

Die biologische Evolution

Werden und Entwicklung einer umfassenden Theorie^{1,2}

STEFAN SCHNECKENBURGER

Inhalt

- Einleitung
- Um was geht es?
- Anfänge
- Verbreitung der Lebewesen auf der Erde: Pflanzen- und Tiergeographie
- Evolution und Paläontologie
- Systematik und Ähnlichkeit
- Genetik
- Molekulargenetik
- Evo-Devo
- Literatur
- Anhang: Experimentelle Ansätze

© AG EvoBio – Evolution in Biologie, Kultur und Gesellschaft 05/2012
www.ag-evolutionsbiologie.de



¹ Eine gekürzte Version dieses Textes erscheint im Heft 1/2012 (S. 13-33) der Zeitschrift "Evangelium und Wissenschaft – Beiträge zum interdisziplinären Gespräch" der KARL-HEIM-Gesellschaft (www.karl-heim-gesellschaft.de).

² BRIGITTE BERTELMANN (Mainz) mit Dank für stete und warme (Gast-) Freundschaft sowie viele inspirierende Gespräche zum 60. Geburtstag gewidmet.

Einleitung

Unter Evolution versteht man heute den Wandel von Organismen in der Folge der Generationen. Hierbei handelt es sich um einen meist graduellen Prozess, bei dem die heute zu beobachtende Diversität tierischen und pflanzlichen Lebens auf der Erde aus einfachsten Anfängen über einen Zeitraum von mehr als 3 Milliarden Jahren entstand. Wissenschaftsgeschichtlich ersetzte diese Vorstellung die bis in die Mitte des 18. Jahrhunderts geltende Doktrin von der separaten Erschaffung der einzelnen Arten durch Gott und erklärte die Ähnlichkeiten durch die Abstammung von gemeinsamen Vorfahren. Wie wir wissen, hat dieser Paradigmenwechsel zu großen Verwerfungen zwischen Theologie und Naturwissenschaften geführt.

Die diese Beobachtungen und Vorgänge erklärende Theorie, als deren maßgeblicher Schöpfer CHARLES DARWIN (1809-1882) zu nennen ist, gilt heute als eine der wichtigsten und am besten abgesicherten naturwissenschaftlichen Theorien überhaupt. Darüber hinaus ist sie schon längst keine rein biologische Theorie mehr, sondern sie umfasst weit größere Bereiche und greift immer weiter aus. So dehnt man den Evolutionsbegriff auch auf kulturelle Phänomene aus und versucht, eine verallgemeinerte Evolutionstheorie zu formulieren (vgl. z.B. SCHURZ 2011). Intensiv macht man sich auch zu den biologisch-evolutionären Hintergründen der Religiosität des Menschen Gedanken (vgl. VOLAND & SCHIEFENHÖVEL 2009).

Aber soweit wollen wir hier nicht gehen, sondern bei den Biowissenschaften bleiben, für die selbstredend die Evolutionstheorie eine zentrale und dominierende Stellung einnimmt. Blättert man in einem Lehrbuch zur Evolutionsbiologie, so wird man Bilder von Pflanzen und Tieren finden und diese in all ihren Lebensstadien und Lebensräumen, mikroskopische Aufnahmen, Fossilien und Rekonstruktionen ausgestorbener Lebewesen, Landkarten, chemische und mathematische Formeln und die verschiedensten Diagramme aus Physiologie, Biochemie und Genetik. So wird deutlich, dass die gesamte Breite der Biologie zur Evolutionsbiologie beiträgt und umgekehrt die Evolutionstheorie durch die gesamte Biologie herausgefordert und getestet wird. So kann der russischstämmige Genetiker und orthodoxe Christ THEODOSIUS DOBZHANSKY (1900-1975) im Jahr 1973 in einem Beitrag für amerikanische Lehrer schreiben: "Nothing in biology makes sense except in the light of evolution."

Um was geht es?

Im folgenden Beitrag soll skizziert werden, dass die Evolutionstheorie – ohne Kenntnis solcher Schlüsseldisziplinen wie z.B. der Genetik – entstanden ist, wie sie sich entwickelt hat, wie heute die Evolutionsbiologen ihre Erkenntnisse gewinnen und an der großen Theorie weiterbauen. Es wird auch deutlich werden,

dass es völlig unangemessen ist, sich bei der kritischen Würdigung allein auf CHARLES DARWIN zu beziehen: seine Theorie entstand in den vierziger und fünfziger Jahren des vorletzten Jahrhunderts und war mit seinem Tod 1883 als eigenes Werk abgeschlossen. Das auf dieser Basis unter Einbeziehung der Fortschritte der Biologie und anderer naturwissenschaftlicher Disziplinen errichtete Theoriegebäude führte vom klassischen Darwinismus (der Begriff stammt übrigens von ALFRED RUSSELL WALLACE [1823-1913], einem Zeitgenossen DARWINS, der zeitgleich, aber weniger ausführlich begründet eine Theorie Evolution durch Selektion entwickelt hatte) über den Neodarwinismus zur New Synthesis. Heute zeichnet sich unter Einbeziehung der Ergebnisse der "Evolutionären Entwicklungsbiologie" ("Evo-Devo") eine nochmals erweiterte Theorie – eine "Extended Synthesis" (PIGLIUCCI & MÜLLER 2010) ab (vgl. u. a. auch GILBERT & EPEL 2006, JABLONKA & LAMB 2006, WALLACE 2011).

Hierbei wird deutlich werden, dass in die Theorie Ergebnisse aus der gesamten Biologie eingehen, dass aber auch - wie schon in ihrer Frühzeit - eine ganze Reihe nicht-experimenteller Ansätze – darunter historische oder vergleichend-morphologische - einen eigenen, unverzichtbaren Beitrag leisteten und immer noch leisten. Gerade im Fall des letztgenannten Aspekts erhellen die Erkenntnisse der modernen Entwicklungsgenetik die alten Vorstellungen und begründen die alten Schlussfolgerungen teilweise ganz neu (s. u.).

Anfänge

1859 erschien CHARLES DARWINS Hauptwerk, die "The Origin of species by means of natural selection or the preservation of favoured races in the struggle of life", die er zu seinen Lebzeiten noch in fünf weiteren, immer wieder sorgfältig korrigierten, ergänzten und erweiterten Ausgaben herausbrachte. Wie er selbst sagte, handelte es sich um ein "einziges langes Argument" für seine Vorstellung einer Entwicklung durch Abwandlung und durch die Wirkung eines auswählenden Prinzips – wie man es mit wenigen Worten umschreiben könnte. Seine Theorie hatte er in fast zwanzigjähriger privater Forschertätigkeit unter Heranziehung von Beobachtungen und Fakten aus zahlreichen Teildisziplinen erarbeitet und wollte sie eigentlich 1859 noch gar nicht publizieren. Das tat er erst, als ihm klar war, dass die Idee einer natürlichen Auslese quasi in der Luft lag – der bereits genannte WALLACE hatte ihm von der indonesischen Insel Ternate – quasi vom anderen Ende der Welt - den Entwurf einer Publikation zugesandt, in der er zu gleich lautenden Ergebnissen wie DARWIN selbst gekommen war. Innerhalb weniger Wochen straffte dieser den eigenen, sehr umfangreichen Entwurf und publizierte 1859 sein schon erwähntes Hauptwerk (auf immerhin noch knapp 500 Druckseiten!).

ERNST MAYER (1904-2005), der bedeutende Evolutionsbiologe des letzten Jahrhunderts, hat herausgearbeitet, dass DARWINS Theorie der Evolution genau

genommen aus fünf einzelnen Theorien besteht, die man aus unserer heutigen Sicht etwa wie folgt formulieren könnte (MAYR 1982, 2005; FUTUYMA 2009):

1. Im Lauf der Zeit verändern sich die Abstammungslinien der Lebewesen.
2. Alle Lebewesen haben sich aus einem (oder höchstensfalls wenigen) gemeinsamen Vorfahren entwickelt.
3. Die Veränderungen laufen in kleinen Schritten ab (Gradualismus).
4. Die Veränderungen laufen in Teilpopulationen ab, die über ein unterschiedliches Erbgut verfügen.
5. Ursache dafür ist die natürliche Auslese, die auf der je unterschiedlichen Fähigkeit einzelnen Individuen beruht, zu überleben und vor allem sich fortzupflanzen. Dies führt zu einer Evolution von Anpassungen, also zu Merkmalen, "that appear "designed" to fit organisms to their environment". (Zusammenstellung und Zitat nach/aus FUTUYMA 2009).

In diesen sehr groben Grundzügen kann man dies heute auch noch gelten lassen, wenngleich sich die Erklärungen und Vorstellungen DARWINS zu den Mechanismen doch sehr stark verändert haben. Wir müssen uns darüber klar sein, dass er z.B. keine Vorstellungen über die Hintergründe und Mechanismen des Vererbungs geschens hatte – die Ergebnisse MENDELS oder WEISMANNs wurden erst nach seinem Tod veröffentlicht und allgemein bekannt. So nahm DARWIN an, dass durch Umwelteinflüsse in den Körperzellen noch unbekannte Stoffe gebildet werden, die ihrerseits auf die Geschlechtszellen einwirken und somit eine Vererbung erworbener Eigenschaften möglich ist. Wie dem auch sei, es erstaunt doch sehr, dass vor 150 Jahren DARWIN mit den Kenntnissen und Methoden seiner Zeit eine solch weit reichende Theorie entwickeln und fundiert begründen konnte. Ihm standen eben nicht die Ergebnisse der klassischen und der molekularen Genetik, das mathematische Handwerkszeug der Populationsforscher und die neuen Erkenntnisse der Entwicklungsgenetik ("Evo-Devo") zur Verfügung. Aber noch heute liefern die von DARWIN herangezogenen Disziplinen wie z.B. Pflanzen- und Tiergeographie, Paläontologie, Vergleichende Morphologie, Ethologie, Blütenbiologie immer wieder und immer noch wichtige Ergebnisse, die stets nur die Evolutionstheorie stützen, sie jedoch nie in irgendeiner Weise widerlegen oder widerlegt haben. So erweist sich die Richtigkeit einer Umkehrung des Satzes von DOBZHANSKY, dass alles in der Biologie auf die Evolution hinweist.

