

Editorials

Biologische Evolution – Offene Fragen

Stefan Fränze und Bernd Markert

Internationales Hochschulinstitut, Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik, Markt 23, D-02763 Zittau

"Nothing in biology makes any sense except in the light of evolution"
Theodosius Dobzhansky (1900–1975)

DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/uwsf2006.10.145>

Vor einer Bestandsaufnahme über 'die Evolution', Fragen dazu und einer Stellungnahme zur Kritik am ganzen Konzept soll eine Art Definition von (biologischer) Evolution stehen. Sie lautet wie folgt: "In der Biologie bezeichnet Evolution den Verlauf der Stammesgeschichte von den niedrigsten Organisationsstufen des Lebens bis zu den heutigen hoch organisierten Formen. Evolution erfolgt, weil Evolutionsfaktoren wirken, besonders Mutation, Rekombination, Selektion, Isolation und Zufall."

Mutation bezeichnet hier Veränderungen der genetischen Struktur, die vererbt werden, also die Keimbahn von Mehrzellern betreffen (im Gegensatz zu somatischen Mutationen an Körperzellen, die freilich u.a. Krebs auslösen können), und die die Struktur oder Gestalt des Organismus (Phänotyp) bleibend verändern.

Diese Veränderungen sind dann Gegenstand und Angriffsort von Selektionsvorgängen, d.h. 'Hebel' der natürlichen Auslese; viele Mutationen haben jedoch keinen Einfluss auf den Selektionswert ('fitness', vgl. Kimura 1979).

Eine **Rekombination** genetischen Materials tritt einzig bei sexueller Fortpflanzung (sowie bei der Einfügung des Genoms von Retroviren in dasjenige des Wirtes) auf.

Isolation bewirkt Trennung von Teilpopulationen, die dann unterschiedlichen Umweltbedingungen unterworfen werden und ohne weiteren rekombinativen Genaustausch sich fortschreitend auseinander und zu getrennten Arten entwickeln, die sich irgendwann nicht mehr fertil kreuzen lassen (Kern der zoologisch-taxonomischen Artdefinition).

Die Rolle, die **Zufallsvorgänge** bei Mutation, Isolation und Rekombination spielen, ist augenfällig, aber zugleich der Aspekt, der Kritikern evolutionärer Interpretationen des biologischen Gestaltwandels subjektiv am wenigsten behagt. Die Quantifizierung dieser fünf Größen Mutation, Rekombination, Selektion, Isolation sowie Zufall und damit eine Abschätzung, wie schnell Evolution verläuft und was sie ursächlich zu erklären vermag, ist schwierig. Kann Zufall, gepaart mit den anderen hier genannten Faktoren, 'kreativ' sein und innerhalb geologisch mehr oder weniger kurzer Zeit dazu führen, dass komplexe Strukturen entstehen?

Dies spiegelt sich historisch als Leitmotiv auch in der Geschichte der Evolutionstheorie selbst: Es gibt eine längere Vorgeschichte der Evolutionstheorie vor Charles Darwin, und das, was wir heute als solche kennen, mit allen noch offenen Fragen, hat auch erst später durch die Entwicklung und Integration der Genetik sowie durch statistische Ansätze (Populationsgenetik, Spieltheorie, vgl. Sigmund 1995, Soziobio-

logie¹) zur heutigen Form ausreifen können. Daher sei zunächst die Evolution der Evolutionstheorie kurz umrissen.

