

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/283734367>

Die Evolution der Tiere Begleittext zum Poster „Die Evolution der Tiere“, mit dem Text der Hörbuch- Doppel-CD: „Die Evolution“ (1) Das Leben entsteht (2) Das Tierreich. Der Mensch. (...)

Article · August 2007

CITATIONS

0

READS

2,561

3 authors:



Michael Gudo

Morphisto – Evolutionsforschung und Anwendung GmbH

93 PUBLICATIONS 271 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Manfred Grasshoff

Morphisto – Evolutionsforschung und Anwendung GmbH

68 PUBLICATIONS 285 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Tareq Syed

22 PUBLICATIONS 145 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

QUERSCHNITTE

Materialien für Unterrichtsvorbereitung
und Selbststudium

Jahrgang 2 • Heft 7 • August 2007

7

Die Evolution der Tiere

Begleittext zum Poster „Die Evolution der Tiere“, mit dem Text der Hörbuch-Doppel-CD: „Die Evolution“

- (1) Das Leben entsteht**
- (2) Das Tierreich. Der Mensch.**
- (3) Der molekularbiologische Stammbaum der Tiere**

Vorwort des Herausgebers

Seit jeher versuchen Biologen eine Geschichte des Lebens auf der Erde darzustellen. Entsprechend vielfältige Darstellungen gibt es. Die wenigsten jedoch zeichnen ein Gesamtszenario. Zudem implizieren vor allem die älteren Darstellungen von Stammbäumen eine Höherentwicklung der Organismen und stellen den Menschen als die Krone der Schöpfung an die Spitze der Evolutionsleiter. Nach heutiger Sicht hat der Mensch – ebenso wie der Fisch, der Wurm oder der Schwamm – eine viele Millionen Jahre andauernde Evolutionsgeschichte hinter sich und nimmt seinen Platz mitten im Tierreich ein – ohne biologische Sonderstellung.

Die Pfade der Evolutionsgeschichte zu rekonstruieren und nachzuzeichnen, ist ein Forschungsfeld der Evolutionsbiologie. Hier spielen populationsdynamische und biogeographische Aspekte – mit anderen Worten: der Rassen- und Artenwandel – eine ebensolche Rolle wie der Wandel der Körperkonstruktionen, also die Frage nach dem „Wie“ der Umwandlung. Der Artenwandel wird anhand von Merkmalsveränderungen untersucht, der Konstruktionswandel hingegen kann nur ausgehend von einer ingenieurmäßigen Betrachtung des Aufbaus, d.h. der Konstruktion der Organismen, rekonstruiert werden. Eine solche Sichtweise vermittelt die am Senckenbergmuseum in Frankfurt am Main entwickelte Konstruktionsmorphologie und

Frankfurter Evolutionstheorie (siehe Heft Nr.6). Sie versteht Lebewesen als energiewandelnde, hydraulische Konstruktionen und stellt Evolution als naturgesetzlich notwendige Optimierung, Ökonomisierung und Differenzierung von Körperkonstruktionen dar.

Bereits 1992 erschien das Poster „Die Evolution der Tiere“ in der ersten Auflage. Die damalige Konzeption war grundlegend neu: Alle Baupläne des Tierreiches wurden schrittweise von der Körperkonstruktion eines gemeinsamen Vorfahren abgeleitet. Hierzu wurden hypothetische Zwischenstadien dargestellt, die nicht mehr umkehrbare Umwandlungsschritte repräsentieren und damit erstmals klare Begründungen für die „Lesrichtung“ der jeweiligen Evolutionsreihen liefern. Seit der 1. Auflage des Posters sind viele neue Erkenntnisse hinzugekommen, und die Ergebnisse wurden mittlerweile molekularbiologisch bestätigt.

Das vorliegende Heft ist das Begleitheft zum Poster „Die Evolution der Tiere“ in der 4. Auflage 2007. Zugleich gibt es den gesprochenen Text der Doppel-CD „Die Evolution“ wieder. Der Fließtext des Heftes entspricht dem gesprochenen Text auf den beiden CD's, die Exkurse, Abbildungen und der Beitrag auf S. 46-47 sind Ergänzungen und dienen der Erläuterung des Posters.

Dr. Michael Gudo,
Geschäftsführer Morphisto GmbH

Verlag:

Khorshid Verlag, Frankfurt

Herausgeber:

Morphisto - Evolutionsforschung und Anwendung GmbH
Senckenberganlage 25, D-60325 Frankfurt am Main

Autoren:

Hörbuchtext: Dr. Manfred Grasshoff (S. 3 – 45)
Exkurse & Abb.: Dr. Manfred Grasshoff & Dr. Michael Gudo
Kapitel 3: Dr. Tareq Syed (S. 46 – 47)

unter Mitarbeit von:

Prof. Dr. Wolfgang Oschmann, PD. Dr. Joachim Scholz, Dr. Holger Granz, Prof. Dr. Dr. Mathias Gutmann, Dr. Tareq Syed

Jahrgang:

Jahrgang 2, Heft 7, Datum: 15.08.2007,
Frankfurt am Main: Khorshid Verlag 2007, ISSN 1862-4839

Erscheinung:

Erscheint in unregelmäßigen Abständen,
Subskription: 6,50 EUR pro Heft
Einzelheft: 7,- EUR pro Heft

Lektorat:

Dr. Karin Afshar

Externe Begutachtung:

Dr. Jens L. Franzen, Dr. Gera Levit, Prof. Dr. Stefan D. Peters

Layout, Satz und Grafik:

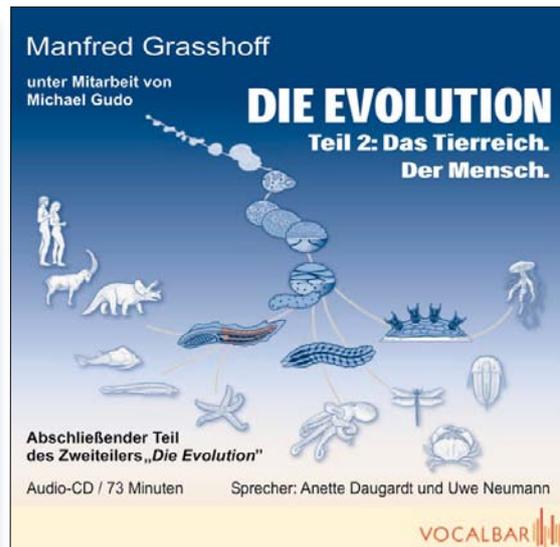
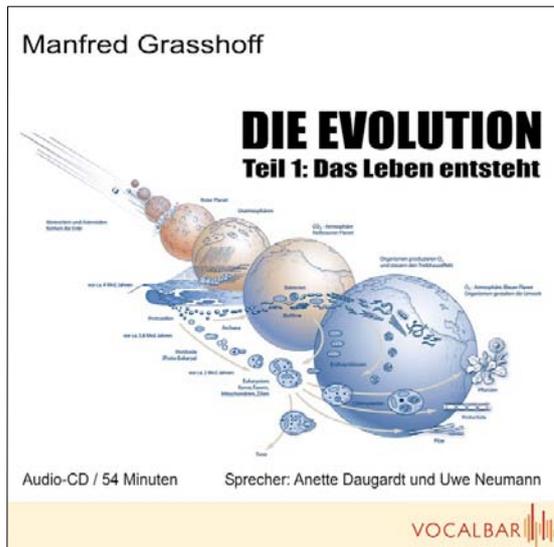
STELZNER Illustration, 60323 Frankfurt am Main
www.stelzner-illustration.de

Bezug:

Morphisto GmbH, email: info@morphisto.de,
Internet: www.morphisto.de, Tel.: 0180 / 5226880-708

1. Die Evolution – Teil 1: Das Leben entsteht

Dr. Manfred Grasshoff, Senckenberg-Institut, Frankfurt am Main, e-mail: mgrasshoff@senckenberg.de



Der folgende Beitrag ist der wörtliche Abdruck des Hörbuches „Die Evolution – Teil 1: Das Leben entsteht“ und „Teil 2: Das Tierreich. Der Mensch.“, von Dr. MANFRED GRASSHOFF, erschienen im Vocalbar-Hörbuchverlag, 2007, ISBN: 978-3-939696-01-8. Der wörtliche Inhalt der CD wird ergänzt um Abbildungen mit Untertiteln und durch einige Exkurse, die weiterführende Informationen geben und sich auf das in der E. Schweizerbart'schen Verlagsbuchhandlung erschienene Poster „Die Evolution der Tiere“, 4. Auflage 2007, ISBN: 978-3-510-61386-1, beziehen (siehe Abb. 6, S. 18).

Einleitung

Die Geschichte der Evolution ist einmalig. Die Tatsache, dass es im rauhen, kalten, lebensfeindlichen Universum einen kleinen Flecken gab, auf dem Leben entstehen konnte, scheint wie ein Wunder. Und doch wissen wir heute: Es spielte sich alles im Rahmen der Naturgesetze ab, es war eine Folge der Entstehung unseres Planetensystems und unserer Erde, es war kein übernatürliches Ereignis, welches gerade hier Leben entstehen ließ.

Über den Beginn der Welt und des Lebens hat der Mensch, dieses sinn- und grundsuchende Wesen, seit jeher nachgedacht. Viele der schönsten Erzählungen verdanken wir diesem Nachdenken. Vom Gaia-Mythos der Griechen, den Schöpfungsgeschichten des Alten Testaments, dem Gilgamesch-Epos, den Schöpfungs- und Entstehungsmythen der Indianer, der Inder, der Chinesen, bis zu den vielen tausend schriftlich und mündlich tradierten Sagen aller Völker: Sie alle versuchen in

lyrischen oder epischen Worten zu erklären, wie die Welt, wie das Leben begann.

Die Geschichte, die wir hier erzählen, ist nüchterner. Sie ist die wissenschaftliche Sicht auf die Evolution, wie sie heute, im 21. Jahrhundert, gesehen wird. Hier geht es um Kausalitäten, Ursachen und Wirkungen, um chemische Elemente und um physikalische Gesetzmäßigkeiten. Es geht darum, wissenschaftlich plausible Gründe für Theorien darzulegen und Beweise für historische Sachverhalte zu liefern. Sie will sich damit nicht in Konkurrenz gegen die großen, die Menschheitsgeschichte prägenden Werke stellen – sie könnte es auch nicht. Die hier erzählte Geschichte möchte zeigen, wie das Phänomen Evolution heute gedeutet wird, und welche Wirkmechanismen man heute hinter ihr feststellen kann, mit einem Wort: Sie vermittelt ein zeitgemäßes Verständnis von Evolution und Evolutionstheorie.

Was ist Evolution?

Mit dem Begriff Evolution bezeichnet man die allmähliche Veränderung der Lebewesen durch Generationen und Zeiträume. Durch die Veränderungen entstehen dauernd neue Lebensformen und andere verschwinden, sie sterben aus. Der ständige Wandel ist eine Natur-Tatsache, genauso, wie die Kugelgestalt der Erde oder die Tatsache, dass die Erde um die Sonne kreist. D.h. nicht, dass diese Tatsachen für die Menschheit immer klar waren, im Gegenteil, es hat lange gedauert, bis sie erkannt, und vor allem, bis sie allgemein akzeptiert waren.

Dass die Erde die Gestalt einer Kugel hat, erkannte THALES VON MILET schon vor circa 2500 Jahren, und man hielt sie für im Mittelpunkt der Welt stehend. Die Erkenntnis von NIKOLAUS KOPERNIKUS, dass sich Erde und Planeten um die Sonne bewegen, setzte sich nur langsam und gegen erhebliche Widerstände durch, mit denen GALILEI noch mehr als hundert Jahre später zu kämpfen hatte.