Verbreitung der Lebewesen auf der Erde: Pflanzen- und Tiergeographie

Die historisch ältesten Argumente für eine Evolution der Lebewesen stammen von der Pflanzen- und Tiergeographie. Es ist kein Zufall, dass DARWIN, dessen

biologische Ausbildung eher eine eklektische denn eine systematische war, die ersten Ideen zur Evolution im Zusammenhang mit der Aufarbeitung seiner Beobachtungen und Aufsammlungen seiner Weltreise kamen. Sie beginnen 1837 mit der berühmten Serie der "Transmutation Notebooks", in denen er diese Überlegungen skizzierte. Weiterhin erweiterten sich in diesen Jahrzehnten durch die Entdeckungen und Kolonisierungen der Europäer die Kenntnisse fremder Tiere und Pflanzen geradezu explosionsartig.³ Auch kein Zufall: ALFRED RUSSELL WALLACE, der zeitgleich mit Darwin seine Evolutionstheorie auf der Basis einer natürlichen Selektion formulierte, war damals professioneller Tiersammler in Südostasien. Seine Abnehmer waren neben den großen Museen auch Privatleute, die sich z.B. an der Pracht tropischer Schmetterlinge erfreuten und entsprechende Preise dafür zahlten.⁴ Auf den Forschungsschiffen dieser Zeit reisten Naturforscher mit, deren Aufgabe es war, Pflanzen und Tiere zu sammeln und naturkundliche Beobachtungen der für Europa neuen Länder, Inseln und Kontinente aufzuzeichnen. Dabei ging es keineswegs nur um die reinen geographischen, floristischen oder faunistischen Erkenntnisse, sondern auch um deren Nutzung in den als nationale Interessengebiete beanspruchten Kolonien, um interkontinentalen Nutzpflanzentransfer oder um Rat für die Kolonisten⁵ – also um das damalige "Big Business" (vgl. SCHNECKENBURGER 2010).

Man erkannte mit großem Erstaunen damals die große Vielfalt der Lebewesen auf unserer Erde. Man stellte sich Fragen, die wir heute kaum noch für beachtenswert halten, die damals aber revolutionäres Potenzial in sich trugen: Warum gibt es bestimmte Arten nicht überall dort, wo ihnen zusagende Bedingungen herrschen? Warum gibt es also keine Lamas in den Alpen oder keine Elefanten auf Hawaii? Einem allmächtigen Schöpfer wäre dies ohne Zweifel möglich gewesen. Mit anderen Worten: Es überraschte die Tatsache, dass die Vielfalt deutlich größer war, als man zunächst erwartet hatte und wie es mit einem einmaligen Schöpfungsakt zu erwarten gewesen wäre. In verschiedenen Regionen, die sich zwar geographisch (Lage relativ zum Äquator, Meereshöhe, Klima, etc.) sehr glichen, traten zwar auf den ersten Blick ähnliche bzw. mit ähnlichen Anpassungen ausgestattete Organismen auf, die aber aus ganz anderen natürlichen

³ Voss (2007) führt aus, dass Teile der immensen Menge der dem Britischen Museum in diesen Jahrzehnten eingesandten Aufsammlungen immer noch in den Magazinen lagern und einer Aufarbeitung harren.

⁴ Sein größter Erfolg war die Präsentation der ersten lebenden Paradiesvögel in London nach einem außerordentlich heiklen Transport.

⁵ Auch DARWIN war hier ein gefragter Ratgeber. Durch seine Kenntnisse der gegenseitigen Anpassungen von Blüten und ihren Bestäubern riet er zur Einfuhr von Hummelvölkern nach Neuseeland zur Bestäubung und zum Bestandserhalt des für die Farmtiere lebensnotwendigen Rotklee – für die Kolonisten ein Segen, für die (bis dorthin hummelfreie) Insektenfauna der Insel eine kleine Katastrophe (vgl. SCHNECKENBURGER 2009).

Verwandtschaftskreisen stammten. Und das wäre in einer ökonomischen Schöpfung (vgl. dazu z.B. den Beitrag von DANZ 2011) mit einem einmaligen, globalen Schöpfungsakt nicht zu erwarten gewesen. DARWIN konstatierte zum Beispiel, dass die marinen Lebewesen im Atlantik östlich Südamerikas sich tiefgreifend von denen des Pazifiks auf der Westseite des Kontinents unterschieden.

Eine Liste ähnlicher Beobachtungen würde den Rahmen dieses Beitrags bei weitem sprengen. Man stellte später zum Beispiel fest, dass die polaren Meere des Nordens und des Südens trotz ganz ähnlicher physikalischer Bedingungen völlig verschiedene Faunen aufweisen. Dies gilt auch für physiologisch-biochemische Details wie die Gefrierschutzproteine in den Geweben der Fische der Arktis und der Antarktis: sie erfüllen zwar die gleiche Funktion, sind aber chemisch in beiden Polarmeeren völlig verschieden (vgl. MORRIS 2004, 2008). Ebenso stellten sich die tropischen Regenwälder Afrikas und Südamerikas trotz klimatischer Übereinstimmung als floristisch und faunistisch völlig verschieden heraus: Beiden ist z.B. (sieht man einmal von den vom Menschen mitgebrachten Nutz- und Schadtieren ab) keine einzige Säugetierart gemeinsam!⁶ Während die Trockengebiete der Neuen Welt von den Kakteen geprägt werden, zeigen in der Alten Welt ganz andere Pflanzenfamilien die stark verdickten, als Wasserspeicher fungierenden Sprossachsen und führen nicht nur den Laien in die Irre, der in Afrika meint, einen Kaktus vor sich zu haben, tatsächlich ist es aber eine Wolfsmilchart. So widmete DARWIN in seinem "Ursprung der Arten" zwei umfangreiche Kapitel dem Thema Pflanzen- und Tiergeographie, und es spricht für die Qualität seiner Erkenntnisse und Schlüsse, dass sie durch 150 Jahre Forschung schlichtweg nur bestätigt wurden. Er ging davon aus, dass einzelne Taxa⁷ an definierten Orten entstanden sind und sich dann ausgebreitet und u. U. auch in Tochttersippen aufgespaltet haben, wobei spätere geographische Fragmentationsereignisse wie Gebirgsbildungen, plattentektonische Vorgänge oder Klimaänderungen wie Eiszeiten (und damit verbundene Schwankungen des Meeresspiegels und so entstehende bzw. verschwindende Landbücken) eine wichtige Rolle spielen können.

Die Entstehung der so definierbaren tier- und pflanzengeographischen Regionen (an deren Umschreibung der bereits mehrfach genannte WALLACE einen großen Anteil hatte⁸), lassen sich nur mit der Evolutionstheorie zwanglos erklä-

⁶ Der Mensch erreichte die Wälder Südamerikas sehr spät nach einer Überquerung der Beringstraße vor höchstens wenigen zehntausend Jahren.

⁷ Mit Taxon ("Sippe"; Plural Taxa) wird in der Biologie ganz allgemein eine systematische Einheit bezeichnet, wobei man sich auf deren Stufe nicht festlegt. Je nach Zusammenhang wird damit z.B. eine Art, eine Gattung oder eine Familie gemeint sein.

⁸ So erinnert noch heute die WALLACE-Linie, eine Grenze zwischen zwei wichtigen faunistischen Regionen in der südostasiatischen Inselwelt an den Mitbegründer der Evolutionstheorie.

ren – auch in Anbetracht der großen Veränderungen der Erdoberfläche im Rahmen der Plattentektonik ("Kontinentaldrift").

Die Artentwicklung auf Inseln ist ohne die Evolutionstheorie kaum zu verstehen. So vermittelt die Untersuchung von Inselwelten tiefe Einblicke in spezielle Evolutionsvorgänge – schon Darwin exemplifizierte dies bekanntermaßen an den Galapagos-Inseln (z.B. an den Landschildkröten, die sich von Insel zu Insel geringfügig aber eindeutig unterscheiden, oder den bekannten "Galapagos-Finken). Man versteht z. B. die Entwicklung einzelner Tier- und Pflanzengruppen auf dem isolierten hawaiianischen Archipel mit sehr seltenen Besiedelungsereignissen durch Fernverbreitung nur vor dem Hintergrund des unterschiedlichen Alters der einzelnen Inseln (Kauai im Westen ist 5 Millionen, Hawaii im Osten etwa 500 000 Jahre alt) und einer entsprechenden Aufspaltung und dem "island hopping" der Pioniertaxa. Dies lässt sich sowohl an Pflanzen- als auch an Tierarten überzeugend darlegen.

Heute werden diese Erkenntnisse durch die Ergebnisse der molekularen Phylogeographie unterstützt und erweitert (vgl. STORCH et al. 2007). Durch phylogenetische Rekonstruktionen und Ermittlung der Divergenzzeiten anhand von DNA-Sequenzen ("molekulare Uhren"; siehe unten!) lässt sich die Verbreitungsgeschichte vieler Organismen rekonstruieren. Kommen nämlich verwandte Sippen auf mehreren Erdteilen vor, so ergeben sich zwei Möglichkeiten: Entweder waren die Stammarten bereits auf einem Urkontinent vorhanden und gelangten durch die Bewegungen der Plattentektonik ("Kontinentaldrift") zur heutigen Verbreitung. Die andere Möglichkeit liegt in der Fernverbreitung von einem distinkten Ursprungszentrum mithilfe von Meeres- oder Luftströmungen, in oder auf anderen Tieren oder über zeitweise bestehende Landbrücken. In beiden Fällen können auch Zufallsereignisse eine Rolle spielen – unabhängig von den Selektionsvorgängen, die belegen, dass "Survival" nicht unbedingt ein Ergebnis von "good genes" sein muss, sondern einfach eine Folge von "good luck." So können z.B. Sporen, Samen, Früchte oder kleine Tiere durch Wirbelstürme in große Höhen gerissen werden, wonach dann eine sehr weite horizontale Verdriftung möglich ist. Schon Darwin untersuchte die Keimfähigkeit von Verbreitungseinheiten nach langem Aufenthalt in Salzwasser und konnte dabei zeigen, dass viele Samen auch nach langem Aufenthalt im Meerwasser ihre Keimfähigkeit behielten.

Durch die genannten phylogeographische Analysen wurde z.B. deutlich, dass die Ratiden (brustbeinlose, flugunfähige Vögel, zu denen die Ñandús Südamerikas, die Strauße Afrikas, die Emus und Kasuare Neuguineas und Australiens, die Kiwis und die [erst vor wenigen hundert Jahren ausgestorbenen] Moas Neuseelands gehören) eine sehr ursprüngliche Vogelgruppe bilden, die bereits vor 80 Millionen Jahren und damit vor dem endgültigen Auseinanderdriften des Südkontinents Gondwana entstanden war und deren Nachkommen sich auf den heutigen, aus Gondwana hervorgegangenen Kontinenten bzw. "Splittern" fin-

den.⁹ Nichtlösbare Widersprüche hätten sich aus einem deutlich jüngeren Alter der Stammgruppe ergeben, denn eine Fernverbreitung der plumpen Vögel ist kaum denkbar. Die zugrunde liegenden Analysen bestanden im Übrigen aus immunologischen und zwei verschiedenen molekulargenetischen Studien, so dass das Ergebnis als dreifach abgesichert gelten kann.

