen, welche – ist deren Emergenz einmal bewirkt – wiederum auf die Flüsse zurückwirken und sie in maßgeblicher Weise beeinflussen und einschränken. (Dies führt zwar des Öfteren zu eher oberflächlichen Verallgemeinerungen, doch die Resultate solcher „erster Näherungen“ sind schon für sich genommen neu und regen mitunter zu vertiefterem Studium an.)

Bezeichnend für de Landas Vorgangsweise ist die Erstellung von Querverbindungen zwischen scheinbar sehr disparaten (Wissens-)Bereichen, die letztlich erst aus einer systemischen Perspektive gemeinsam erfasst werden können. So sei etwa die organische Welt bis vor ungefähr 500 Millionen Jahren durch „weiches Gewebe“ zu charakterisieren: Gel, Aerosole, Muskel und Nerven.

Zu diesem Zeitpunkt machten einige der Konglomerate fleischlicher Materie/Energie eine plötzliche *Mineralisierung* durch, und es entstand neues Material zur Konstruktion lebender Kreaturen: *Knochen*. Es ist beinahe so, als ob sich die mineralische Welt, die als Substrat für die Emergenz biologischer Kreaturen gedient hatte, in der Bestätigung wieder geltend gemacht hätte, dass die Geologie – weit davon entfernt, als primitives Stadium in der Evolution der Erde zurückzubleiben – vollständig mit den weichen, gallertartigen Newcomern koexistierte. Primitiver Knochen, ein steifer, verkalkter zentraler Stock, aus dem später die Wirbelsäule werden sollte, ermöglichte den Tieren neue Arten der Bewegungskontrolle, befreite sie von vielen Einschränkungen und setzte sie im wahrsten Sinn des Wortes in Bewegung, um jede verfügbare Nische in der Luft, zu Wasser und am Land einzunehmen. Und doch, während Knochen die Komplexifikation des Tierreichs erlaubten, zu dem wir, als Wirbeltiere, gehören, vergaßen sie nie ihre mineralische Herkunft: Sie sind jenes lebende Material, das am leichtesten versteinert, das am schnellsten die Schwelle überschreitet, zurück in die Welt der Felsen. Aus diesem Grund ist ein Großteil der geologischen Geschichte mit fossilen Knochen geschrieben.¹⁷

De Landa belässt es aber nicht mit diesem an sich bekannten Sachverhalt, sondern knüpft mit einer Analogie an, deren abstrakter Gehalt im weiteren Verlauf des Buches selbst zum Thema werden wird:

Das menschliche Endoskelett war eines der vielen Produkte dieser uralten Mineralisierung. Doch das ist nicht die einzige geologische Unterwanderung, die die menschliche Spezies durchmachte. Vor ungefähr achttausend Jahren begannen menschliche Populationen erneut zu mineralisieren, als sie ein urbanes *Exoskelett*

¹⁶ Manuel de Landa, *A Thousand Years of Nonlinear History*, New York 1997.

¹⁷ Ebd., S. 26 f (m. Ü., auch die noch folgenden Zitate). Zur Unabdingbarkeit des Studiums von Fossilien in der Geschichte der Geologie, vgl. Simon Winchester, *Eine Karte verändert die Welt. William Smith und die Geburt der modernen Geologie*, München 2001.

entwickelten: Ziegel aus sonnengetrocknetem Lehm wurden zum Baumaterial ihrer Wohnungen, die wiederum Stein-Monumente umgaben und alle selbst wieder von steinernen Verteidigungsmauern umgeben waren. Dieses Exoskelett diente einem ähnlichen Zweck wie das interne Gegenstück: die durch die Mauern einer Stadt hinaus- und hereinfließende Bewegung menschlichen Fleisches zu kontrollieren.¹⁸

Im Anschluss an die obige Diskussion nichtlinearer Dynamik sei aber an dieser Stelle auch de Landas Warnung erwähnt, dass man bei solchen Analogien vorsichtig vorzugehen hat:

Wir müssen aber insbesondere dem Irrtum vorbeugen, Städte mit Organismen zu vergleichen, besonders wenn die Metapher zu implizieren trachtet (wie sie es in der Vergangenheit getan hat), dass beide im Zustand eines inneren Equilibriums, oder Homöostase, existieren. Urbane Zentren wie lebende Kreaturen müssen vielmehr als *unterschiedliche* dynamische Systeme betrachtet werden, die weitab vom Equilibrium operieren, das heißt, durchsetzt von mehr oder weniger intensiven Flüssen von Materie/Energie, welche ihre einzigartigen Metamorphosen erst bewirken.¹⁹

Zwei besonders charakteristische Merkmale *nichtlinearer Systeme* (im Unterschied zu weniger komplexen Systemen, zu deren Beschreibung einfache lineare Gleichungen genügen) sind die möglichen *dynamischen* Generierungen von *Hierarchien* und *Netzwerken*. Solche vielen spezifischen Ausformungen gemeine Prozesse können allerdings durch ihre linguistischen Repräsentationen allein nicht in ihrer weitreichenden Bedeutung erfasst werden. De Landa schlägt in diesem Zusammenhang den Gebrauch von *technischen Diagrammen* vor und illustriert dies an folgendem Beispiel:

Wenn wir sagen (wie Marxisten früher sagten), dass „der Klassenkampf der Motor der Geschichte“ sei, so verwenden wir das Wort „Motor“ in rein metaphorischem Sinn. Wenn wir aber sagen, „ein Hurrikan ist ein Dampfmotor“, so formulieren wir *nicht* bloß eine linguistische Analogie; vielmehr sagen wir damit, dass Hurrikans das gleiche Diagramm verkörpern [embody], das Ingenieure verwenden, um Dampfmotoren zu *bauen* – das heißt, wir sagen, dass ein Hurrikan wie eine Dampfmaschine ein Reservoir an Hitze in sich birgt, via thermische Unterschiede operiert, sowie Energie und Material durch einen (sogenannten) Carnot-Kreislauf zirkuliert.²⁰

Dem Autor geht es letztlich um die Suche nach „abstrakten Maschinen“²¹ hinter den struktur-generierenden Prozessen, welche als historische Produkte spezifische Netzwerke und Hierarchien erzeugen.

¹⁸ Ebd., S. 27.

¹⁹ Ebd., S. 28. Eine ganz ähnliche Forderung lässt sich übrigens auch hinsichtlich der verbreiteten Analogie des Internet mit einem „global brain“ stellen.

²⁰ Ebd., S. 58. Natürlich müsste man „steam motor“ im Deutschen mit „Dampfmaschine“ übersetzen. Da aber dann das angeführte Beispiel in der Übersetzung nicht mehr nachvollziehbar wäre, wird hier der Begriff „Dampfmotor“ verwendet.

²¹ Diesen Terminus verwenden Deleuze und Guattari für die hier besprochenen „technischen Diagramme“. Vgl. Gilles Deleuze und Félix Guattari, Tausend Plateaus. Kapitalismus und Schizophrenie, Berlin 1992.

Ich möchte nun am Beispiel der (geologischen, biologischen wie sozialen) „Stratifikation“ aufzeigen, was de Landa unter der *Verkörperung* [embodiment] von technischen Diagrammen (bzw. abstrakten Maschinen) versteht. Wie geologische Strata Schichten von felsigem Material sind, so können etwa „soziale Strata“ als Schichten (Klassen, Kasten) von menschlichem Material aufgefasst werden. Wie kann dies aber mehr sein als eine Metapher? Kann gezeigt werden, dass der Prozess der *Erzeugung* von geologischen wie sozialen Strata durch *dieselbe abstrakte Maschine* erfolgt?²² De Landa bejaht dies und argumentiert folgendermaßen. Geologische Strata entstehen durch (zumindest) zwei unterschiedliche Operationen: *selektive Akkumulation* und *isolierende Konsolidierung*.

Betrachtet man ein geologisches Stratum genau, so stellt man fest, dass jede von Weitem erkennbare Schicht aus feineren Schichten besteht, wobei jede einzelne wiederum (unterm Anderem) aus Kieselsteinen besteht, die hinsichtlich ihrer Größe, Gestalt und chemischen Zusammensetzung beinahe vollständig homogen sind. Da Kiesel nicht a priori in derart standardisierten Formen auftreten, muss hier ein Sortiermechanismus am Werk gewesen sein. (Geologen sprechen auch tatsächlich davon, dass ein Fluß als „hydraulischer Computer“ operiert, wenigstens aber als „Sortiermaschine“. Da zwischen Kiesel und Fluß wie zwischen Fluß und Flussbett Feedback-Mechanismen existieren, muss diese „Sortiermaschine“ ein höchst nichtlinear-dynamisches System sein.)

Nach der erreichten selektiven Akkumulation folgt die Konsolidierung in Form einer Zementierung durch wasserlösliche Substanzen (gewisse Silikate u. dgl.), die das Sediment durch die kleinen „Poren“ zwischen den Kieseln auffüllen, danach kristallisieren und somit die ursprünglich beweglichen Kiesel in mehr oder weniger permanenten „architektonischen“ Strukturen verfestigt.

Diese doppelte Operation konstituiert also die „abstrakte Maschine der Stratifikation“. Gemäß dem bisher Gesagten finden sich nun aber isomorphe Prozesse auch in anderen Bereichen. De Landa erläutert eine gleichermaßen doppelte Operation auch auf der Ebene biologischer Spezies. Hier ist es das genetische Material, das (auf Grund einer ganzen Reihe von Selektionszwängen) nicht zufällig akkumuliert wird, sondern gleichfalls „sedimentiert“. Die zweite Operation ist hier jene der „reproduktiven Isolation“, die eine Population auf mechanische und genetische Weise daran hindert, mit allen anderen Populationen in Reproduktion zu treten, womit eine einmal akkumulierte genetische Komposition und Adaption erhalten bleibt und nicht wieder in einen allgemeinen Gen-Pool, im Extremfall bis hin zur Einzelligkeit, „de-evolvieren“ kann. Die beiden Operationen sorgen also dafür, dass individuelle Pflanzen und Tiere eine Einheit auf höher-organisatorischer Ebene bilden können, eine Spezies.

Auch bei der Bildung sozialer Klassen lassen sich die beiden Operationen (und damit dieselbe abstrakte Maschine) wiederfinden. Unterschiedliche „Schichten“ existieren zwar in allen komplexeren sozialen Systemen, doch müssen die Rangzuordnungen

²² Seit Längerem verfolge ich einen vergleichbaren Gedankengang. Ich suche nach „Echos“ in unterschiedlichen Wissensgebieten, die ausschließlich dynamisch verstehbar sind. In einer entsprechenden „Echologie“ wäre zu fragen, wie der Organisationswandel eines (Wissens-, Schaffens-, etc.)Bereichs im Organisationswandel eines anderen nachklingt bzw. welche abstrakten Gemeinsamkeiten sich dabei ergeben. Vgl. unter Anderem Gerhard Grössing, *Das Unbewusste in der Physik. Über die objektalen Bedingungen naturwissenschaftlicher Theoriebildung*, Wien 1993.

nicht notwendigerweise die soziale Organisation als autonome Dimension charakterisieren. Um Klassen oder Kasten also als separate Einheit einzuführen und zu erhalten, ist daher eine zweite Operation notwendig. Diese wird durch theologische Interpretation oder das Rechtswesen vorgegeben, wobei die Eliten als die Verteidiger und Bewahrer so institutionalisierter Traditionen fungieren. Zweifellos ist dieses Bild (als simplifiziertes „technisches Diagramm“) der Entstehung sozialer Strata sehr vereinfacht, doch de Landa plädiert dafür, es wegen seines heuristischen Wertes beizubehalten:

Sedimentäre Felsen, Spezies und soziale Klassen (sowie andere institutionalisierte Hierarchien) sind allesamt historische Konstruktionen, Produkte bestimmter struktur-generierender Prozesse, die als Ausgangslage eine heterogene Ansammlung von Rohmaterial annehmen (Kiesel, Gene, soziale Rollen), sie durch einen Sortiervorgang homogenisieren und schließlich die resultierenden einheitlichen Gruppierungen in einen länger andauernden Zustand konsolidieren. Die Hierarchien (...) sind Spezialfälle einer allgemeineren Klasse von Strukturen, stratifizierte Systeme, zu denen nicht nur menschliche Bürokratien und biologische Spezies gehören, sondern auch Sediment-Gestein. (Und all dies *ohne Metapher*.)²³

Neben den hier beispielhaft erläuterten Hierarchien und deren erzeugende abstrakte Maschine diskutiert de Landa mit ähnlicher Intention das Beispiel von Netzwerken (oder „selbst-konsistenten Aggregaten“), die er davon zunächst zu Analyse-Zwecken deutlich abgrenzt. In der Realität treten natürlich beide Arten von Systemeigenschaften, mit unterschiedlichen Gewichtungen, zugleich auf. Doch in erster Näherung gibt sich de Landa mit folgender Einteilung zufrieden: Wie Sediment-Gestein, biologische Spezies und soziale Hierarchien als stratifizierte Systeme zu betrachten sind, so sind Eruptivgestein, Ökosysteme und Märkte selbst-konsistente Aggregate, d.h. Resultate des Zusammentreffens beziehungsweise der organisatorischen Verbindung von heterogenen Elementen. Sind *hierarchie-generierende* Maschinen durch die Kombination von Sortier- und Konsolidierungs-Operationen gekennzeichnet, so artikulieren *netzwerk-generierende* Maschinen divergente (doch teilweise überlappende) Komponenten durch ihre funktionalen Komplementaritäten, wobei sowohl endogen emergierende stabile Zustände, als auch verschiedene lokal eingeschobene (und gerade nicht „vor-sortierte“) Elemente beteiligt sein können.

Wenn nun auch etwa Sediment-Gestein und biologische Spezies durch eine gemeinsame abstrakte Maschine gekennzeichnet sind, so muss aber dennoch klar sein, dass diese erste Näherung ergänzungsbedürftig ist. In anderen Worten, gesucht ist eine abstrakte Maschine, die mehr umfasst als die Generierung von Hierarchie. Diese neue Maschine müsste der höheren Komplexität biologischer Spezies Rechnung tragen beziehungsweise überhaupt die Möglichkeit eröffnen, von niedriger zu höherer Komplexität zu gelangen. In einem kurzen Paragraphen erwähnt de Landa nun eine besonders effektive Strategie zur möglichen Erhöhung der Komplexität abstrakter Maschinen: Wenn die Materialien, die einer Sortier-Operation unterworfen sind, die Möglichkeit zu Replikation und Variation erwerben, entsteht eine neue abstrakte Maschine in der Form einer „blinden Versuchs-Sonde“ (*blind*

²³ De Landa, A Thousand Years, wie Anm. 14, S. 62. Die vom Autor selbst hervorgehobene Wiederholung, dass es sich hier nicht um (einfache) Metaphern handelt (sondern um Verkörperungen abstrakter Maschinen, die man auch als „Metaphern höherer Ordnung“ verstehen könnte), wird uns auch weiter unten noch beschäftigen.

probe-head) mit der Fähigkeit zur Erkundung eines erweiterten Möglichkeitsraums. Damit sind primär die sogenannten „Genetischen Algorithmen“ angesprochen, und diesen wollen wir uns nun zuwenden.

4. Genetische Algorithmen

In den Fünfziger- und Sechziger-Jahren des 20. Jahrhunderts haben Computerwissenschaftler damit begonnen, evolutionäre Systeme zu studieren, um einige ihrer Prinzipien als Optimierungsstrategie für technische Probleme zu implementieren. Dabei war beabsichtigt, zunächst ein technisches Problem zu formulieren und davon eine computergenerierte Lösung anzugeben. Diese Lösung wurde dann daraufhin getestet, ob sie optimal (oder gut genug) sei oder nicht. War sie es nicht, so wurden in den Computerprogrammen zusätzliche Operatoren eingesetzt, wie sie durch genetische Variation oder natürliche Selektion inspiriert worden sind. Die sich ergebenden Lösungen wurden wieder nach ihrer Optimalität getestet, und im Fall mit negativem Ausgang wurde die Prozedur (oft über viele „Generationen“ hinweg) wiederholt, bis eine optimierte (d.h. besser angepasste) Lösung gefunden wurde.

Ein genetischer Algorithmus ist also im Wesentlichen eine Suchprozedur, die eine gewisse objektive Funktion dadurch optimiert, dass eine „Population“ von „Lösungen“ erhalten wird, wobei Genetik-inspirierte Operationen wie Mutation oder Replikation eingesetzt werden, um eine neue Population aus der vorhergehenden „Eltern“-Population hervorzubringen. (Vgl. das Schema in Fig. 1) Im Allgemeinen werden die Lösungs-Kandidaten als Bit-Reihen enkodiert. Die Operation der „Kreuzung“ (*Crossover*) ermöglicht es, zwei Kandidaten von der Lösungs-Population miteinander zu kombinieren, um einen neuen Kandidaten zu erzeugen. Für zwei n -Bit-Reihen A und B kann dies einfach so erfolgen, dass die ersten k ($<n$) Bits von Kandidaten A mit den letzten $(n-k)$ Bits von Kandidaten B verbunden werden. Die Operation der „Mutation“ besteht darin, ein oder mehrere Bit(s) eines Kandidaten zu vertauschen. Im Schema der Fig. 1 wird die natürliche Selektion durch einen Zufalls-Mechanismus (Roulette-Rad) simuliert. Zentrale Bedeutung bei einem genetischen Algorithmus hat die sogenannte „Fitness-Funktion“, die ein Evaluationsmaß für jeden Kandidaten angibt, wie gut die Lösung (angesichts des möglichen Optimums) nun ist.

Genetische Algorithmen wurden in den Sechzigerjahren von John Holland erfunden und von seiner Gruppe weiterentwickelt.²⁴ Hollands Varianten wurden als Methode entworfen, die neben *Crossover* und Mutation auch die Operation der „Inversion“ implementiert, bei der die Reihenfolge der Anordnung der „Gene“ neu arrangiert wird. Weiters wählt ein Selektions-Operator jene „Chromosomen“ einer Population, die zur weiteren Reproduktion eingesetzt werden, wobei im Durchschnitt die „fitteren“ Chromosomen mehr Nachkommen erzeugen als die weniger fitten. (In Abweichung zur Biologie wird jedoch den „Nachkommen“ nur dann erlaubt, die Stelle der „Eltern“ einzunehmen, wenn ihr Fitness-Wert über dem der „Eltern“ liegt.)

²⁴ Vgl. etwa John Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Cambridge 1992.