Ganz ähnlich entwickelte sich die Erkenntnis nur langsam, dass ständiger Wandel, dass Evolution eine Naturerscheinung ist. Zwar gab es Evolutionsgedanken schon immer; sie waren aber mythischer oder religiöser Art. Erst in der Mitte und

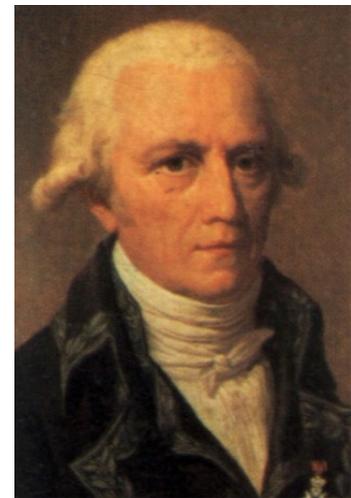


JAMES HUTTON

zu Ende des 18. Jahrhunderts wurden Beobachtungen in der Natur mit allmählicher langfristiger Veränderung erklärt. Im Jahr 1756 (dem Geburtsjahr MOZARTS) deutete der schottische Naturforscher JAMES HUTTON die in Gebirgen gefundenen Meeresmuscheln und -schnecken damit, dass die Gesteine allmählich gehoben und dann wieder in die Tiefe sin-

ken würden; er nahm einen Kreislauf der Gesteine an, d.h. eine zyklische Evolution. Es braucht kaum erwähnt zu werden, dass das den Widerspruch kirchlicher Kreise hervorrief; solche Gedanken liefen ihren Vorstellungen zuwider, die eine Entwicklung in einer Richtung annahmen, nämlich von der Schöpfung hin zum Weltende.

Es war der Biologe JEAN LAMARCK, der erstmals in einer umfangreichen Schrift, seiner „Philosophie zoologique“ von 1809, für das Tierreich den Gedanken einer durchgehenden Evolution vortrug. LAMARCK kann zu recht als der Begründer der Einsicht gesehen werden, dass alle Tiere durch allmähliche Veränderung, durch Evolution, entstanden sind. LAMARCK war in erster Linie



JEAN BAPTISTE LAMARCK

Zoologe und schrieb deswegen über Tiere, aber es versteht sich, dass das Gleiche für alle Lebewesen einschließlich der Pflanzen gilt.

LAMARCK kam zu früh, seine Einsicht setzte sich nicht durch. Seine Zeitgenossen und Widersacher, allen voran sein Kollege am Museum Paris, GEORGES CUVIER, konnten in den Tieren nur festgefügte Baupläne sehen, an denen jede Veränderung zum Kollaps führen müsste. Vor allem CUVIER sah sich durch seine Untersuchungen an den Fossilien bestätigt, die in reicher Anzahl gefunden und in die wissenschaftlichen Institute gebracht wurden.

Der gesellschaftliche Durchbruch der Erkenntnis, dass Evolution ein Naturvorgang ist, kam erst mit CHARLES DARWIN. Und vermutlich wäre auch sein Werk „The Origin of Species – Der Ursprung der Arten“ von 1859, nur wissenschaftlichen Kreisen eine Beachtung wert gewesen, hätte DARWIN nicht



CHARLES DARWIN

den provokanten Satz eingefügt: „Light will be thrown on the origin of man and his history – Licht wird fallen auf die Herkunft des Menschen und seine Geschichte“. Das konnte nur bedeuten: der Mensch stammt aus dem Tierreich, er stammt aus der Verwandtschaft der Affen. Der Schock war ungeheuer. Es war offenbar: Die Welt ruht nicht in

Ordnung, sie ist dynamisch, und Evolution ist die Realität. Behagliche Ruhe und Gewissheit waren zerrissen, die Welt war aus den Fugen. Viele Menschen fühlten sich von DARWIN verstört und beleidigt wie von keinem anderen je zuvor, doch für andere waren seine Ausführungen die Offenbarung schlechthin und er selbst der Held der Wissenschaft.

Die Ziele der Evolutionsforschung

Was treibt die Veränderungen an? Was geschah in der Vergangenheit? Wer stammt von wem ab? Es sind Fragen, denen die Evolutionsforschung nachgeht. Sie verfolgt dabei zwei Ziele, die auf den ersten Blick nichts miteinander zu tun haben. Zum ersten geht es um die Ursachen, um die Antriebe des Geschehens. Sie fragt also nach den Prinzipien, den Mechanismen, die hinter der beobachtbaren Veränderung wirken. Das lässt sich an den heute lebenden Organismen, an Tieren, Pflanzen und Bakterien untersuchen.

Zum anderen geht es der Evolutionsforschung um den Ablauf des Geschehens in der Vergangenheit. Das ist historische Forschung; sie muss den geschichtlichen Ablauf rekonstruieren. Die Frage, was in der Vergangenheit geschah, soll uns hier

beschäftigen. Deswegen nur wenige Worte zu den Ursachen des Wandels.

Es ist heute Allgemeingut des Wissens, dass Veränderungen in den Genen zu Veränderungen im Körper führen, die schließlich über sehr lange Zeiträume die Arten verändern und damit neue Arten hervorbringen. So einfach das auch erscheint, ist es doch nur ein Teil der Wahrheit, denn die Gene sind nur ein Stellglied unter vielen bei den Abläufen, die in einem Lebewesen andauernd stattfinden. Tatsächlich sind neben den Genen auch andere chemische Komponenten im Körper veränderlich. Und tatsächlich ist das Leben eines Organismus eine Geschichte ständiger Veränderungen. Von der befruchteten Eizelle über das Wachsen des Embryo, das Jugendalter und die Fortpflanzungsphase bis hin zu Alter und Tod verschieben sich im Körper andauernd die inneren Funktionen und Aufbauten. Zudem müssen ständig die chemischen Bausteine, die Moleküle, erneuert werden, weil sie selbst altern, d.h. chemisch zerfallen. Man geht davon aus, dass im Körper eines Menschen innerhalb von sieben Jahren sämtliche Moleküle abgebaut und durch neue ersetzt sind – d.h., dass der Körper eines Erwachsenen kein einziges jener Moleküle mehr besitzt, mit denen er als Säugling auf die Welt kam.

Der Wandel verläuft in jedem Organismus vom Beginn über das Erwachsenenstadium bis zum Tod, und er setzt sich fort über die Nachkommen, denn sie sind nicht völlig identisch mit den Eltern. D.h., der Wandel ist nicht aufzuhalten, er vollzieht sich weiter durch die Generationen und verändert allmählich die Struktur der Lebewesen. Die Gesamtheit dieses organismischen Wandels nennt man Morphoprozess. Morphoprozess bedeutet direkt übersetzt in etwa Formwandel. Jeder Organismus ist nur ein vorübergehender Träger des Morphoprozesses, der Organismus stirbt, aber das Leben setzt sich über die Nachkommen fort: Das Leben bleibt erhalten.

Die Lebewesen, die Organismen, könnten ohne ständigen Wandel gar nicht existieren. Man sagt, Wandel ist dem Organismus als System immanent. „Statisches Leben“ ist ein Widerspruch in sich, ohne Wandel gibt es keine Lebewesen und kein Leben. Evolution ist also eine naturbedingte Tatsache. Sie hat keinen wie auch immer gearteten mystischen Grund.

Wir wollen uns hier mit Fragen befassen, die die Frühzeit der Organismen und ihrer Entwicklung betreffen: Warum und wie konnte Leben auf der Erde entstehen? Warum ist es nicht wieder verschwunden? Wie hat sich der Prozess des Formwandels aufgebaut, der nun seit fast vier Milliarden Jahren läuft? Ist sein Ende abzusehen?

Vorbedingungen des Lebens auf der Erde

Dass es überhaupt Leben auf der Erde gibt, ist der Entwicklung unseres Planetensystems zu verdanken. Nur auf dem Planeten Erde konnte Leben entstehen, nur hier konnte es sich auf Dauer halten.

Unser Planetensystem entstand vor etwa fünf Milliarden Jahren. Nach einer gewaltigen Explosion, einer Super-Nova, flachte sich eine rotierende Materiewolke zur Scheibe ab. Nahezu das gesamte Material sammelte sich aufgrund der Gravitation in ihrer Mitte und wurde hier zur Ur-Sonne. In ihr begannen nukleare Prozesse, d.h. Kernverschmelzungen, mit entsprechender Hitzeentwicklung und Strahlung. Die restliche verbliebene Materie, die weiter außen geblieben war, ballte sich in Wirbeln zu zahlreichen festen und gasförmigen Körpern. Kamen sie sich zu nahe, stürzten sie ineinander und bildeten so die heutigen Planeten. Die Planeten der inneren Umlaufbahnen sind fest, wie Merkur, Mars, Venus und Erde, die weiter außen kreisenden sind riesige Gasbälle, wie Jupiter und Saturn.

Die noch zähflüssige heiße Ur-Erde kollidierte mit einem anderen Ur-Planeten. Die Massen der beiden vermischten sich, doch der Einschlag war so heftig, dass ein Teil davon ins All geschleudert wurde. Dieser kleinere Teil blieb auf einer Umlaufbahn um den größeren Teil gefangen. Es waren Erde und Mond entstanden. In der Folge dieses Ereignisses stabilisierte sich die Rotationsachse der Erde. Sie steht gegenüber der Ebene der Umlaufbahn leicht schräg und bedingt so die Jahreszeiten. Die Rotations-Geschwindigkeit, die wir in 24 Stunden messen, ist nun gerade so, dass sich die von der Sonne eingestrahlte Energie einigermaßen gleichmäßig verteilt: Erhitzung am Tage und Abkühlung in der Nacht sind nicht allzu groß. Ebenso sind die Unterschiede in den durch die Schrägstellung der Achse bedingten Jahreszeiten Sommer und Winter nicht zu lange und nicht zu groß, und dauernde Eiskälte herrscht nur an den Polkappen. Diese Eigenheiten von Rotation und Schrägstellung der Achse gehören zu den Bedingungen, unter denen Leben auf der Erde entstehen und sich dann auch dauerhaft halten konnte.

Mit allmählicher Abkühlung stieg leichteres Material aus dem Erdinneren auf und verfestigte sich an der Oberfläche zur Erdkruste. Sie ist mit ca. zwölf Kilometern Stärke allerdings nur hauchdünn, gemessen an den zwölftausend Kilometern Gesamt-Durchmesser des Erdballs. In ihr liegen die leichteren Massen der Kontinente wie Platten über den etwas schwereren Massen der heutigen Ozeanböden.