Nicht zuletzt erhellen phylogeographische Untersuchungen auch die Geschichte unserer eigenen Art und die sukzessive Besiedelung der Kontinente unserer Erde durch *Homo sapiens*, dabei teilweise die archäologischen Befunde ergänzend (vgl. z. B. die Überblicke in FUTUYMA 2009 und STORCH et al. 2007). Im Hinblick auf ihre psycho-sozialen Leistungen und dem Einfluss, der unsere Art auf den Verlauf der Evolution genommen hat und zunehmend nehmen kann, kann man sie als Gipfel, als "Krone der Evolution" (NEUWEILER 2008) bezeichnen.

Evolution und Paläontologie

Man würde zunächst annehmen, die Paläontologie (also die Wissenschaft von den Lebewesen vergangener Erdzeitalter) hätte einen bestimmenden Anteil an der Entstehung der Theorie gehabt. Dass dies nicht ganz in dem erwarteten Maße der Fall war, liegt nicht zuletzt auch darin begründet, dass vor 150 Jahren die Kenntnis der Fossilien, ihre Datierung sowie ihr Studium deutlich hinter den heutigen Gegebenheiten zurück lag. Untersuchungen und Techniken, die uns heute Feinstrukturen wie Zellkerne (!) in 1,5 Milliarden (!) Jahre alten Fossilien altertümlicher Einzeller erkennen lassen, sind erst in den letzten Jahrzehnten verfügbar geworden. Insgesamt sind heute einfach viel mehr Fossilien viel genauer bekannt als in der Mitte und gegen Ende des 19. Jahrhunderts.^{10,11}

Grundsätzlich hat man schon früh erkannt, dass die "Petrefakten", also die Versteinerungen im weiteren Sinn, Zeugnisse vergangener Lebenswelten waren,

⁹ Derartige Verbreitungsmuster von Pflanzen und Tieren, die letztlich auf die Existenz dieses Südkontinents Gondwana hinwiesen, waren schon lange vor der Formulierung der Theorie der Plattentektonik durch ALFRED WEGENER bekannt.

¹⁰ DARWIN selbst entdeckte im Süden Südamerikas eine aus dem Tertiär stammende fossile Fauna riesiger Säugetiere, darunter z.B. das berühmte *Megatherium*, ein Riesenfaultier.

¹¹ Es erstaunt nicht, dass HEINRICH BRONN (1800-1862), der Übersetzer der beiden ersten Buchpublikationen Darwins ("Origin of species" und den "Various contrivances" (1862), einem Werk zur gegenseitigen Anpassung von Blüten und ihren Bestäubern am Beispiel der Orchideen, einer der bedeutendsten Paläontologen seiner Zeit war. BRONN hatte kurz vorher ein viel beachtetes, mehrbändiges Verzeichnis aller damals bekannten tierischen Fossilien publiziert. Zur Übersetzung der "Origin" verfasste er ein eigenes, zusätzliches Schlusskapitel mit kritischen Fragen, an denen sich die frühen Evolutionsforscher arbeiteten. Dieses Kapitel fehlt in den späteren deutschen Auflagen. Im Übrigen ließ er den Satz "Light will be thrown on the origin of man and his history" in der Übersetzung einfach aus.

die man anfangs in die Zeit vor der Sintflut (vorsintflutlich, antediluvial) datierte¹². So beschrieb der Schweizer Arzt, Naturforscher und Physikotheologe JOHANN JAKOB SCHEUCHZER (1672-1733) ein Fossil eines Riesensalamanders, bei dem er die Beckenknochen als Schädelknochen interpretierte, als Zeugen der Sintflut: "Homo diluvii testis" – ein "Mensch, Zeuge der Sintflut". Das deshalb später etwas spöttisch als "Scheuchzers armer Sünder" bezeichnete, am Galgenberg von Öhningen gefundene Fossil, das heute den korrekten Namen *Andrias scheuchzeri* trägt, macht aber deutlich, dass man schon damals diesen wundersamen, oft auch zu Hexereien verwendeten oder Zauberei zugeschriebenen Gebilden ein hohes Alter zuerkannt hat.

Kurz vor DARWINS Zeit setzte sich die Erkenntnis durch, dass Fossilien ganz bestimmten Phasen der Erdgeschichte zuzuordnen sind. So wurde anfangs des 19. Jahrhunderts der Begriff des Leitfossils geprägt, das einem geologischen Zeitabschnitt eineindeutig zugeordnet ist und zunächst eine relative Altersbestimmung erlaubt. In ganz praktischer und von wirtschaftlich großer Bedeutung werden Leitfossilien zur Prospektion z.B. von Bodenschätzen oder auch Erdöl eingesetzt; im letztgenannten Fall handelt es sich meist um die Überreste von Kleinstlebewesen (sog. Mikrofossilien). Mit der Geologie und der Paläontologie war DARWIN schon während seines Studiums in Berührung gekommen; besonders aber prägte ihn das Studium der dreibändigen "Principles of Geology" (1830-1833) des bedeutenden Geologen CHARLES LYELL (1797-1875), die ihn auf seiner Weltreise begleiteten.

Heute kennt man etwa 300 000 Taxa fossiler Lebewesen (Storch et al. 2007) und damit deutlich weniger Sippen, als die rezente Flora und Fauna aufweist; hier gehen die Zahlen in die Millionen. Vielfach wird vor allem bei Pflanzen die Situation dadurch erschwert, dass "Organsippen" beschrieben sind, bei denen man Früchte, Stammquerschnitte, Oberflächenstrukturen etc. benannt, aber nur in Sternstunden der Paläobotanik deren Zusammengehörigkeit zum gleichen Organismus erkannt hat. So stellte sich 1971 ein lange den Nadelbäumen zugewiesenes Holz (*Callixylon*) als zu den ausgestorbenen devonischen Farnsamern zugehörig heraus; alle bekannten Teile dieses frühen Baumes tragen heute deshalb den Namen *Archaeopteris*, der schon vorher für Blätter und Vermehrungsstrukturen geprägt worden war (TAYLOR et al. 2009).

Man kann davon ausgehen, dass in der Erdgeschichte ein Vielfaches der heute lebenden Arten ihr Dasein auf der Erde gefristet haben, von denen die meisten wieder ausgestorben sind¹³ und – ohne irgendwelche Spuren hinterlas-

¹² Gerade zur Zeit DARWINS erfreute sich das Sammeln von Fossilien großer Beliebtheit. So frönte der evangelische Pfarrer und Dichter EDUARD MÖRIKE dieser Leidenschaft.

¹³ Manche Autoren gehen davon aus, dass weit über 95% (manche Autoren nennen 99%) der Arten der einstmaligen Floren und Faunen ausgestorben sind. Man kennt heute mindestens fünf große Aussterbeereignisse. Im späten Perm verschwanden etwa 36% der Familien und 96% aller Arten mariner Lebewesen (mit Innen- oder Außenskeletten) in-

sen zu haben – wieder verschwunden sind.¹⁴ Man muss sich darüber klar sein, dass die Bedingungen, die gegeben sein müssen, damit ein Lebewesen als Fossil die Jahrmillionen der Erdgeschichte überdauert, sehr eng sind und dass es in den allermeisten Fällen ein Glücksfall ist, wenn so etwas wie der "Urvogel" *Archaeopteryx* oder die frühen Landpflanzen des Devon erstens auf uns kommen und zweitens nicht in unseren Öfen (als Stein- oder Braunkohle) verbrannt oder bei der Zement- und Betonherstellung (z.B. aus biogenen [!] Kalken) gemahlen und gebrannt werden. Insofern ist es trotz aller immer noch bestehenden Lücken immer wieder für den "Rezentbiologen" erstaunlich, welche Fülle an Belegen der Evolution des Lebens in den vergangenen Jahrzehnten zusammen gekommen ist. Der Fund des einen oder anderen "missing link" ("fehlendes Bindeglied") – nun also ein "connecting link" (bekannte Zwischenform) - brachte Klarheit und erhellte die Entwicklung auch hoch komplexer Formen. So traf ein Fund im kreidezeitlichen Bernstein vor einigen Jahren ins Schwarze: Den Ursprung der Ameisen vermutete man in der Gruppe der Wespen und konstruierte eine hypothetische Zwischenform. Bis ins Detail glich diese dem Jahre später gemachten Fund im Bernstein mit dem "sprechenden Namen" *Sphecomyrmex* ("Wespenameise"; vgl. FUTUYMA 2009).

Um Überreste – seien sie nun jünger oder älter – zur Rekonstruktion des Evolutionsverlaufs nutzen zu können, müssen sie zeitlich eingeordnet, also datiert werden. Neben der relativen Datierung, also der Einordnung eine bekannte Schichtenfolge - wobei die bereits erwähnten Leitfossilien eine wichtige Rolle spielen - kann man heute auch mit großer Zuverlässigkeit absolute Altersbestimmungen durchführen. Dazu gibt es eine ganze Reihe von Methoden, die eine Alterszuweisung insofern mit großer Sicherheit ermöglichen, als man sehr häufig mit mehreren Indikatoren arbeiten und die Ergebnisse auf diese Weise absichern kann. Es würde an dieser Stelle zu weit führen, diese Methoden im Einzelnen vorzustellen, aber man arbeitet in vielen Fällen mit dem Zerfall radioaktiver Isotope, die zu Lebzeiten in den Organismus aufgenommen wurden. Die Menge der Zerfallsprodukte lässt eine Altersbestimmung zu (sog. radiometrische Datierung). Es werden verschiedene Ausgangselemente (z.B. Kohlenstoff, Kalium oder Uran) eingesetzt, die sich für unterschiedliche Zeiträume eignen. Daneben werden beim radioaktiven Zerfall in Kristallen entstehende mikroskopisch kleine Spaltspuren (sog. "Fission-track-Methode") herangezogen. Auch die Ausrichtung magnetischer Teilchen in erstarrter Lava oder in wenig gestörten Schichten erlaubt eine

nerhalb von wenigen hunderttausend Jahren (vgl. RIDLEY 2004; HALLAM & WIGNALL 1997, BOULTER 2002, FUTUYMA 2009).

¹⁴ Dabei muss man sich klar machen, dass manche Gruppen viele, oft Hunderte von Millionen Jahre gelebt haben – ausgestorbene Gruppen existierten mitnichten zwangsläufig nur kurze Zeiträume.

Altersbestimmung, da sich das Magnetfeld der Erde mehrfach umgepolt und verändert hat (sog. Paläomagnetik).