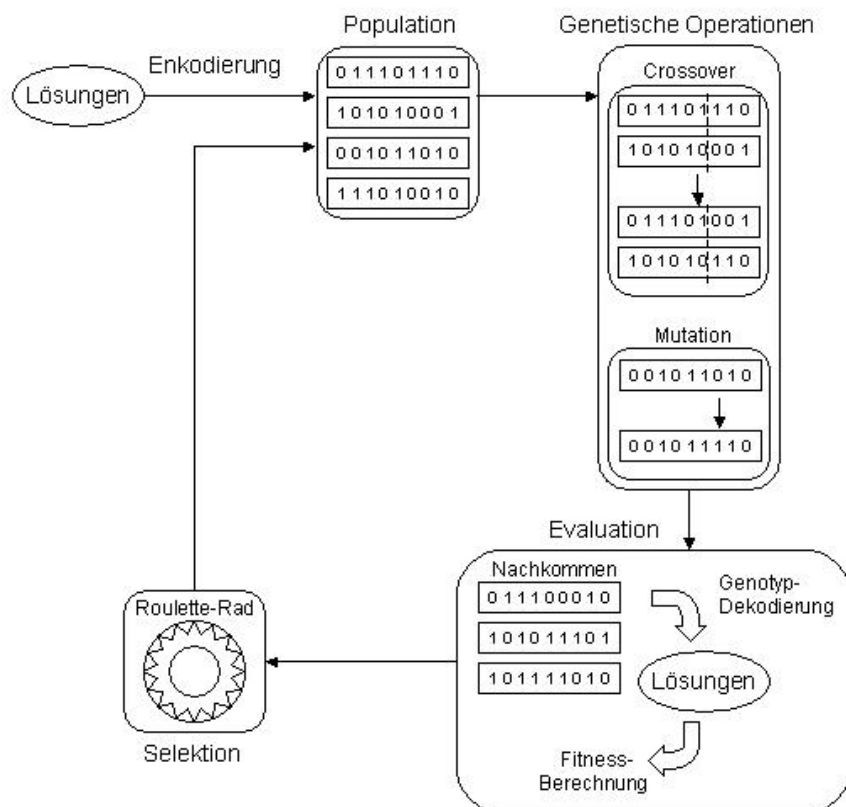


Fig.1: Schema für einen Genetischen Algorithmus

Die allgemeine Idee, in einer Ansammlung von Kandidaten-Lösungen die gewünschte Lösung zu suchen, führte in der Computerwissenschaft zur Schaffung eines Neologismus: Man sucht in einem „Such-Raum“ (*search space*). So gibt es eine Suche unter gespeicherten Daten, die Suche nach Pfaden (zu bestimmten Zielen) oder eben die Suche nach optimalen Lösungen. Letztere gehört zu dem Such-Typ, für den genetische Algorithmen eingesetzt werden.

Ein weiterer zentraler Begriff ist die sogenannte „Fitness-Landschaft“. Dabei handelt es sich um die Darstellung des Raums aller möglichen Genotypen und deren zugeordnete Fitness-Werte. Die „Evolution“ via genetische Algorithmen verursacht, dass sich Populationen auf bestimmte Art in dieser Landschaft bewegen, wobei das Phänomen der „Adaption“ als Erreichen eines lokalen Maximums (einer lokalen „Erhöhung“ in der „Landschaft“) dargestellt werden kann. Die Operatoren von Crossover und Mutation können dann als Instrumente betrachtet werden, eine Population in der Fitness-Landschaft hin- und her zu bewegen.

So viel zu einer kurzen Beschreibung von genetischen Algorithmen. Sie sind hier auch deshalb von Interesse, weil sie Gemeinsamkeiten mit einem weiteren

Phänomen aus der Biologie teilen. So hat besonders Richard Dawkins²⁵ immer wieder darauf hingewiesen, dass bestimmte Muster von Tierverhalten, wie etwa der Werkzeuggebrauch bei Affen oder Vogelgesänge, aufgrund der Operation der *Imitation* sich tatsächlich „replizieren“ und über eine Population sowie über Generationen hinweg verbreiten. Vogelgesänge sind das meist-studierte Beispiel dieser Replikatoren (die Dawkins „Meme“ nennt²⁶), die auch tatsächlich evolvieren können, um neue Formen und unterschiedliche „Dialekte“ zu erzeugen. Manuel de Landa hat nun in einer Bemerkung darauf aufmerksam gemacht, dass hier eine wesentliche Gemeinsamkeit mit genetischen Algorithmen vorliegt:

In beiden Fällen resultiert die Verkopplung von variablen Replikatoren mit einem Selektionsdruck in einer Art von „Such-Instrument“ (oder „Versuchs-Sonde“), das (die) einen Raum möglicher Formen erkundet (d.h., den Raum möglicher organischer Gestalten oder von Vogelgesängen oder von Lösungen für Computer-Probleme). Dieses Such-Instrument ist natürlich blind (oder genauer: kurzsichtig) und folgt damit dem zentralen Prinzip des Neo-Darwinismus: *Evolution hat keine Voraussicht*. [*Evolution has no foresight.*] (...) Diese Versuchs-Sonde ist die abstrakte Maschine, die wir gesucht haben, nämlich diejenige, die den Prozess der Entstehung von Sediment-Gestein von jenem, der biologische Spezies hervorruft, unterscheidet. Und dennoch, obwohl die neue Maschine für Lebens-Formen charakteristisch ist, gilt dasselbe grundsätzliche Diagramm auch für Meme und für genetische Algorithmen.²⁷

5. Warum etwas wird

Der in genetischen Algorithmen definierte „Such-Raum“ (*search space*) besteht aus (mit den Elementen 0 und 1 gebildeten) Mengen reiner Zufallsketten. Das heißt, er ist nicht besonders reichhaltig strukturiert und widerspiegelt dabei einen klassisch-reduktionistischen Ansatz zur Genetik. Dies wäre heute allerdings mit der von den großen Genetik-Lobbies stets verdrängten aber in weiten wissenschaftlichen Kreisen wohlbekannten Tatsache zu kontrastieren, dass Gene nicht mehr – wie noch vor zwei oder drei Jahrzehnten – als „Blaupausen“ für die zu gestaltenden Organismen anzusehen sind, sondern eine zwar wesentliche, aber doch eben eingeschränkte

²⁵ Richard Dawkins, *The Selfish Gene*, New York 1990.

²⁶ In Analogie zu jenem der „Gene“ (als Träger der Erbmerkmale) wurde der Begriff der „Meme“ bereits 1948 von Heinz von Foerster vorgeschlagen, um „Träger der Erinnerungsmerkmale“ zu bezeichnen. Siehe Heinz von Foerster, *Das Gedächtnis. Eine quantenphysikalische Untersuchung*, Wien 1948. Da die Meme bei Foerster (auch in späteren Arbeiten) als Zustände selbstreferenzieller Molekülkomplexe angelegt sind, die über zwischenmenschliche Kommunikation „übertragen“ werden können, sind auch sie als „Replikatoren“ anzusehen.

²⁷ De Landa, *A Thousand Years*, wie Anm. 14, S. 139. Vgl. auch S. 216, wo de Landa eine Brücke zur menschlichen Sprache schlägt (für die er dann später wieder eine weiter ausdifferenzierte Maschine sucht): „Insofern Laute, Wörter und Konstruktionen einer Sprache als Replikatoren betrachtet werden können, verkörpern auch Sprachen eine abstrakte Versuchs-Sonde, eine Such-Vorrichtung.“ Vgl. dazu auch in ähnlicher Intention Gerhard Grössing, *Das Schwärmen der Sprache*, Text und Kritik 137 (1998), zu Peter Waterhouse, S. 77 - 80.

Rolle in komplexen *autokatalytischen Netzwerken* einnehmen.²⁸ Evolution passiert erst durch das Zusammenspiel auf genetischer und organischer Ebene:

Wenn sich aber Gene an das jeweils spezifische Milieu des genetischen Netzwerkes, dessen Teil sie sind, ebenso anzupassen haben wie Individuen an die jeweils spezifischen Bedingungen ihrer Umwelt, dann sind Gene *sowohl Replikatoren als auch Interaktoren*. Diese Doppelrolle des genetischen Materials als etwas, das sowohl steuert als auch gesteuert wird, entspricht dem Prinzip der Selbstorganisation des Lebens viel eher als die Formulierung vom Gen als dem zentralen Bewegiger und Replikator.²⁹

Die oben erwähnten Ketten aus Elementen der Menge (0,1) entsprechen daher bestenfalls einer *Verkörperung* des Such-Raums auf genetischer Ebene: Sie wären äquivalent zu *Resultaten* von Prozessen der Selbst-Organisation in einem physischen Raum (wie zum Beispiel der Umgebung des Zellkerns).

Somit wird nun eine Auffassung der Rolle von Genen bestätigt, wie sie der Physiker Howard Pattee schon 1968 vorgestellt hat.³⁰ Danach liegt die zentrale Funktion der Gene darin, individuelle Moleküle innerhalb einer Zelle dazu zu bringen, sich dem Funktionieren der Zelle selbst unterzuordnen, und ganz ähnlich wäre weiter die Anpassung der kleineren Einheiten in das jeweils größere Gefüge vorzustellen: individuelle Zellen in einem Gewebe, individuelles Gewebe in einem Organ, individuelle Organe in einem Organismus. Auf jeder Ebene dieser Hierarchie wäre es dann die Aufgabe der Gene, die Operationen auf dem niedrigeren Niveau dermaßen einzuschränken, dass dieses Niveau sich so verhält, wie es durch das Funktionieren des jeweils vorgegebenen nächst-höheren Niveaus bestimmt ist. Dies impliziert geradezu automatisch ein Szenario, in dem Operationen auf allen Ebenen miteinander verknüpft sind und in Feedback-Schleifen aufeinander einwirken. Somit wird aber auch klar, dass ein realistischer Ansatz zur Simulation von Such-Operationen im jeweiligen Umfeld der elementaren Einheit eines bestimmten Niveaus implementiert werden muss.

Da uns hier interessiert, wie etwas wird, das heißt, wie eine einmal vorhandene Struktur oder Lebensform mit der Zeit (und auf irreversible Weise) komplexer werden kann, werden wir versuchen, solche „Such-Operationen“ gänzlich un-teleologisch als *selbst-organisierte* darzustellen und die Bedingungen für derartige Prozesse zu erforschen. In anderen Worten, gesucht ist nun eine minimale Form von „replikativen“ (oder noch allgemeiner: rekursiven) Prozessen in einer Umgebung, deren Resultat ein irreversibles Anwachsen einer charakteristischen Komplexitäts-Größe sein soll. Dazu sollen im Folgenden zwei Varianten diskutiert werden: das einfache Modell der „rauschenden Rekursionen“ und das (auf den selben Grundgedanken basierende) komplexere Modell „hierarchisch emergenter fraktaler Evolution“, das uns letztlich einem Verständnis grundsätzlicher Regeln für die „Evolution der Evolution“

²⁸ Vgl. Stuart A. Kauffman, *The Origins of Order: Self-Organization and Selection in Evolution*, New York 1993, oder David J. Depew u. Bruce H. Weber, *Darwinism Evolving: Systems Dynamics and the Genealogy of Natural Selection*, Cambridge 1995.

²⁹ Wolfgang Wieser, *Gentheorien und Systemtheorien: Wege und Wandlungen der Evolutionstheorie im 20. Jahrhundert*, in: Wolfgang Wieser (Hg.), *Die Evolution der Evolutionstheorie. Von Darwin zur DNA*, Heidelberg 1994.

³⁰ Howard Pattee, *The Problem of Biological Hierarchy*, in: Charles H. Waddington (ed.), *Towards a Theoretical Biology*, Edinburgh 1968.

näherbringen soll. Bevor diese beiden Varianten aber präsentiert werden, ist die Vorstellung eines für alle Lebewesen gültigen fundamentalen Gesetzes notwendig.

5.0. Der Puls des Lebens

Alle höheren Tiere (*Vertebraten*) auf unserem Planeten folgen einem Grundgesetz hinsichtlich ihres Metabolismus: Die Lebensdauer ist auf eine Gesamtzahl der Herzschläge zwischen einer und zwei Milliarden angelegt. Während ein Huhn etwa 300 Herzschläge pro Minute charakterisiert, sind es bei einem Elefanten ungefähr 30 pro Minute. Daraus folgt, dass kleinere Lebewesen ihr Leben im Mittel rascher „abwickeln“ als große, die ihre Energien langsamer verbrennen und länger leben. Seit Max Kleiber vor siebzig Jahren die ersten entsprechenden Messungen anstellte, wurde diese erstaunliche Beziehung zwischen langsamem Puls und langem Leben immer genauer bestätigt. In entsprechendem Maß existiert auch ein gesetzmäßiger Zusammenhang zwischen der Pulsrate und der Körpermasse: Das sogenannte „Kleibersche Gesetz“ wird in neueren Darstellungen als „Scaling Law“ (Gesetz der Maßstab-Unabhängigkeit) beschrieben, wonach das Verhältnis von metabolischer Rate (Puls) zu Körpermasse eine Konstante ist, unabhängig von der Wahl der spezifischen Skala. Diese Skalen-Unabhängigkeit lässt sich in doppelt-logarithmischen Diagrammen als eine Gerade darstellen, deren Steigung (im Falle des Kleiberschen Gesetzes) $3/4$ beträgt.³¹ (Fig. 2)

In Anbetracht der enormen Diversität von Körpergrößen (bzw. Massen) der Lebewesen von über 21 Größenordnungen (d.h. von 10^{-13} g bei Mikroben bis 10^8 g = 100 Tonnen bei Walen) ist es eine besondere Herausforderungen, diesen gesetzmäßigen Zusammenhang zu erklären. Tatsächlich scheint dies in jüngster Zeit in Arbeiten von Geoffrey West, James Brown und Brian Enquist gelungen zu sein.³² Ihr Argument ist auf Tiere wie auf Pflanzen, ja sogar auf Einzeller, anwendbar und bezieht sich im Wesentlichen auf die physikalischen Randbedingungen beziehungsweise Einschränkungen eines idealen Verteilungssystems für die Nahrungsaufnahme. Während sie in früheren Arbeiten noch auf die Hydrodynamik hierarchischer Netzwerke Bezug nahmen, ist ihr allgemeineres und breiter anwendbares Argument ein geometrisches:

³¹ Knut Schmidt-Nielsen, *Scaling: Why is Animal Size so Important?*, Cambridge 1984. Das „Potenzgesetz“ („Scaling Law“) für die Beziehung zwischen der Körpermasse M und der metabolischen Rate R beschreibt die Gerade in Fig. 2: $R = R_0 M^b$, wobei R_0 eine (für verschiedene Tiere unterschiedliche) Normierungs-Konstante ist, aber der entscheidende Exponent b für alle Lebewesen gleich ist: $b = 3/4$. (Im Falle der skalierenden Beziehung zwischen Körpermasse und Lebensdauer ist $b = 1/4$.)

³² Geoffrey B. West, James H. Brown u. Brian J. Enquist, *The Fourth Dimension of Life: Fractal geometry and Allometric Scaling of Organisms*, in: *Science* 284 (1999) 1677 - 1681.

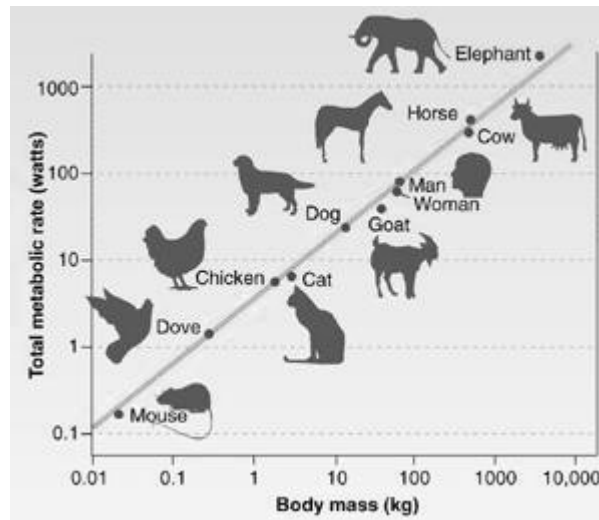


Fig. 2: Das Kleibersche Gesetz, das für alle Wirbeltiere eine gleichermaßen gültige Beziehung zwischen Körpergröße und metabolischer Rate (und damit indirekt auch Gesamt-Lebenszeit) darstellt. [Nach Schmidt-Nielsen 1984, wie Anm. 31]

Wir gehen davon aus, dass Organismen zur Maximierung ihrer Fitness selektiert wurden, indem sie ihre metabolische Kapazität maximierten, d.h. die Rate, mit der Energie und materielle Ressourcen von der Umgebung aufgenommen und für eine bestimmte Kombination von Überleben und Reproduktion verwendet werden. Dies ist äquivalent zu einer Maximierung der Maßstab-Unabhängigkeit [scaling] der gesamtorganismischen metabolischen Rate B . Es folgt, dass B durch die Geometrie und das Skalenverhalten der gesamten effektiven Oberfläche a limitiert ist, über die Nahrungsstoffe und Energie mit der externen oder internen Umgebung ausgetauscht wird. Beispiele dafür sind die Gesamtfläche aller Blätter von Pflanzen, die Gesamtfläche absorbierender Eingeweide- oder Kapillarien-Oberflächen von Tieren oder die Gesamtfläche von mitochondrischen inneren Membranen innerhalb von Zellen. Im allgemeinen gilt also, dass B proportional zu a ist. Es ist wichtig, a von der relativ glatten externen Oberfläche, oder „Haut“, zu unterscheiden, die viele Organismen einhüllt. Weiters schlagen wir vor, dass die natürliche Selektion dazu beigetragen hat, dass a in Abhängigkeit verschiedener Rahmenbedingungen und Einschränkungen, doch unter Beibehaltung einer kompakten Gestalt, maximiert wird. Dies ist äquivalent zur Minimierung der Hindernisse und der Zeit für die Abgabe von Ressourcen, indem eine charakteristische Länge oder interne lineare Distanz des hierarchischen Netzwerks minimiert wird.³³

Man braucht also nach diesem Argument zwei Gruppen von Variablen zur Beschreibung von Größe und Gestalt eines Organismus: eine konventionelle Euklidische Menge zur Beschreibung der Äußeren Oberfläche A , die ein Gesamtvolumen umfasst, und eine „biologische“ Menge zur Beschreibung der inneren Struktur, inklusive eine effektiven Materie/Energie-Austauschfläche a und das gesamte Volumen biologisch aktiven Materials. West *et al.* konnten nun zeigen, dass diese „biologischen“ Größen *fraktales* Verhalten aufweisen, wie die Selbst-Ähnlichkeit im (skalen-unabhängigen) Kleiberschen Gesetz schon nahelegt. Aus der

³³ Ebd. (m. Ü.).