Die Kontinental-Platten werden durch Bewegungen im zähflüssigen Untergrund des Erdinneren verschoben, an andere gepresst, dabei schieben sich Gesteinsmassen hoch, und es entstehen Gebirge. Kontinentale wie auch ozeanische Massen können schließlich an den Rändern in die Tiefe abtauchen. Sie werden wieder eingeschmolzen, und neues Material steigt aus der Tiefe auf. An den mittelozeanischen Gebirgsrücken ist unmittelbar zu beobachten, wie Tiefenmaterial aufquillt. Diese Dynamik, die man Plattentektonik nennt, hält bis heute an. Deswegen gibt es nur an ganz we-

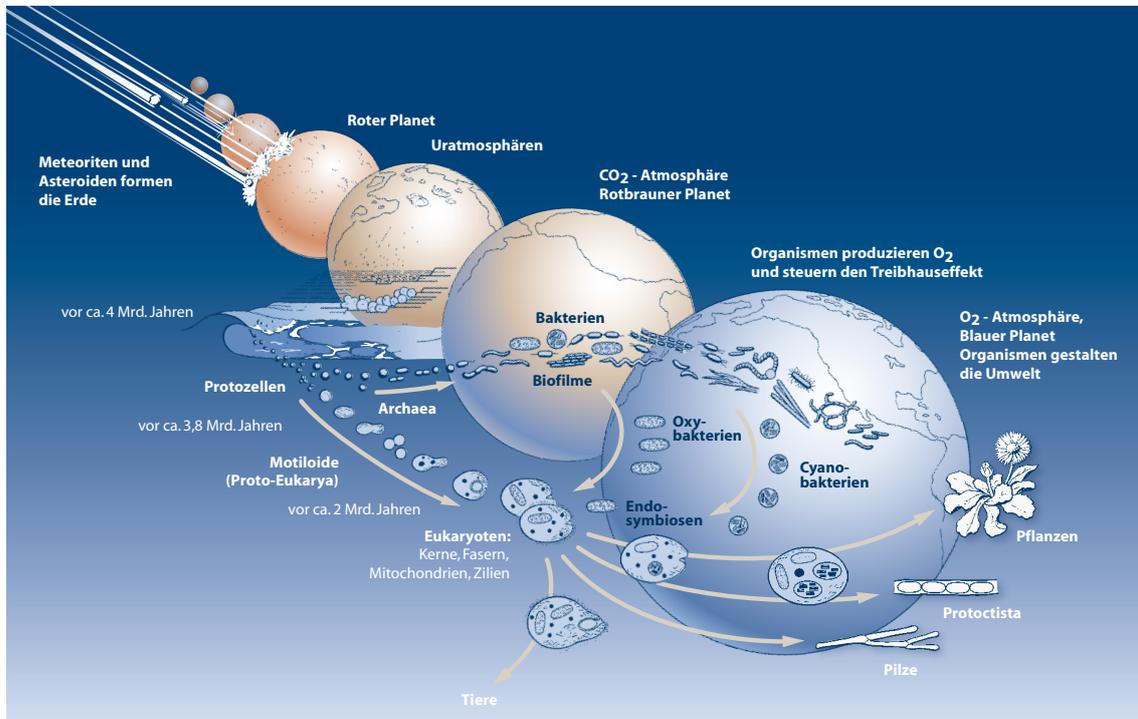


Abb. 1. Der Planet Erde und die Entwicklung des Lebens. – Oben: Roter Planet, Meteoriten und Asteroiden ballen sich zur glutflüssigen Erde zusammen, es bilden sich die Uratmosphären. – Mitte, präbiotische Phase: Rotbrauner Planet. CO₂-Atmosphäre ohne freien Sauerstoff. Urzeitliche Biofilme, Verwirbelungen, Protozellen (Präzyten). Frühe Formen des Lebens: Vielfalt der Bakterien, Archaea und ihnen ähnliche Motiloide (Proto-Eukarya). Rechts: Blauer Planet durch die Wirkung freien Sauerstoffs. Zellen mit Zellkern (Eukaryota), Endosymbiosen als weitere Schritte zur Vielfalt der Organismen.

nigen Stellen auf den Kontinenten noch Gesteine, die älter als sechshundert Millionen Jahre sind. Das Meiste ist längst wieder abgetaucht und aufgeschmolzen.

Die ganz leichten Elemente und Verbindungen, die ursprünglich im Erdinneren eingeschlossen waren, entwichen als Gase und bildeten eine Ur-Atmosphäre. Sie enthielt keinen Sauerstoff, sondern bestand im Wesentlichen aus Wasserdampf, Stickstoff, Stickoxiden, Methan, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid (als CO₂ bekannt) und Schwefelwasserstoff, und sie war somit viel dichter und schwerer als unsere heutige Atmosphäre. Das leichteste aller Elemente und Gase, der Wasserstoff, entwich ins All. Die noch sehr starke Aktivität der Vulkane fügte Staubteilchen und feinste Tröpfchen, sogenannte Aerosole, hinzu. Für sichtbares Licht war diese Atmosphäre fast undurchdringlich, gleichwohl konn-

te UV-Strahlung, damals noch durch das Fehlen einer Ozonschicht in der Höhe ungebremst die Erdoberfläche erreichen. Bei weiter schreitender Abkühlung kondensierte schließlich das Wasser, und ein Millionen Jahre dauernder Regen strömte über die Kontinente. Er wusch Mineralien vom Gestein und füllte die Senken als Seen und Ozeane. Der Treibhauseffekt der Gase ließ zwar die Temperatur auf weit über 100°C ansteigen. Trotz der hohen Temperatur war das Wasser flüssig, weil der Atmosphärendruck angesichts der Dichte der Gase sehr hoch war. In dieser Situation konnten im Wasser viele Kohlenstoff-Verbindungen entstehen; man nennt sie organische Moleküle, da sie heute vor allem die molekularen Bausteine der Organismen sind. UV-Strahlung und elektrische Entladungen wie Blitze tragen zur Synthese solcher Verbindungen bei, wie Laborversuche zeigen.

Die wesentlichen Umsetzungen, d.h. die wesentlichen chemischen Reaktionen der organischen Moleküle miteinander konnten (und können auch heute noch) nur im Wasser geschehen. Die Gewässer bestanden damals wie heute aus feuchten Filmen auf Gestein, aus Tümpeln, Bächen, Flüssen, Seen und Ozeanen mit Ebbe und Flut und mit Überschwemmungs- und Austrocknungsgebieten, unter hohem atmosphärischem Druck stehend, voller Minerale und organischer Moleküle. In diesen vielfältigen Bereichen der Hydrosphäre, der Welt des Wassers, spielten sich ebenso vielfältige chemische Umsetzungen ab, die es unter heutigen Verhältnissen nicht mehr geben kann. Man nennt die Hydrosphäre jener Zeit „Ursuppe“, doch besser müsste man von vielen Ursuppen sprechen, die sich an vielerlei Stellen befanden und sich hier und da mischten. Die damalige Situation auf der Erde nennt man präbiotisch – d.h. vor dem Leben –, denn diese Gemische miteinander reagierender Stoffe waren durchaus noch kein Leben. Dazu bedurfte es weiterer Entwicklungsschritte.

Die frühesten Organismen: Leben entsteht

Alle Lebewesen, von der Bakterie bis zum Menschen, haben eine Begrenzung, im einfachsten Fall eine Hülle, Membran genannt; von ihr sind sie umschlossen. Zudem setzen sie Stoff und Energie um, sowohl im Inneren wie auch mit ihrer Umgebung. Auch das gilt für alle Lebewesen: für die Butterblume, den Steinpilz, den Schwan, die Spinne. Beide Eigenschaften, das Ausbilden einer Membran und der Stoff- und Energiewechsel, konnten in den geschilderten Ur-Suppen schrittweise entstehen.

Vor allem an Mineral-Oberflächen konnten sich organische Moleküle als dünne Lagen zu solchen Systemen von Stoff- und Energie-Wechsel organisieren. Zudem bildeten sich aus relativ einfachen Molekülen, den Lipid-Molekülen, flache Membranen. Die Lipidmembran kann schnell wachsen, indem sich weitere Moleküle einlagern. Bei Verwirbelung zerreißt diese Membran, aber ihre Ränder

verschmelzen, so dass sich kleine Hohlkugeln bilden, die wir Vesikel nennen.

In diese Hohlkugeln oder Vesikel wurden nun die Inhaltsstoffe der Ursuppe und die geschilderten Systeme von Stoff- und Energie-Umsatz eingeschlossen. So blieben sie im Wasser schwebend auf längere Dauer zusammen und konnten weiter miteinander reagieren. Die Vesikel konnten durch Einlagerung weiterer Lipid-Moleküle wachsen oder auch zerbrechen, sodass zwei kleine Vesikel blieben, und entsprechend konnten kleine Vesikel zu größeren zusammenfließen. Moleküle wurden damals wie heute durch die Membran hindurch von Innen und Außen ausgetauscht, und zudem hielt die Membran auch größere Moleküle dauerhaft fest.

Die Lipidmembran ist bis heute einer der Grundbausteine aller Lebewesen, von den einfachsten Bakterien bis zu den Zellen der Pflanzen und der Tiere. Daran hat sich nie wieder etwas geändert. Es ist eine der Konstanten, die alle Lebewesen kennzeichnet. Hier zeigt sich ein für die Evolutionsforschung wichtiger Gesichtspunkt: sie beschäftigt sich nicht nur mit dem ständigen Wandel, sie berücksichtigt auch, was sich nicht ändert.

Wegen der vielfältigen Eigenschaften der in Vesikel eingeschlossenen Verbindungen, vor allem wegen der Größe der Protein-Moleküle, stellte sich zunehmend eine Ordnung ein, die den Vesikelsystemen eine neue Qualität verlieh. Dadurch konnten chemische Umsetzungen gleichzeitig oder auch in geregelter Nacheinander ablaufen. Die Stoffkombinationen in den Vesikeln war nun nicht mehr rein zufälliger Natur, sondern auch Ergebnis der im Inneren ablaufenden Reaktionen. Manche Stoffe wurden und werden selbst synthetisiert, andere von außen aufgenommen.

Präzyten (Protozellen)

Wir nennen die Vesikel von diesem Stadium an Präzyten, d.h. Vorläufer von Zellen. In ihnen waren die Eigenschaften erfüllt, die typisch für Organismen sind:

- (1) Die Präzyten waren Individuen, nämlich in sich geschlossene Einheiten mit einer Umhüllung, einer Membran.
- (2) Sie waren Energiewandler, denn sie hatten Stoff- und Energie-Umsatz im Inneren und mit der Umgebung, und sie stellten eigene Stoffe her.
- (3) Sie hatten eine flexible Hülle aus Membran und eine flüssige Füllung, man nennt dies ein hydraulisches System.
- (4) Sie bewegten sich im Inneren.
- (5) Die Präzyten zeigten Wachstum und Vermehrung, denn sie konnten sich teilen und mit anderen vereinen.
- (6) Sie waren autonom, denn an ihren inneren Strukturen und Aktionen entschied sich, was sie aufnehmen und verarbeiten und wo sie existieren oder nicht existieren konnten. Alle Kennzeichen von Organismen waren erfüllt.

Wir können konstatieren: Lebewesen, Organismen, waren entstanden.

Fazit: Leben auf der Erde

Fortan war Leben auf der Erde. Es war auf ganz unspektakuläre Weise entstanden, allmählich, und aufgrund von Prozessen, die wir aus der Chemie gut kennen. Allerdings konnte das nur in jenem Zeitraum der Entwicklung unseres Planetensystems und unserer Erde geschehen, in dem die Zusammensetzung der Atmosphäre und Hydrosphäre diese Abläufe zuließen. Diese Situation, die etwa vor 4 Milliarden Jahren gegeben war, und die damaligen Vorgänge haben für unser Verständnis etwas Außergewöhnliches, vielleicht Unvorstellbares. Man muss sich vergegenwärtigen, wie die uns vertraute helle lichtvolle Erde damals

aussah: umhüllt von giftigen Gasen, überhitzt, unter hohem Druck, ohne Sauerstoff, von zahlreichen Vulkanen mit immer neuen CO₂-Wolken aufgeladen und immer neuen Staubwolken befrachtet, unter gelbroter Sonne, unter düster rötlichem Himmel, nachtdunkel und doch unter harter UV-Strahlung, ohne jegliches Leben, eine riesige Ansammlung chemischer Reaktions- und Verwirbelungs-Gebilde in Tropfen, Tümpeln, Bächen, Flüssen und Ozeanen. Und doch: Gerade darin ist das Leben entstanden, nur hier konnte es entstehen.