Ein glanzvoller Beleg aus der Paläontologie ist die immer wieder in Lehrbüchern wiedergegebene Evolution der Pferdeverwandtschaft, ausgehend von nur hundegroßen, als "Buschschlüpfer" lebenden Vorfahren bis hin zu den Großtieren offener Grasländer. In den letzten Jahren hat sich allerdings herausgestellt, dass der Pferde-Stamm"baum", der eher einem reich verzweigten Busch gleicht, noch komplexer ist, als man früher angenommen hat (FRANZEN 2007). Aber dies wurde in den letzten Jahren noch durch eine Reihe von Fossilfunden bedeutend in den Schatten gestellt, die die Evolution der Walartigen (rezent: Wale und Delphine) fast lückenlos belegen: ausgehend von vierfüßigen, fuchs- bis wolfsgroßen Landsäugetieren aus dem Eozän Pakistans (also vor ca. 50 Mio. Jahren) bis hin zu den großen Meeressäugern mit ihren stark bis fast völlig reduzierten Hinterextremitäten (z.B. THEWISSEN et al. 2001, THEWISSEN et al. 2007). In der Vergangenheit waren gerade die Walartigen ein Paradebeispiel kreationistischer Argumentation, denn mit dem Hinweis auf Dysfunktionalität von Zwischenformen konnte man sich das Entstehen dieser Tiergruppe nur auf der Basis eines einmaligen Schöpfungshandelns vorstellen (so z.B. JUNKER & SCHERER 1988: "... ist es Tatsache, dass es unfertige Wale nicht gibt, Hypothese, dass sie durch (Makro-)Evolution entstanden sind" {S. 71}). Hier hat die Paläontologie durch eine nahezu lückenlose Fossilienreihe unmittelbar zeigen können, wie und in welchen Zeiträumen abgeleitete Formen entstanden sind und sich Landsäuger einen ganz neuen Lebensraum erschlossen haben. Die fossile Überlieferung ist so gut, dass man heute die Evolution des Innenohres der Wale nachvollziehen kann, das ein sehr hoch entwickeltes Richtungshören unter Wasser ermöglicht. Dabei sind Zwischenstufen dokumentiert, die sowohl ein Über- als auch ein Unterwasserhören ermöglichen – beides allerdings nicht optimal (NUMMELA et al. 2004) und wieder ein unmittelbarer Nachweis für angeblich nicht existenzfähige dysfunktionale Zwischenformen.

Durch neue Fossilfunde sind inzwischen die Vorstellungen zur Evolution unserer eigenen Gattung *Homo* deutlicher geworden, dabei hat sich auch hier – wie an vielen anderen Stellen - das Bild des Stamm"baums" hin zu einem reich verzweigten Busch gewandelt. Noch vor einigen Jahrzehnten undenkbar, ist es sogar gelungen, das Genom beispielsweise des Neanderthalers zu sequenzieren. Aber auch die Paläobotanik hat viel Klarheit in die Evolution der Pflanzenwelt gebracht: Die ersten, zu den Farnartigen zählenden Landpflanzen des Silur und Devon sind dokumentiert und auch DARWINS "abominable mystery" (brieflich am 22.7.1879 an den Botaniker JOSEPH DALTON HOOKER (1817-1911); vgl. JERNSTEDT 2009, FRIEDMAN 2009), nämlich die rasche Entstehung und Diversifikation der

bedecktsamigen Pflanzen ist heute kein unlösbares Rätsel mehr.¹⁵ Fossilfunde zarter Blütenreste und von Pollenkörnern haben deutlich mehr Klarheit in die Angelegenheit gebracht.

Insgesamt kann man beobachten, dass sich die Fossilien aller Organismen, je älter sie sind, desto mehr von den heutigen Verhältnissen abweichen. Die umgekehrte Formulierung ist ebenso richtig: Von den ältesten bekannten Fossilien ausgehend nähern sich die Lebewesen in gradueller Veränderung zunehmend den heutigen Formen an. In der jüngsten geologischen Vergangenheit (bis ca. 2 Mio. Jahre) existierten viele der heutigen Arten schon. Zu Beginn des Tertiärs (vor etwa 65 Mio. Jahren) sind nur noch wenige der heute lebenden Tierfamilien nachweisbar. Dies setzt sich fort bis in die Frühzeit der Höheren Lebensformen, wo die Organismen vielfach ausgestorbenen Großgruppen angehörten und Vertreter heutiger systematischer Großeinheiten doch sehr rar waren. So waren zunächst die Lebensformen des kanadischen Burgess-Shale, die aus dem Kambrium stammen und etwa 505 Mio. Jahre alt sind, so fremdartig, dass die Paläontologen ihrem Erstaunen mit entsprechenden Namen wie *Wiwaxia*, *Anomalocaris* oder *Hallucigenia* Ausdruck verliehen. Heute weiß man, dass diese marinen Lebewesen immerhin teilweise zu heute noch lebenden Großgruppen wie u. a. den Arthropoden (Gliederfüßler) oder den Chordaten (einer Gruppe, die auch die Wirbeltiere umfasst) gehörten. Sogar Wirbeltiere im engeren Sinn fand man in dieser Fauna, die offensichtlich räuberisch lebende Formen einschloss; die Beutetiere schützten sich vor ihnen bereits durch Hartstrukturen (vgl. MORRIS 1999). Dieser etwa 20 Mio. Jahre umfassende Zeitraum sah eine stürmische Formenentfaltung, so dass einige Autoren von der "kambrischen Explosion" sprechen.

Noch rätselhafter ist die deutlich ältere Ediacara-Fauna, die über 100 Mio. Jahre hinweg den Boden flacher Meere besiedelte (640-540 Mio. Jahre vor unserer Zeit) und heute mit Ausnahme von der Antarktis von allen Kontinenten bekannt ist: In diesem "Experimentierfeld" der Evolution entstanden und verschwanden Formen, die keinerlei Beziehungen in die Jetztzeit aufweisen. Da sie keine Hartstrukturen ausbildeten, geht man davon aus, dass es eine Fauna ohne Räuber war.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die hier nur skizzenhaft ange deutete Korrelation zwischen den geologischen Zeiträumen und der stufenweisen Abänderungen der Lebensformen allein mit der Evolutionstheorie erklärt werden kann. Harmonisierungsversuche mit der biblischen Schöpfungsgeschichte sind meiner Meinung nach obsolet und eine Vergewaltigung sowohl der Texte des Alten Testaments als auch der Ergebnisse der Paläontologie.

¹⁵ Im DARWIN-Jahr 2009 (200. Geburtstag CHARLES DARWINS und 150. Jahrestag des Erscheinens der "Origin of Species") widmete die American Botanical Society ein fast 400 Seiten starkes Sonderheft speziell diesem Thema (JERNSTEDT 2009). Die Rückwärtsge wandtheit vieler Kreationisten zeigt sich nicht zuletzt auch darin, dass sie mit dieser weit über 100 Jahre alten brieflichen Äußerung hausieren gehen.

Systematik und Ähnlichkeit

Ein Charakteristikum des Menschen ist die Sprache, mit der er die Dinge seiner Umgebung benennt. Und schon ganz am Anfang ist mit der Namensgebung auch eine Klassifizierung verbunden. So hat man bei Forschungen im Regenwald Neuguineas in den dreißiger und vierziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts festgestellt, dass die in einer Steinzeitkultur lebenden Urwaldbewohner eine fast identische "Arteinteilung" der in ihrem Lebensraum vorkommenden Vögel vorgenommen hatten wie die taxonomisch geschulten Biologen aus Europa und den USA.¹⁶

Dieses Bestreben nach Namensgebung und Einteilung zieht sich auch durch die gesamte westliche Kulturgeschichte. Die großen naturkundlichen Werke der griechischen Autoren wie ARISTOTELES oder THEOPHRASTOS VON ERESSOS klassifizierten Tiere und Pflanzen nach je eigenen Kategorien. Einen Kulminationspunkt dieses Einteilens und Benennens tritt uns in dem Schweden CARL VON LINNÉ (1707-1778) entgegen, auf dessen Werke noch heute die Namensgebung der Pflanzen (1753) und Tiere (1758) beruht. LINNÉ selbst sah sich als Sekretär Gottes, dessen Aufgabe als "Kanzlist" die Namensgebung und Klassifikation war (GOERKE 1989, BLUNT 2001). Er führte die so genannten "binäre Nomenklatur" ein, die jedem Organismus einen zweigliedrigen Namen aus Gattungsname und spezifischem Epitheton zuweist: Wir gehören zur Gattung *Homo*, durch das Epitheton *sapiens* wird die Art, der wir zugehören, festgelegt.¹⁷ Andere, erst in unserer Zeit entdeckte Arten unserer Gattung wie *Homo erectus* oder *Homo habilis* sind ausgestorben.

Die Kriterien der Einteilung LINNÉs waren an Strukturen gebunden, wie sie natürlich schon von seinen Vorgängern erkannt und ausgearbeitet worden waren. Diese Kriterien waren z. T. sehr technisch (so bei den Pflanzen die Anzahl der Staubblätter in einer Blüte), erlaubten aber eine rasche Zuordnung der Organismen zu einer "Schublade"¹⁸ und sehr kurze, leicht merk- und auflistbare Namen – ein enormer Vorteil in der Zeit der Erforschung unbekannter Weltgegenden mit

¹⁶ Wesentlich unterschieden sich dagegen Auffassung z.B. bei Ameisen: den Dutzenden von den Biologen definierten Arten standen nur ganz wenige Namen des Naturvolks gegenüber.

¹⁷ LINNÉ legte in seinen Hauptwerken Inventuren aller ihm bekannten Pflanzen- und Tierarten vor, wobei er alle benannte und kurz beschrieb bzw. vorhandene Beschreibungen zitierte. Eine solche Diagnose fehlt nur bei *Homo sapiens*: "Nosce te ipsum!" – notierte an dieser Stelle der große Biologe (GOERKE 1989).

¹⁸ Die Primaten ("Herrentiere") charakterisierte LINNÉ (nur) durch vier Schneidezähne und zwei im Brustbereich liegende Milchdrüsen – dadurch wurden auch Fledermäuse zu Primaten.

ihren "neuen" Floren und Faunen.¹⁹ LINNÉ selbst hat diese hierarchische Klassifikation als künstlich empfunden, sein Ziel eines "natürlichen Systems", das seiner Meinung nach auf einer Vielzahl verschiedener Merkmale beruhen sollte, hat er nicht erreicht: "Ziel ist und wird immer ein natürliches System sein!" (GOERKE 1989). Seit CHARLES DARWIN wissen wir, dass ein solches "natürliches System" die Abstammungs – und Verwandtschaftsverhältnisse widerspiegeln muss und demzufolge nur ein "Phylogenetisches System" sein kann.

LINNÉ betrachtete die Arten als vom "unendlichen Wesen" ("infinitem ens") geschaffene und unveränderliche Einheiten. Später machte er sich in Briefen – nicht in Publikationen - Gedanken, ob das immer so sei. Er beobachtete Hybriden – Kreuzungen sich nahe stehender Arten – und räumte ein, dass diese neue Arten darstellen könnten, dass sich also neue Arten aus Vorgängern entwickeln können und stellte deren Unveränderlichkeit schon vor 250 Jahren in Frage.