Berechnung der involvierten fraktalen Dimensionen konnten die Autoren schließlich für alle Organismen ein Potenzgesetz herleiten, dessen Exponent von $3/4$ zur exakten Übereinstimmung mit dem empirisch bestimmten Kleiberschen Gesetz führt. Dies geht mit dem Nachweis einher, dass die oben erwähnten effektiven Oberflächen jeweils „maximal fraktal“ sind: die Vernetzungs-Struktur³⁴ ist Volumen-füllend³⁵ :

In dem Sinn haben Organismen eine vierte räumliche Dimension ausgenutzt, dass sie hierarchische fraktal-artige Strukturen entwickelten, um die Aufnahme und Verteilung von Ressourcen zu maximieren. (...) Im Unterschied zum genetischen Code, der nur einmal in der Geschichte des Lebens evolvierte, sind fraktal-artige Verteilungs-Netzwerke, die eine effektive vierte Dimension mit sich bringen, viele Male entstanden. Beispiele dafür sind extensive Oberflächen von Blättern, Kiemen, Lungen, Eingeweiden, Nieren, Chloroplasten und Mitochondrien, die gesamt-organismischen Verzweigungsarchitekturen von Bäumen, Schwämmen, Hydrozoen, oder die baumartigen Netzwerke diverser Atmungs- und Kreislauf-Systeme. Daher überrascht es nicht, wenn sogar einzellige Organismen viertelzahliges Scaling zeigen, inklusive dem $3/4$ -Potenzgesetz für die metabolische Rate. Obwohl Lebewesen einen dreidimensionalen Raum einnehmen, operieren ihre interne Physiologien und Anatomien so, als ob er vier-dimensional wäre.³⁶

Wir haben nun gesehen, dass allen Organismen ein Grundgesetz gemein ist, das auf der Basis von Optimierungsstrategien zur Verarbeitung von Materie- und Energieflüssen unter den jeweiligen Voraussetzungen ihrer Geometrien notwendig so und nicht anders zustande kommt. Zweifellos haben wir es hier mit einer sehr effektiven *abstrakten Maschine* zu tun, die kaum Spielraum für Alternativen offenläßt.³⁷ Jedoch gilt in unserem Zusammenhang festzustellen, dass dies nicht die abstrakte Maschine sein kann, die uns erklärt, warum etwas wird. Das nach Kleiber benannte Potenzgesetz [*scaling law*] erklärt uns zentrale Eigenschaften von *Resultaten*, die die Evolution in Form von Organismen hervorgebracht hat. Wir haben aber bisher noch kein *dynamisches Bild* von den Vorgängen, die zu diesen Resultaten führen. In anderen Worten, das Kleibersche Gesetz ist eine Zustandsbeschreibung, in der der Faktor *Zeit* nicht explizit aufscheint: Auch die inzwischen ausgestorbenen Saurier würden wohl auf der Geraden von Fig. 2 zu finden sein, doch wo kommt die Dynamik der Evolution ins Spiel? Woher rührt die Irreversibilität der (biologischen) Evolution, wenn die fundamentalen geometrischen und physikalischen Gesetzmäßigkeiten immer auf gleiche Weise gegolten haben? Eine erste Antwort soll nun vorgebracht werden, indem auf die entscheidende Rolle von Fluktuationen hingewiesen wird.

³⁴ Ebd.. Die Autoren betonen, dass das Netzwerk „virtuell“ sein kann: „Es muss kein physikalisches System verzweigter Röhren sein; es genügt, wenn hierarchische Pfade von Material-Flüssen vorliegen.“ (Ebd.)

³⁵ Ebd.. Man bedenke in diesem Zusammenhang, dass fraktale Dimensionen nicht notwendigerweise ganzzahlig sind. Ausnahmen bilden aber zum Beispiel Flächen- oder Volumen-füllende Strukturen. Als Beispiel sei hier etwa die Trajektorie eines der Brownschen Bewegung unterliegenden Moleküls genannt: Obwohl bloß eine Linie (also mit euklidischer Dimension $D=1$), überstreicht diese im Lauf der Zeit die gesamte Fläche, was ein Maß für die „Irregularität“ der un stetigen Trajekto re in Form einer fraktalen Dimension von $d=2$ ergibt. Vgl. Benoit B. Mandelbrot, *The Fractal Geometry of Nature*, New York 1977.

³⁶ Ebd. Es sei nochmals betont, dass es sich hier um eine vierte räumliche Dimension handelt, was also keinerlei Gemeinsamkeiten mit der relativistischen vier-dimensionalen Raum-Zeit impliziert.

³⁷ Die Autoren führen als einzige Ausnahmen ihres Erklärungsschemas die Anwendbarkeit auf filamentartige Algen und Pilze an, die zur Maximierung linearer Dimensionen selektiert wurden und daher kaum ein maximales Volumen okkupieren.

5.1. Rauschende Rekursionen

Im Laufe der biologischen Evolution auf dem Planeten Erde lassen sich einige offensichtlich irreversible Entwicklungen konstatieren, seien es die Diversifizierung der Spezies (d.h. die durch phylogenetische Aufzweigungen erfolgte Okkupation ökologischer Nischen in der Biosphäre), der Anstieg an Komplexität in den Übergängen von einzelligen zu vielzelligen Organismen oder von prokaryotischen zu eukariotischen Zellen. Obwohl allgemein *keine inhärente Tendenz* zu erhöhter Komplexität für alle Organismen angenommen wird, die etwa in einer besonderen „Kraft“ oder irgendeinem teleologischen Prinzip begründbar wäre, kann doch von einer *progressiven Evolution* gesprochen werden.³⁸ Es handelt sich dabei um eine Tendenz, die durch eine Reihe von Parametern wie Genomgröße, Anzahl der Zelltypen oder Hirngewicht im Laufe der Evolution nachgewiesen werden kann. (Fig. 3)³⁹

Die progressive Tendenz muss jedoch für die Gesamtheit (das Ensemble) sämtlicher Spezies in einem evolutionären Raum verstanden werden. Sie betrifft also nicht das einzelne Individuum, aber auch nicht eine isolierte Spezies - es ist vielmehr die Gesamtheit sämtlicher ökologischer Vernetzungen, die eine Optimierung im evolutionären Raum sucht. Es ist also zu präzisieren, dass die zitierte inhärente Tendenz zu größerer Komplexität im Verlauf der Evolution dem Netzwerk der Spezies zukommt. Welche einzelne Spezies gerade zufällig die höchste Komplexität aufweist, hängt also vom gegebenen Raum, in dem die Evolution stattfindet (den lokalen Gegebenheiten: dem Nahrungsangebot, den Umweltbedingungen, etc.) sowie von der Zeitdauer seit dem Beginn der evolutionären Iterationen ab.

Folglich ist bezweifelbar, ob hier von „evolutionärem Fortschritt“ aus der Sicht einer einzelnen Spezies gesprochen werden kann, etwa in dem Sinne, wie Menschen vom „technologischen Fortschritt“ sprechen. Hier liegt – offenbar in beiden genannten Fällen – ein nicht objektivierbares, „spezizentrisches“ Werturteil vor. (Der Begriff „Fortschritt“ führte sich für den Menschen im Zusammenhang mit technischer Entwicklung spätestens dann ad absurdum, wenn sich die Menschheit qua Technik selbst auslöschte, die Evolution auf der Erde würde jedoch weiter fortschreiten.) In der Kritik am Fortschrittsbegriff gehen allerdings manche Biologen sehr weit, wenn sie – nun im Zusammenhang mit der biologischen Evolution – eine generelle „Fortschritts-Sehnsucht“ konstatieren, die nicht einzulösen sei.

Stephen Jay Gould argumentiert etwa, dass der „angebliche Fortschritt des Lebendigen“ in Wirklichkeit, und notwendigerweise *generell*, eine „zufällige Bewegung von einem einfachen Ausgangspunkt aus und kein gerichteter Impuls zu einer von sich aus vorteilhaften Komplexität“ ist.⁴⁰ Er illustriert dies anhand der Tatsache, dass die Häufigkeitsverteilung für die Komplexität der Organismen im Laufe der Evolution immer schiefsymmetrischer wurde, und zwar auf Grund des einfachen Umstands der Existenz einer „Wand der geringstmöglichen Komplexität“. Letztere ist durch die einfache Tatsache vorgegeben, dass als Startpunkt der

³⁸ Vgl. Richard Gordon, *The Hierarchical Genome and Differentiation Waves. Novel Unification of Development, Genetics and Evolution*, Vols. I and II, London – Singapore 1999.

³⁹ Vgl. Wolfgang Wieser, *Die Erfindung der Individualität*, Heidelberg 1998. Im Fall der allgemeinen Tendenz zu stets erhöhter Körpergröße im Lauf der Phylogenese spricht man auch von der „Copeschen Regel“: Vgl. John T. Bonner, *The Evolution of Complexity by Means of Natural Selection*, Princeton 1988.

⁴⁰ Stephen Jay Gould, *Illusion Fortschritt. Die vielfältigen Wege der Evolution*, Frankfurt a.M. 1998.

Evolution die einfachsten Lebensformen Einzeller beziehungsweise Bakterien sind und eine noch niedrigere Komplexität nicht möglich ist (Fig. 4):

Meine Argumentation für das ganze System ist hieb- und stichfest: Von einem Anfang, der zwangsläufig an der Wand liegt, kommt es in einem wachsenden System durch zufällige Bewegung aller Elemente zu einer immer stärker rechtsschiefen Verteilung. Daraus ergibt sich eine auffällige Ironie: Der angesehenste Beleg für allgemeinen Fortschritt – die zunehmende Komplexität des Komplexesten – wird zur passiven Folge des Wachstums in einem System, dessen Bestandteile keinerlei Vorliebe für eine bestimmte Richtung haben.⁴¹

Im Verlauf der Evolution erschließen sich jeweils komplexere neue Arten neue Lebensräume. Dabei ist jedoch wichtig zu beachten, dass die jeweils höher komplexifizierten Spezies auf die Existenz der einfacher organisierten Spezies angewiesen sind. (Vgl. etwa die symbiotische Darmflora der Säugetiere oder im allgemeinen die Nahrungsketten.) Das Bild von der höheren erreichten Komplexität darf nicht dazu verleiten, eine systemische Autonomie zu denken. Der Mensch an der vordersten Komplexitäts-Front von Fig. 4 wäre lebensunfähig in einer kahlen unbelebten Welt.

⁴¹ Ebd., S. 212.

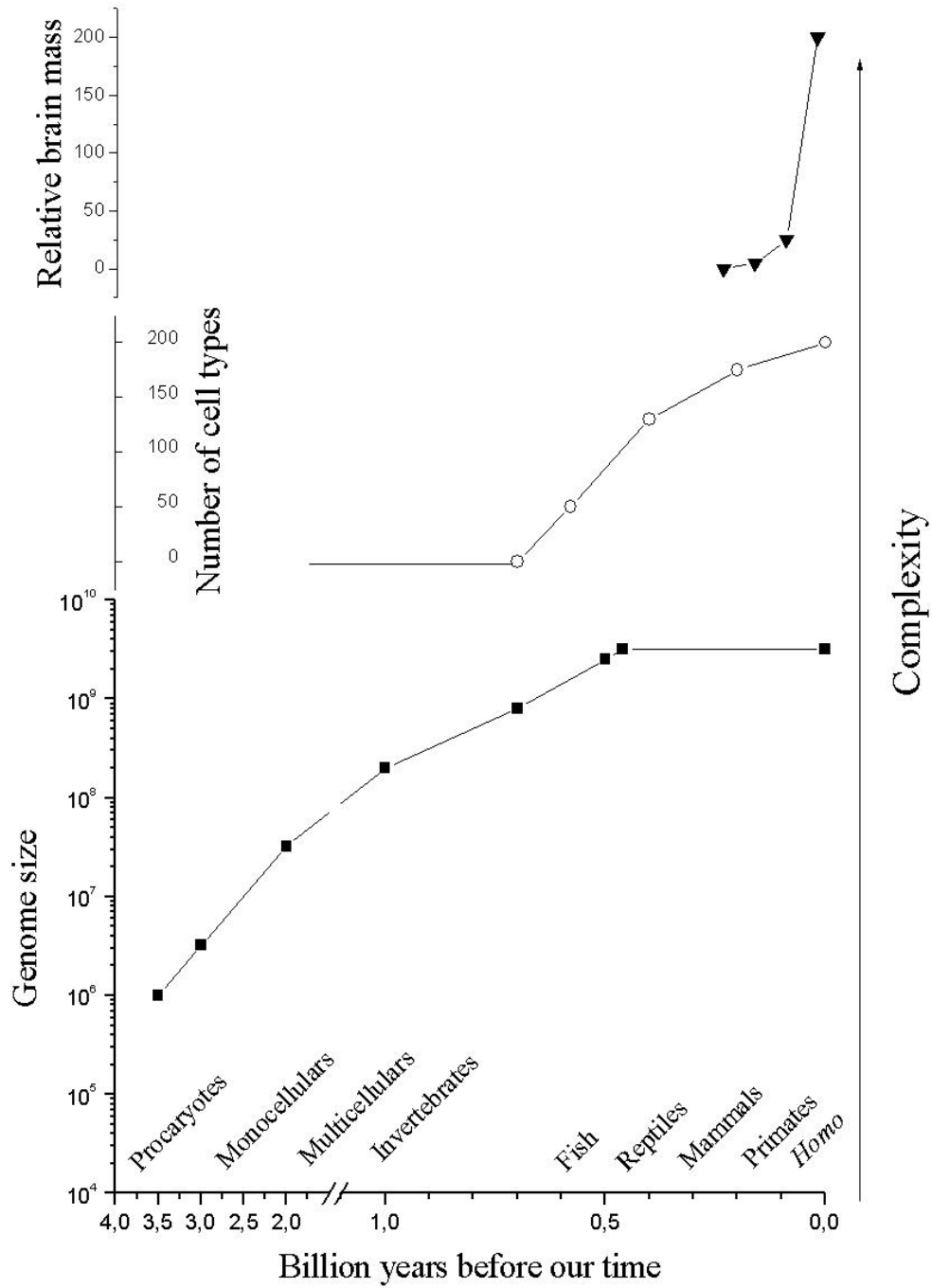


Fig. 3: Indikatoren für wachsende Komplexität im Laufe der letzten 4 Milliarden Jahre bei drei verschiedenen biologischen Parametern: Genomgröße, Zelltypanzahl und relative Gehirnmasse. [Wieser 1998, wie Anm. 39]

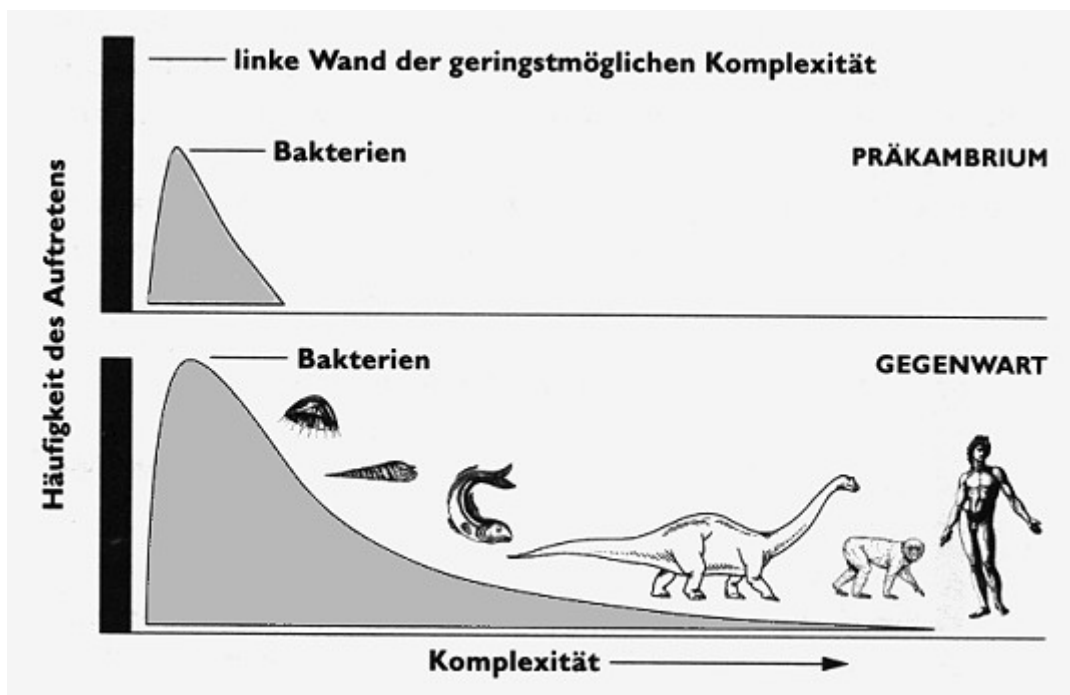


Fig. 4: Die Häufigkeitsverteilung für die Komplexität der Lebewesen, die im Laufe der Zeit immer stärker rechtsschief wird. [Nach Gould 1998, wie Anm. 40]

Allerdings räumt Gould ein, dass noch ein Argument für *progressive Evolution* (er selbst spricht – in etwas denunzierender Absicht – von „allgemeinem Fortschritt“) übrig bleibt, das bisher nicht ausgeschlossen werden könne:

Dem ganzen System steht von dem Ausgangspunkt an der linken Wand aus nur die Richtung der größeren Komplexität für Veränderungen offen. Wie steht es aber mit einer einzelnen Abstammungslinie, die in einer mittleren Position beginnt, so dass es ihr freisteht, sich in *beide* Richtungen weiterzuentwickeln (das erste Lebewesen steht an der linken Wand, aber das erste Säugetier, die erste Blütenpflanze oder die erste Muschel geht von der Mitte aus, und die Nachkommen können sich in Richtung beider Schwänze bewegen). Wenn man alle Linien untersucht, die sich in beide Richtungen verändern können, würde man vielleicht eine deutliche Vorliebe für eine Gesamtbewegung nach rechts finden, also in Richtung größerer Komplexität. Könnte man eine solche Vorliebe nachweisen, wäre es gerechtfertigt, von einem allgemeinen Trend zu mehr Komplexität in der Evolution der Abstammungslinien zu sprechen.⁴²

In Goulds Argumentation fällt auf, dass er von Zufallsverteilungen ausgeht und es für notwendig hält, von „Vorlieben“ der Spezies zu sprechen, anstatt wertfrei eine

⁴² Ebd..

Beschreibung vom Ausschöpfen sämtlicher Komplexitätsstufen zu entwerfen, die einem Ökosystem zu unterhalten möglich sind. Erst in diesem Bild kommt aber die notwendige systemische Dichotomie der Beschreibung zur Sprache: Die Spezies entwickeln sich im ökologischen Raum, und das gesamte Ökosystem unterhält all seine Spezies. Es geht also im Wesentlichen um Bestandsaufnahmen von Verteilungen und deren evolutionäre Trends (wenn man diese Verteilungen im Laufe der Zeit verfolgt). Bei Gould (und vielen anderen) ist jedoch nie von *dynamischen* Entwicklungen die Rede, wie also aus einer Verteilung konkret eine andere, unterschiedliche, resultieren kann – die gesamte Argumentation läuft auf einen unspezifizierten „Zufall“ hinaus.