Mag die Vorstellung dieser Szenerie auch etwas Unheimliches haben, so bedarf doch die Erklärung der Vorgänge keineswegs des Mystischen. Hier ist kein wie auch immer gearteter Schöpfer oder Dämon am Werk. Im Gegenteil, mit Erstaunen ist die Zwangsläufigkeit zu vermerken, mit der es unter diesen Umständen zur Entwicklung der ersten Lebewesen kam, und mit Erstaunen ist die Tatsache zu vermerken, dass

| | | |
|-----------------------------|--------------|--|
| Känozoikum (Erdneuzeit) | Neogen | Entstehung des Menschen |
| | Paläogen | 23,8 Ma Ausbreitung der Säugetiere |
| Mesozoikum (Erdmittelalter) | Kreide | 65 Ma Aussterben der Dinosaurier |
| | Jura | 144 Ma Ausbreitung der Dinosaurier |
| | Trias | 206 Ma Entstehung der Dinosaurier |
| Paläozoikum (Erdaltertum) | Perm | 248 Ma Säugetierähnliche Reptilien |
| | Karbon | 290 Ma Ausbreitung der Landwirbeltiere |
| | Devon | 345 Ma Fische gehen an Land |
| | Silur | 417 Ma Fische mit Schuppen und Skelett |
| | Ordovizium | 443 Ma erste kieferlose Fische alle Grundbaupläne sind vorhanden |
| | Kambrium | 490 Ma Diversifizierung der Baupläne erste mineralisierte Hartteile |
| Erd-Urzeit (Proterozoikum) | Prä-Kambrium | 540 Ma Gallertoide-Diversität 600 Mio Jahre einfache Körperfossilien Vielzellige Tiere 800 Mio Jahre erste Körperfossilien/ Abdrücke 900 Mio Jahre Eukaryonten 1 Mrd. Jahre Sauerstoffkrise 2,0 Mrd. Jahren erste Riffe, Stromatolithen 3,5 Mrd. Jahre Protozellen 3,8 Mrd. Jahren Chemo-Evolution Entstehung der Erde vor 4,8 Mrd. Jahren |



Abb. 2: Gebänderte Eisenerze. Sie entstehen durch wechselweise Ablagerung von zweiwertigem und dreiwertigem Eisen als Oxide. Der zur Oxidation nötige Sauerstoff wurde von Cyanobakterien produziert. Rote Lagen enthalten Eisen-III-Oxid („Rost“), schwarze Lagen bestehen aus Eisen-II-Oxid, gelbe Lagen aus Pyrit. Foto: SVEN TRÄNKNER, Senckenberg.

das Leben nicht alsbald wieder erlosch, sondern über Jahrmilliarden seinen Fortgang nahm, ja sogar zwangsläufig seinen Fortgang selbst sicherte.

Frühe Formen des Lebens: Bakterien verändern die Erde

Das Archaikum

Für die ersten zwei Milliarden Jahre seit Entstehung des Lebens besiedelten Bakterien die Erde ganz allein; und in dieser langen Zeit haben sie durch ihre Stoffwechsellätigkeit die Erde entscheidend geprägt. Wir nennen diese Zeit „Archaikum“.

Zwar ist der Körper der Bakterien auf winzige Dimensionen festgelegt. Aber sie können sich durch

einfache Teilung sehr schnell vermehren; unter günstigen Umständen kann sich ihre Anzahl in einer halben Stunde verdoppeln. Die Masse macht es: Trotz der geringen Körpergröße können sie erhebliche Mengen von Stoff und Energie umsetzen. Zudem können wegen der hohen Teilungsraten immer neue genetische Varianten entstehen, die entsprechend andere Varianten von Stoffwechsel zeigen. Ein Austausch von genetischem Material geschah und geschieht auf indirektem Wege: Bakterien können frei in der Umgebung liegendes genetisches Material aufnehmen, das durch Auflösung anderer Bakterien frei wurde. Zudem können Viren Teile von Genen zwischen Bakterien übertragen. Kein Gentechniker ist hier vonnöten, und auch keine hoch spezialisierten Genlabors. Entwicklung und Vielfalt waren und sind fast unbegrenzt.

Bei den Bakterien, diesen ersten Bewohnern der Erde, unterscheidet man zwei Bautypen: Die eigentlichen Bakterien, deren Membran durch eine zähe Hülle aus Proteinen versteift ist; sie leben heute noch in großer Vielfalt und großen Mengen. Der zweite Typ sind die Archae-Bakterien, kurz Archaea genannt, deren Körper von einer flexiblen Hülle umgeben ist. Von ihnen leben heute nur noch wenige und das in ungewöhnlichen Umgebungen; einige in stark salzhaltigem Wasser; andere in der heißen Säure vulkanischer Aufquellungen; andere an sauerstofffreien Stellen, in Faulschlamm, im Darm von Tieren, und in Mooren, wo sie Methan bilden. Auf Hochmooren ist der Effekt der Methanbildung des Nachts zu besichtigen: Es flackern kurzzeitig bläuliche Flammen, Irrlichter genannt. Sie sind verbrennendes Methan, das aus dem Untergrund aufsteigt und sich entzündet, denn in unserer sauerstoffhaltigen Luft wird es augenblicklich oxidiert und eine Flamme entsteht.

Im Archaikum bauten Bakterien und Archaea zunächst vorhandene organische Moleküle ab und bezogen hieraus die nötige Energie zum Aufbau ihrer körpereigenen Stoffe. Auf diese Weise hätten sich die Ressourcen an organischem Material

Exkurs: RNS und DNS – die genetische Grundlage des Lebens

Während dieser frühen Entwicklungsschritte hin zu den Bakterien ist auch bereits die genetische Grundsubstanz entstanden. Sie liegt als einfacher Strang (Ribonukleinsäure (RNS)) und als Doppelstrang (Desoxyribonukleinsäure (DNS)) vor und wird als „Erbsubstanz“ bezeichnet. Die Nukleinsäureketten tragen die Bauanleitung für die verschiedenen Proteinketten, die im Stoffwechsel von Bedeutung sind. Bei den Bakterien liegt dieser Strang frei, bei den Eukarya wurden die DNS-Stränge um Proteine gewickelt und von einer weiteren Membran umschlossen, auf diese Weise entstand ein Kern, in dem fortan das genetische Material in Form von Chromosomen verwahrt wurde.

Exkurs: Biofilme

Über 90% aller Prokaryoten leben auf Gesteinsoberflächen. Hier tendieren ihre Schleimschichten dazu, sich zu dünnen Schichten, sogenannten Biofilmen, zu vereinen. In solchen Biofilmen können Zyklen des Auf- und Abbaus organischer Substanzen ablaufen – mit hin des Stoff- und Energiewechsels. Verfangen sich in dem Schleim Sedimentpartikel oder fallen die Zellen aktiv Kalk aus, dann kann ein geschichtetes und mikrobiell erzeugtes Gestein entstehen, ein sogenannter Stromatolith. Stromatolithen gibt es im Meer sowie in Flüssen und Seen als Sinterkalke. Sie sind fossil gut überlieferungsfähig. Die ersten Stromatolithen und zugleich die ersten (mikrobiellen) Riffe sind 3,5 Milliarden Jahre alt; sie wurden in der westaustralischen Wüste gefunden – an einem Ort namens *North Pole*. Biofilme bilden sich auch heute auf festen Oberflächen. Es sind neben Bakterien vor allem einzellige Eukaryoten unterschiedlicher Art beteiligt.

über die Jahrtausende erschöpft. Nachschub kam jedoch von jenen Bakterien und Archaea, die aus anorganischen Stoffen ihre Energie gewinnen und

organische Stoffe synthetisieren konnten. Es waren diejenigen, die Schwefelwasserstoff und Methan freisetzen, und von denen einige Bautypen heute noch leben.

Im Archaikum gab es, wie schon gesagt, keinen freien Sauerstoff. Deswegen konnten sich viele oxidierbare Stoffe halten, d.h. Stoffe, die sich mit Sauerstoff verbunden hätten. Und daher konnte sich auch das Methan, das von Bakterien produziert wurde, in der Atmosphäre anreichern. Es verstärkte den Treibhaus-Effekt, der ohnehin schon durch andere Gase bewirkt wurde, vor allem durch das Kohlendioxid, das CO_2 .

Chlorophyll / Photosynthese

Es war deswegen ein Entwicklungsschritt von weitreichenden Folgen, dass sich Bakterien entwickelten, deren Stoffwechsel Sauerstoff freisetzt: die Cyanobakterien. Sie konnten Chlorophyll aufbauen, den grünen Farbstoff, den wir aus Pflanzen kennen. Cyanobakterien leben heute noch, und vor allem ihre Nachfahren leben, denn sie sind die Träger des Chlorophylls in den Pflanzenzellen. Noch einmal reformuliert: Die Cyanobakterien produzieren Sauerstoff, ohne sie gäbe es keinen freien Sauerstoff auf der Welt (siehe Abb. 3).

Schon zu einem sehr frühen Zeitpunkt, vor mindestens 3,8 Milliarden Jahren, setzte die Tätigkeit der Cyanobakterien ein. Es wurden zunehmend größere Mengen organischer Substanz produziert und ebenso gewaltige Mengen von Sauerstoff in die Atmosphäre entlassen, ein Vorgang, der bis heute anhält, und der heute von den Pflanzen bewerkstelligt wird.

Nun ist Sauerstoff allerdings eine höchst aggressive Substanz: Er verbindet sich mit vielen Stoffen, d.h. er oxidiert sie und wandelt sie somit um. Die meisten im Archaikum lebenden Bakterien und Archaea waren ihm gegenüber schutzlos; für sie war Sauerstoff ein tödliches Gift. Wir würden ihn mit heutigen Begriffen als gefährliches Umweltgift bezeichnen. Allerdings wurde er damals als

Gift zunächst kaum wirksam, denn die großen Mengen oxidierbarer Substanzen nahmen ihn auf. Vor allem zu nennen ist das Eisen, das damals in löslicher Form im Wasser vorhanden war. Es wurde zu Eisenoxid oxidiert und am Meeresgrund abgelagert; es entstanden die gewaltigen Massen der Bänder-Eisenerze, die man heute in der Erde findet. – Man darf sich den Unterschied in einem Bild klar machen: Was würde mit einem alten Eisenträger geschehen, der am Strand des Ozeans liegt? Er rostet, bis er ganz zerbröseln ist, und der Rost verteilt sich fein im Sand und bleibt dort auf ewig erhalten. Anders im Archaikum: Hier hätte kein Sauerstoff den Eisenträger zu Rost umgewandelt, und das glänzend blanke Metall wäre erhalten geblieben, sofern sich auf ihm nicht Bakterienrasen angesiedelt hätten (siehe auch Abb. 2).