Der Einwicklungsgedanke und die Möglichkeit einer "Blutsverwandtschaft" der Lebewesen begann dann einige Jahrzehnte später in den Überlegungen und Schriften des französischen Gelehrten JEAN BAPTISTE DE LAMARCK (1744-1829) Gestalt anzunehmen. In seiner "Philosophie zoologique" (1809) formulierte er zum ersten Mal den Evolutionsgedanken, dessen komplexe Formulierungen später stark auf die Vererbbarkeit erworbener Merkmale hin vereinfacht wurde (vgl. CORSI 2011).²⁰

Zugrunde lag den Ideen eine wesentlich differenziertere Betrachtung des Baus des Pflanzen- und Tierkörpers, zu dem u. a. auch GOETHE beigetragen hatte (vgl. SCHNECKENBURGER 1998). Die großen, z. T. erst durch genaue Analysen erkennbaren Veränderungen ("Metamorphosen" im Sinne GOETHES wie die Blattnatur bestimmter Dornen oder aller Blütenorgane) unterliegenden Gemeinsamkeiten und gestatten das Aufstellen von Typen und die Definition von Bauplänen. Heute beginnen wir mit den neuen Erkenntnissen der evolutionären Entwicklungsbiologie das Entstehen und die Veränderung von Bauplänen zu verstehen (s. u.). Diese Baupläne wurden mit dem Handwerkszeug der "Vergleichenden Morphologie" herausgearbeitet. Zentrale Termini sind hier das Begriffspaar Homologie – Analogie. Es sei vorausgeschickt, dass eine erschöpfende Behandlung dieses Themas und eine differenzierte Darstellung dieser Begriffe und ihrer Entwicklung und Verschärfung in den letzten hundert Jahren den Rahmen dieses Aufsatzes weit überschreiten würden. So seien also nur die Grundlinien skizziert. Einen leicht lesbaren und vor allem illustrierten Überblick findet sich z.B. in dem Lehrbuch von STORCH et al. 2007.

¹⁹ Die vor-LINNÉschen Namen waren umfangreiche, teilweise mehrzeilige lateinische Diagnosen.

²⁰ Seine Einteilung der Wirbellosen Tiere (1815-1822) hat in den wesentlichen Grundzügen bis heute Bestand.

Unter homologen Strukturen versteht man – völlig unabhängig von ihrer Funktion - Strukturen, die ursprungsgleich sind, also auf einen gemeinsamen Vorfahren zurückgehen; im Bauplan stellen sie meist identische Elemente dar. So sind Vorderflossen der Wale, die Vogelflügel sowie unsere Arme und Hände homolog: Sie nehmen im Bauplan der Wirbeltiere die gleiche Stellung ein, ihre Bauteile entsprechen einander und sie durchlaufen eine vergleichbare Entwicklung. Analogie²¹ hingegen bezeichnet eine strukturelle Ähnlichkeit, die – bei unterschiedlichem Ursprung der Strukturen - nur durch eine gleiche Funktion bedingt ist. Kernpunkt ist nun das Herausarbeiten von Homologien, zu dem ein hoch differenziertes wissenschaftliches "Handwerkszeug" entwickelt wurde. Dabei ist natürlich die Abgrenzung zu den oftmals verwirrenden Analogien ein sehr wichtiges Anliegen, denn Homologien – also identische Baupläne - markieren eine gemeinsame Abstammung, während Analogien aus der Sicht der Phylogenie nur auf Anpassungen an gleiche Lebensbedingungen beruhen, weshalb sie auch als "Anpassungsähnlichkeiten" bezeichnet werden.

Die Erkenntnisse der vergleichenden Morphologie und Anatomie, mit deren Hilfe man Baupläne herausarbeitete, waren seit LAMARCK und dann vor allem für DARWIN und seine Nachfolger zentrale Argumente für die Evolution und überaus starker Beleg für die gemeinsame Abstammung der Lebewesen. DARWIN formulierte, die Suche nach dem "Typus" sei eine zentrale Aufgabe der Biologie und hier der Morphologie, "the most interesting department of natural history, and may be said to be its very soul." (DARWIN 1859: 434). "Meister" in dieser u. a. auf GOETHE zurückgehenden Disziplin waren z.B. der Zoologe ERNST HAECKEL (1834-1919) oder der Botaniker WILHELM HOFMEISTER (1824-1877). Letztgenannter erkannte mit vergleichenden Untersuchungen auf der feinstrukturellen Ebene 1851 und damit einige Jahre vor der Publikation von Darwins Hauptwerk die tief liegenden Gemeinsamkeiten in den hoch komplexen Vermehrungsvorgängen der Moose, Farne und Samenpflanzen. Es ist bemerkenswert, dass DARWIN die Feinheiten der HOFMEISTERSchen Argumentation offenbar nicht verstand und diesen zwingenden Beleg einer gemeinsamen Abstammung der Höheren Pflanzen nicht aufgriff, obwohl ihm die Arbeit dieses bedeutenden deutschen Botanikers vorlag und er sie sogar ins Englische übersetzen ließ (vgl. SCHNECKENBURGER 2009).

Schon früh wurden nicht nur strukturelle Merkmale auf ihre Gemeinsamkeiten untersucht, sondern auch die zu ihnen führenden Entwicklungsprozesse. Man erkannte, dass Tiere ähnliche Entwicklungsstadien durchlaufen, dass sich also Embryonalstadien gleichen. Etwas über das Ziel hinausschießend formulierte HAECKEL 1866, sehr stark durch den in Brasilien lebenden und forschenden FRITZ MÜLLER inspiriert, sein "Biogenetisches Grundgesetz", das besagte, dass die On-

²¹ Die Begriffe Homologie und Analogie gehen auf den bedeutenden englischen Zoologen und Anatomen RICHARD OWEN (1804-1892) zurück, der u.v.a. den Begriff der Dinosaurier prägte und diese Wesen als ausgestorbene Reptilien erkannte.

togenie (also Entwicklungsgeschichte des einzelnen Lebewesens) in verkürzter Form die Phylogenie²² (also Stammesgeschichte) wiederholt. In einer modifizierten Form gilt dies im Kern noch heute: Wiederholt wird nicht die Phylogenie, sondern einzelne Entwicklungsstadien, denn die Entwicklung der Mehrzeller ist eine hoch konservative Angelegenheit, die durch sehr alte Genfamilien gesteuert wird. Diese Erkenntnisse aus der Entwicklungsgenetik lassen die alten Formulierungen HAECKELS in neuem Licht erscheinen und unterstützen sie von einer ganz anderen Seite her.

Aus dieser Sicht werden die morphologischen Homologien ganz neu verständlich und auf vielen Lebewesen gemeinsame Entwicklungsprozesse und die diese steuernden, allen gemeinsamen Gene bzw. Gengruppen zurückgeführt. Und diese Gemeinsamkeiten, die nach heutigen Erkenntnissen sehr weit in die Geschichte des Lebens zurückreichen, sind gleichermaßen ein überzeugender Beleg für die Abstammung aller Lebewesen von einem gemeinsamen Vorfahren. Weitere Gemeinsamkeiten ergeben sich durch Merkmalen im chemisch-biochemischen Bereich. Spezielle Inhaltsstoffe und die zu ihnen führenden hoch komplexen Synthesewege markieren genauso Verwandtschaften bzw. gemeinsame Vorfahren wie anatomische oder morphologische Gemeinsamkeiten.

Genetik

Dass Merkmale vererbbar sind, weiß man schon sehr lange: Tier- und Pflanzenzuchtung beruhen seit Jahrtausenden auf diesen Erkenntnissen. Die Auslese (Selektion) entsprechender Eltern mit den gewünschten Eigenschaften zur Zucht ist das, was der Geologe und Paläontologe HEINRICH GEORG BRONN mit "Zuchtwahl" übersetzte. DARWIN war es, der eine natürliche Selektion, eine "natürliche Zuchtwahl" als wichtiges Werkzeug der Evolution postulierte.

DARWIN konnte durchaus als Experte auf dem Feld der Tier- und Pflanzenzuchtung gelten: Intensiv kontaktierte und befragte er entsprechende Züchter, war bei ihren Leistungsschauen anwesend und experimentierte selbst auf seinem Landgut mit Pflanzen und Tieren. Er unternahm ähnliche Experimente wie JOHANN GREGOR MENDEL (1822-1884), der Augustiner-Mönch aus Brünn, gelangte aber nicht zu dessen Ergebnissen, da er mit komplexeren Merkmalen experimentierte und er die unübersichtlicheren Zahlenverhältnisse in seinen Ergebnissen nicht wahrnahm. Auch ein "Wahrnehmungsfehler": Die wissenschaftliche Welt nahm die Ergebnisse MENDELS erst einmal nicht zur Kenntnis; erst um die Wende zum 20. Jahrhundert wurden zum einen ähnliche Experimente wiederholt und zum anderen die Arbeiten des Brünner Mönchs wieder entdeckt.

²² Diese beiden Begriffe wurden, wie viele andere (z.B. Ökologie) von HAECKEL geprägt und eingeführt.

Wie bereits oben erwähnt, war DARWIN – wie viele seiner Zeitgenossen – von der Vererbbarkeit erworbener Merkmale überzeugt, indem er eine Einwirkung von Körperzellen auf die Keimzellen annahm. Es war der deutsche Genetiker AUGUST WEISMANN (1834-1914), der 1885 nachweisen konnte, dass es diese Verbindung im Allgemeinen nicht gibt, dass man also strikt zwischen somatischen Zellen und Keimzellen trennen muss und dass Merkmale nur über die generativen Zellen, die so genannte Keimbahn, von Generation zu Generation weitergegeben werden können.²³

Diese Erkenntnis führte zusammen mit der Entdeckung der Gesetzmäßigkeiten der Vererbung, wie sie mit den "MENDELSchen Gesetzen" begründet wurden, zu einer ganz neuen Sicht auf die Evolution. Man erkannte, dass definierbare und lokalisierbare Abschnitte im Erbgut – die so genannten Gene, Träger der Merkmale sind. Bei Fortpflanzungsvorgängen wird das Erbgut an die Nachkommen weitergegeben. Merkmalsänderungen ergeben sich durch zufällige Veränderungen dieser Gene, und so können sich Nachkommen durch Abänderungen unterscheiden. Diese Mutationen können hinsichtlich ihrer Auswirkungen negativ, neutral oder auch positiv sein. Im letzten Fall verschaffen sie ihrem Träger insofern einen Vorteil, als er mehr Nachkommen erzeugt als diejenigen mit dem ursprünglichen Merkmal. Und genau dieses – die Erhöhung der Zahl der Nachkommen – meint der Begriff der (evolutiven) Fitness. Dies betrifft sowohl die asexuelle Vermehrung z.B. durch Teilung (ein Bakterium, das resistent gegen Antibiotika ist, hinterlässt bei Einsatz solcher Stoffe einfach mehr – ebenfalls resistente – Nachkommen) als auch bei sexueller Vermehrung, bei der mütterliches und väterliches Erbgut zusammen kommen und – das ist letztlich der evolutive Vorteil von Sex – neu kombiniert werden kann, was in der Regel positive Effekte hat.