Evolution der Evolutionstheorie

Auffassungen über Entstehung und Gestaltwandel von Lebewesen, die man als Vorläufer der Evolutionstheorie ansehen könnte, reichen bis in die griechische Frühantike zurück (Anaximander; zit.n. Rožanskij 1984, Russo 2005). Schon in der Renaissance wurden Fossilien studiert und deren Fundorte von Leonardo da Vinci als Zeugnisse geologischen Gestaltwandels, von starken Hebungen und Senkungen ganzer Landstriche interpretiert (Fossilien von Meerestieren auf den Bergen des Apennin und der Dolomiten). Hier knüpften um 1800 die ersten Geologen und Paläontologen (Lyell, Hutton) an Darwins Großvater Erasmus Darwin, Jean-Baptiste Lamarck, und auch Georges Cuvier, entwickelten im frühen 19. Jahrhundert darüber hinaus gehende Vorstellungen von der Bedeutung von Fossilien als Zeugnisse biologischen Gestaltwandels und einer wie oder wodurch auch immer gerichteten Entwicklung – Fossilien von Dinosauriern und Mollusken (Ammoniten, Belemniten) waren um 1820 bereits als Relikte inzwischen ausgestorbener Lebewesen anerkannt. Diese Vorstellungen wichen sowohl voneinander als auch von modernen biologischen Konzepten erheblich ab: vertreten die einen (Hutton, E. Darwin) bei noch sehr lückenhaften Fossilreihen eine Kontinuität (auch) des Gestalt- und Artenwandels, stellte Cuvier dem eine Abfolge von wiederholten Neuschöpfungen von Lebewesen (durch Gott ?) und deren teilweise Ausrottung in einer Abfolge von 'Sintfluten', Vulkanausbrüchen oder sonstigen Katastrophen gegenüber (Katastrophismus). Später vertrat Charles Darwin als Antrieb der Entwicklung eine Selektion anhand der Eigenschaften des Individuums ('survival of the fittest'). Lamarck hielt dabei auch die Weitergabe individuell erworbener Eigenschaften für möglich. Eine Genetik gab es auch 1859, dem Erscheinungsjahr von Darwins 'Origin of Species', noch nicht, einzig die Erfahrungen mit landwirtschaftlicher Züchtung, auf die Darwin und Alfred Wallace (1823–1913) beide rekurrierten. Die Wissenschaftsgeschichte der Genetik beginnt – lange Zeit ohne breite Rezeption – erst sechs Jahre später, 1865, mit Gregor Mendel. Eine ausgearbeitete Theorie der Beziehung zwischen Genetik, Mutation und Evolu-

¹ Die Populationsgenetik und mehr noch die Soziobiologie (Wilson 1975) betonen an Hand umfangreichen Befundmaterials, dass die orthodox-darwinistische Vorstellung, Organismen würden tendenziell im Sinne der Art-erhaltung agieren, nicht immer zutrifft; oft findet man stattdessen Verhaltensstrategien, die auf die Ausbreitung der je eigenen Gene (als einer nur kleinen Teilmenge des Genpools einer Art) abzielen und dabei im Extremfall sogar den Bestand einer Population und Art gefährden können.

tion existiert erst seit etwa 1910 (Thomas Hunt Morgan). Die 'Vorgeschichte der Evolution' – nicht allein der modernen Synthetischen Theorie – reicht damit weit über Darwins Lebensspanne (1809–1882) ins 20. Jahrhundert hinein.

Reizthema Evolution

Evolution ist aber auch aus anderen Gründen noch heute ein Reizthema, insbesondere wenn es um als spezifisch menschlich wahrgenommene Eigenschaften und deren etwaige historisch-paläontologische Entwicklung geht. Die weltanschauliche Auseinandersetzung, auf die wir zurückkommen werden, ist stets auch die Frage nach einem 'Sinn in der Biologie', und zwar einem Sinn, der über die Erklärung von Abläufen, was Dobzhansky meint, hinaus die Frage nach dem Sinn und Daseinsgrund der Spezies *Homo sapiens* berührt. Das allerdings ist eine Fragestellung, die schon der Methodik nach naturwissenschaftlich nicht beantwortet werden kann, auch wenn selbstverständlich menschliches Verhalten wie das jeder anderen Spezies unter Aspekten des Selektionsvorteils analysiert werden und mit ethischen Normen – die als solche nicht ohne weiteres aus der Biologie herleitbar sind – kontrastiert und relativiert, humanisiert werden kann und muss. Andere Naturwissenschaften sind übrigens mit ähnlichen Fragen bzw. Erwartungen konfrontiert (Weinberg 1977). Genetiker, auch Humangenetiker, neigen freilich dazu, die diesem Beitrag vorangestellte Anmerkung von Dobzhansky und deren Implikationen dadurch eher zu umgehen als zu bearbeiten, dass sie Gene für verschiedenste Eigenschaften des Menschen postulieren und zu identifizieren versuchen – bis hin zu solchen, die Religiosität bedingen oder wenigstens begünstigen sollen (das 'Gottesgen'). Die Frage nach dem mit diesem präsumtiven Gen oder Allel (möglicherweise) verknüpften Selektionsvorteil stellt sich dann allerdings als Nächstes. Andererseits ist wohl bekannt, dass sich Evolution auch (zu einem wohl sehr erheblichen Anteil) vollzieht, ohne dass jeder Einzelschritt, jede Mutation mit einem definierbaren Selektionsvorteil verbunden ist ('neutrale Evolution', vgl. Kimura 1979). Populationsgenetiker, Molekularbiologen und eher auf ökosystemarer Ebene denkende andere Naturwissenschaftler reden und forschen hier vielfach leider noch aneinander vorbei.