Versuchen wir aber, eine mögliche Dynamik zu entwerfen, so wird schnell klar, dass in der von Gould selbst eingeräumten Möglichkeit tatsächlich das entscheidende Potential für *progressive Evolution* vorliegt. So geht aus einer Arbeit unseres Instituts (AINS) offenbar erstmals hervor, dass progressive Evolution auf Grund ihres *fraktalen* Charakters mathematisch fassbar wird.⁴³ Dies wird auch in dem umfangreichen Werk von Richard Gordon anerkannt, der unsere Argumentation übernimmt und dazu bemerkt, dass wir „dabei sind, eine solide mathematische Basis für progressive Evolution“ zu erhalten.⁴⁴

Bevor wir unser Modell der *hierarchisch emergenten fraktalen Evolution* im nächsten Abschnitt eingehender diskutieren, soll hier ein erster Grundgedanke zu unserem im Prinzip sehr einfachen mathematischen Argument skizziert und mit einem Beispiel aus der Biologie illustriert werden.

Wir gehen davon aus, dass Organismen systemisch gesehen ganz wesentlich durch ihre selbstreferenzielle Natur charakterisiert sind.⁴⁵ Damit liegt es aber nahe, entstehende Zufallsverteilungen nicht nur durch *additive* Prozesse zu simulieren, sondern diese aus iterativen Vorgängen entstehen zu lassen. In solchen Fällen können Wachstumsraten durch eine selbstreferenzielle *Multiplizität* zustande kommen, wie an folgendem geometrischen Beispiel leicht darstellbar ist (Fig. 5a): Die Größe eines Quadrats mit einer beliebigen Längeneinheit wird rekursiv variiert, indem sie einmal um 25 % vergrößert und danach um 25 % verkleinert wird, und so fort. Die langfristige Tendenz ergibt sich dabei eindeutig als Bewegung in Richtung stets kleinerer Flächen der Quadrate. Dieses Resultat gilt auch für den Fall, dass nicht strikt abwechselnd vergrößert und verkleinert wird: Es müssen bloß im Durchschnitt gleich viele Schritte der Vergrößerung wie der Verkleinerung erfolgen, um die Gesamt-Tendenz zur Verkleinerung der Flächen zu erreichen.

⁴³ Siegfried Fussy, Gerhard Grössing u. Herbert Schwabl, A Simple Model for the Evolution of Evolution, J. Biol. Systems 5 (1997) 341 – 357. Siehe auch <http://xxx.lanl.gov/abs/physics/0204070>.

⁴⁴ Gordon, The Hierarchical Genome, wie Anm. 36, S. 1000 f.

⁴⁵ Eine besonders pointierte Ausformulierung dieses Sachverhalts findet sich im Konzept „autopoietischer Systeme“. Vgl. dazu etwa Humberto R. Maturana und Francisco J. Varela, Der Baum der Erkenntnis. Die biologischen Wurzeln menschlichen Erkennens, Bern – München 1987.

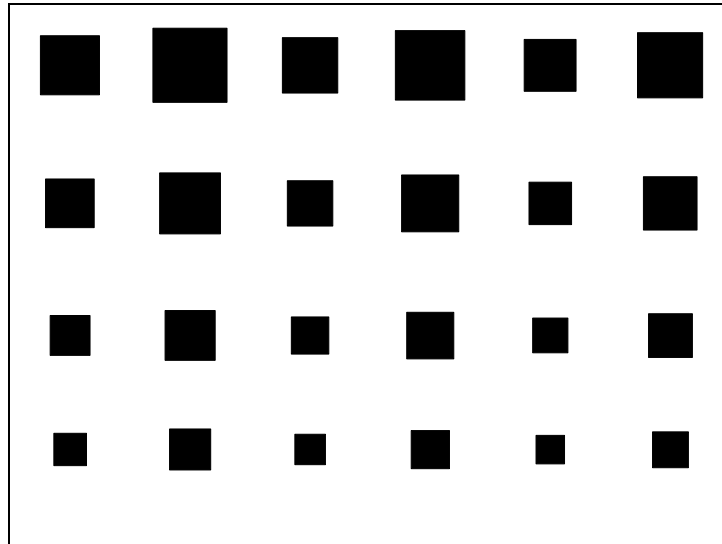


Fig. 5a: Die Größe eines Quadrats wird alternierend um 25 % vergrößert und verkleinert (von oben links nach unten rechts). Die langfristige Tendenz ist eindeutig in der Verkleinerung der Flächen gegeben. Dieses Ergebnis wird auch dann erreicht, wenn die Vergrößerungen und Verkleinerungen nicht strikt alternieren, sondern unvorhersehbar fluktuieren („rauschen“) und sich nur im statistischen Mittel die Waage halten („Rauschende Rekursionen“).

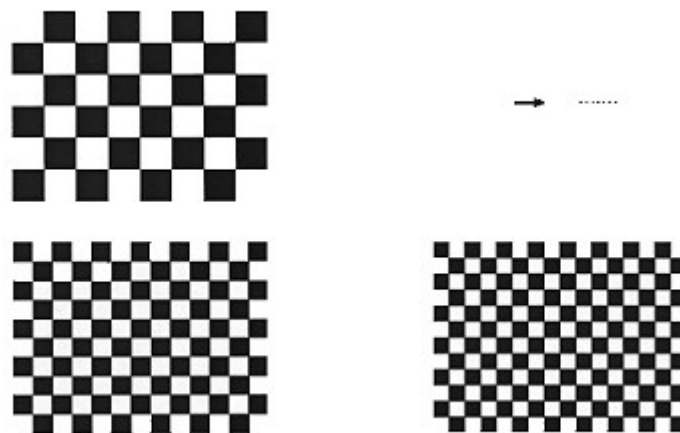


Fig. 5b: Repräsentiert eines der Quadrate in Fig. 5a die perzeptive „Auflösung“ eines Organismus in Form eines „Rasters“, dessen entsprechende zeitliche Entwicklung durch die Darstellung der mit eben diesen Quadraten „gefüllten“ Rechtecke (von oben links nach unten rechts) gegeben ist, so ist hiermit ein Beispiel für *progressive Evolution* auf der Basis von *rauschenden Rekursionen* illustriert: Während im Einzelfall zwar eine zufällige Fluktuation zu einer Verschlechterung der Auflösung führen mag, halten sich Verbesserungen und Verschlechterungen im Mittel die Waage. Da aber das Gesamtsystem rekursiv ist und das entsprechende Komplexitätsmaß (oder „Qualitätsmaß“) für die Auflösung multiplikativ, wird letzteres in der langfristigen Entwicklung stets erhöht werden.

Deshalb ist hier also von „rauschenden Rekursionen“⁴⁶ die Rede: Die Rekursionen können einem „Zufalls-Rauschen“ unterworfen sein, wobei bloß zu gewährleisten ist, dass die Fluktuationen in beide Richtungen im längerfristigen Mittel gleichwahrscheinlich sind. Obwohl also eine strikte Chancen-Gleichheit (zu Vergrößerung oder Verkleinerung) herrscht, bei der ein Zufallsprozess wirksam sein kann, ist das Endresultat unabhängig vom einzelnen „Zufall“ und in der Flächen-Verkleinerung eindeutig gegeben.⁴⁷ Wenn aber die quadratischen Flächen von Fig. 5a Einheiten einer perzeptiven „Auflösung“ auf einem Gitter darstellen, so wird diese Auflösung, nun etwa auf einem rechteckigen Hintergrund dargestellt (Fig. 5b), stets progressiv höher werden. In diesem Falle hätten wir also ein Maß für die Komplexität eines biologischen Systems vor uns (wie etwa die Dichte eines für die optische Wahrnehmung notwendigen neuronalen Netzwerks), das im Laufe der Zeit stets anwächst.⁴⁸

Ich räume gerne ein, dass dies noch lange kein konkretes, *dynamisches* Argument zur Komplexitäts-Erhöhung ist, wie oben gefordert wurde. Aber es deutet bereits an, welcher Typus von *abstrakter Maschine* zur Komplexitätserhöhung erforderlich sein kann. Im Folgenden soll nun an einem konkreten biologischen Beispiel illustriert werden, wie man sich die evolutionäre Operation einer derartigen „Maschine“ vorstellen kann.

Als konkretes Beispiel wollen wir uns die Entwicklung von *Radiolarien* vornehmen, das sind einzellige Mikroorganismen mit charakteristischen Exoskeletten, die typischerweise aus sehr „ornamentalen“ Gittern geometrischer Polygone aufgebaut sind, besonders oft aus Sechsecken. Radiolarien zählen zu den ältesten Lebewesen auf der Erde und sind als lebende Fossilien anzusehen. (Ein Großteil der Meeresboden-Sedimente besteht aus abgelagerten Radiolarien-Skeletten.) In historischer Hinsicht ist insbesondere auf die umfangreiche Sammlung von Stichen hinzuweisen, in denen Ernst Haeckel die Vielfalt und Schönheit der Radiolarien-Skelette dokumentierte.⁴⁹ Oft kommen Radiolarien in beinahe perfekter Kugelform vor, wie das Beispiel der Fig. 6 illustriert: Die Abbildung links zeigt die Radiolarie *Aulonia hexagona* in einer Zeichnung Haeckels, während wir auf der rechten Seite eine elektronenmikroskopische Aufnahme einer Radiolarie desselben Typs sehen.⁵⁰

Man beachte, dass die geschlossene Kugeloberfläche zwar primär aus Sechsecken aufgebaut ist, aber doch auch einzelne Fünfecke und Siebenecke vorkommen. Dies

⁴⁶ Vgl. Gerhard Grössing, Noisy Recursions: Possible Applications in Evolutionary Biology and Macroeconomics, in: Conference Proceedings *Systemorientierte Ansätze in Wirtschaft und Gesellschaft*, Karl-Franzens Universität Graz (1998), 133 - 137.

⁴⁷ Steht die Fläche des Quadrats für ein biologisch determiniertes Maß $C'(t)$ zum Zeitschritt t , so ist die entsprechende rekursive Relation (bei $2n$ Iterationen pro Zeitschritt) gegeben durch $C'(t+1) = g C'(t)$, wobei $g = (1+m)^n (1-m)^n$ und m der Flächen-Änderungs-Faktor ($m < 1$) ist. Bei einer im Mittel gleichen Wahrscheinlichkeit für Vergrößerungen und Verkleinerungen gilt daher $g = (1-m^2)^n < 1$ für alle n , und folglich auch immer, dass $C'(t+1) < C'(t)$. Ist nun ein Maß für die Komplexität $C(t)$ definierbar (Fig. 5b), das invers proportional zum Maß $C'(t)$ ist, so gilt allgemein, dass $C(t+1) > C(t)$.

⁴⁸ Neuere Untersuchungen bestätigen, dass die kognitiven Auflösungen ein gutes Maß für skalierende Größen anbieten, da sie in eindeutiger Korrelation zur Gehirngröße stehen. So konnte etwa nachgewiesen werden, dass bei Vögeln der Durchmesser (wie die Masse) der Augen in gleichem Ausmaß skaliert wie die Gehirnmasse. Vgl. M. de L. Brooke, S. Hanley, and S. B. Laughlin, The scaling of eye size with body mass in birds, in: Proceedings of the Royal Society London, Ser. B. 266 (1999) 405-412.

⁴⁹ Ernst Haeckel, Die Radiolarien, Berlin 1862. Im Internet sind die besonders schönen Farbtafeln unter <http://caliban.mpi-z-koeln.mpg.de/~stueber/haeckel/radiolarien/index.html> abrufbar.

⁵⁰ Aus Philip Ball, The Self-Made Tapestry. Pattern Formation in Nature, Oxford 1999.

ist bereits Ernst Haeckel aufgefallen (wie an Hand der Zeichnung in Fig. 6 zu sehen ist), und nach ihm dem Biologen D'Arcy Thompson. Letzterer hat in seiner berühmten Arbeit *On Growth and Form* von 1917 darauf hingewiesen, dass kein System von Sechsecken einen Raum vollständig einschließen kann.⁵¹ Dies resultiert aus einer allgemeinen Formel des Mathematikers Leonhard Euler, die für alle konvexen Polyeder gilt: $e-k+s = 2$, wobei e die Zahl der Ecken, k die Zahl der Kanten und s die Zahl der Seiten(flächen) des Polyeders bezeichnet.

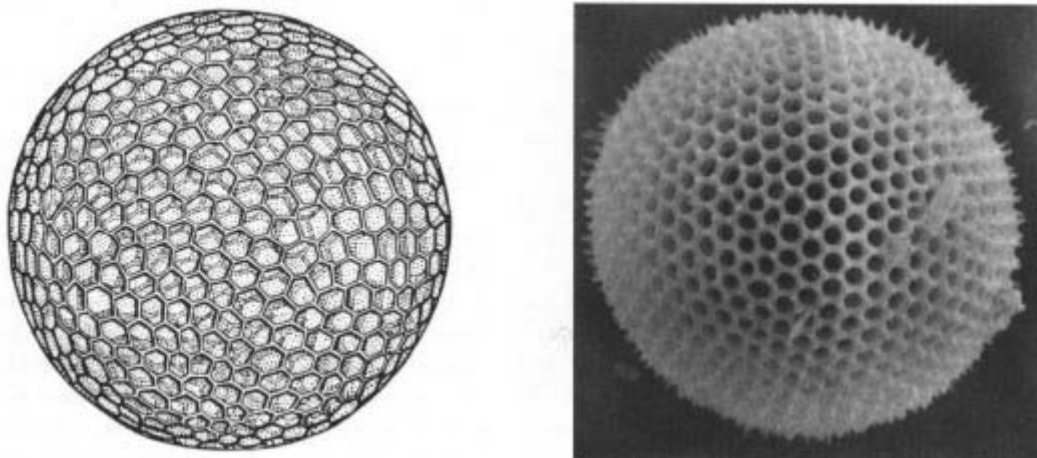


Fig. 6: Die Radiolarie *Aulonia hexagona* in der Zeichnung von Haeckel (links) und in einer elektronenmikroskopischen Aufnahme (rechts). Obwohl meist mittels Sechsecken, ist die geschlossen kugelförmige Konstruktion notwendigerweise auch mit Fünf- und Siebenecken aufgebaut. (Ball 1999, wie Anm. 50)

Tatsächlich genügen 12 Fünfecke zur vollständigen Schließung einer sonst ausschließlich aus Sechsecken aufgebauten polyedrischen Hülle, ganz gleich wie groß sie ist.⁵² Nun stellt sich aber die Frage, wie die Natur solche geometrischen und ästhetischen „Meisterleistungen“ zuwege brachte.

⁵¹ D'Arcy Thompson, *On Growth and Form*, Cambridge 1917 (gekürzt und hrsg. v. John T. Bonner 1961).

⁵² Auf dieser Basis konnte auch der amerikanische Architekt Richard Buckminster Fuller seine berühmten „geodesischen Dome“ bauen, was wiederum Anlass für die Namensgebung einer neuen Form von Kohlenstoff-Molekül wurde: C-60 wird heute als „Buckminsterfulleren“ oder kurz „Buckyball“ bezeichnet.

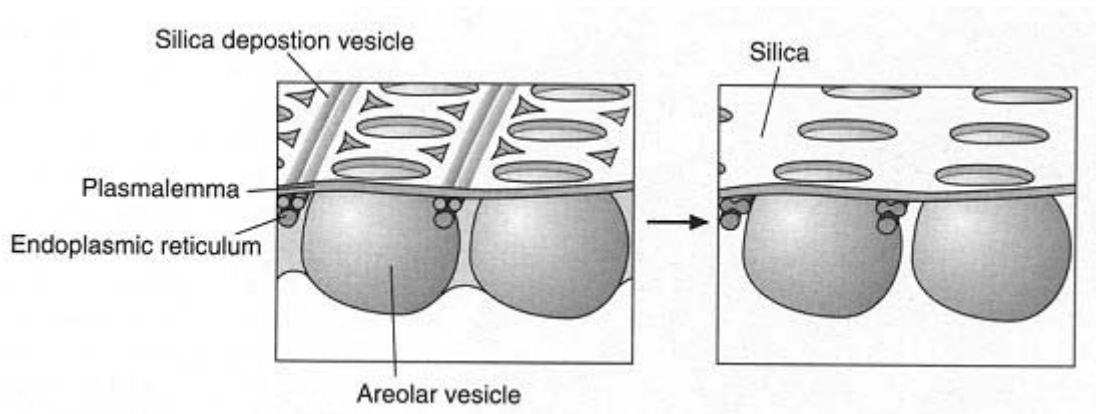


Fig.7: Die Bildung von Exoskeletten bei Radiolarien erfolgt in einem höchst orchestrierten Prozess. An der äußeren Membranwand (Plasmalemma) des Organismus bildet sich ein Schaum aus kleinen Bläschen („Alveolen“ [areolar vesicles]), während ein Gerüst von röhrenförmigen Bläschen in deren Zwischenräumen konstruiert wird. Letztere sondern Silikate ab, die um die Schaumblasen langsam ein geometrisches Netz bilden, das letztlich verhärtet und auch nach Zerfall der organischen Bestandteile erhalten bleiben. (Nach Mann und Ozin 1996, wie Anm. 54)

Dazu ist zunächst die grundsätzliche Beobachtung hilfreich, die schon D’Arcy Thompson über Wachstum und Form anstellte, wonach sich die Gestalt jedes Teils der Materie, ob tot oder lebendig, sowie ihre Änderungen während Wachstum oder Bewegung, in allen Fällen auf die Einwirkung von Kräften zurückführen lässt. Auch für Organismen, und zwar grosse wie kleine, gilt deshalb, dass ihre Formung auf Kräfte zurückzuführen ist, deren Bestand oder statisches Gleichgewicht als Wechselwirkung beziehungsweise Balance von Kräften erklärbar ist.⁵³ Lebende Radiolarien sind im Wesentlichen Protoplastmatropfen, die aus einer zähen Flüssigkeit bestehen und im Meerwasser schweben. Dieses Schweben wird selbst für geißellose Kugelformen durch einen von der Membran dieser Einzeller abgesonderten „Schaum“ ermöglicht. Da die flüssigen Kanten eines Schaumgebildes generell auf seine Flüssigkeitshäute absorbierend wirken, werden kleine in der Flüssigkeit schwimmende Partikel, insbesondere Silikate, in die Kanten transportiert, wodurch nach und nach die Radiolarienskelette aufgebaut werden.⁵⁴ (Fig. 7)

Neuere Untersuchungen haben ergeben, dass einerseits die Größe der kugelförmigen Radiolarien aus einem Kräfteverhältnis zwischen Oberflächen- und Membranspannung resultiert, andererseits aber auch eine innen liegende strukturbildende Komponente im „Kräftediagramm“ eine Rolle spielt: Jede Radiolarie bildet viele dünne, elastische und völlig gerade Fäden („Axopoden“) aus, die aus den winzigen Höhlungen des Skeletts hervortreten und für den Metabolismus gebraucht werden. Der Stofftransport findet in sehr dünnen Röhrrchen, den „Mikrotubuli“ statt, die äußerst regulär angeordnet sind. (Einige sind hexagonal angeordnet und durch Brücken verbunden, die wie Pumpen wirken.)⁵⁵ Wir sehen also, dass das

⁵³ D’Arcy Thompson, Growth, wie Anm. 48.