Als eminent wichtiges Werkzeug zum Verständnis vor allem der Evolution auf der unteren Ebene erwies sich die Populationsgenetik, die in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts entwickelt wurde. Dabei analysiert man das quantitative Auftreten von einzelnen Merkmalen und Merkmalszuständen auf der Ebene einer Population und kann durch entsprechende Mathematisierung und einen Vergleich zwischen verschiedenen Generationen z.B. die Wirkung der Selektion unmittelbar beobachten und modellieren. Betrachtet wurde auf dem Weg zu dieser "Modern Synthesis" auch das Verhalten kleiner Populationen, Verläufe nach der Fragmentation von Populationen oder die Abläufe in kleinen und kleinsten Populationen nach Neubesiedelung eines Areals z.B. einer Insel nach einem (zufälligen!) Fernverbreitungsereignis. Ein weiteres wichtiges Element bei der Formulierung dieser "Modern Synthesis" waren Betrachtungen zur Verteilung des

²³ Heute beginnen wir durch die Ergebnisse der Epigenetik langsam zu verstehen, dass diese Trennung nicht so strikt ist, wie über Jahrzehnte hinweg angenommen. Allerdings erfordert dies eine sehr differenzierte Betrachtung und eine sorgfältige Analyse (vgl. z.B. JABLONKA 2006 oder GILBERT & EPEL 2009).

genetischen Materials bei direkten Verwandten und die Überlegungen zur den Mechanismen der Verwandten-Selektion ("kin selection"). Damit verstand man z.B. das Verhalten eusozialer Insekten (wie Bienen oder Ameisen), bei denen zahlreiche (sterile) Arbeiterinnen ihr Leben mit der Aufzucht von Nachkommen verbringen, die nicht die eigenen sind, die aber – und das ist eine Aussage der Forschungen über Verwandten-Selektion – "ausreichend nahe" mit ihnen verwandt sind (vgl. VOLAND 2009, HÖLLDOBLER & WILSON 2009, 2011).

Die Architekten der "Modern Synthesis" waren in England RONALD A. FISHER und JOHN B.S. HALDANE, in den USA SEWALL WRIGHT. Wegweisend waren auch der bereits erwähnte THEODOSIUS DOBZHANSKY, der Botaniker G. LEDYARD STEBBINS und der aus Deutschland stammende und in Harvard lehrende und forschende Ornithologe und Evolutionsbiologe ERNST MAYR.

Molekulargenetik

Mit der Entdeckung der eigentlichen Erbsubstanz in Form der DNA als molekularem Datenspeicher standen der Evolutionsforschung ganz neue Wege offen. Zunächst wurde deutlich, dass auf dieser Ebene alle Lebewesen die gleiche hochkomplexe Sprache sprechen und verstehen, die gleichen Vokabeln, die gleiche Grammatik und die gleiche Syntax benutzen. So ergab sich auch hier noch einmal ein starkes Argument für eine "einmalige Erfindung" dieser Sprache und eine gemeinsame Abstammung aller Lebewesen.

Man begann nun, im gesamten Genom einzelne Gene zu markieren und genauer zu untersuchen. Dabei gelang es zunächst die exakte und charakteristische Struktur einzelner Gene und in den letzten Jahren durch schnellere Techniken ganzer Genome zu analysieren. Diese Feinstruktur drückt sich in der Folge von (Millionen bis Milliarden von) Basen innerhalb des langen Kettenmoleküls der DNA aus; die entsprechende Technik nennt man [DNA-]Sequenzierung. So gelang in den letzten Jahren zwei Forschergruppen unabhängig voneinander die vollständige Sequenzierung des menschlichen Genoms; mittlerweile läuft das "1000-Genome-Project". Ziel ist die Sequenzierung von 1000 menschlichen Genomen, um Informationen über die Variation im menschlichen Erbgut zu erhalten und damit nicht zuletzt die Wanderbewegungen in der Frühzeit des Menschen nachvollziehen zu können.

So untersuchte und verglich man einander entsprechende Gene bei verschiedenen Arten und stellte fest, dass sie sich – bei gleicher Funktion – doch mehr oder weniger in der Sequenz ihrer Basen unterschieden. Diese Abweichungen entstanden im Lauf der Evolution, wurden an die Nachkommen weiter gegeben, störten dabei aber ganz offensichtlich nicht die eigentliche Funktion der entsprechenden Gene. Man fand nun Gene, deren Sequenz sich offensichtlich schneller veränderte – näher verwandte Taxa zeigten schon Abweichungen untereinander - und Gene, die sich nur außerordentlich langsam verändert hatten,

also hoch konserviert waren. Wie zu erwarten ist, waren dies vor allem Gene, die für zentrale und bei allen Lebewesen gleich ablaufenden Stoffwechselforgänge verantwortlich waren. Diese sich unterschiedlich schnell veränderten Gene zog man nun zur Analyse von Verwandtschaftsverhältnissen heran: die einen zur Analyse von Verwandtschaft auf Art- oder Gattungsebene, die andere zur Analyse der Verwandtschaft von Großgruppen oder gar den Verwandtschaftsverhältnissen aller Lebewesen untereinander. Dies erfordert – wie schon erwähnt – den Einsatz von Analysemaschinen, die die Sequenz bestimmter Gene analysieren und protokollieren sowie großer und leistungsfähiger Rechenmaschinen, die aus diesen riesigen Datenmengen mit speziell dafür entwickelten Programmen entsprechende Stammbäume berechnen – am Ende steht dann ein "Tree of life", die Analyse der Hominiden (Menschen und Menschenaffen) oder ein Stammbaum, der die Verwandtschaftsverhältnisse innerhalb der Gruppe der Vögel, Reptilien und Saurier wiedergibt, einer Gruppe, die auf einen gemeinsamen Vorfahren zurückgeht, m. a. W. also monophyletisch ist.

Durch die unterschiedliche Veränderungsrate der verschiedenen Gene ist es auch möglich geworden, mit auf dieser Basis definierten "molekularen Uhren" ("molecular clocks") Aufspaltungseignisse zeitlich einzuordnen und Stammbäume um die zeitliche Dimension zu erweitern. Durch Hochleistungsrechner ist es heute möglich²⁴, bei hunderten von Taxa gleichzeitig molekulare, morphologische und biochemische Merkmale zu berücksichtigen, so dass den hierauf beruhenden Bäumen das gesammelte Wissen vieler Biologengenerationen und der verschiedensten Disziplinen zu Grunde liegt. In den letzten Jahren konnte man durch die immer größer werdende Menge und Vollständigkeit der vorliegenden Daten sowie die zunehmende Leistungsfähigkeit der Rechner und die verbesserten Programme feststellen, dass die errechneten Bäume nur noch in Details voneinander abweichen, dass also m. a. W. auf der großsystematischen Ebene eine erhebliche Stabilität erreicht wurde. Zum anderen stellte sich heraus, dass die Systeme der "vormolekularen" Zeit gar nicht so schlecht waren und in den Grundzügen (und auch in vielen Details!) durchaus mit den heutigen übereinstimmen. Viele Fragen der Vergangenheit konnten geklärt werden. So findet sich in einem der klassischen "Opera magna" der Pflanzensystematik, den vielbändigen, von ADOLF ENGLER und KARL PRANTL zwischen 1887 und 1915 herausgegebenen "Natürlichen Pflanzenfamilien" schon 1895 der Hinweis des Bearbeiters SCHUMANN, dass man die Familien der Malvengewächse, der Wollbaumgewächse, der Lindengewächse und der Kakaobaumgewächse durchaus auch als eine einzige Familie betrachten könnte. Durch molekulare Analysen wurde diese Option jetzt bestätigt und man fasst alle genannten Gruppen seit wenigen Jahren in der als monophyletisch nachgewiesenen Familie der Malvaceae (Malvengewächse)

²⁴ Auch modernste Rechner brauchen für die Berechnung umfangreicher Bäume viele Stunden Arbeitszeit!

zusammen (vgl. JUDD et al. 2007).²⁵ Auf der anderen Seite mussten auch Gruppen aufgeteilt werden, die man früher auf der Basis jetzt als analog erkannter Merkmale zusammengefasst hatte. Gruppen "incertae sedis" – also unsicherer systematischer Stellung - bekamen nun einen festen Platz zugewiesen. – Zweifel, Zweideutigkeiten und Fragezeichen konnten also geklärt und beseitigt werden. Es wird in der Zukunft ganz sicher noch Umstellungen und Neuordnungen geben, das wird aber – und da sind sich die Systematiker ganz überwiegend einig – nur noch Details und vor allem kleinere und isolierte Gruppen betreffen. Wir haben uns dem großen LINNÉschen Ziel eines "Natürlichen Systems" in den letzten Jahrzehnten doch sehr weit angenähert.

Nicht zuletzt durch molekulargenetische Untersuchungen wurde die etwa 100 Jahre alte "Endosymbiontenhypothese" bestätigt: Die Zellen höherer Organismen entstanden durch mindestens zwei "Aufnahmeereignisse". Die Mitochondrien aller und die Chloroplasten der Pflanzenzellen sind ehemals freilebende Bakterien, die in die Zelle aufgenommen wurden und mit ihnen Symbiosen eingegangen sind, dabei ihre Selbstständigkeit weitgehend eingebüßt habend. Dies ist ein beeindruckendes Beispiel für die Rolle, die Kooperation und Integration in der Evolution spielen (GEUS & HÖXTERMANN 2007).

Evo-Devo

Ganz neue Erkenntnisse erbrachten in der jüngsten Vergangenheit die Forschungen zur evolutionären Entwicklungsbiologie – kurz Evo-Devo genannt (evolutionary developmental biology). Eine aktuelle und lesbare Übersicht über die spannenden und umwälzenden Ergebnisse liegt z.B. in dem Buch von CARROLL (2008) vor. Ganz neue Einsichten eröffnet dieser moderne Wissenschaftszweig in den Ablauf "großer" Evolutionsschritte, also Prozessen, die der Makroevolution, der Entstehung höherer Taxa, zugrunde liegen könnten.

Die "Modern Synthesis" ist überwiegend eine Theorie über erwachsene Lebewesen, die um reproduktiven Erfolg konkurrieren. Sie untersucht also, wie die Selektion auf bereits bestehenden Variationen operiert. Sie sagt zunächst nicht viel darüber aus, wie solche Veränderungen entstehen. Um es etwas überspitzt zu formulieren – und dieses Aussage findet sich in der Literatur erstmals durch ARTHUR HARRIS 1904: Die "Modern Synthesis" kann zwar "the survival of the fittest" erklären, aber kaum das "arrival of the fittest" (nach GILBERT & EPEL 2009: 324).