Von dieser Bestandsaufnahme des noch nicht genau Verstandenen klar zu unterscheiden sind rein ideologisch motivierte Angriffe auf das naturwissenschaftliche Konzept von Evolution. Diese Attacken zeugen wohl hauptsächlich davon, dass ihre Urheber entweder psychologisch – in ihrem Menschenbild, der Vorstellung ihrer 'Rolle in der Natur' – oder/und gerade in ihren religiösen Ansichten (die hier inhaltlich nicht weiter zur Debatte stehen), letztlich nicht wirklich gefestigt sind. Daran ändert nichts, dass das Lehramt aller großen Glaubensgemeinschaften die Evolutionstheorie (inzwischen) akzeptiert hat², denn von Kreationisten werden berechnete, ja fachwissenschaftlich (nicht allein biologisch) notwendige Fra-

² Aussagen z.B. des katholischen Lehramtes, der Mensch in seiner Art typischen wie individuellen körperlichen Gestalt (dem Phänotyp, biologisch gesprochen) habe sich evolutionär aus Vorgängerorganismen, d.h. zuletzt aus Affen entwickelt, die Seele aber sei direkt von Gott geschaffen und dem Einzelnen eingegeben worden, sind rein theologischen Inhalts und ihrer Natur nach überhaupt kein Gegenstand wissenschaftlicher Diskussion: bei derartigen Aussagen bleibt z.B. offen, ob die hier als dauerhaftes Vehikel der Beziehung zwischen Mensch und Gott gemeinte Seele in irgend einer Weise mit denjenigen materiell auch nur bedingt repräsentierbaren Strukturen und Funktionen korrespondiert, die Psychologen untersuchen und therapieren.

gen u.E. missbräuchlich aufgeworfen – es gibt dort kein Bestreben, sie überhaupt zu klären, geschweige denn eine experimentell oder historisch (paläontologisch oder genetisch) anwendbare Arbeitsweise dazu anzugeben. Den Kreationisten – auch in ihrer anspruchsvolleren 'Intelligent Design'-Variante – sei daher entgegen gehalten:

Das Stattfinden von Evolution in Vergangenheit wie auch Gegenwart kann heute als etablierte empirische Tatsache gelten, sie kann ingenieurmäßig wie auch biochemisch an mathematischen, technisch-physikalischen, biochemischen und biologischen Modellsystemen nachvollzogen und experimentell sowie (in gewissem Umfang) numerisch simuliert werden (Markert et al. 2006). Bei diesem Stand der Dinge kann man den Zweiflern nur von Herzen wünschen, dass sie Wirkung und Folgen von Evolutionsvorgängen nicht am eigenen Leibe (mitunter tödlich) erfahren müssen – dann nämlich, wenn sie sich einen durch Jahrzehnte lange Exposition seiner (des Bakteriums oder Virus) Vorfahren gegenüber verschiedensten Medikamenten multiresistent gewordenen pathogenen Keim eingefangen haben. Ähnliches gilt für die schwindende Wirkung von Insektiziden, deren Zielorganismen manche davon nunmehr selbst als Fraßgifte gegenüber Räubern einsetzen. In der freien Natur geschieht dasselbe seit Hunderten von Jahrtausenden, wenn marine Arthropoden, Mollusken und sogar Fische (Tetrodon) Toxine mariner Algen und Bakterien als Fraßgifte anreichern (Tetrodotoxin, Saxitoxin, vgl. Habermehl et al. 2002) oder Baumsteigerfrösche (*Dendrobates*, *Phyllobates*) das Gleiche mit Giften von Ameisen (*Batrachotoxin* u.ä.) tun. Die Resistenz der anreichernden Tiere gegenüber Wirkstoffen, von denen wenige mg (!) einen Menschen töten können, Neurotoxinen sogar, verschafft jenen einen Selektionsvorteil, Räubern gegenüber signalisiert durch Warnfarben.