⁵⁴ Stephen Mann and Geoffrey A. Ozin, Synthesis of inorganic materials with complex form, in: Nature 382 (1996) 313 – 318.

⁵⁵ Vgl. Stefan Hildebrandt und Anthony Tromba, Panoptimum. Mathematische Grundmuster des Vollkommenen, Heidelberg 1986, S. 165 ff.

Kräfte-diagramm selbst bei Einzellern bereits sehr komplex sein kann. Dabei ist stets zu beachten, dass die entstehenden Strukturen jeweils in einer Art „Fließgleichgewicht“ zwischen dem Organismus und seiner Umgebung zustande kommen. Während also der grobe Bauplan genetisch vorgegeben ist, ist die spezifische Ausformung über Prozesse der Selbstorganisation in der Meeresumgebung vorzustellen. So mag also die Größe der Radiolarien genetisch angelegt sein, die endgültige Gestalt, und insbesondere ihre Einzelheiten, sind es sicher nicht. Dies hat unter anderem auch wesentlich mit dem Umstand zu tun, dass in jedem einzelnen „Konstruktionsschritt“ Fluktuationen auftreten können, die letztlich leicht unterschiedliche Strukturen im Kräfte-diagramm des Fließgleichgewichts zulassen. Eine Möglichkeit zu Fluktuationen besteht dabei zum Beispiel in leichten Variationen der hexagonalen Anordnung der oben genannten *Mikrotubuli*, die zum Aufbau einer stabilen Kugelform beitragen können. Dies kann sich gleichfalls an einer leichten Veränderung der Hexagonalstrukturen des äußeren Radiolarienskeletts wie in Fig. 6 bemerkbar machen. Da generell gilt, dass Sechsecke allein zur Schließung der Kugelform nicht reichen, müssen einige „abweichende Blasen“ vorkommen, die im genannten (und letztlich skelett-bildenden) Schaum entstehen.

Somit ist folgende Tatsache festzustellen: Die Regelmäßigkeit der polyedrischen Radiolarien-Skelette ist teils genetisch angelegt, teils ein Produkt der konkreten Emergenz im Wachstum der lebenden Radiolarie. Da letzteres ein komplexer dynamischer Vorgang ist, der nicht ohne Fluktuationen vor sich gehen *kann*, ist davon auszugehen, dass bestimmte geometrische Eigenheiten wie die „Gitter-Maschigkeit“ der Radiolarien-Skelette in einem bestimmten Rahmen fluktuierende Größen sind. (Ob diese Maschigkeit letztlich auf Grund leicht fluktuierender Verteilungen der Mikrotubuli oder der Alveolen des Membran-Schaums resultiert, ist hier nicht weiter von grundsätzlicher Bedeutung.) Der entscheidende Punkt, warum dies für das evolutionäre Werden der Radiolarien von Belang ist, ist aber folgender. Die Gitter-Maschigkeit ist eine *selbst-referenzielle Größe*: Sie lässt sich nicht ohne ihre Vorläufer denken. In anderen Worten, eine grundsätzliche Maschigkeit ist sicherlich genetisch vorgegeben, doch der Prozess der Selbstorganisation enthält noch die Möglichkeit zu geringfügigen Fluktuationen, welche das ultimative Erscheinungsbild der Radiolarien(-Skelette) noch etwas beeinflussen kann. Sollte sich über mehrere Generationen hinweg eine Veränderung der Maschigkeit etablieren, so wird dies über lange evolutionäre Zeitspannen letztlich genetisch verankert und gilt dann als neuer selbstreferenzieller Standard, und so weiter.

Nun stellt sich die Frage, welche der zuletzt genannten Möglichkeiten selbstreferenzieller Änderung der Maschigkeit sich einstellen können. Hierzu können wir aber das weiter oben bereits erläuterte Argument der „rauschenden Rekursionen“ einbringen. Einerseits ist dabei zu berücksichtigen, dass – in einem gewisse Fluktuationen erlaubenden Rahmen – die Stabilität des Gesamtsystems gewährleistet sein muss, und andererseits ist gerade diese bei Systemen im Fließgleichgewicht nicht fest fixiert, sondern „plastisch“. Hinsichtlich der Stabilität sei hier nochmals an die Arbeit von West *et al.* erinnert⁵⁶, in der gefordert wird, dass die *biologisch effektive Oberfläche unter Beibehaltung einer kompakten Gestalt maximiert wird*. Bei Radiolarien kann als Maß für die biologisch effektive Oberfläche der Radius einzelner Alveolen (und deren Verteilung entlang einer Längenskala wie

⁵⁶ Vgl. Anm. 30.

etwa dem Kugelumfang) genommen werden, wobei die typische Längeneinheit der „kompakten Gestalt“ (wie z.B. der Kugelumfang) als Richtgröße dient. Freilich ist die Kugelform keine zwingende Notwendigkeit, und unser Argument kann auf beliebige Längenskalen bei Radiolarien Anwendung finden. Das wesentliche Verhältnis, auf welches es in der Stabilitätsfrage ankommt, ist jenes zwischen „Gesamtumfang“ der kompakten Gestalt und einem ganzzahligen Vielfachen des durchschnittlichen Alveolen-Durchmessers, welches notwendig ist, um besagten Gesamtumfang zu „überdecken“. Dabei ist entscheidend, dass dieses „Überdecken“ nicht perfekt ist, wie oben bereits erwähnt: Es sind genau die „Leerstellen“, die Raum für Fluktuationen anbieten, innerhalb derer die Größe der Vakuolen – immer relativ zum Gesamtumfang – fluktuieren kann. Bedenkt man nun die Forderung von West *et al.* nach Maximierung der biologisch effektiven Oberfläche, so ergeben sich daraus für unsere Radiolarien nur zwei Entwicklungsmöglichkeiten: 1) Die Alveolen werden etwas kleiner, dann muss auch der Gesamtumfang (bzw. die Gesamtgröße des Organismus) kleiner werden. 2) Die Alveolen werden etwas größer, dann muss auch der Gesamtumfang (um einen geringeren Prozentsatz als die Alveolen, aber doch) größer werden. Letzteres ist deshalb gefordert, weil die Alveolen in jedem Fall ein Exoskelett aufbauen werden, das eine gewisse Minimalseparation der einzelnen Bläschen verlangt.

Daraus wird aber ersichtlich, dass keine Mischform (kleinere Alveolen bei größerem Umfang oder größere Alveolen bei kleinerem Umfang) auftreten kann, was letztlich im jeweils vorhandenen Kräftediagramm begründet ist.⁵⁷ Wenn wir unter diesen Voraussetzungen unsere „Maschinerie“ der „rauschenden Rekursionen“ in Bewegung setzen, so haben wir von dem Verhältnis A/a auszugehen, wobei A die „geometrische Oberfläche“ und a die „biologische Oberfläche“ bedeuten. Wenn wir nun in Analogie zur Manipulation an den Quadraten in Fig. 5a dieses Verhältnis alternierenden Fluktuationen unterwerfen (die im Durchschnitt gleich viele Vergrößerungen wie Verkleinerungen erlaubt), so wird sich längerfristig zwangsläufig eine Verkleinerung der Verhältniszahl ergeben, wie sie der Forderung nach Maximierung der biologisch effektiven Oberfläche entspricht. Nach West *et al.* folgt aber⁵⁸, dass der Gesamtradius R *per se* über lange Zeiten anwachsen muss, wenn das Verhältnis A/a im selben Zeitintervall abnimmt.

Das sehr einfache Modell der rauschenden Rekursionen führt also zu konkreten Vorhersagen über die phylogenetischen Entwicklungsmöglichkeiten der Radiolarien. Es liegt dabei letztlich an der Gesamtökologie, welche der möglichen Entwicklungen sich tatsächlich einstellen. Im folgenden Beispiel erkennt man leicht, dass *beide* möglichen (und oben mittels der abstrakten Maschine *rauschende Rekursionen* deduzierten) Entwicklungsergebnisse ihre ökologischen Nischen fanden und sich über Jahrmillionen ausbilden konnten.⁵⁹ (Fig. 8) Das Diagramm zeigt, wie eine neue und größere Radiolarien-Spezies, *Eucyrtidium matuyamai*, langsam von der Spezies *Eucyrtidium calvertense* abspaltet. (Stark vergrößerte Bilder der beiden Arten sind auf der rechten Seite gezeigt.) Wie in der Geologie üblich, zeigt das Diagramm die tiefsten (ältesten) Fossilien unten, die oben gelegenen (jüngsten) Fossilien oben. Die

⁵⁷ Fuller spricht in diesem Fall von „Tensegrity“, der Kräftebalance zwischen kontinuierlicher Gesamt-Oberflächenspannung und partialen Kompressionen der Teilelemente. Vgl. Buckminster Fuller, *Critical Path* New York 1981.

⁵⁸ Aus einer Tabelle mit allen verfügbaren Variablen ist leicht entnehmbar, dass A/a proportional zu $1/R^4$ ist.

⁵⁹ Nimmt man den Gesamt-Durchschnitt über beide Radiolarien-Spezies, so lässt sich weiters feststellen, dass die *durchschnittliche* Größe der Organismen mit evolutionärer Zeit leicht anwächst.

erste Stichprobe stammt aus einer Zeit vor zwei Millionen Jahren, Stichprobe Nummer 7 ist eine Million Jahre alt. Die schwarzen Histogramme zeigen die Fossilengrößen bei sieben verschiedenen Tiefen an. (Die horizontale Skala zeigt eine Einteilung in 10 verschiedene Größen-Gruppen. Die dazu angegebenen Zahlen geben den prozentuellen Anteil der jeweiligen Größe an der Gesamtmenge an.) Es ist anhand der Histogramme deutlich erkennbar, dass anfangs eine einzige Spezies vorlag, mit geringer Variation. In der dritten Stichprobe (von unten) ist diese Variation bereits deutlich erhöht. Die Stichproben 5 und 6 zeigen deutlich zwei Gruppen, die aber noch durch Fossilien dazwischenliegender Größe verbunden sind. In der Stichprobe 7 gibt es keine Zwischengrößen mehr: die ursprüngliche Spezies hat sich in zwei aufgespalten. (*Jaramillo* und *Olduvai* sind zwei spezifische Zeitzonen innerhalb des Pleistozäns.)⁶⁰

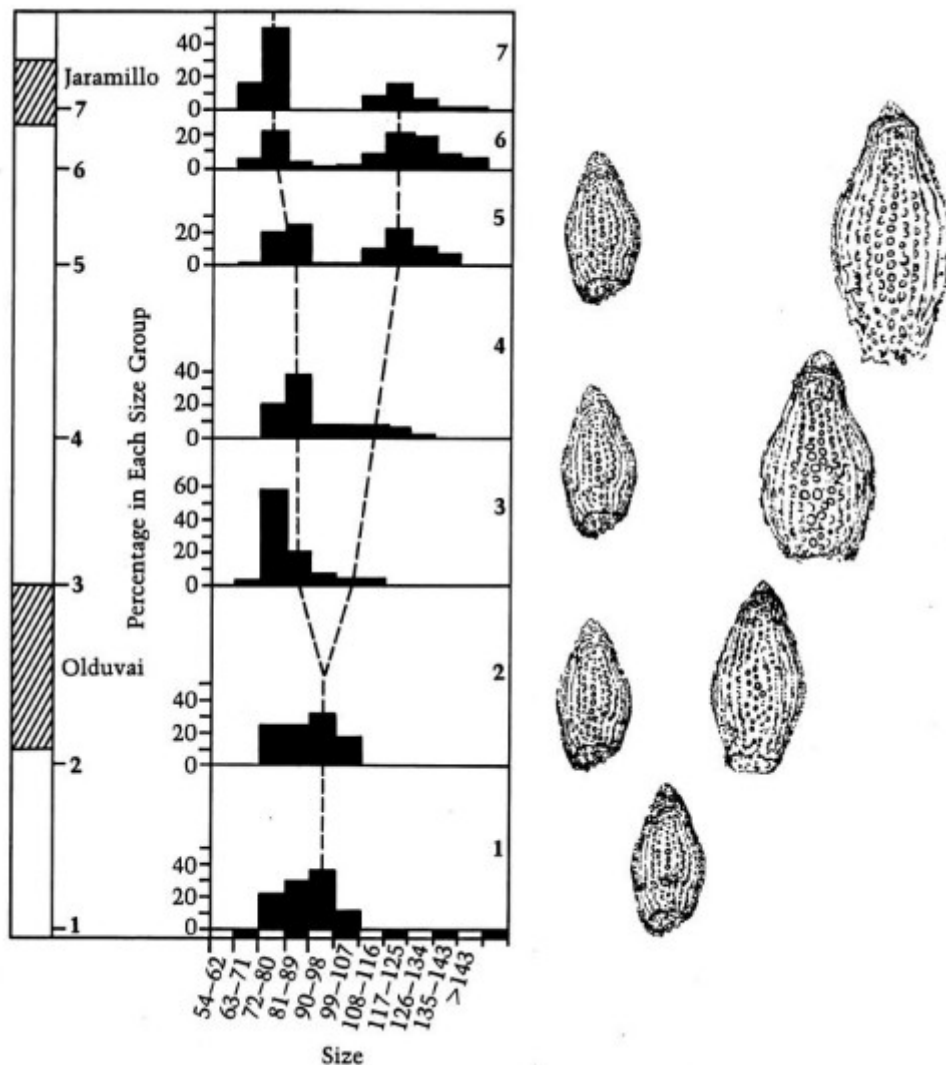


Fig. 8: Die Aufspaltung einer Radiolarien-Spezies in zwei Arten, erklärbar durch die abstrakte Maschine der *rauschenden Rekursionen*.

⁶⁰ David R. Prothero and David B. Lazarus, Planktonic microfossils and the recognition of ancestor", in: Systematic Zoology 29 (1980), 119-129.

Die Umgebung einer Art kann aber auch derart gestaltet sein, dass eine Aufspaltung wie in obigem Beispiel nicht möglich ist. Das Beispiel der *Podocyrtis (Lampterium)* – Radiolarie ist ein besonders illustratives hinsichtlich der Verkörperung der *rauschenden Rekursionen*, bei der es nur zur Vergrößerung (der Alveolen wie des Gesamt-Organismus) gekommen ist. (Fig. 9)⁶¹

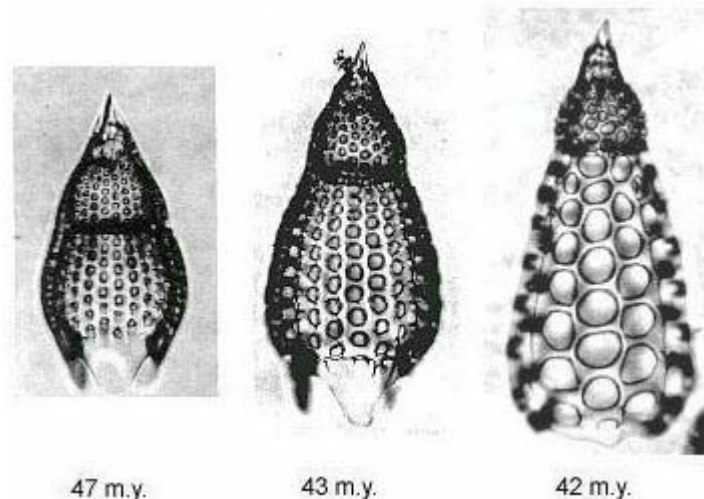


Fig. 9: *Rauschende Rekursion* stellen ein viables Modell für die Evolution der Radiolarie *Podocyrtis (Lampterium)* hin zu stets größeren Alveolen wie Gesamt-Organismen dar, hier dokumentiert für den Zeitraum von 47 Millionen bis 42 Millionen Jahren vor der Jetztzeit.

Wir sehen also, dass mit den *rauschenden Rekursionen* eine einfache Modellierungs-Möglichkeit gegeben ist, um im Prinzip zu verstehen, warum (auf der Ebene der Makroevolution) etwas wird.⁶² Ein beredtes Beispiel für das durchschnittliche Anwachsen von Organismen im Laufe der Evolutionen wird in Fig. 10 gezeigt. Dabei handelt es sich um den durchschnittlichen Durchmesser (mittlere Thorax-Breite) der Radiolarie *Pseudocubus Vema* im Zeitabschnitt von etwa 4,5 bis 2,5 Millionen Jahren vor der Jetztzeit.⁶³ Diese Abbildung wird bei Per Bak verwendet, um das Phänomen des *punctuated equilibrium* (s.u.) zu illustrieren, das von seiner Gruppe in Computer-Simulationen modelliert wurde. Wie wir aber sehen werden, wird sich ein Modell *fraktaler Evolution* dazu noch besser eignen, das den

⁶¹ William R. Riedel and Annika Sanfilippo, Stratigraphy and evolution of tropical Cenozoic radiolarians, in: Micropaleontology 24 (1978), 61 – 96. Im Unterschied zum Beispiel von Fig. 8 ist hier sogar der Bauplan der Radiolarie insofern abgeändert worden, als sich die Anzahl der Alveolen entlang des Umfangs deutlich verringert hat.

⁶² Eine formal stringente Ausarbeitung der hier nur heuristisch vorgebrachten Argumente ist derzeit am AINS in Arbeit.

⁶³ Davida E. Kellogg, The Role of Phyletic Change in the Evolution of *Pseudocubus-Vema* Radiolaria, in: Paleobiology 1 (1975), 359.

Grundgedanken der *rauschenden Rekursionen* in einem komplexeren Modell implementiert.