²⁵ Für alle möglichen Sammlungen wie Herbarien, Zoologische und Botanische Gärten ergibt sich hieraus immer wieder die Notwendigkeit der Umsortierung oder Umetikettierung. Bei nur Forschern zugänglichen Sammlungen unterlässt man dies in der Regel, bei Präsentationen mit einem öffentlichen Bildungsauftrag macht dies u. U. nicht geringe Schwierigkeiten – im Botanischen Garten Darmstadt erforderte allein die erwähnte Neugliederung der Malvenverwandtschaft die Neugravur von über 100 Etiketten.

Man muss sich darüber klar sein, dass die Evolution sich entlang der Onogenesstadien, der Entwicklungswege also (engl. trajectories) vollzieht, die damit zu einem wichtigen Objekt höchst anspruchsvoller biologischer Studien geworden sind. Die klassische Genetik untersucht den Zusammenhang zwischen Genen und Merkmalen. Entwicklungsprozesse werden natürlich auch über Gene gesteuert. Es muss also Steuerungseinheiten geben, die nicht nur die Augenfarbe bestimmen, sondern auch die Entstehung eines Auges an sich. Und hier hat man in den vergangenen Jahrzehnten mit der Entdeckung solcher Steuergene bzw. Gruppen von Steuergenen faszinierende Entdeckungen gemacht – und, um es mit THOMAS MANN ("Der Zauberberg") zu sagen, "mit dessen Beginnen so vieles begann, was zu beginnen wohl kaum schon aufgehört hat."

Man fand zum Beispiel das Gen *Pax6*. Dieses Gen steuert die Augenentwicklung – und zwar universell. Lässt man das *Pax6*-Gen aus der Taufliege am Fliegenbein "arbeiten", entsteht am Fliegenbein ein fliegentypisches Facettenauge. Man fand nun, dass auch Wirbeltiere über das nahezu identische *Pax6*-Gen verfügen. Durch dieses Gen kann man z.B. am Wirbeltierembryo zusätzliche Linsenaugen erzeugen. Man beachte: In einer Gruppe steuert es die Entstehung von Linsen-, in der anderen Gruppe die Entstehung von Facettenaugen – zwei Strukturen, die sich ganz tief greifend voneinander unterscheiden. Dieses Werkzeugkasten-Gen ("toolkit gene") löst also eine ganze Kaskade von Abläufen aus, die zu den verschiedenen Augentypen führen. Aber es geht noch weiter: *Pax6* des Wirbeltiers lässt bei der Taufliege ein Facettenauge entstehen, *Pax6* der Taufliege beim Wirbeltier ein Linsenauge. Es wird deutlich, dass *Pax6* ein Gen sein muss, das uralt ist und schon dem schon lange ausgestorbenen gemeinsamen Vorfahren der Wirbeltiere und der Insekten eignete. Ähnliche Steuergene bzw. Gruppen von Steuergenen hat man in der Zwischenzeit viele gefunden, so die Hox-Gene, die die longitudinale Gliederung aller höheren Tiere steuern und die schon in ganz altertümlichen Mehrzellern vorkommen.

Auch bei Pflanzen gibt es derartige Steuergene. Allen Blütenpflanzen sind zum Beispiel Steuergene gemeinsam, die die reguläre Blütenentwicklung steuern, deren Aktivität also dazu führt, dass Kelch-, Kron-, Staub- und Fruchtblätter in der korrekten raum-zeitlichen Folge gebildet werden. Ein weiteres Beispiel: Ein großer Schritt in der Domestikation des Maises aus seinen wildern Vorfahren ist die Lösung der Verbindung zwischen den trockenen, ungenießbaren Spelzen vom eigentlichen Korn. Man kennt nun das entsprechende, weit verbreitete Steuergen und kann wechselweise beim Mais Körner mit den ihnen fest verbundenen Spelzen und bei der Teosinte, der Stammform des Kulturmais, freie Körner erzeugen. Man hat nun herausgefunden, dass die entsprechende Mutation nur aus dem Austausch einer einzigen Aminosäure besteht: eine "winzige" Mutation in einem Steuergen mit sehr großer Wirkung (vgl. GILBERT & EPEL .2009, WALLACE 2011).

Es wird immer deutlicher, dass sich größer Veränderungen durch Veränderungen in der Entwicklung und somit letztlich durch Veränderung im Bereich der Steuergene ergeben. So wird bei den Hox-Genen deutlich, dass höhere Tiere in der "Hox-Gen-Werkzeugkiste" mehr Gene als altertümliche besitzen, die zusätzlichen Gene aber oft nur wenig veränderte Kopien bereits vorhandener Gene sind. Man kann nun nachweisen, dass zu makroevolutionären Veränderungen solche Vorgänge wie Verdoppelung und Umwidmung, andere Wirkungsorte (Heterotopie), Veränderung der Wirkzeiten (Heterochronie), Veränderungen des Wirkausmaßes (Heterometrie) und Umwidmung (Heterotypie) die entscheidende Rolle spielen (vgl. WALLACE 2011).

Es ist ganz sicher, dass die Forschung im Bereich Evo-Devo in den nächsten Jahren und Jahrzehnten gerade im Bereich der Makroevolution entscheidende Fortschritte erbringen wird – bereits jetzt verstehen wir viel besser, wie es zum "arrival of the fittest" kam und kommt. In den letzten Jahren hat sich durch die Forschungen zur Epigenetik gezeigt, dass in einem gewissen, im Ausmaß erst schemenhaft erkennbaren Umfang, die Umwelt einen Einfluss auf die Formung neuer, u. U. besser angepasster Typen nehmen kann (vgl. JABLONKA & LAMB 2006) und dass das Kennzeichen der Evolvierbarkeit der Lebewesen eine neue Facette bekommen wird (vgl. z.B. WAGNER & DRAGHI 2010).

Die Zukunft wird sicher nicht allein der "Modern Synthesis" und auch nicht allein dem Evo-Devo gehören, sondern einer ganz neuen Synthese (vgl. PIGLIUCCI & MÜLLER 2010), die die weiterhin gültigen Ergebnisse der "Modern Synthesis" mit den evolutionären Entwicklungsgenetik und den Ergebnissen der Epigenetik verbinden und, wie GILBERT & EPEL 2009 vorschlagen, als "Eco-Evo-Devo" bezeichnet werden könnte. Es steht zu erwarten, dass die Ergebnisse auch aus medizinischer Sicht für uns von großer Bedeutung sein werden – Grundlagenforschung verbindet sich wieder einmal überraschend mit den angewandten Disziplinen.

Literatur²⁶

- BLUNT, W. (2001): LINNAEUS – The compleat naturalist.- Princeton University Press. Princeton (NJ).
- BOULTER, M. (2002): Extinction. Evolution and the end of man.- Fourth estate, London.
- CARROLL, S. B. (2008): Evo Devo. Das neue Bild der Evolution. – Berlin University Press. Berlin.

²⁶ Als allgemeines und für den Nicht-Spezialisten gut lesbares Werk mit Lehrbuchcharakter sei STORCH et al. 2007 und als Standardwerk in englischer Sprache FUTUYMA 2009 empfohlen. Daneben seien als kürzere Einführungen MAYR 2005 und ganz besonders das "Lese-Lehrbuch" von ZRAVY et al. 2009 genannt. Über "Eco-Evo-Devo" unterrichten GILBERT & EPEL 2009.

- CORSI, P. (2011): JEAN BAPTISTE LAMARCK: From myth to history.- In: GISSIS, S.B., JABLONKA, E. (eds.): Transformations of Lamarckism. From subtle fluids to molecular biology.- MIT Press, Cambridge (MA)
- DANZ, CH. (2011): CHARLES DARWIN und die Physikotheologie. Überlegungen zum Verhältnis von Theologie und Naturwissenschaft.- Glaube und Denken 24: 33-48.
- DARWIN, CH. (1859): On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life.- John Murray. London.
- FRANZEN, J.L. (2007): Die Urpferde der Morgenröte – Ursprung und Evolution der Pferde.- Spektrum, Heidelberg.
- Friedman, W.E. (2009): The meaning of Darwin's "Abominable mystery."- Amer. J. Bot. 96: 5-21.
- Futuyma, D.J. (2009): Evolution. 2nd ed.; Sinauer, Sunderland.
- GEUS, A./HÖXTERMANN, E. (2007) (Hrsg.): Evolution durch Kooperation und Integration. Zur Entstehung der Endosymbiontentheorie in der Zellbiologie.- Marburg.
- Gilbert, S.F., Epel, D. (2009): Ecological developmental biology. Integrating epigenetics, medicine and evolution. Macmillan.
- GOERKE, H, (1989): CARL VON LINNÉ: Arzt – Naturforscher- Systematiker.- Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft. Stuttgart.
- GOULD, S. J. (2002): Structure of evolutionary theory.- Harvard University Press, Cambridge, MA.
- HALLAM, A., WIGNALL, P.B. (2007): Mass extinctions and their aftermath.- Oxford University Press. Oxford.
- HÖLLDOBLER, B., WILSON, E.O. (2009) The superorganism. The beauty, elegance, and strangeness of insect societies.- Norton Comp., New York, London.
- HÖLLDOBLER, B., WILSON, E.O. (2011): Blattschneiderameisen – der perfekte Superorganismus.- Springer, Heidelberg.
- JABLONKA, E., LAMB, M.J. (2006): Evolution in four dimensions. Genetic, epigenetic, behavioural and symbolic: Variation in the history of life.- MIT-Press. Cambridge (MA).
- JERNSTEDT, J. (2009): DARWIN Bicenentennial: The "abominable mystery."- Amer. J. Bot. 96: 1-384.
- JUDD, W. S., CAMPBELL, CH. S., KELLOGG, E. A., STEVENS, P. F. (2007): Plant Systematics. A phylogenetic approach.- Palgrave Macmillan.
- JUNKER, R. SCHERER, S. (1988): Entstehung und Geschichte der Lebewesen. 2. Aufl., Weyel Lehrmittel Biologie, Gießen.
- KEGEL, B. (2009): Epigenetik. Wie Erfahrungen vererbt werden.- Dumont Buchverlag. Köln
- MAYR, E. (1982): The growth of biological thought: Diversity, evolution; and inheritance.- Harvard University Press, Cambridge (MA).