Dennoch bleiben zahlreiche Fragen offen: gerade wenn bzw. seitdem Evolution an Modellsystemen nachvollzogen werden kann – vom Lederbergschen Stempelversuch (Lederberg & Lederberg 1952) oder dem Spiegelman-Experiment an isolierter replizierender RNA, bis zur Optimierung von Strömungskörpern, Düsen und Tragflächen nach stochastischer Variation der Abmessungen einzelner Segmente durch Zufallsgeneratoren (Rechenberg 1989). Für derartige Modellsysteme ist inzwischen sogar die Kinetik des evolutionären Optimierungsvorganges teilweise verstanden worden. Dennoch bleibt einswelchen z.B. völlig offen, ob sich Evolution eher stetig oder in diskreten Sprüngen vollzieht; warum gibt es einmal rapide Artbildung (ostafrikanische Buntbarsche, vgl. Seehausen & van Alphen 1999), ein andermal 'lebende Fossilien' (auch bei Fischen: Quastenflosser, Lungenfische), oder auch die schnelle Entwicklung voll funktionsfähig umgestalteter Vordergliedmaßen bei Fledermäusen?

Biologische Optimierung

In Modellversuch (Rechenbergs Lavaldüse bzw. Umlenkkrümmer) und Biologie werden die optimalen Geometrien der von Gasen oder Flüssigkeiten um- oder durchströmten Körper schnell aufgefunden, wie bereits frühe Fische, Meeressäuger oder -reptilien (Plesio- oder Mosasaurier) sowie Vögel neben anderen Kriterien (langsame, laminare Strömung) auch Insektenflügel zeigen, obwohl das volle Verständnis solcher Strömungen bis heute nicht gelungen ist. Physikalische Systeme (Realisierung von Fluidströmungen mit geringstem Wi-

derstand) können offenbar weitaus schneller biologisch optimiert werden als chemische Prozesse, Umgebungen und Katalyseverfahren: es sollte 'eigentlich' viel einfacher sein, aus höchstens 20–25 unterschiedlichen Metallionen das für die jeweilige Katalyse-, Transport- oder Signalfunktion passendste selektionistisch auszuwählen, als einen fast perfekten Strömungskörper oder ein widerstandsarm durchflossenes Blutgefäß zu entwickeln. Vergleicht man aber reale Metalloproteine mit den anorganisch-chemisch gesehen idealen Zentralionen, zeigt sich, dass häufig auch nach extrem langer Zeit das Optimum nicht realisiert wurde – z.B. das Eisen beim Sauerstofftransport (oder Cu bei Arthropoden) anstelle des weitaus günstigeren Cobalts (Hämoglobin, Hämerythrin, Hämocyanin, vgl. Fränzle & Markert 2006). Evolution vollzieht sich also einmal schnell, wo es 10-hoch-zig 'Lösungsmöglichkeiten' rings um das tatsächliche Optimum gibt (Fluiddynamik), ganz langsam dagegen, wenn höchstens 20–25 Varianten (unterschiedliche Metallionen) vorhanden sind und diese alle obendrein der Umwelt direkt entnommen werden können! Warum? Was für 'die Evolution' einfach und was kompliziert, extrem langwierig zu bewerkstelligen ist, entzieht sich offenkundig bislang gänzlich unserer Kenntnis; daher ist es bis auf weiteres auch abwegig, zu behaupten, dies oder jenes – etwa die Ausbildung von Linsenaugen – sei mit den Mechanismen der Darwinschen Evolution (+ Molekulargenetik) in vier Milliarden Jahren (oder rund 450 Mio. Jahren für Wirbeltiere) nicht zu erreichen!