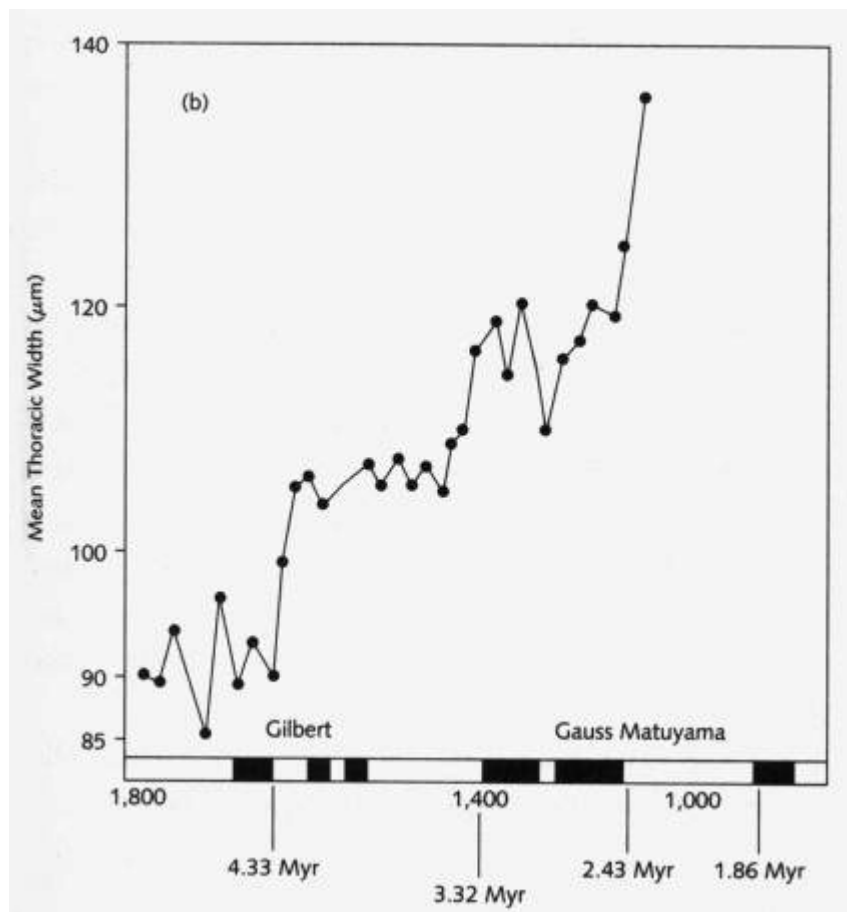


Fig. 10: Mittlere Thorax-Breite der Radiolarie *Pseudocubus Vema* im Zeitabschnitt von etwa 4,5 bis 2,5 Millionen Jahren vor der Jetztzeit. Während die Größe über kleinere Zeitspannen hinweg fluktuiert, ist eine eindeutige Vergrößerung über längere Zeiten feststellbar. Diese abwechselnden Phasen der Stabilität und Aktivität sind ein anschauliches Beispiel für das Phänomen des *punctuated equilibrium*. (Kellogg 1975, wie Anm. 63)

5.2. Hierarchisch Emergente Fraktale Evolution

Das in Fig. 5 schematisch dargestellte Modell der *rauschenden Rekursionen* deutet bereits eine Eigenschaft evolutionärer Dynamik an, die nun ausführlicher diskutiert werden soll, nämlich ihren (in jeweils zu bestimmenden Grenzen) *fraktalen* Charakter. Gerade so, wie die Abfolge von, sagen wir, vier konsekutiven Quadraten aus Fig. 5 a sich bei Fortsetzung der Serie auch weiter unten „selbstähnlich“ wiederholt, stellt man sich auch das Auftreten gewisser „evolutionärer Sprünge“ vor (wenn auch in komplexeren Abfolgen als im Beispiel der Quadrate). Denn dass die Evolution nicht immer graduell verläuft (und damit ausschließlich stetige Übergänge zwischen den Formen der Organismen erlauben würde), ist aus paläontologischen Befunden reichlich dokumentiert. Vielmehr trifft die Beobachtung von Eldridge und Gould zu, wonach die Folge von langen stabilen und kurzen bewegten Phasen in gewisser Weise an selbstähnliche fraktale Muster erinnert, deren Motive sich bei unterschiedlichen Zeit- und Größenordnungen wiederholen. Nach dem Modell des *punctuated equilibrium* entstehen Trends innerhalb der Entwicklungslinien durch kurze Episoden intensiver Artbildung und nicht durch allmählichen Wandel in fortbestehenden Populationen.⁶⁴ (Vgl. Fig. 10) Die dramatischen Sprünge zeigen an, dass im Laufe der Evolution in einem gegebenen Raum jeweils neu erreichte Werte der Fitness einer Spezies dramatische Auswirkungen haben können. Im Sinne des „Fressens und gefressen Werdens“ nützt jede Spezies ihre eigenen erworbenen Vorteile dergestalt aus, dass sie sich auf Kosten der anderen einen funktionellen Raum verfügbar macht oder aber einen neuen Raum erschließt. Es ist hier zu betonen, dass der funktionelle Raum nicht notwendiger Weise ein territorialer ist: auch neue metabolische Fähigkeiten, etc., können einen funktionellen Raum aufspannen.

Seit den späten Achtzigerjahren ist nun eine systemische Eigenschaft der Selbstorganisation einer Vielzahl von Einzelelementen bekannt, die sich dazu eignet, *punctuated equilibrium* am Computer zu simulieren. Die Rede ist von der sogenannten *selbstorganisierten Kritizität*, mit deren Hilfe sich sowohl Phänomene im Anorganischen als auch im Organischen erklären lassen.⁶⁵ Es handelt sich hier um eine permanent ablaufende Selbstorganisation großer interaktiver Systeme in der Weise, dass sie einen kritischen Zustand annehmen und aufrechterhalten, in dem mitunter selbst ein winziges Ereignis eine Kettenreaktion in Gang setzen kann, die in einer Katastrophe mündet. *Selbstorganisierte Kritizität* stellt ein Konzept zur Erklärung des Verhaltens zusammengesetzter Systeme aus üblicherweise vielen Millionen Elementen dar, die über kurze Entfernungen miteinander interagieren. Nach diesem Modell ist ein und dieselbe abstrakte Maschine für die kleineren wie für die großen Ereignisse (inklusive Katastrophen) verantwortlich. Außerdem erreichen solche zusammengesetzten Systeme niemals einen fixen Gleichgewichtszustand, sondern bewegen sich vielmehr von einem metastabilen Zustand zum nächsten:

⁶⁴ Vgl. Niles Eldredge and Stephen J. Gould, *Punctuated equilibria: An alternative to phylogenetic gradualism*, in: Thomas J. M. Schopf (ed.), *Models in Paleobiology*, San Francisco 1972. Dieser Ansatz ist auch insofern von Interesse, als in den USA Schulen des „Kreationismus“ gegenüber dem vermeintlichen Gradualismus der Darwinschen Evolutionstheorie die erwähnten paläontologischen Befunde der Unstetigkeit anführen, bei der sie „den Finger Gottes“ ins Spiel bringen wollen. Die Modellierbarkeit des *punctuated equilibrium* ist daher auch in dieser Hinsicht von Bedeutung.

⁶⁵ Vgl. etwa Per Bak and Kan Chen, *Selbstorganisierte Kritizität*, in: *Spektrum der Wissenschaften* 3 (1991), 62 – 70.

Die Theorie der selbstorganisierten Kritizität ist holistisch: Die globalen Merkmale - etwa das Verhältnis von großen zu kleinen Ereignissen - hängen nicht von mikroskopischen Mechanismen ab. Folglich lassen sie sich auch nicht durch die separate Analyse der einzelnen Komponenten verstehen. Unseres Wissens ist die selbstorganisierte Kritizität bisher das einzige Modell oder der einzige mathematische Formalismus, der eine holistische Theorie dynamischer Systeme geliefert hat.⁶⁶

Als Modellfall für selbstorganisierte Kritizität dient das einfache System eines Sandhaufens. Die Dynamik lässt sich sowohl mit Hilfe von Computersimulationen als auch mit Real-Experimenten untersuchen, in denen Sand- bzw. Reiskörner langsam und gleichmäßig - Körnchen für Körnchen - zu einem Haufen auf eine kreisförmige Platte zusammenrieseln. Zunächst bleiben die Körnchen meist nahe bei der Stelle liegen, an der sie auftreffen. Wenn die Steigung an einer Stelle zu groß wird, rutschen einige Sandkörner herunter und verursachen eine kleine Lawine. Wird der Haufen durch stetiges Zugeben weiterer Körner immer steiler, nimmt die mittlere Größe der Lawinen zu und die ersten Körnchen fallen vom Rand der Scheibe herunter. Wenn schließlich im Mittel so viele Körnchen herunterfallen wie zugegeben werden, vergrößert sich der Sandhaufen nicht mehr: An diesem Punkt hat das System den kritischen Zustand erreicht. Es existiert eine genaue mathematische Beziehung zwischen der Zahl der Körner, die von jedem neuen Korn verschoben werden und der Häufigkeit, mit der Lawinen unterschiedlicher Größe auftreten: Wieder treffen wir hier auf ein weiteres „Potenzgesetz“ (*power law*).

Steigt das Gefälle jedoch über den kritischen Wert, sodass sich der Haufen im überkritischen Zustand befindet, dann sind die Lawinen wesentlich größer als im kritischen Zustand. Ein überkritischer Haufen schrumpft daher, bis er wieder den kritischen Zustand erreicht hat. Der kritische Zustand wirkt somit als „Attraktor“, d.h. als eine Art Anziehungsbereich, zu dem sich unter- und überkritische Zustände hinbewegen. Das System ist zwar an vielen Stellen instabil, aber der kritische Zustand selbst ist absolut robust:

Ein Beobachter, der einen bestimmten Bereich des Haufens untersucht, kann leicht erkennen, was den Sand ins Rutschen bringt, und sogar vorhersagen, ob in naher Zukunft kleine örtliche Lawinen auftreten werden. Große Lawinen müssen für diesen lokalen Beobachter jedoch unvorhersehbar bleiben, da sie sich aus der Gesamtentwicklung des ganzen Haufens ergeben: Unabhängig von der lokalen Dynamik werden diese mit einer bestimmten, nicht beeinflussbaren Häufigkeit niedergehen; denn die Kritizität ist eine globale Eigenschaft des gesamten Systems.⁶⁷

Diese globale Eigenschaft liefert für komplexe Systeme genau jenen Trend, den wir oben als „progressive Evolution“ umschrieben haben: Ein gegebenes komplexes System ist bestrebt, den Ereignisraum derart auszufüllen, dass es sich von der einfachsten Komplexität bis an den „äußersten Rand“, d.h. hin zur Kritizität bewegt. Derartigen Systemen wohnt also die Tendenz inne, den gegebenen Raum mit sämtlichen verfügbaren Komplexitätsstufen vollständig auszufüllen.

Selbstorganisierte Kritizität liefert einen wertvollen Beitrag zum Verständnis für weit auseinanderliegende Phänomenbereiche, wie z.B. Erdbeben, das sogenannte Flackerrauschen, bestimmte ökonomische Prozesse oder das Verhalten von Ökosystemen. Offensichtlich spielt derartig selbstorganisiertes Systemverhalten also

⁶⁶ Ebd.

⁶⁷ Ebd.

auch in der Evolution des Lebens eine wesentliche Rolle. Die Untersuchungen der Gruppe um Per Bak deuten darauf hin, dass die Evolution im Grunde ein einfaches, mehr oder weniger zufälliges, interaktives dynamisches System automatisch in einen solchen kritischen Zustand zu überführen. Mit Hilfe von Simulationsmodellen lassen sich die Mechanismen der Koevolution näher untersuchen, die ihrerseits wiederum mit den Phänomenen der Kritizität und dynamischer Komplexität zusammenhängen. Durch Koevolution entwickelt sich etwa ein zufällig entstandenes Ausgangsmuster ihres Modellsystems allmählich hin zu einem hochorganisierten kritischen Zustand, dessen zeitlicher Verlauf ein fraktales Verhalten hervorbringt, wie es nach der Theorie des *punctuated equilibrium* zu erwarten ist. Tatsächlich ist eines der Hauptresultate des sogenannten „Bak-Sneppen-Modells“ der biologischen Makroevolution⁶⁸ in einem Diagramm veranschaulicht, das die akkumulierten Wechsel bzw. Sprünge entlang der Zeitachse aufträgt und schließlich ein Bild liefert, das durch Perioden längerdauernder „Stasis“ mit dazwischenliegenden, kurzzeitigen „Sprüngen“ zu geänderten Fitness-Bereichen gekennzeichnet ist. Die mathematische Analyse weist nach, dass dieses Diagramm eine fraktale Funktion präsentiert, nämlich die sogenannte „Teufelsstiege“ („devil's staircase“).⁶⁹

Damit zeigen sich aber auch bereits die Grenzen des Bak-Sneppen-Modells: Die „Teufelsstiege“ (wie etwa jene in Fig. 13) zeigt ausschließlich die akkumulierten Wechsel an und kann nicht zwischen vorübergehenden Fluktuationen in Richtung positiver oder negativer Fitness-Änderung unterscheiden, wie sie aus den empirischen Daten (Fig. 10) vorgegeben ist. Nach letzteren ist etwa auch „Stasis“ nur ein ungefähr zutreffender Begriff, während eine genauere Betrachtungsweise praktisch permanente Fluktuationen ergibt. Der Hauptgrund, warum das Bak-Sneppen-Modell nur begrenzt brauchbar ist (weshalb hier auch nicht näher darauf eingegangen werden soll), liegt aber in dem Umstand, dass die *selbstorganisierte Kritizität* im Allgemeinen, wie jene im Fitness-Raum des Bak-Sneppen-Modells im Besonderen, einen im Wesentlichen statischen Zustand beschreibt. In anderen Worten: Da das Bak-Sneppen-Modell als zentrale Relation ein im Fitness-Raum gültiges Potenzgesetz hervorbringt, welches etwa über die Illustration der „Teufelsstiege“ veranschaulicht wird, gilt hierfür die gleiche Einschränkung wie für ähnlich formulierte Potenzgesetze wie etwa das Kleibersche Gesetz. Letzteres beschreibt zwar eine eindrucksvolle Skalenunabhängigkeit für alle Wirbeltiere, aber sie enthält keinerlei Dynamik, die erklären würde, wie etwa höherkomplexe Spezies aus niedrigkomplexen evolvieren konnten. Im gleichen Sinn liefert das Bak-Sneppen-Modell eine mögliche Zustandsbeschreibung der Gesamtheit aller Spezies, aber kein dynamisches Modell für ihre Entwicklung. Von diesem Kritikpunkt ausgehend haben wir an unserem Institut (AINS) ein Forschungsprojekt initiiert, das die entsprechenden Mängel des Bak-Sneppen-Modells vermeiden und ein dynamisches Modell der Makroevolution ermöglichen soll. Unsere Absicht ist dabei, ein einfaches Computermodell für die „Evolution der Evolution“ zu liefern, und die Resultate zeigen, dass dies im Prinzip möglich ist.

Zur spezifischen Motivation unserer Modellbildung sei vorerst auf ein weiteres Potenzgesetz hingewiesen, von dem bisher noch nicht die Rede war. Denn es gibt

⁶⁸ Vgl. etwa Per Bak and Kan Sneppen, Punctuated Equilibrium and Criticality in a Simple Model of Evolution, in: Physical Review Letters 71 (1993) 4083 – 4087.

⁶⁹ Eine solche „Teufelsstiege“ ergibt sich auch aus unserem Modell der „fraktalen Evolution“; vgl. Abbildung 13.

eine dem Kleiberschen Gesetz (Fig. 2) sehr vergleichbare Beziehung zwischen der Größe eines Organismus und seiner Reifungszeit. Trägt man die beiden Charakteristika in einem Diagramm mit je einer logarithmischen Skala auf, so ergibt sich eine Gerade wie in Fig. 2. So braucht etwa das einige Mikrometer große Bakterium *E. Coli* nur einige Minuten bis zur Reproduktionsfähigkeit, die einige Millimeter große Stubenfliege knapp einen Monat, der weniger als 1 Meter große Biber etwa 5 Jahre, der knapp 2 Meter große Mensch etwa 15 Jahre, oder der 100 Meter hohe Sequoia-Baum knapp 100 Jahre. Es ist ein sehr allgemeines Prinzip, das auf alle Pflanzen und Tiere anwendbar ist: Je kleiner der Organismus, desto weniger Zeit braucht er für sein Heranwachsen ins reproduktionsfähige Alter. John T. Bonner folgert unter anderem aus dieser Tatsache, dass es der *Lebenszyklus* ist, der evolviert:

Die große Lehre, die man erhält, wenn man Organismen als [verkörperte] Lebenszyklen betrachtet, liegt darin, dass es der Lebenszyklus selbst ist, der evolviert, nicht bloß der erwachsene Organismus. Es ist dabei insbesondere die Entstehungsphase des Lebenszyklus – die Phase der Entwicklung – , die durch die natürliche Selektion über die Zeit verändert wird. Es ist offensichtlich, dass die einzige Möglichkeit zur Veränderung des Typs eines erwachsenen Organismus in einer Änderung seiner Entwicklung besteht.⁷⁰

An anderer Stelle kommt Bonner auf einen wichtigen systemischen Aspekt der Evolutionsdynamik zu sprechen, indem er anhand des Beispiels der Entwicklung vom Ein- zu Mehrzellern argumentiert, dass diese auf einem kontinuierlichen und bedeutenden Selektionsdruck zur Vergrößerung des Organismus basiert.

Dies bringt den größeren Organismus in die Welt einer anderen Größenskala [another size world], und dies scheint zumindest in den meisten Fällen eben nicht die kleineren Vorläufer-Formen zu verdrängen. Durch diese Invasion einer neuen ökologischen Nische wird eine neue, größer-dimensionierte Welt geschaffen, wobei die Großen und die Kleinen koexistieren können.⁷¹

Diese Einsichten bedeuten nun für unsere Modellierungs-Strategie, dass es bedeutsam wäre, ein Anwachsen der stabilen Dauer ökologischer Nischen zu erhalten, welche wiederum die Möglichkeit für längere Entwicklungsphasen der Organismen implizierte. (Dabei ist natürlich besonders darauf zu achten, dass von keinen Annahmen ausgegangen wird, in denen implizit die gewünschten Resultate schon angelegt sind – so würde man bloß herausbekommen, was man schon hineingelegt hat.) Wir sollten uns demnach nicht nur bemühen, die Emergenz von Zonen besonders hoher Fitness in der ko-evolvierenden Fitness-Landschaft („Nischen“) zu studieren, sondern auch die Dauer dieser Nischen über lange evolutionäre Zeiten. Dazu wird eine „Betrachtungsweise zweiter Ordnung“ notwendig sein: die Modellierung der Evolution von Evolution.

Ganz ähnlich wie im Bak-Sneppen-Modell verwenden wir zu diesem Zweck einfache Computermodelle, in denen abstrakte „Spezies“ als diskrete Einheiten in einem „Fitness-Raum“ implementiert werden. Dabei stellt sich die Methode der Simulation der Evolution diskreter Systeme mittels "zellulärer Automaten" ("cellular automata",

⁷⁰ John Tyler Bonner, *Life Cycles*, Princeton 1993, S. 93.