- MAYR, E. (2005): Das ist Evolution.- Goldmann, München.
- MORRIS, S.C. (1999): The crucible of creation. The Burgess Shale and the rise of the animals.- Oxford University Press. Oxford.
- MORRIS, S. C. (2004): Life's solution. Inevitable humans in a lonely universe. Cambridge University Press, Cambridge. (eine Teilübersetzung durch den Autor dieses Beitrags liegt unter dem Titel "Jenseits des Zufalls. Wir Menschen im einsamen Universum."- Berlin University Press (2008) vor).
- MORRIS, S.C. (ed.) (2008): The deep structure of biology. Is convergence significantly ubiquitous to give a directional signal?- Templeton Foundation Press, West Conshohocken (PA).
- NEUWEILER, G. (2008): Und wir sind es doch – die Krone der Evolution.- Klaus Wagenbach Verlag, Berlin.
- NUMMELA, S., J.G.W. THEWISSEN, S. BAJPAL, S.T. HUSSAN, K. KUMAR (2004): Eocene evolution of whale hearing.- Nature 430: 776-778.
- PIGLIUCCI, M. & MÜLLER, G.B. (2010): Evolution – The extended synthesis.- MIT Press, Cambridge (MA).
- RIDLEY, M. (2004): Evolution, 3rd ed.- Blackwell Publishing, Malden (MA).
- SARASIN, PH., SOMMER, M. (2010): Evolution. Ein interdisziplinäres Handbuch.- J.B. Metzler.
- SCHNECKENBURGER, S. (1998): In tausend Formen magst du dich verstecken - GOETHE und die Pflanzenwelt.- Palmengarten Sonderheft 29, Frankfurt am Main.
- SCHNECKENBURGER, S. (2009): DARWIN und die Blütenbiologie.- in: STÖCKLIN, J. HÖXTERMANN, E. (Hrsg.): DARWIN und die Botanik. Beiträge eines Symposiums der Schweizerischen Botanischen Gesellschaft und der Baseler Botanischen Gesellschaft zum DARWIN-Jahr 2009: 76-101.- Rangsdorf, Basiliken-Presse.
- SCHNECKENBURGER, S. (2010): Auf der Jagd nach dem "Grünen Gold": Botanische Gärten in der Zeit des Kolonialismus.- Biol. unserer Zeit 40: 411-419.
- SCHURZ, G. (2011): Evolution in Natur und Kultur. Eine Einführung in die verallgemeinerte Evolutionstheorie.- Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- STORCH, V., U. WELSCH, WINK, M. (2007): Evolutionsbiologie.- 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg.
- TAYLOR, T.N., TAYLOR, E.L., KRINGS, M. (2009): Paleobotany.- The biology and evolution of fossil plants. 2nd. Ed.- Academic Press, London, New York.
- THEWISSEN, J. G. M.; WILLIAMS, E. M.; ROE, L. J.; HUSSAIN, S. T. (2001): Skeletons of terrestrial cetaceans and the relationship of whales to artiodactyls" - Nature 413: 277–281.
- THEWISSEN, J.G.M., COOPER, L.N., CLEMENTZ, M.T., S. BAJPAL, S., TIWARI, B.N. (2007): Whales originated from auqruc artiodactyls in the Eocene epoch of India.- Nature 450: 1190-1194.

- VOLAND, E. (2009): Soziobiologie. Die Evolution von Kooperation und Konkurrenz,. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- VOLAND, E. , SCHIEFENHÖVEL, W. (eds.) (2009): The biological evolution of religious mind and behavior.- Springer, Dordrecht, Heidelberg, New York.
- VOSS, J. (2007): Darwins Bilder. Ansichten der Evolutionstheorie 1837-1874.- Fischer-Verlag. Frankfurt.
- WAGNER, G.P., DRAGHI, J, (2010): Evolution of evolvability.- In Pigliucci & Müller (2010): 379-400.
- WALLACE, A. (2011): Evolution. A developmental approach.- Wiley Blackwell, Chichester.
- ZRAVY, J., STORCH, D., MIHULKA, S. (2009): Evolution. Ein Lese-Lehrbuch..- Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Anhang: Experimentelle Ansätze

Ein wesentliches Merkmal der Naturwissenschaften erscheint in der Wahrnehmung der Zeitgenossen ihre Verankerung und Begründung im Experiment zu sein, das vornehmlich unter Laborbedingung ausgeführt werden und jederzeit mit gleichen Ergebnissen wiederholbar sein sollte. Die Evolution als ein sich über viele Millionen Jahre erstreckender Vorgang verweigert sich zunächst einmal einem solch einfach erscheinenden Zugang. Dennoch hat schon der recht wohlhabenden Charles Darwin versucht, unter den Bedingungen seines großzügigen victorianischen Hausstandes mit Garten, (Hobby-)Labor und ausreichendem Personal seine Ideen experimentell zu untermauern – was erwartungsgemäß nur für Teilaspekte Erfolge zeitigte. So gelang ihm u. a. der Nachweis negativer Effekte länger dauernder Inzucht. ERNST HAECKEL ging sogar so weit, die Evolutionsforschung als "historische und philosophische Naturwissenschaft" einzustufen, mithin ihr eine enge Nähe zum Quellenstudium der historischen Wissenschaften zuzuweisen. Etwa 100 Jahre später fordert einer der zentralen Akteure der Entwicklung der "Modern Synthesis", der Biologe ERNST MAYR anstelle einer einseitigen Ausrichtung am Experiment dessen gleichberechtigte Ergänzung durch das "klassische" Beobachten, durch Vergleich und die Ergebnisse taxonomischer und systematischer Forschung, mithin also durch die Klassifikation.

Wie steht es nun mit dem Experiment in der konkreten Evolutionsforschung? Während zahlreiche Teildisziplinen der Biologie experimentelle Wissenschaften sind und ihre Ergebnisse in diesem Sinne erzielen und überprüfen können, ist dazu die Evolutionsbiologie nur in ganz bescheidenem Umfang in der Lage. Und genau das wird ihr oft von Gegnern vorgeworfen: "Niemand hat das beobachtet! Niemand war dabei!" –einer Aussage, der man im Sinne einer Augenzeugenschaft nicht widersprechen kann. Was man unmittelbar überprüfen kann und was andererseits auch direkt auf den Menschen zurückwirkt, ist das beobachtbare Ergebnis der Selektion durch den Menschen –das, was Darwin als

"Zuchtwahl" durch den Menschen für seine Theorie inspiriert hat und das er einer "natürlichen Zuchtwahl" gegenübergestellt hat.

Sehr leicht und eindrucksvoll ist das heute bei Mikroorganismen möglich. Verhängnisvoll sind Beispiele der positiven Selektion antibiotikaresistenter Bakterienstämme, die in zunehmendem Maße zu beobachten sind. Ein Teil der Schuld trägt dabei auch eine leichtfertige oder mangelhafte Verordnungspraxis seitens der Ärzte, aber vor allem eine mangelnde Compliance vieler Patienten, die derartige Medikamente zu früh absetzen: zu früh, um den Pathogenen endgültig den Garaus zu machen, aber gerade rechtzeitig, um den resistenten selektierten Keimen das Überleben zu sichern und – vor allem in der Krankenhaussituation die Vermehrung und Ausbreitung zu ermöglichen. Andere dramatische Beispiele sind das Überspringen des HIV-Virus von Schimpansen auf den Menschen, mit der sich das Virus einen neuen "Lebensraum" erschlossen hat oder die Selektion insektizidresistenter Stämme pathogener oder Krankheiten übertragender Insekten durch den Einsatz eben dieser Mittel.

Insgesamt aber ist ein experimenteller Test der Evolutionstheorie in Einzelaspekten zwar möglich, oftmals aber ausgeschlossen - dafür sind die Zeiträume im Großen wie auch auf der Ebene der Einzelorganismen zu lang. Man wird niemals die Evolution auf der höheren taxonomischen Ebene unter kontrollierten Bedingungen im Labor ablaufen lassen können – allein unter Berücksichtigung der Zeit zwischen zwei aufeinander folgenden Generationen, die bei Menschen etwa zwanzig Jahre beträgt. So gelangen die frühen Beobachtungen auch an Tieren mit kurzer Generationszeit, an denen Darwin die Wirkung der "Zuchtwahl" (also der Selektion) durch den Menschen beobachtete. U. a. diese Beobachtungen und ihre akribische Auswertung sowie ihre Übertragung aus der laborähnlichen Situation der Tierzüchter führte Darwin zur Erkenntnis der Wirksamkeit der "natürlichen Zuchtwahl" als einem der tragenden Säulen seiner Theorie.

An dieser Stelle bietet sich dann auch ein viel genutzter experimenteller Ansatz an: Experimentiert man mit Organismen mit einer kurzen Generationszeit, lassen sich in überschaubaren Zeiträumen doch die große Reihe von Generationen beobachten und überblicken. Beim Coli-Bakterium (*Escherichia coli*) beispielsweise beträgt die Generationszeit etwa 20 min, so lassen sich z.B. während eines Tages 70, während eines Jahres etwa 26.000 Generationen überblicken und untersuchen (das würde im Hinblick auf den Menschen einem Zeitraum von etwa 650.000 Jahren entsprechen!²⁷). Hier lässt sich die Wirkung von Selektion

²⁷ Dieser Zeitraum erscheint sehr lang, aber in der Evolution des Menschen haben sich während dieser Zeit nur Veränderungen höchstensfalls auf der Artebene ergeben; die Gattung *Homo* reicht bis etwa 1.5 bis 1.9 Mill. Jahre zurück; in der Zeit vor etwa 300 000 tauchte der Neandertaler (incl. seiner unmittelbaren Vorgänger) auf, der früher als Unterart des modernen Menschen, seit neuestem aber als eigenständige Art *Homo neanderthalensis* betrachtet wird. Früheste Nachweise des (anatomisch) modernen *Homo sapiens* stammen aus Afrika und sind etwa 170 000 Jahre alt.

sehr gut beobachten und protokollieren. Den Ausgangszustand eines solchen Experiments lässt sich darüber hinaus durch einfaches Einfrieren konservieren und – z.B. für verschiedene Versuchansätze oder Wiederholungen - verfügbar halten.

Aber generell muss man zu diesen Experimenten unter Laborbedingungen konstatieren, dass sie nie konstruktiv im Hinblick auf die Evolution sein können, sondern nur rekonstruktiv²⁸ bzw. exemplarisch. Laborbedingungen und Versuche mit einzelligen Bakterien lassen sich auch nicht unmittelbar auf komplexe Ökosysteme mit hochentwickelten Tieren und Pflanzen übertragen.

© Priv.-Doz. Dr. Stefan Schneckenburger

Botanischer Garten der Technischen Universität Darmstadt
Schnittspahnstraße 3-5

64287 Darmstadt



²⁸ Dies gilt auch für die berühmten Experimente Stanley Millers aus den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts. Unter den Bedingungen, die in der frühen Erdatmosphäre geherrscht haben könnten, entstanden eine ganze Reihe organischer Verbindungen wie z.B. Aminosäuren oder einfache Zuckermoleküle. Diese Versuche unterstützen die Hypothese einer spontanen Entstehung des Lebens unter diesen Bedingungen. Aufgrund der Komplexität selbst einfachster, zu Stoffwechsel und Selbstreproduktion fähiger Zellen lässt nicht erwarten, dass dieser Vorgang in Gänze unter Laborbedingungen nachgestellt und mit Erfolg ausgeführt werden wird.