Jedes Leben ist mit Stoffwechsel, Stoffaustausch mit seiner Umwelt verbunden; daher beeinflusst die Evolution stets auch Stoffströme im Einzelorganismus wie in Symbiosen (Fränzle et al. 2007). Die Koevolution von Wirt und Parasit oder von Symbionten – eng verknüpften wie Flechten oder solchen in lockererer Beziehung zueinander – zeitigt faszinierende biochemische Resultate: Eichenblätter produzieren – insbesondere in Gallen – Polyphenole (Tannine), die durch effiziente Komplexbildung den Parasiten (Gallwespenlarven) Fe entziehen (Eisengallustinte!); letztere schützen sich mittels Polyphenole spaltenden, Cu-haltigen Enzymen (Laccasen u.a.). Dieses chemische 'Wettrüsten' zwischen Wirten und Parasiten führt innerhalb begrenzter Zeiträume zu erstaunlichen Stoffwechselverflechtungen und zur Entwicklung von Nährstoffkreisläufen, etwa zwischen Pflanzen, ihrer Laubstreu und dem Oberboden (Fränzle & Markert 2006, Fränzle et al. 2007).

Selektion weiterer Fragen

Zurück von der Lebensgemeinschaft zur Einzelart: gibt es Makroevolution (Cowen 1991), also die schnell verlaufende radikale Veränderung von Bauplänen oder biochemischen Strukturen ('der erste Vogel kroch aus einem Reptilei')? Falls ja: verläuft sie schubweise, vielleicht als Folge massiver, global wirkender externer Störungen wie Eiszeiten ('snowball Earth', vgl. Evans et al. 1997) oder Meteoritenimpakten – oder ist die nicht lineare Dynamik der Evolution ('kambrische Faunenexplosion' vs. minimale Änderungen über lange Zeiträume) dadurch bedingt, dass mehr oder minder periodisch die Selektionsintensität oder die Mutationsrate geändert werden? Es wäre sogar denkbar, dass Evolution auf Grund ihrer Einflussfaktoren überhaupt nicht stetig verlaufen kann (was sich in ihrer mathematischen Modellierung spiegeln müsste). Wie sind die großen Organismengruppen entstanden, standen vielleicht partielle Autotrophien (Photo- oder Chemolithoautotrophie) am Anfang des irdischen Lebens (Rauchfuß 2005)? Nur ein kleiner Teil

der Mutationen bewirkt überhaupt irgendwelche biochemischen oder phänotypischen Veränderungen, an denen Selektion unmittelbar ansetzen könnte; beim Menschen haben 90% des Genoms überhaupt keine ersichtliche Funktionen, ebenso 90% der Mutationen dort also keinerlei Folgen. Wie verhält sich die gezielte, auf einen spezifischen Zweck gerichtete Modifikation des Genoms zum Prozess stochastischer Optimierung in der Darwinschen Evolution? Welche Folgen hat letztere Wechselbeziehung (vorsätzlich oder versehentlich) ins Werk gesetzt durch die Ausbringung transgener Organismen, in der natürlichen Umwelt?

Ist es aussichtsreich oder vertretbar, einen Organismus genetisch und in seinem Phänotyp zu verändern und Selektion außerhalb des Labors auszusetzen? Man bedenke: von den nicht gentechnisch, sondern 'traditionell' durch züchterische Selektion genetisch modifizierten Organismen sind relativ viele wieder 'erfolgreich' verwildert. Weil dies ebenso nach minimalen (Damhirsch, Ren, Kaninchen) wie recht massiven (Hund, mehrere Kulturpflanzen) Veränderungen unter dem menschlichen Einfluss geschah, liegt es nahe, dass die züchterische Optimierung in diesen Fällen nicht zu Zuchtresultaten mit unzureichendem Freilandselektionswert geführt hatte. Was bedeutet es aber, wenn bestimmte Resistenzen oder andere Eigenschaften nicht schrittweise aufgebaut werden, sondern vollständig und massiv auf ein (und sei es agrarisches, vollständig vom Menschen gestaltetes) Ökosystem einwirken, z.B. Bt-Mais oder Pflanzen, die gegen Totalherbizide wie Glyphosat (Roundup®) resistent sind?