⁷¹ Ebd., S. 60.

kurz CAs) als besonders praktikabel heraus. Diese sind im allgemeinen n -dimensionale Anordnungen diskreter Einheiten ("Zellen"), deren globale Zeitentwicklung sich zumeist als emergentes Resultat von lokalen (nur die "nächsten Nachbarzellen" involvierenden) Evolutionsregeln ergibt. Im folgenden wollen wir uns mit eindimensionalen CAs befassen⁷², die Evolutionsregeln gehorchen, wie sie abstrakt so formuliert werden können: Der Zustand einer Zelle („Spezies“) an einem Ort (j) zu einem bestimmten Zeitpunkt (t) hängt vom Zustand derselben Zelle zum vorhergehenden Zeitpunkt ($t-1$) sowie von denen der beiden nächsten Nachbarn ($j-1, j+1$) zum vorhergehenden Zeitpunkt ($t-1$) ab, u.s.f.. Als Maß für den besagten Zustand einer CA-Zelle geben wir einen „Fitness-Wert“ an, der zwischen 0 und 1 liegt und auf die gesamte Anordnung hin normiert ist. In unserem einfachen Simulationsmodell soll es nicht darauf ankommen, welche (im allgemeinen extrem Modell-abhängigen) Mechanismen zum Inter-Spezies-Verhalten angenommen werden (wie zum Beispiel die Elimination der Spezies mit geringster Fitness im Bak-Sneppen-Modell), sondern ausschließlich, unter welchen Umständen, und wie, sich die relative Häufigkeit von Abweichungen vom „durchschnittlichen Evolutionsverlauf“ gestaltet. Konkret implementieren wir eine zeitliche „Global-Periodizität“ in den Randbedingungen der Fitness-Landschaft, wie sie zum Beispiel von außen durch ökologische Periodizitäten vorgegeben sein kann. In einem „normalen“ Evolutionsverlauf ohne derartige Global-Periodizitäten würden sich über kurz oder lang die relativen Fitness-Werte aneinander anpassen und nach und nach ein immer „ausgeglicheneres“ Muster bilden, das einen Gleichgewichtszustand repräsentiert. Mit der Einführung besagter Global-Periodizität und einer jede individuelle Spezies betreffenden Rückkopplungsschleife, die nach einem „kognitiven Erfassen“ dieser Periodizität abfragt, kann sich das Gesamtverhalten aber dramatisch ändern.⁷³

Dies wird folgendermaßen implementiert. Wenn der Fitness-Wert einer bestimmten Zelle nach einem Zyklus der Global-Periodizität innerhalb einer „Auflösungs-Genauigkeit“ $1/\epsilon$ der gleiche ist als eine Periode zuvor, dann wurde – selbst wenn der relative Fitness-Wert der Zelle gering ist – eine gewisse reproduktive Isolation erreicht. Im Modell entspricht dies einer überdurchschnittlichen relativen Überlebensrate. Beispielhaft seien hierzu zwei mögliche Szenarien illustriert. Einmal kann das Wieder-Erreichen einer bestimmten Fitness innerhalb eines langfristigen Zyklus mit einengendem und eventuell sogar destruktivem Potenzial (z.B.: Eiszeiten), während der überwiegende Teil der umgebenden Fitness-Landschaft abnehmende Fitness-Werte erzeugt, gleichbedeutend mit der Etablierung einer ökologischen Nische sein, deren Fitness-Potenzial eine Zeit lang ungestört konsumiert werden kann.

Ein anderes Mal kann eine zu einem vergangenen Zeitpunkt erworbene Eigenschaft bei einem später nochmals auftretenden Global-Ereignis einen selektiven Vorteil bieten, der einer ökologischen Nische gleichkommt. (Ein Bakterium zum Beispiel, das bereits einmal gegen ein Antibiotikum resistent geworden ist, kann diesen Vorteil bei jeder neuen Attacke ausnützen.)

⁷² Da die „Zellen-Anordnungen“ mit periodischen Randbedingungen versehen sind, sodass man sich im eindimensionalen Beispiel etwa die Gesamt-Ökologie eines Nahrungskreislaufs vorstellen kann (wie auch im Bak-Sneppen-Modell), und da die (zwischen 0 und 1 variierenden) Fitness-Werte der Zellen über den gesamten Bereich normiert werden, muss man technisch genauer von sogenannten „coupled map lattices“ sprechen, was aber hier keine weitere Rolle spielen wird.

⁷³ Tatsächlich ergibt sich bereits aus der „molekularen Kognition“ in der Genom-Dynamik eine gewisse „kognitive“ Fähigkeit für jede individuelle Zelle, indem diese ihre eigene Fitness relativ zu ihrer Umgebung (mit einer bestimmten Auflösung) erfassen kann. Vgl. Peter Schuster, Molekulare Evolution an der Schwelle zwischen Chemie und Biologie, in: Wieser, Evolution, wie Anm. 27.

In unserem Modell wird daher die Zelle, die eine derartige Spezies repräsentiert, mit einem deutlich erhöhten Fitness-Wert versehen, da es uns ja primär um relative Änderungen in der Fitness-Landschaft geht, die es herauszuheben gilt. Dies führt in den entsprechenden Grafiken, die die Lebensdauer überdurchschnittlich hoher Fitness-Bereiche (Nischen) gegenüber einem Maß der (inversen) Auflösung, „relative Intervallbreite“ ε genannt, aufträgt, zum Auftauchen von mehr oder weniger gleichmäßig verteilten „Inseln“ überdurchschnittlich hoher Fitness. (Fig. 11 a und b) Natürlich gilt bei geringer geforderter Auflösungsgenauigkeit $1/\varepsilon$ zur Erfüllung der genannten Feedback-Bedingung (das heißt, bei höherem ε), dass die Wahrscheinlichkeit eines „Treffers“ hoch ist und daher im Durchschnitt viele Zellen eine („belohnende“) Werte-Erhöhung erfahren, was sich grafisch im Auftreten vieler kleiner „Inseln“ in der Fitness-Landschaft bemerkbar macht, deren Fitness also höher liegt als der „Meeresspiegel“ eines (gewählten) mittleren Verhaltens.

Wird nun (etwa auf Grund koevolutionärer Dynamik) die Genauigkeitsanforderung erhöht, so wird sich eine geringere Anzahl von „Treffern“ einstellen: Bei niedrigen ε werden also weniger Nischen-„Inseln“ auftauchen, deren mittlere Lebensdauer $\bar{\tau}$ (eben wegen der geringeren koevolutionären Konkurrenz) erhöht ist. Dies ist zwar nicht sehr überraschend, aber auch noch nicht das Ende der Geschichte. Im Gegenteil: Wir haben vor etwa 10 Jahren am AINS herausgefunden, dass ε und $\bar{\tau}$ generell (d.h. zum Beispiel auch unabhängig vom gewählten „Pegel“ des „Meeresspiegels“ oder von der Art der implementierten Feedback-Bedingung) in einem *universalen Potenzgesetz* verknüpft sind, was wir mit dem Begriff *Fraktale Evolution* umschreiben.⁷⁴

Wir konnten nämlich zeigen, dass die Kombination zweier Operationen in CAs mit nur einer Feedback-Schleife, nämlich (i) Vergrößerung des Fitness-Wertes einer Zelle bei Erfüllung einer Feedback-Bedingung (oder einfach auf Zufallsbasis⁷⁵) und (ii) Normierung des Gesamt-Systems nach jedem Zeitschritt, raumzeitliche Muster produziert, deren mittlere Lebensdauer $\bar{\tau}$ als *emergenter Ordnungsparameter* des Systems betrachtet werden kann. (Fig. 11 a und b)

Die wesentliche Entdeckung besteht darin, dass diese mittlere Lebensdauer einem Skalierungsgesetz ähnlich den bisher besprochenen „Potenzgesetzen“ (*power laws*) in anderen nichtlinearen Systemen gehorcht. Es betrifft nun aber einen relevanten *intrinsic Parameter*, der „relative Intervallbreite“ ε genannt wird und gewissermaßen die „Fehlertoleranz“ der Feedbackbedingung repräsentiert: Wie etwa im Kleiberschen Gesetz (Fig. 2) ist bei Verwendung von logarithmischen Skalen das Verhältnis zwischen $\bar{\tau}$ und ε durch eine Gerade dargestellt. (Fig. 12)⁷⁶

Somit können innerhalb geeigneter Bereiche der Systemvariablen die dynamischen Eigenschaften durch einen *fraktalen Evolutions-Exponenten* b (in Unterscheidung zur herkömmlichen *fraktalen Dimension*) charakterisiert werden. Gewöhnlich zeigt eine fraktale Dimension die skalen-invarianten Eigenschaften eines „Objekts“ an, wobei der Vorgang ihrer Bestimmung keineswegs die intrinsic Eigenschaften des „Objekts“ verändert. Anders jedoch in unserem Falle: Hier wird die Skalen-

⁷⁴Siegfried Fussy and Gerhard Grössing, Fractal evolution of normalized feedback systems on a lattice, in: Physics Letters A 186 (1994) 145 - 151. Siehe auch <http://xxx.lanl.gov/abs/nlin.AO/0204047> .

⁷⁵Siegfried Fussy, Gerhard Grössing u. Herbert Schwabl, Fractal Evolution in Deterministic and Random Models, in: Int. J. Bifurcation and Chaos 6, 11 (1996) 1977 - 1995.

⁷⁶ Formal bedeutet dies (mit Konstanten a und b), dass $\bar{\tau} = a \varepsilon^{-b}$.

Invarianz der Fragmentierung der einzelnen Muster durch wiederholte Anwendung verschiedener Werte besagter Fehlertoleranz *generiert*.

Nun lag aber unser besonderes Anliegen nicht bloß darin, eine abstrakte Maschine zu finden, die uns ein Potenzgesetz erzeugt. Vielmehr muss ein derartiges System erlauben, die Manipulation von Relationen innerhalb dieses Potenzgesetzes zu ermöglichen. Genauer: Wir suchten nach einer Erweiterung unserer abstrakten Maschine, die eine Dynamik zwischen den einzelnen Punkten auf der Geraden von Fig. 12 liefert. Unser Ziel war ja letztlich, eine Tendenz zu länger andauernden evolutionären Nischen zu erhalten, die sich allerdings nicht bloß als triviale Konsequenz eines schon daraufhin angelegten Inputs ergibt, sondern als vom System her intrinsisch notwendig.

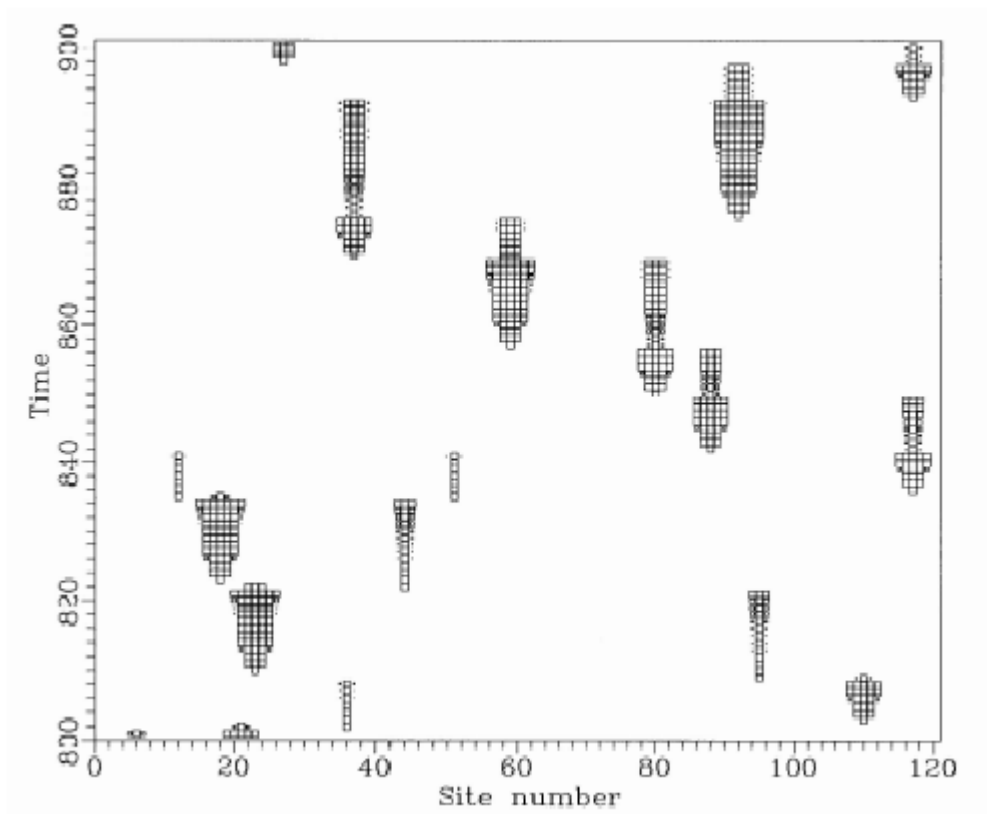


Fig. 11 a: Intensitätsverteilung eines Zellulären Automaten mit Feedback-Schleife bei $\epsilon = 25\%$. (Verschiedene Größen der Quadrate geben entsprechend unterschiedliche Intensitäten an.)

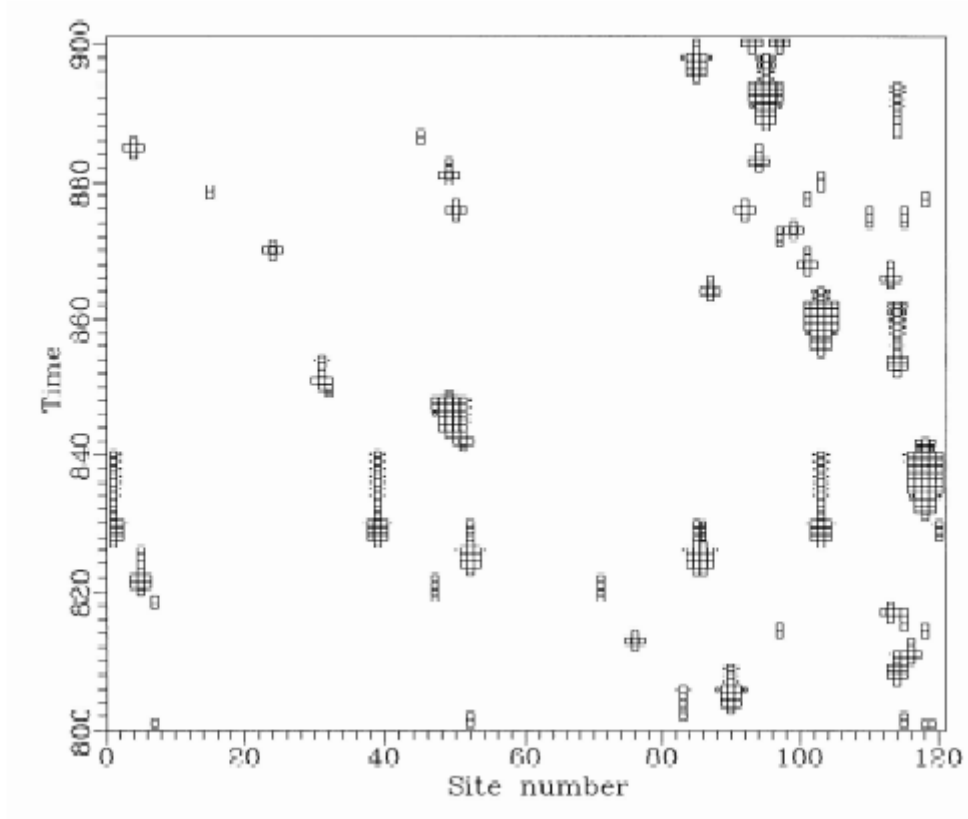


Fig. 11b: Wie Fig. 11a, aber mit $\varepsilon = 4,1\%$.

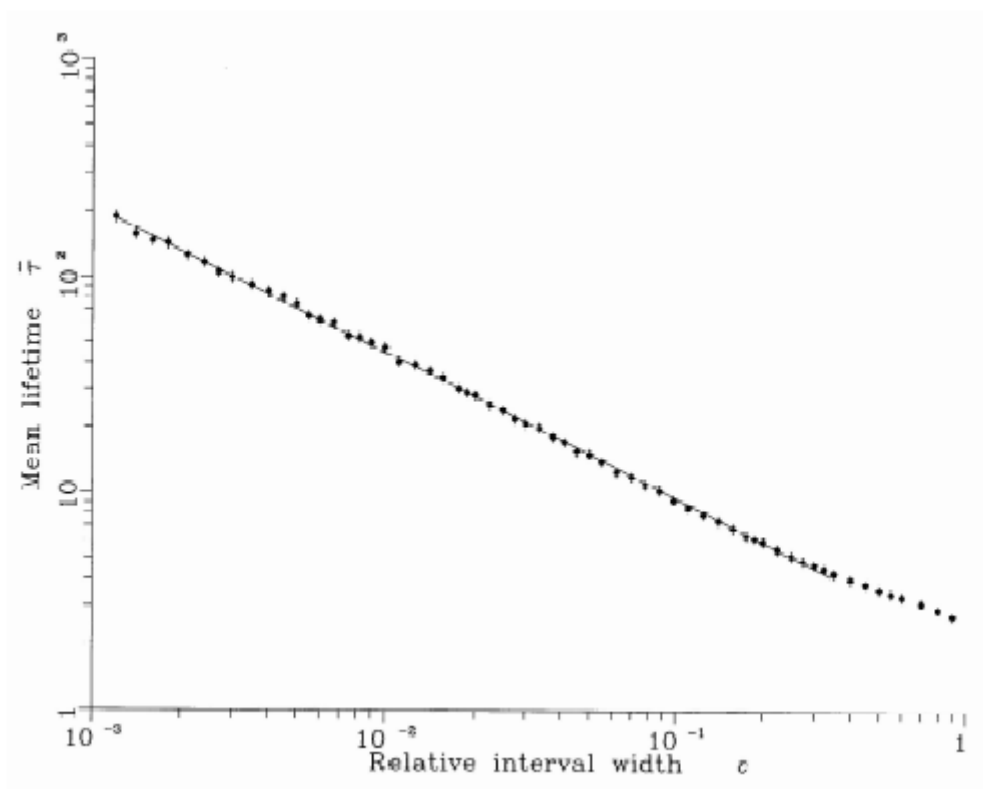


Fig. 12: *Fraktale Evolution*: Das zwischen einer Größe namens „relative Intervallbreite“ ε (invers proportional zur kognitiven „Auflösung“ der Umgebung) und der mittleren Lebensdauer $\bar{\tau}$ evolutionärer „Nischen“ (mit hohen Fitness-Werten) gültige universale Potenzgesetz.

Ist schon das Phänomen der *fraktalen Evolution* durch Implementieren von Feedback-Mechanismen in jeder CA-Zelle und damit durch Realisierung einer *nicht-trivialen Maschine* im Sinne Heinz von Foersters⁷⁷ geprägt, so wird es nun darum gehen, die bestehende zu einer nicht-trivialen Maschine im Sinne der *Kybernetik 2. Ordnung*⁷⁸ zu erweitern, indem eine weitere, sozusagen eine intrinsische „Meta-Feedback-Bedingung“, eingeführt wird: Geht man von einem System mit bestimmter relativer Intervallbreite ε aus (also mit einem „Auflösungsvermögen“ $1/\varepsilon$), das ja „Fragmente“ der mittleren Lebensdauer $\bar{\tau}$ produziert, so lassen sich ε und $\bar{\tau}$ auch miteinander verknüpfen. Der am einfachsten implementierte diesbezügliche Prozess könnte durch ein „Drehen an ε als äußerem Systemparameter“ veranschaulicht werden. Entschieden wir uns nach einer bestimmten Zeit, in die CA-Evolution mit $\varepsilon = 25\%$ (Fig. 11a) dadurch einzugreifen, dass wir den Zellen nun ein höher auflösendes $\varepsilon = 4,1\%$ (Fig. 11b) ermöglichen, so würde sich die Musterbildung entsprechend verhalten und die Muster in Fig. 11a würden als Resultat dieses Eingriffs in die Muster von Fig. 11b übergehen. Somit wäre also letztlich Komplexitätserhöhung simulierbar, indem von außen in das System durch Modifikation von ε eingegriffen würde. Das ist aber nicht, was uns hier interessiert. Unser Ziel ist es ja, Lebenszeit- bzw. potenzielle Komplexitäts-Erhöhung der Zellen als *intrinsisch emergent*⁷⁹ zu operationalisieren.