Es wird daraus deutlich, wie tiefgreifend die Tätigkeit der Cyanobakterien den Gehalt des Ozeanwassers allmählich verändert hat, indem die oxidierbaren Substanzen immer weniger wurden. Die Cyanobakterien selbst blieben davon unberührt: Sie waren resistent gegen den Sauerstoff

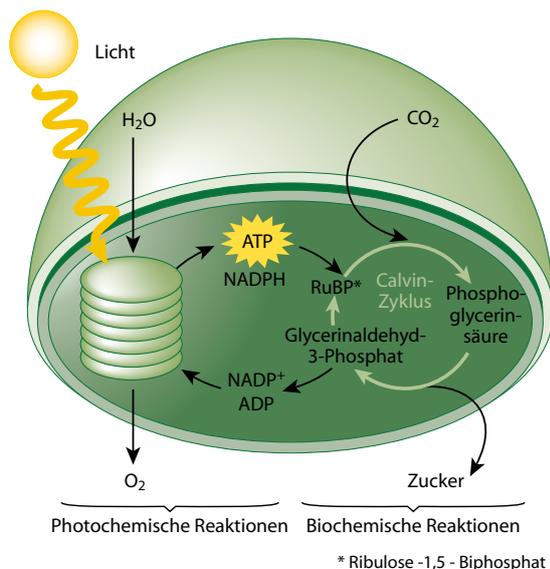


Abb. 3: Photosynthese: Dieser Vorgang findet in allen grünen Pflanzen statt. Die eigentlichen Akteure dieses Prozesses sind Cyanobakterien, die heute als Chloroplasten in den Pflanzen leben. In ihnen läuft die Reaktion von Kohlendioxid und Wasser zu Sauerstoff und Zucker ab.

und produzierten immer weiter organische Substanz und freien Sauerstoff. Irgendwann musste das an eine kritische Grenze kommen, denn irgendwann mussten die oxidierbaren Substanzen aufgebraucht sein.

Atmung – Gärung

Bevor die kritische Grenze erreicht war, kam es aber zu einem weiteren entscheidenden Schritt in der Entwicklung der Organismen. Es entstand nämlich unter den vielen Varianten der Bakterien eine Variante, die den Sauerstoff für sich nutzen konnte, um aus organischen Stoffen Energie zu gewinnen. Es ist der Vorgang, den wir heute Atmung nennen.

Im Archaikum war diese neue „Erfindung“ zunächst noch ohne große Wirkung. Denn nur dort, wo die Cyanobakterien den Sauerstoff freisetzen, konnten die Sauerstoff atmenden Bakterien leben; d.h., sie führten über lange Zeit ein Schattendasein neben den gewaltigen Massen und der reichen Vielfalt der Bakterien, die den Sauerstoff

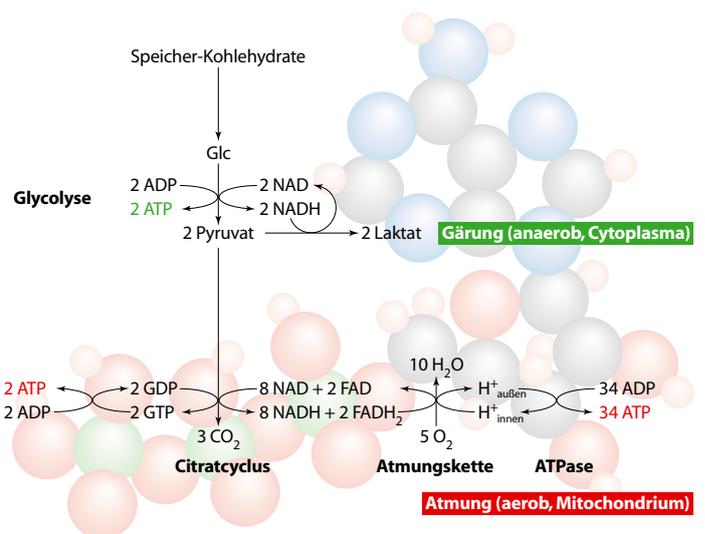


Abb. 4: Gärung und Atmung. Die Gärung kann ohne Sauerstoff stattfinden, sie liefert aber nur 2 ATP-Moleküle. Erst mit der Atmung, welche den von den Cyanobakterien produzierten Sauerstoff verwendet, ist eine umfangreiche Energieausbeute möglich: Es entstehen 24 ATP-Moleküle.

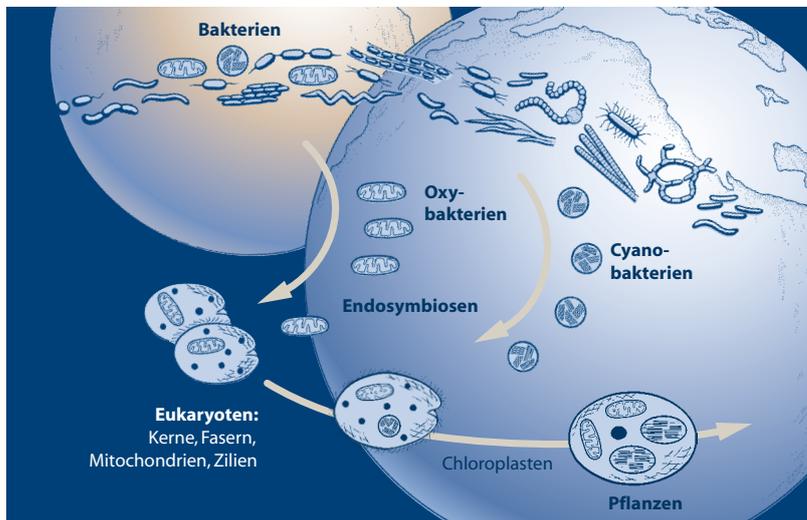


Abb. 5: Endosymbiosen. Sauerstoff veratmende Bakterien (Oxybakterien) werden in Archaea eingelagert. Hierdurch entstehen die ersten Eukaryoten. Sie können den von den Cyanobakterien produzierten Sauerstoff nutzen, wodurch ihnen weitaus mehr Energie zur Verfügung steht. In einem zweiten Schritt nehmen manche Eukaryoten zusätzlich Cyanobakterien auf. Es entstehen die Zellen vieler Protocysten und der Pflanzen.

nicht brauchten und die damaligen Lebensräume dominierten. Diese Bakterien benutzten alle die alten Systeme, organische Stoffe abzubauen um Energie zu gewinnen. Eines davon ist uns gut bekannt, nämlich die alkoholische Gärung. Bei ihr wird in den Hefezellen das Zuckermolekül ohne Sauerstoff chemisch zerlegt, bis nur noch CO_2 und Alkohol übrigbleiben. Aus dem Alkoholmolekül könnte noch weitere Energie bezogen werden, aber dazu müsste Sauerstoff zu Hilfe genommen werden, wozu das System der Gärung nicht in der Lage ist. Bei anderen Gärungssystemen entstehen statt Alkohol andere Stoffe, die ebenfalls noch mit Sauerstoff nutzbare Energie enthalten. D.h., die Gärung arbeitet weniger effizient. Das ist bei der Atmung im Gegensatz zur Gärung anders: Die Atmung kann das zu Ende bringen, was die Gärung nicht ganz schafft (siehe Abb. 4). Wie aber kommt es, dass fast alle heutigen Lebewesen atmen, d.h., dass sie den Sauerstoff nutzen? Stellen wir uns die damalige Situation vor: Die Bakterien mit ihren festen Hüllen konnten nur Nahrung in Form von Molekülen aufnehmen. Die Archaea haben flexible Hüllen. Relativ große Formen unter ihnen konnten große Moleküle und ganze Bakterien umfließen und in den Körper einschleusen. Auf diese Weise war es möglich, dass Sauerstoff verbrauchende Bakterien aktiv in manche Archaea eingelagert wurden. Es stellte sich zwischen den beiden

eine Symbiose ein: Die relativ großen Archaea holten Nahrung herein und ließen Sauerstoff eindringen, die von den sehr kleinen Sauerstoff verbrauchenden Bakterien im Inneren verarbeitet wurden. Die Archaea hatten den Vorteil, mit einer hohen Rate von Energie versorgt zu werden. Man könnte geradezu von Hochleistungs-Archaea sprechen. Man nennt eine solche Lebensgemeinschaft, bei der der eine Partner im anderen sitzt, eine Endosymbiose (siehe Abb. 5).

Tatsächlich arbeiten die Zellen fast aller heutigen Lebewesen auf eben diese Art. Sie enthalten nämlich die Nachfahren der ehemaligen frei lebenden Sauerstoff verbrauchenden Bakterien, die sogenannten Mitochondrien. Es sind kleine in sich abgeschlossene Körper, in denen die Sauerstoff-Atmung stattfindet.

Viele Zellen sind auch heute noch in der Lage, bei Bedarf auf das andere chemische Energiegewinnungssystem umzuschalten, auf die Gärung. Allerdings: Das Umschalten auf Gärung bei Sauerstoff-Mangel kann nicht den ganzen Organismus versorgen. Seit die Mitochondrien fest in den Zellen eingebaut sind, muss ununterbrochen Sauerstoff herangeführt werden, denn die Mitochondrien lassen sich nicht abstellen. Kommt kein Sauerstoff nach, so bricht in Minutenschnelle das

Zum Poster: Die Vielfalt der Eukaryoten – Overture der Vielzelligkeit

Die Eukaryoten haben vor etwa 2 Milliarden Jahren eine Vielzahl von Evolutionslinien hervorgebracht. Die einzelnen Bautypen unterscheiden sich noch heute in ihren Zellbestandteilen, der Art wie sie Nahrung gewinnen, wie sie sich teilen und wie sie wachsen. Wir unterscheiden heute 3 Domänen: Archaea, Bakteria und Eukarya. Innerhalb letzterer gibt es Protoctista, Pilze, Pflanzen und Tiere.

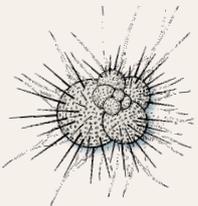
Archaea und Bakteria wurden im Haupttext besprochen. **Protoctista** ist ein Sammelbegriff für viele Evolutionslinien mit sehr unterschiedlichen Bautypen. Sie alle teilen ihre Zellen vollständig



und mittig durch, indem sich die Wand einschnürt. Bei vielen Bautypen trennen sich die Zellen, sie leben als **Einzeller**.



Die Menge der Einzeller, die Vielzahl der Arten und die Masse ihrer Gesamsubstanz sind unüberschaubar. Viele haben Chloroplasten, betreiben Photosynthese und werden deswegen einzellige Pflanzen genannt.



Anderer, die Partikel als Nahrung aufnehmen, werden als Protozoen (Urtierchen) bezeichnet; abgebildet sind ein Pantoffeltierchen, ein Geißeltierchen und eine Foraminifere.

Die mikroskopisch kleinen Protoctista sind, zusammen mit Pilzen und Bakterien, zu Wasser und Land nahezu allgegenwärtig. Wie die oben genannten Bakterien können auch viele von ihnen zu dünnen Lagen, Biofilmen, zusammen-

treten, in denen Stoffwechsel-Austausch und Wachstum stattfinden, und die Ausgangspunkt für größeren Aufwuchs auf festen Oberflächen sein können.

Bei manchen bleiben die Zellen durch gallerartige Substanzen verbunden, die sehr fest wer-

den können (im Poster als Zellen-Faden dargestellt). Unter ihnen finden sich sehr große, sehr differenzierte Formen, wie die großen Braunalgen, die Tange der Meere, oder die Rotalgen und viele Grünalgen.

Die **Pflanzen**, einzellige und mehrzellige jeglicher Art, verdanken ihre Existenz der Endosymbiose mit Cyanobakterien, die sich nur wenig wandelten. Sie wurden zu den Chlorophyll-Trägern, den Chloroplasten. Die Photosynthese mit Hilfe des Chlorophylls hat danach nie mehr aufgehört, und heute produzieren die Pflanzen die Hauptmasse der organischen Substanz, die von ihnen selbst und anderen Organismen als Nahrungs- und Baustoff verwendet wird.

Die Landpflanzen (im Poster ein Gänseblümchen) und die Armleuchteralgen haben eine spezielle Art des Wachstums. Ihr Zellkern teilt sich, die Zelle vergrößert sich und zieht eine in ihrem Inneren produzierte durchlöchernte Platte (Siebplatte) ein, sodass auf jeder Seite ein Kern zu liegen kommt. Die Landpflanzen nehmen mit dieser unvollständigen Zellteilung gegenüber den anderen Eukaryoten eine Sonderstellung ein. Die aus der Photosynthese reichlich vorhandenen Zucker werden zu Zellulose zusammengefügt. Sie ermöglicht dicke Zellwände und stabile Aufbauten.