Daraus folgend stellen sich uns ethische Fragen: ist die potenzielle Offenheit evolutionärer Prozesse als Natur immanenter 'Problemlösung' selbst ein adäquates, folgerichtiges, ethisch gebotenes Schutzgut im Natur- und bzw. an Stelle des klassischen Artenschutzes, und was folgt hieraus dann ggf. für die Normenfindung? (In welchem Maße) soll(ten) wir Selektions- und Evolutionsprozesse im Zuge unserer grundsätzlich nicht vermeidbaren Eingriffe in die Umwelt gezielt anstoßen (wie wir es im Falle von Bioziden, aber auch biogeochemischen und klimatischen Veränderungen ohnehin tun) oder wird (durch menschliches Zutun ja auch steigerbare) Biodiversität und damit genetische Diversität pro Flächeneinheit als Grundlage weiterer Evolutionsvorgänge ein höchststrängiges Schutzgut – mehr als sie es heute bereits (Hummel et al. 1999) ist?

Das sind viele Fragen – die Liste beansprucht keine Vollständigkeit –, die auch 147 Jahre nach Publikation der grundlegenden Einsichten durch Darwin und Wallace ungeklärt sind und vielfach kontrovers an unterschiedlichen und nur bedingt vergleichbaren Beispielen diskutiert werden (z.B. die Alternativen des Gradualismus, einer eher stetigen Entwicklung, oder von 'Sprüngen' ('punctuated equilibrium', vgl. Gould & Eldredge 1993).

Dies alles bildet – siehe oben – keinerlei Anlass oder Ansatzpunkt, die Evolution selbst in Zweifel zu ziehen, wie es die Kreationisten tun. Es ist eher der übliche Fall in den Naturwissenschaften – ein gelöstes Problem zieht fünf neue Fragen nach sich. Biologen könnten auf ihrem Weg zum Verständnis der Dynamik biochemischer Optimierung auch von der in der katalytischen organischen Chemie bereits öfter erprobten 'gerichteten' Evolution³ aus einer Vielfalt ähnlicher Stoff-

³ entwickelt von M. Reetz am heutigen MPI für Bioanorganische Chemie in Mülheim/Ruhr

varianten (Schneider 2004) profitieren. Wir rechnen daher mit weiteren spannenden Erkenntnissen, wenn versucht wird, einige der obigen offenen Fragen mit mathematisch fundierten Methoden anzugehen, ebenso wie in der 'Ingenieur-Evolution' und bei der Untersuchung biochemischer und genetischer Relikte.

Literatur

- Cowen R (1991): *History of Life*. Blackwell, Boston, Oxford, London
- Evans DA, Beukes NJ, Kirschvink JL (1997): Low-latitude glaciation in the Palaeoproterozoic era. *Nature* 386, 262–266
- Fränzle S, Markert B (2006): Metals in biomass. From the biological system of elements to reasons of fractionation and element use. *Environ Sci Pollut Res*, OnlineFirst <DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/espr2006.10.354>>
- Fränzle S, Markert B, Wünschmann S (2007): Prediction of metal bioconcentration in different organisms and estimation of exposure risks. *Environmental Pollution* 150; in Vorbereitung
- Gould SJ, Eldredge N (1993): Punctuated equilibrium comes of age. *Nature* 366, 223 – 27
- Habermehl G, Hammann PE, Krebs HC (2002): *Naturstoffchemie. Eine Einführung*. 2. Aufl.. Springer, Berlin und Heidelberg
- Hummel ME, Simon H-R, Scheffran J (1999): *Konfliktfeld Biodiversität: Erhalt der biologischen Vielfalt – Interdisziplinäre Problemstellungen*. IANUS – TU Darmstadt, Eigendruck
- Kimura M (1979): The neutral theory of molecular evolution. *Scientific American* 241, 94–104
- Lederberg J, Lederberg E (1952): Replica plating and indirect selection of bacterial mutants. *Journal of Bacteriology* 63, 399–406
- Markert B, Lieth H, Menke-Glückert P, Hosang M, Fränzle S (2006): Zur Existenz eines ganz starken anthropischen Prinzips – Ist Gott ein Perpetuum mobile nullter Art? BOD Verlag, Norderstedt
- Rauchfuß H (2005): *Chemische Evolution und der Ursprung des Lebens*. Springer, Berlin und Heidelberg
- Rechenberg I (1989): *Evolutionsstrategie – Optimierung nach Prinzipien der biologischen Evolution*. In: Albertz J (ed): *Evolution und Evolutionsstrategien in Biologie, Technik und Gesellschaft*. Freie Akademie, Bonn, 25–72
- Rožanskij ID (dt. 1984): *Geschichte der antiken Wissenschaft*. München, Piper
- Russo L (dt. 2005): *Die vergessene Revolution oder die Wiedergeburt des antiken Wissens*. Springer, Berlin und Heidelberg
- Schneider T (2004): *Gerichtete Evolution als Methode zur Erzeugung enantioselektiver Cyclohexanonmonoxygenasen (CHMOs) für die Katalyse von Baeyer-Villiger-Reaktionen*. Diss. Ruhr-Universität Bochum
- Seehausen O, van Alphen JJM (1999): Can sympatric speciation by disruptive sexual selection explain rapid evolution of cichlid diversity in Lake Victoria? *Ecology Letters* 2, 262–271
- Sigmund K (1995): *Spielpläne: Zufall, Chaos und die Strategien der Evolution*. Hoffmann und Campe, Hamburg
- Weinberg S (dt. 1977): *Die ersten drei Minuten*. dtv, München
- Wilson EO (1975): *Sociobiology: The new synthesis*. Harvard University Press, Boston, MS