Die intrinsische Verknüpfungsvorschrift zwischen ε und $\bar{\tau}$, die solches bewerkstelligen kann, ist freilich eine zirkuläre: ε und $\bar{\tau}$ sind miteinander rückgekoppelt zu implementieren. Dazu muss eine dieser neuen Feedback-Schleife eigene Zeitkonstante eingeführt werden, denn würden wir das über lange Zeiten ermittelte $\bar{\tau}$ in Abhängigkeit von ε implementieren, wäre keine Änderung möglich, da ja das Potenzgesetz der *fraktalen Evolution* gilt. Führt man aber ein geeignetes Zeitintervall ein, das als „lokales Zeitfenster“ der Zellen verstanden werden kann, und ermittelt man die in diesem Zeitintervall aktuelle mittlere Lebensdauer $\bar{\tau}_{lok}$, so wird letztere stärker fluktuieren als die über lange Zeitintervalle ermittelte mittlere Lebensdauer $\bar{\tau}$. Somit lässt sich die Maschine der *rauschenden Rekursionen* einsetzen, deren Basis im gleichwertigen Verhalten der Fluktuationen hinsichtlich Zu- und Abnahme bei einer relativen Änderung liegt. Trotz dieser zeitsymmetrischen Anlage ergibt sich aber in unserem Modell, dass ein „Zeitpfeil“ emergiert, ein Faktum, das in der rekursiven Natur der implementierten Feedback-Prozesse verankert ist. Zwei Resultate unserer Simulationen sollen hier zum Abschluss besonders hervorgehoben werden.⁸⁰

Zum Einen lässt sich leicht zeigen, dass die akkumulierten Fitness-Erhöhlungen jeder beliebig herausgenommenen Zelle das Verhalten des *punctuated equilibrium*

⁷⁷ Vgl. etwa Heinz von Foerster, *Wissen und Gewissen. Versuch einer Brücke*, hrsg. v. Siegfried J. Schmidt, Frankfurt am Main 1993.

⁷⁸ Ebd.

⁷⁹ Zur Definition der *intrinsischen Emergenz* vgl. Gerhard Grössing, *Die Information des Subjekts*, Wien 1997.

⁸⁰ Bezüglich Details, insbesondere in mathematischer Hinsicht, vgl. Fussy *et al.*, *Evolution of Evolution*, Anm. 41. Die Arbeit ist auch im Internet unter <http://xxx.lanl.gov/abs/physics/0204070> verfügbar.

reproduzieren (also Phasen der Stasis, immer wieder unterbrochen durch sprunghafte Erhöhungen), wobei die resultierende Funktion genau dem Typus des „Teufelsstiege“-Fraktals (wie im Bak-Sneppen-Modell) entspricht. (Fig. 13)

Zum Anderen geht aber unsere abstrakte Maschine wesentlich über jene des Bak-Sneppen-Modells hinaus, indem sie einen irreversiblen Trend zu höheren Lebensdauern der evolutionären Nischen nachweist. Dieser Trend ergibt sich letztlich aus den implementierten *rauschenden Rekursionen*, wo – das soll hier nochmals hervorgehoben werden – als Ausgangslage eine prinzipielle Gleichwahrscheinlichkeit für Vorwärts- und Rück-Entwicklungen vorliegt. Einzig auf Grund der intrinsischen, nichtlinearen Dynamik des Gesamtsystems, das dem Potenzgesetz der *fraktalen Evolution* unterliegt, resultiert eine irreversible Entwicklung, die wir *hierarchisch emergente fraktale Evolution (HEFE)* nennen. (Fig. 14) Abgesehen von der offenkundigen Irreversibilität der gezeigten Evolutionen ist in Fig. 14 auch noch zu beachten, dass die mittleren Lebensdauern der „Nischen“ mitunter bedeutende Schwankungen (und zwar in positive und negative Richtungen) aufweisen – eine Eigenschaft, die im Bak-Sneppen-Modell nicht auftreten kann, woraus sich dort auch die bereits kritisierte Stasis des Gesamtmodells der *selbstorganisierten Kritizität* ergibt.

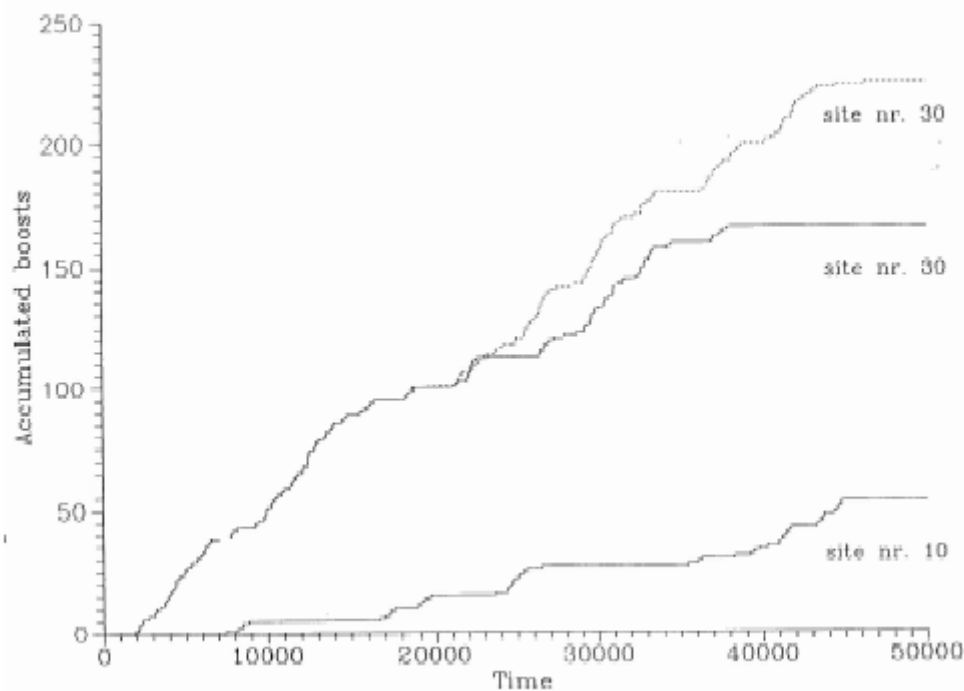


Fig. 13: Die akkumulierten Fitness-Erhöhungen („Boosts“) für zwei beliebig herausgenommene Zellen (Nr. 10 und Nr. 30 von insgesamt 120) zeigen das Verhalten des *punctuated equilibrium*, d.h. Phasen der Stasis werden durch punktuelle (und potenziell Mutationen inkludierende) „Boosts“ unterbrochen. Die unterbrochene Linie zeigt den für Fraktale typischen Effekt dramatischer Verlaufsänderung, auch wenn etwa nur ein (hier der 100.) Boost bei Zelle 30 ausgelassen wird.

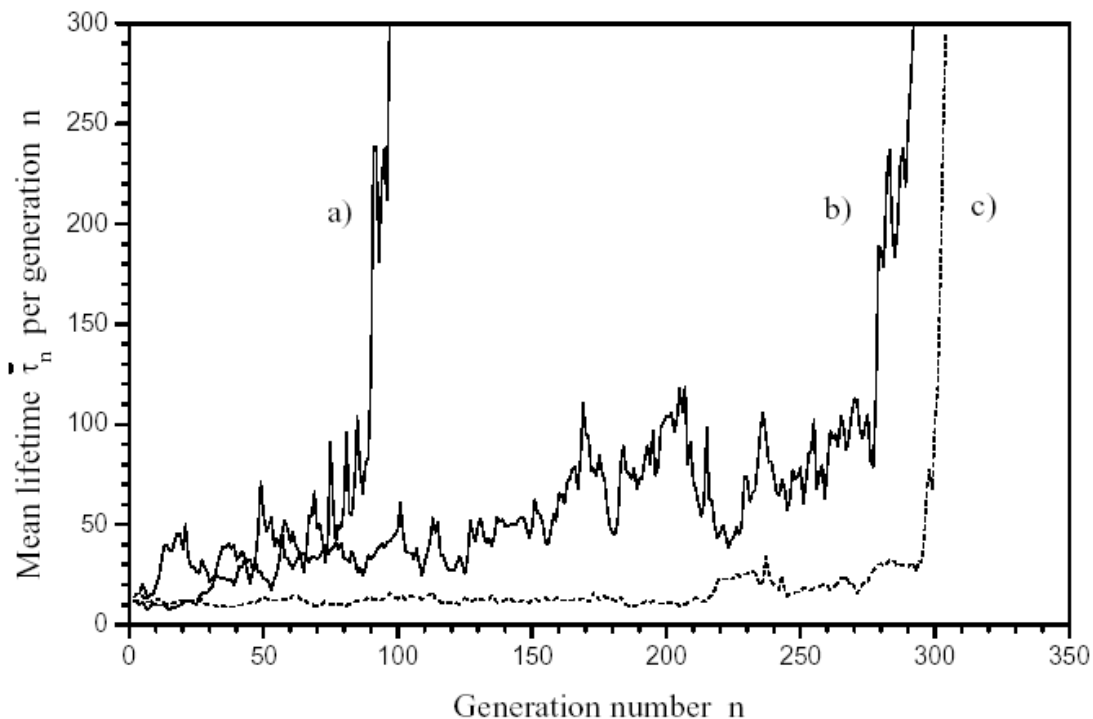


Fig. 14: *Hierarchisch emergente fraktale Evolution (HEFE)* für drei verschiedene „Generationen“ (Werte für gewählte Zeitspannen der statistischen Analyse bei bestimmtem ϵ). Die Zeitspannen für jede Generation sind gegeben durch a) 2000, b) 5000, und c) 10000 einzelne Zeitschritte. Der Anfangswert für ϵ ist bei allen Kurven durch $\epsilon_0 = 10\%$ gegeben. Man beachte die stufenweisen Zu- und Abnahmen der mittleren Lebensdauern pro Generation, wodurch offensichtlich zwei einander opponierende Trends der kurzzeitigen Dynamik illustriert werden. Über lange evolutionäre Zeiten jedoch werden die mittleren Lebensdauern in unserem Modell notwendigerweise ansteigen.

Wir sehen somit, dass die zusätzlich eingeführte „Meta-Feedback-Bedingung“ die bloße funktionale Eigenschaft der *fraktalen Evolution* der Fitness-Landschaft über die implementierten *rauschenden Rekursionen* in einen dynamischen Prozess (*HEFE*) überführt. So kommt es zur *intrinsic* (und nicht etwa extern aufkotroyierten) *Emergenz* von potenziell selbst-organisiertem Wachstum, sodass die Komplexität jeder Spezies ansteigen kann. Wir haben jedoch absichtlich eine Definition des Begriffs „Komplexität“ vermieden, sondern bloß vorteilhafte Fitnessbereiche für jede Spezies bedacht, mit dem Potenzial, zu höherer Komplexität zu evolvieren, unabhängig von zugrundeliegenden, konkreten Mechanismen. Das wesentliche Resultat der Untersuchungen mit unserem simplen Computermodell liegt im Nachweis, dass solche Potenziale im Laufe evolutionärer Zeiten anwachsen.

Bedenken wir an dieser Stelle, dass der Kern unseres Modells aus nur zwei Mechanismen besteht, so können wir nun die folgenden Propositionen formulieren:

Proposition 1: Die minimale abstrakte Maschine zur Abbildung der emergenten Dynamik evolutionärer Systeme besteht aus zwei abstrakten Maschinen mit gegenläufigen rekursiven Dynamiken jeweils eigener Periodizität.

Proposition 2: Aus der ersten der beiden Maschinen (Feedback über eine „Global-Periodizität“) ergibt sich ein universales Potenzgesetz (*fraktale Evolution*), die Verknüpfung mit der zweiten Maschine (Feedback über die Periodizität der *rauschenden Rekursionen*) führt zur Irreversibilität evolutionärer Abläufe (*hierarchisch emergente fraktale Evolution*).

Das gesamte System „reagiert“ in unserem Modell über die Variation kognitiver Präzision auf die Lebensdauern der Spezies, die selbst wieder auf die äußere Global-Periodizität „reagieren“, und *vice versa*. In anderen Worten: Das Gesamtsystem „spürt“ seine Abhängigkeit von den globalen Umweltparametern – die einzelnen Spezies evolvieren nur im Rahmen des Gesamtsystems, das auf Grund rein intrinsischer Dynamik nach höherer Komplexität strebt. Die einzelne Spezies strebt zwar im Überlebenskampf nach höherer Fitness. Doch im Rahmen der globalen Bewegung versucht das Gesamtsystem sämtliche möglichen Komplexitätsstufen zu optimieren – und ordnet so die Einzeldynamik ihrer „Zellen“ diesem intrinsisch emergenten Gesamtgeschehen unter.

Schluss

Unser an der Frage nach der Irreversibilität biologischer Makroevolution orientiertes Computermodell besteht aus einer parallel operierenden Reihe von miteinander verkoppelten *nicht-trivialen Maschinen*. Mit Heinz von Foerster können wir aber feststellen, „dass eine beliebig große Anzahl interagierender nicht-trivialer Maschinen operational äquivalent ist einer einzigen nicht-trivialen Maschine, die rekursiv mit sich selbst operiert.“⁸¹

Somit ist die abstrakte Maschine, mit der wir uns hier ausführlicher beschäftigt haben, ein Beispiel für eine operational geschlossene nicht-triviale Maschine. Von diesen wissen wir mit Foerster, dass in ihnen notwendigerweise „Eigen-Verhalten“ entstehen muss. Besitzt dieses Verhalten den natürlichen Spielraum von Fluktuationen, so entsprechen seine rekursiven Prozesse Erprobungen im Raum möglicher (maschinen-erhaltender) Zustände. In anderen Worten: *Rauschende Rekursionen* sind selbst-organisierte und selbst-organisierende Erprobungen im Möglichkeitsraum. Die evolutionäre Emergenz stets größerer Individuen einer Spezies entspricht dann jeweils konkreten Verkörperungen dieser Erprobungen, die

⁸¹ Foerster, Wissen und Gewissen, wie Anm. 77, S. 362.

durch die umgebende Ökologie beziehungsweise den Prozess der „natürlichen Selektion“ systemisch zugelassen sind.

Hier wäre auch wieder in einem breiteren Kontext anzuknüpfen. Denn die abstrakten Maschinen von *rauschenden Rekursionen* beziehungsweise der Generierung *fraktaler Evolution* (sowie deren Kombination) sind nicht *a priori* auf biologische Anwendungen beschränkt. Im Gegenteil, ihre allgemeine Formulierbarkeit bietet sich geradezu an, nach Anwendungen in anderen Wissensbereichen Ausschau zu halten. So wird zum Beispiel seit Längerem eine enge Verwandtschaft zwischen abstrakten Regeln der Evolution und Marktvorgängen untersucht⁸², oder es werden Evolutionsstrategien mit innovativen Transformationsprozessen in unterschiedlichen technologischen Systemen verglichen.⁸³ Generell lässt sich vermuten, dass überall dort, wo Potenzgesetze empirisch festgestellt werden – und dies ist etwa in weiten Bereichen von gesellschaftlichen oder technologischen Entwicklungen der Fall⁸⁴, *abstrakte Maschinen* am Werk sein müssen, die deren Zustandekommen begründen.

Das hier ausführlicher dargelegte Beispiel ist vermutlich nur eines unter vielen, die einen Beitrag zur enormen Komplexität unserer Umwelten liefern. Es zeigt sich aber bereits, was für nichtlineare dynamische Systeme allgemein gültig ist: Dass Irreversibilität, und damit ein eindeutiger „Zeitpfeil“, meist die Regel ist in einer Welt mit fast ausschließlich zeit-reversiblen physikalischen Grundgesetzen.⁸⁵ Anders gesagt: Die Naturgesetze mögen zwar „auf tiefer Ebene“ eine zeit-symmetrische Welt aus „Atomen“ vorschreiben. Doch diese „weichen immer wieder von der Bahn ab um ein Kleines“ – was letztlich der Grund für alles Neue ist, das die Natur je schaffend hervorbringt.⁸⁶

Danksagung

Ich danke Albert Müller für wertvolle Hinweise, sowie meinen langjährigen A/NS-Kollegen Siegfried Fussy und Herbert Schwabl darüber hinaus auch für die intensiven Diskussionen über frühere Versionen dieses Aufsatzes.

Gerhard Grössing, A/NS

⁸² Vgl. etwa W. B. Arthur, S. Durlauf, and D. Lane, *The Economy as an Evolving Complex System*, Vol. II, New York 1997. Siehe auch Grössing, *Noisy Recursions*, wie Anm. 44.

⁸³ So wird etwa unser HEFE-Modell im Zusammenhang mit Innovationen in der Telephonie studiert: Annie I. Antón and Colin Potts, *Requirements Engineering in the Long-Term: Fifty Years of Telephony Feature Evolution*, in: *Int. Workshop on Feedback and Evolution in Software and Business Processes*, London 2000. Vgl. auch allgemein Karl H. Müller, *Wie Neues entsteht*, in: *ÖZG* 11, 1 (2000) 87 – 128, insbesondere Tabelle 8.

⁸⁴ Vgl. Per Bak, *How Nature Works*, New York 1996.

⁸⁵ Die große Ausnahme bildet natürlich der eingangs erwähnte Zweite Hauptsatz der Thermodynamik. Allerdings wird in den letzten Jahren auch zunehmend die Frage diskutiert, ob besagte Reversibilitäten nicht bloß aus den Anfangsannahmen (wie z.B. geschlossene Systeme) resultieren und bei genauerer Betrachtung nur idealisierte Grenzfälle darstellen. Solches wird derzeit zum Beispiel im Bereich der Quantentheorie diskutiert. Zu einer breiteren Einführung in diesem Themenkomplex, vgl. etwa Gerhard Grössing (Hg.), *Time's Arrow. A Festschrift on the Occasion of the 10th Anniversary of the Austrian Institute for Nonlinear Studies*, in: *Cybernetics and Systems* 32, 3 – 4, London 2001.

⁸⁶ ...und freilich aber auch der Grund ist für den Tod.