Pilze sind entgegen früherer Vorstellung keineswegs Pflanzen. Sie haben Zellwände aus Chitin und greifen tote oder lebende Organismen chemisch an, zersetzen sie außerhalb ihres Körpers, und nehmen die gelösten Stoffe auf.

Es ist die Auffälligkeit der großen Pflanzen und Tiere in unserem Lebensbereich, die sie uns so wichtig erscheinen lassen. Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass es die gewaltigen Massen der Einzeller, der Pilze, und vor allem der Bakterien einschließlich der Cyanobakterien-Abkömmlinge in den Pflanzen sind, die ständig den wesentlichen Teil der Stoffwechsel-Aktivitäten auf der Erde tragen. Sie treiben die „Megamaschine des Lebens“ an und erhalten damit die Biosphäre.

ganze System zusammen. Es ist, als würde in einer laufenden Maschine der treibende Motor ausfallen. Ohne Antrieb bleibt die Maschine stehen; der Organismus aber stirbt ab. Was für die frühen Bakterien ein tödliches Gift war, ist für die neuen Lebensformen ein Lebenselixier!

Eukaryotische Zelle

In den Bakterien mit den flexiblen Hüllen, den Hochleistungs-Archaea, wurde das Innere allmählich umgebaut. Es wurde mehr genetisches Material gebildet, und es wurde an einem bestimmten Ort konzentriert, der durch Membran umgeben ist. Es ist der Zellkern, den wir aus den heutigen Zellen von Tieren und Pflanzen und Einzellern kennen. Man nennt diese Zellen eukaryotisch, d.h. „mit richtigem Zellkern“. Dieser Umbau war ein wahrer Quantensprung in der Evolution der Organismen, denn für die Zellen mit richtigem Zellkern eröffneten sich ganz neue Möglichkeiten. Sie konnten viel größer werden, zu mehreren zusammentreten und arbeitsteilig funktionierende Großsysteme bilden, und sie konnten schließlich Pflanzen, Pilze, und Tiere werden.

Pflanzen

Stellen wir uns jetzt nochmals die damalige Situation vor: Es kann nur noch eine Frage der Zeit gewesen sein, dass solche einzelligen Organismen, die den Sauerstoff zum Leben benötigen, immer näher an die Sauerstoff produzierenden Cyanobakterien herangingen und sie schließlich verschluckten. Und es kann nur noch eine Frage der Zeit gewesen sein, dass die Cyanobakterien in diesen Organismen weiterlebten, dass sich somit noch eine Endosymbiose einstellte, mithin eine Endosymbiose in einem Endosymbiose-System, - was übrigens nicht verwundern sollte; man kennt Endosymbiosen, in denen fünf, sechs oder sieben Partner ineinander geschachtelt sind, und Endosymbiosen sind die Regel, nicht die Ausnahme. Solche assimilierenden Endosymbiosezellen sind die Zellen der Pflanzen. In ihnen steht das Chlorophyll auf besonderen Kör-

pern, Chloroplasten genannt. Man weiß nun schon seit langem, dass die Chloroplasten sich selbständig teilen und sogar ihre eigenen Erbgänge haben. Heute erst hat man die Erklärung dafür: Sie sind die Nachfahren der Cyanobakterien, die vor langer Zeit im Archaikum in die Zellen eingebaut wurden.

Mit der Ausbreitung der assimilierenden, überwiegend einzelligen Organismen im Wasser und später auch der Pflanzen zu Lande wurden die Träger der Photosynthese erheblich vermehrt. Der meiste Sauerstoff wird auch heute noch von den Bakterien des Wassers produziert. Die Landpflanzen bauen hingegen den weitaus größten Teil der organischen Substanz auf, der für lange Zeit festgelegt wird.

So, wie der Sauerstoff in der damaligen Atmosphäre anstieg, gingen die beiden Treibhausgase Methan und CO_2 zurück. Das Methan wurde ganz einfach vom Sauerstoff verbrannt. Das CO_2 war quasi ein riesiger Baustoffvorrat, aus dem die Pflanzen zusammen mit Wasser organische Substanz aufbauten. Das Holz und vor allem die Kohle und das Erdöl stellen ein riesiges Lager organischer Substanz dar, die im Laufe der Jahrtausende von Pflanzen aufgebaut wurde. Der zweite Grund, warum der Atmosphäre so viel CO_2 entzogen wurde, besteht darin, dass viele Tiere (und einige Pflanzen) aus CO_2 und Calcium Kalk aufbauen können. Man muss die Dimensionen sehen.

Das Ende des Archaikums

Ganz allmählich stieg der Gehalt an freiem Sauerstoff zwar langsam, doch unaufhaltsam an. Zwar war nur ein Bruchteil der Sauerstoffmenge freigesetzt, die wir von heute kennen, doch sie reichte aus, dass sich die Organismen mit Sauerstoffatmung ausbreiten konnten, und sie reichte aus, dass sich in der Höhe die Ozonschicht bilden konnte, die wiederum den größten Teil der harten UV-Strahlung absorbierte.

Dieser Zustand war vor 2,4 bis 2,2 Milliarden Jahren erreicht. Die Erde hatte sich durch die Aktivität

der Bakterien und Archaea gründlich gewandelt. Es ist nicht übertrieben, vom Sauerstoffumsturz zu sprechen. Aus dem düster rotbraunen Planeten der Stickstoff-Methan-Kohlendioxid-Atmosphäre wurde der Blaue Planet der Stickstoff-Sauerstoff-Atmosphäre. Und vor allem: Die Erde erlebte die größte Umweltkatastrophe mit dem größten Massenaussterben ihrer Geschichte, denn für nahezu alle damaligen Organismen war Sauerstoff ein tödliches Gift. Nur wenige von ihnen konnten sich in ein Nischendasein retten. Das Ende des Archaikum war gekommen. Es hatte fast 2 Milliarden Jahre gedauert, immerhin etwa die Hälfte der gesamten Existenzzeit der Erde. Das Proterozoikum, das im Grunde bis heute anhält, begann: Die große Vielfalt der Lebewesen baute sich aus den damals noch wenigen sauerstoffverträglichen Organismen neu auf.

Bilanz

Ziehen wir Bilanz: Bakterien waren die ersten Organismen auf der Erde. Sie verdanken ihre Entstehung den besonderen Bedingungen, die vor etwa 3,8 Milliarden Jahren auf der Erde, und nur auf der Erde, herrschten. Die Bakterien haben mit ihrer Vielfalt und Masse die Welt des Wassers und der Atmosphäre durchgreifend verändert. Sie haben damit ihr eigenes Weiterleben ermöglicht und die Grundlage für die Entwicklung aller weiteren Organismen gelegt, die sie auch weiterhin sichern. Es galt und gilt der Satz: Ohne Bakterien gibt es kein Leben auf der Erde, ohne Bakterien wäre unser Planet unbewohnt.

Bis heute stehen Bakterien und mit ihnen Einzeller, Pflanzen, Pilze und Tiere in einem ständigen Umsatz von Stoff und Energie. Die Organismen haben im Laufe der Evolution diesen Kreislauf selbst geschaffen. Aus den ersten Anfängen heraus haben sie den Morphoprozess, den Prozess der Wandlung alles Lebenden, selbst in Gang gesetzt, dessen Träger und dessen Teile sie sind. Leben und sein ständiger Wandel führen sich in diesem Morphoprozess fort, Leben endet nicht als Ganzes, nur

jeder einzelne Organismus beendet sein individuelles Leben. Im Kreislauf von Materie und Energie wird ständig organische Substanz aufgebaut und Sauerstoff freigesetzt, und ständig wird organische Substanz abgebaut und dabei Sauerstoff verbraucht. Aufbau und Abbau stehen in einem dynamischen Gleichgewicht. Das Gegenteil, nämlich ein statisches, d.h. endgültiges Gleichgewicht wäre nur dann erreicht, wenn Aufbau und Abbau beendet würden. Dann nämlich würden alle möglichen chemischen Reaktionen stattfinden, bis kein Stoff mehr mit einem anderen reagieren könnte, zum Schluss würden alle Stoffe im stabilen Gleichgewicht zueinander stehen. Das wäre dann das endgültige, für den Planeten Erde das astro-physikalische Gleichgewicht. Aber der Morphoprozess der Organismen lässt sich nicht abstellen. Aufbau durch Photosynthese und Abbau durch Gärung und Atmung entsprechen physikalisch-chemisch einer laufenden Maschine; und wie jede laufende Maschine verliert sie einen Teil der umgesetzten Energie durch Abstrahlung. Die globale Maschine des Lebens muss deswegen durch ständige Energiezufuhr in Gang gehalten werden, und diese Energiezufuhr lässt sich nicht abstellen, denn es ist die Sonnenstrahlung. Das Leben geht weiter.

Exkurs:

Der Sauerstoffgehalt der Atmosphäre

Die Atmosphäre hat heute einen Gehalt von 21% Sauerstoff (O₂), 78% Stickstoff (N₂) und 1% anderer Gase, darunter etwa 0,03 % Kohlendioxid (CO₂). In der Erdgeschichte schwankte der O₂-Wert z.T. erheblich. Allerdings ist ein Wert um 21% als relativ stabil anzusehen, weil Gehalte über 23 % dazu führen, dass sich insbesondere Wälder und andere brennbare Materialien sehr leicht entzünden. Die verschiedenen Stoffkreisläufe in der Atmosphäre führten letztendlich dazu, dass der Sauerstoffgehalt sich bei den heutigen 21% einpendelte.

2. Die Evolution – Teil 2: Das Tierreich. Der Mensch.

Dr. Manfred Grasshoff, Senckenberg-Institut, Frankfurt am Main, e-mail: mgrasshoff@senckenberg.de

Einleitung

Das Tierreich stellt sich uns in unüberschaubarer Vielfalt dar. Denken wir an einen Spaziergang an einem See: Singvögel im Geäst des Ufergebüsches, Enten auf dem Wasser, der Reiher lauert dem Fisch auf, Libellen surren, im Gras wimmeln Käfer, Ameisen, Schnecken, am Boden ein Regenwurm, Asseln, Tausendfüßler, im flachen Wasser des Sees wimmeln Wasserflöhe, am Röhricht wächst ein graugelbes lappiges Gebilde: ein Schwamm. Denken wir an das Leben im Meer, wie es uns heute oft in Fernsehfilmen nahe gebracht wird: das Gewimmel der Fische, Schildkröten im Ufersand, der riesige Wal, die Korallen, glitzernde Schwärme winziger Medusen, spiralige Tentakelkronen von Borstenwürmern zwischen den Korallen, bunte Schnecken, riesige Muscheln, die bizarren Seesterne und Seeigel, – Formen und Farben scheinen keine Grenzen zu kennen.

Und das soll alles, so sagt die Wissenschaft, aus einer einzigen gemeinsamen Wurzel entstanden sein? Kaum zu glauben! Und doch können Evolutionsbiologen heute zeigen, dass es sich so verhalten haben muss. Mehr noch: die Evolutionsbiologie kann stichhaltig erklären, wie dieser Wandel verlaufen ist.