Metals in Biomass

From the Biological System of Elements to Reasons of Fractionation and Element Use

Stefan Fränzle* and Bernd Markert

Internationales Hochschulinstitut Zittau, Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik, Markt 23, 02763 Zittau, Germany

* Corresponding author (fraenzle@ihi-zittau.de)

DOI: <http://dx.doi.org/10.1065/espr2006.10.354>

Background, Aim and Scope. Metal ions generally share the ability/tendency to interact with biological material by forming complexes, except possibly for the heavy alkali metals K, Rb and Cs. This is unrelated to the metals being either essential for sustaining life and its reproduction, apparently insignificant for biology though perhaps undergoing bioconcentration or outright toxic even at low admission levels. Yet, those different kinds of metal-biomass interactions should in some way depend on properties describing coordination chemistries of these very metals; whereas both ubiquitously essential metals and others being sometimes used in biology should share these properties in numeric terms, it can be anticipated that they will be distinguished from non-essential and/or toxic ones. These above features include all bioconcentration, the involvement of metal ions such as Zn, Mg, Cu, Fe, etc. in biocatalysis as crucial components of metalloenzymes and the introduction of a certain set of essential metals common to (almost) all living beings (K, Mg, Mo, Mn, Fe, Cu and Zn) which occurred probably very early in biological evolution by 'natural selection of the chemical elements' (more exactly speaking, of the metallome).

Discussion. Effects of ligands secreted from e.g. tree roots or agaric mycelia to the soil on the respective modes (selectivities) of metal bioconcentration can be calculated by the equation giving complex stability constants, with obvious ramifications for a thorough, systematic interpretation of biomonitoring data. Eventually alterations of C-, N- and P-compounds during chemical evolution are investi-

gated – which converted f.e. CH₄ or CO₂, N₂ and other non-ligands to amino acids etc. behaving as efficient chelating ligands: did they cause metal ions to accumulate in what was going to become biological matter and was there a selectivity, a positive bias in favour of now-essential metals (see above) in this process? Though there was no complete selectivity of this kind, neither a RNA world in which early ribozymes effected most of biocatalysis, nor a paleo-atmosphere containing substantial amounts of CO could have paved way to the present biochemistry and metallome.

Conclusions. This way of reasoning provides a causal account for abundance distributions earlier described in the Biological System of Elements (BSE; Markert 1994, Fränzle & Markert 2000, 2002). There is a pronounced exchange from chemical evolution where but few transformations depended on metal ion catalysis to biology.

Recommendations and Perspectives. The application of this numerical approach can be used for modified, weighted evaluation of biomonitoring analytical data, likewise for prediction of bioconcentration hazards due to a manifold of metal ions including organometallic ones. This is relevant in ecotoxicology and biomonitoring. In combining apoproteins or peptides synthesized from scratch for purposes of catalyzing certain transformations, the map and numerical approaches might prove useful for selection of central ions which are even more efficient than the 'natural' ones, like is Co₂+ in many Zn enzymes.