Evolutionsforschung hat zum Ziel, Abläufe der Vergangenheit zu ermitteln. Sie ist eine historische Wissenschaft, sie tut das Gleiche wie die Geschichtswissenschaft, die sich mit der Geschichte der Menschheit befasst, sie rekonstruiert nämlich vergangene Abläufe. Als Grundlage stützt man sich auf beobachtbare Tatsachen – die Historiker nennen sie Quellen, die Naturwissenschaftler nennen sie für gewöhnlich Fakten oder Evidenzen. Und selbstverständlich stützt man sich auch auf die allgemein gültigen Naturgesetze, sei es so einfache wie das Hebelgesetz oder so komplizierte wie die thermodynamischen Hauptsätze. Man entwickelt dann ein Modell für einen bestimmten Ablauf, etwa dafür, wie sich der Vogel aus dem Dinosaurier entwickelt hat.

Hier dürfen wir fragen: was hat man nun eigentlich in der Hand, um den Ursprung des Tierreiches und seine Entwicklung zu rekonstruieren? Im Wesentlichen sind es zwei Dinge, von denen aus wir argumentieren können: Zum einen ist es der Aufbau der Tiere, wie wir ihn heute beobachten und untersuchen können, zum zweiten ist es die geologische Kenntnis vom Aufbau der Erde samt den Fossilien, die in den Gesteinsschichten zu finden sind. Sie lassen nämlich die Tiefe der Zeit ermesen, die für die allmähliche Entwicklung zur Verfügung stand. Als Ausgangspunkt unserer Betrachtung müssen wir die Situation der Erde nehmen, wie sie vor etwa 2 Mrd. Jahren herrschte und wie in Teil 1 beschrieben wurde.

Die Situation auf der Erde vor circa 2 Milliarden Jahren

Blicken wir noch einmal zurück in die urtümliche Welt, wie wir sie in Teil 1 kennen gelernt haben: Die Bakterien stellten weiterhin die Grundlage allen Lebens dar. Sie hatten die Erde zu dem gemacht, was sie war und heute noch ist, zum Blauen Planeten. Bestimmte Bakterien, so genannte Cyanobakterien, produzierten freien Sauerstoff und bauten organische Substanz auf, die anderen Organismen als Nahrungs- und Lebensgrundlage diente. Das Leben spielte sich weiterhin im Wasser ab, in Feuchtigkeitsfilmen auf Felsen des Landes ebenso wie in Flüssen, Seen und Meeren. Aus Bakterien waren Zellen mit Zellkern entstanden, die zunächst nur als einzellige Organismen in reicher Formenvielfalt lebten. Diese Zellen sind viel größer als Bakterien, und sie sind in Bereiche untergliedert, die unterschiedliche Aufgaben wahrnehmen. Manche dieser Einzeller haben Cyanobakterien aufgenommen, die ihnen Nahrung liefern, und allmählich sind solche Cyanobakterien zu festen Zellbestandteilen geworden (siehe Abb. 5, S. 13). Diese Einzeller könnte man als die Pflanzen unter den Einzellern bezeichnen. Andere Einzeller ernähren sich von kleineren Organismen oder organischen Partikeln, sie sind quasi die einzelligen Tiere.

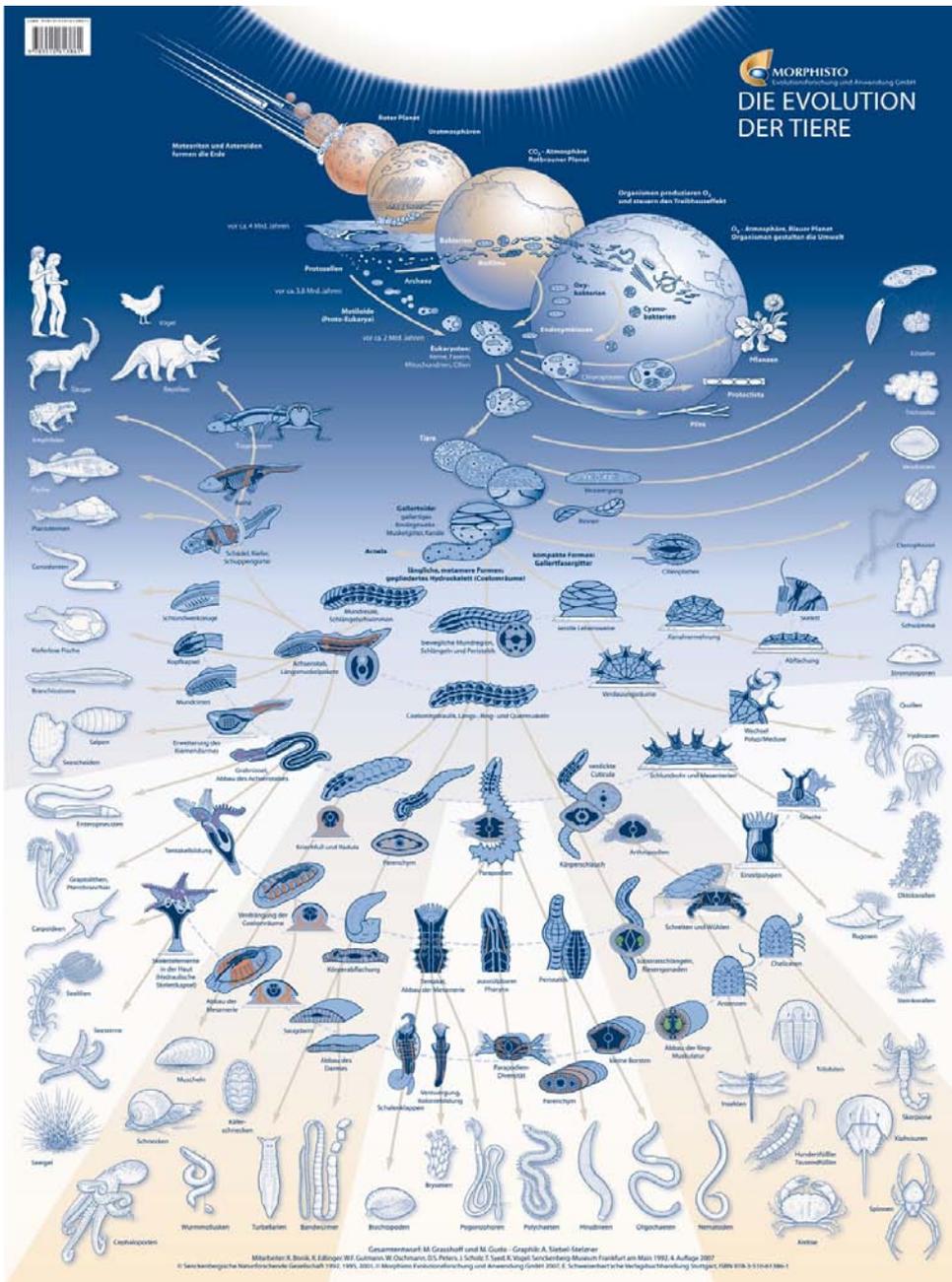


Abb. 6: Poster „Die Evolution der Tiere“, 4. Auflage 2007. Der obere Bildteil zeigt die Entwicklung der Erde und der ersten Organismen. Die Entstehung des Lebens auf der Erde ist aus der planetarischen Entwicklung zu erklären. Da unsere Betrachtung im Wesentlichen der Evolution der Tiere gilt, stehen die urtümlichen ersten Tiere

im Zentrum. Von ihnen gehen Evolutionslinien aus, die sich weiter verzweigen. Konstruktionszeichnungen zeigen die wichtigsten Schritte der Umwandlungen, die zum größten Teil bereits abliefen, bevor die reichliche Fossilüberlieferung im Kambrium einsetzte. Die Linien enden bei den heute lebenden und den fossilen Tieren; sie sind in naturalistischer Weise gezeichnet, da sie die real existierenden Repräsentanten am Ende der Entwicklungslinien sind. Sie stehen im Kontrast zu den modellhaften Ableitungen und Konstruktions-Darstellungen. Alle heutigen Organismen sind gleich weit vom ursprünglichen Zentrum entfernt und alle sind in ihrer Weise hoch entwickelt. Die traditionelle anthropozentrische, d.h. auf den Menschen bezogene Weltsicht, mit der sich der Mensch an die Spitze eines von unten nach oben, vom Niederen zum Höheren wachsenden Stammbaumes stellt, ist verlassen.

Was sind Tiere?

Was sind Tiere? Machen wir eine kleine Umfrage, und sehen, welche Antworten wir bekommen:

„Tiere sind aus vielen Zellen aufgebaut.“

Das gilt aber für Pflanzen und Pilze auch.

„Tiere müssen sich von Pflanzen oder anderen Tieren ernähren, sie müssen organische Nahrung aufnehmen, von Sand, Wasser und Sonne können sie nicht leben.“

Nicht typisch tierisch. Das gilt nämlich auch für Pilze.

„Tiere können sich bewegen und herumschwimmen oder laufen oder fliegen, Pflanzen und Pilze sitzen fest.“

Korallen und Schwämme, die zu den Tieren gehören, sitzen auch fest, und Schwämme können gar keine Bewegungen machen.

„Es gibt auch einzellige Tiere, das Pantoffeltierchen zum Beispiel.“

Einzellige Pflanzen und Pilze gibt es auch, und manche Einzeller sind während ihres Lebens mal wie eine Pflanze mit richtigem Blattgrün und mal ohne Blattgrün, wie ein Tier, das von organischer Nahrung lebt.

Wir merken: so kommen wir nicht weiter. Wir müssen doch näher hinsehen, ob wir etwas finden, was alle Tiere auszeichnet, und womit wir Tiere gegenüber anderen Lebewesen definieren können. Denn ohne eine klare Definition können wir auch keine sinnvolle Evolutions-Betrachtung anstellen.

Fangen wir doch ruhig bei den uns vertrauten Säugetieren und bei unserem eigenen Körper an. Heute weiß jedes Kind: der Körper besteht aus Zel-

len. Allerdings, der Körper besteht nicht nur aus Zellen, sondern zum großen Teil aus Bindegewebe, und Bindegewebe besteht aus zugfesten Fasern. Je nach Lage im Körper organisieren sich die Fasern: Sie können ein räumliches Gitterwerk bilden oder auch flache Lagen um die Muskeln herum, oder sie treten zu größeren Bündeln zusammen. Es kann Kalk eingelagert werden, wie in den Knochen, oder Fasern treten zu festen Teilen zusammen, wie in unseren Haaren und Fingernägeln oder Hufen und Krallen vieler Tiere.

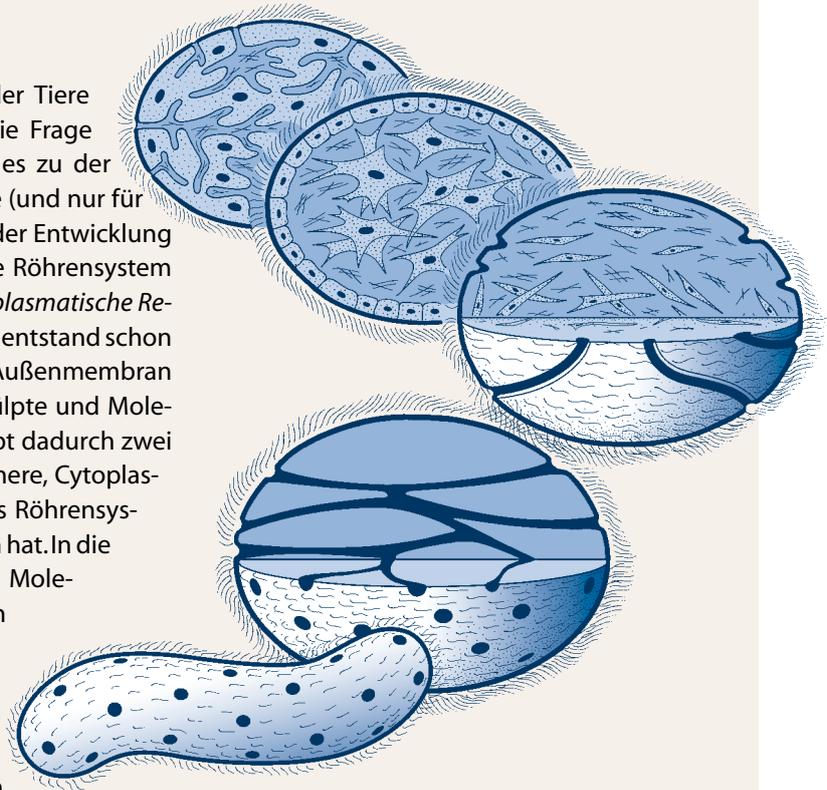
Wohin auch immer im Tierreich wir hinschauen, sei es Fisch, Käfer, Schnecke, Regenwurm, Koralle oder Schwamm: immer wieder das prinzipiell gleiche Bild. Die Zellen sind in das Geflecht der Bindegewebsfasern eingebettet. Hier und da überwiegt die Gallerte im Bindegewebe, am deutlichsten wohl zu sehen bei den Quallen. Ihr Körper besteht zu über neunzig Prozent aus faseriger zäher Gallerte. Insgesamt dürfen wir feststellen: Tiere sind Bindegewebs-Organismen. Wir dürfen sogar sagen „Tiere sind *die* Bindegewebs-Organismen“, wodurch nämlich die anderen Lebewesen ausgeschlossen werden, die auch aus vielen Zellen bestehen: Algen, Landpflanzen und Pilze. Wir sehen: Tiere sind als Vielzeller etwas ganz anderes als Pilze und Pflanzen, und sie müssen sich auch vor vielen Millionen Jahren als Bindegewebs-Vielzeller aus Einzellern entwickelt haben. Wie das geschah, lässt sich heute gut rekonstruieren

Vom Einzeller zum Vielzeller

Die einzelligen Organismen waren in der Evolution zuerst entstanden, und aus ihnen müssen die vielzelligen hervorgegangen sein. Für die Pilze, Algen und Landpflanzen ist das recht einfach zu erklären. Bei ihren einzelligen Vorläufern entwickelte sich die chemische Möglichkeit, Chitin, Pflanzengallerte oder Zellulose zu bilden. Die Zellen konnten diesen Stoff nach außen abscheiden und sich damit umkleiden, denn diese Stoffe lösen sich nicht im Wasser auf, und sie sind zäh und halten

Exkurs: Entstehung der vielzelligen Körperkonstruktion

Um die Evolutionsgeschichte der Tiere zu verstehen, muss zunächst die Frage beantwortet werden: Wie kam es zu der Körperkonstruktion, die für Tiere (und nur für sie) typisch ist? Für den Beginn der Entwicklung zu den Tieren spielte das Innere Röhrensystem der Zelle (das sogenannte *Endoplasmatische Retikulum*) eine besondere Rolle. Es entstand schon bei den Protozellen, als sich die Außenmembran an vielen Stellen nach innen stülpte und Moleküle nach innen mitnahm. Es gibt dadurch zwei Zellbereiche: das eigentliche Innere, Cytoplasma genannt, und das Innere des Röhrensystems, das Öffnungen nach außen hat. In die Membran der Röhren sind viele Moleküle eingelagert, die wesentlich zum Stoffumsatz beitragen. Die Röhren sind nicht starr, sie können sich zu Kavernen erweitern und vielfältig wandeln. In das Innere der Röhren hinein können Stoffe produziert und gegebenenfalls durch die Öffnungen nach außen abgegeben werden, wie etwa bei Drüsenzellen. Die entscheidenden Entwicklungsschritte sind darin zu sehen, dass sich chemische Verbindungen aus Zuckern und Eiweißen (Polysaccharide und Polypeptide) bei urtümlichen Eukaryoten in das Innere des Röhrensystems einlagerten. Dieses Stoffgemisch hatte gallertige Konsistenz. Einige der Polypeptide waren Skleroproteine (Kettenmoleküle) die den Grundstoff für zugfeste Fasern darstellen. Aus ihnen entstanden die verschiedenen Kollagenfasern, der wesentliche Bestandteil des Bindegewebes der Tiere. Die Masse von Gallerte und Fasern stützte und stabilisierte den weichen Zellkörper, so dass er wachsen konnte. Sie dehnte sich dabei immer mehr aus und schob allmählich das Cytoplasma zu Portionen auseinander. In jeder dieser Portionen blieb wenigstens ein Zellkern als Steuerungszentrum und ein Teil des Röhrensystems als



chemische Reaktionsfläche erhalten. Diese Cytoplasma-Bezirke sind von Membran umgeben und haben einen Zellkern, – sie sind somit ganze Zellen. Sind mehrere Zellkerne vorhanden oder sind die Membranen mehrerer solcher Bereiche miteinander verbunden, spricht man von Zellkomplexen oder Synzytien. Nur die Körperoberfläche blieb von der geschlossenen Cytoplasma-Lage mit ihren Cilien bedeckt, sodass die Gallert-Faser-Masse nicht dem offenen Wasser ausgesetzt wurde. Dort würde sie quellen und zerfließen. Das Ergebnis ist die für Tiere typische Körperkonstruktion: Zellen und Zellkomplexe sind mit einer faserig-gallertigen Matrix zu den sogenannten Geweben verbunden. Aus Einzellern waren allmählich Vielzeller, genauer 'Bindegewebs-Vielzeller' geworden: die Gallertoide, als Einstieg in das Reich der Metazoa (= vielzellige Tiere).

auch größere Zellen-Verbände zusammen. Bei Tieren ist das anders, denn die von ihren Zellen abgetrennte Gallerte quillt in Wasser auf und zerfließt. Deswegen müssen die Tiere ihren vielzelligen Aufbau auf einem anderen Weg erreicht haben als Pilze und Pflanzen. Die gallertige Substanz, welche die Grundlage des Bindegewebes bildet, konnte nicht nach außen, sondern nur nach innen abgetrennt werden. Die Zellen, in denen das geschah, lassen sich ebenfalls rekonstruieren: sie hatten Cilien und viele Zellkerne, wie übrigens auch heute noch bei Einzellern zu finden. Cilien bedecken den Körper wie feine Haare, sie können sich aktiv bewegen und so den Einzeller durchs Wasser treiben. Wenn nun gallertige Substanz im Inneren gebildet wurde, so blieb um die Zellkerne Zellsubstanz erhalten, und Zellsubstanz plus Zellkern ist eine Zelle. Das heißt, jetzt liegen Zellen in der gallertigen Bindegewebsmasse. Das aber ist, wie wir schon erklärten, die typische Bauweise von Tieren. Das Ergebnis ist: Es sind die ersten Tiere entstanden. Um für sie einen leicht fasslichen und kennzeichnenden Namen zu haben, nannten wir sie in unserer Frankfurter Arbeitsgruppe „Gallertoide“ (siehe Exkurs S. 20).

Wir müssen uns noch einmal zurücklehnen und darüber nachdenken, was auf dieser Evolutionsbahn eigentlich passiert ist. Das, was gleich geblieben ist, überwiegt bei Weitem die Veränderung, die hier lediglich in einer Vermehrung gallertig-faseriger Masse an bestimmten Stellen des Zellinneren bestand. Aber die Folgen dieser relativ kleinen Veränderung waren enorm. Hieran wird geradezu idealtypisch deutlich: so verläuft Evolution! Es sind immer zunächst nur kleine Veränderungen, die große Auswirkungen haben. Evolution verläuft immer in solchen kleinen Schritten, alles andere wäre auch undenkbar. Ein Organismus ist immer eine funktionierende Konstruktion, ein ausgewogenes Funktions-Gefüge, und das kann sich nicht in vielen Teilbereichen gleichzeitig und in abgestimmter Weise ändern. Immer muss zunächst vieles gleich bleiben, wie wir es eben an der Entstehung der Gallertoide gesehen haben.

Es gibt keine großen Sprünge. Es wird noch etwas Zweites für die Evolution Typisches sichtbar: An jeder Konstruktion bestimmt sich, was an weiteren Veränderungen möglich ist. Das Funktionsgefüge der nun entstandenen Gallertoide ist ein ganz anderes als das des ursprünglichen Einzellers. Man kann sagen, es wurde ein neues Konstruktions-Niveau erreicht. Nur von diesem Niveau aus kann es evolutiv weitergehen, und jetzt bestimmt sich an der Gallertoid-Konstruktion, was aus ihr noch werden kann. Wir werden sehen, dass es sehr viel ist. Denn in der Tat nehmen mehrere Evolutionsbahnen ihren Ausgang von diesem urtümlichen Gallertoid, und aus diesen wenigen Bahnen entfaltet sich die gesamte Vielfalt des Tierreiches.

Gallertoide, die ersten Tiere

Betrachten wir die Gallertoide näher: Was konnten sie, was taten sie? Wie sahen sie aus? Klein waren sie, höchstens gegen 3-4 mm groß, und es gab verschiedene Formen, denn die gallertig-faserige Masse ist zäh und lässt vielerlei Körperformen zu: rundliche, flache, längliche. Sie schwammen mit dem Schlag ihrer Cilien durchs Wasser und fingen feine Nahrungspartikel, die die Oberflächenzellen in sich einschleusten. An der Oberfläche konnten sich Buchten und Falten bilden, zum einen durch Wachstum der äußeren Zellschicht, zum zweiten durch die Aktivität der innen liegenden muskelartigen Verspannungen. In den Buchten und Falten wurde das Wasser zeitweilig ruhig gehalten. Hier konnten Nahrungspartikel besser in die Zellen aufgenommen werden. Die Falten konnten tiefer eingesenkt werden und bildeten schließlich Kanäle, die durch das Innere des Körpers ziehen. Die Cilien an der Körperoberfläche sorgten weiterhin für die Fortbewegung durchs Wasser, und die Cilien in den Kanälen trieben mit ihrem Schlagen einen schnelleren oder langsameren Wasserstrom an.

Wie schon gesagt, die Größe der ersten Gallertoide, die noch keine Kanäle hatten, war auf wenige Millimeter begrenzt. Die Zellen im Inneren brauchen ja Nachschub von Stoff und Energie und

müssen ihre Stoffwechsel-Endprodukte abführen, und so dürfen diese Transportwege nicht zu lang werden. Wenn aber dann Kanäle das Innere des Körpers durchzogen, so wurden diese Transportwege kurz gehalten. Das ermöglichte weiteres Größenwachstum, und die Größe dieser Gallertoiden trat aus dem Millimeterbereich in den Zentimeterbereich hinein. Von diesen Gallertoiden mit ihren vielerlei Körperformen und Kanal-Systemen konnte wiederum eine ganze Reihe von Differenzierungen ausgehen.

In Folge und in Verbindung mit diesen Entwicklungen kam es auch dazu, dass sich Zellen auf bestimmte Aufgaben spezialisierten. Die ursprünglichen Zellen konnten alle lebensnotwendigen Tätigkeiten ausführen. Spezialisieren heißt, dass sich eine Zelle im Wesentlichen auf eine Aufgabe konzentriert. In den Kanälen spezialisierten sich manche Zellen darauf, Verdauungssekrete abzugeben, andere darauf, die aufbereiteten Nahrungspartikel in sich einzuschleusen. Es entstand ein Verdauungstrakt, und tatsächlich arbeiten alle Verdauungstrakte im Tierreich bis heute auf diese Weise. Zellen an der Oberfläche spezialisierten sich darauf, von außen kommende Reize aufzunehmen und nach innen weiter zu leiten. Dazu treiben sie lange schlanke Ausläufer ins Innere, die an anderen Zellen Kontakt aufnehmen, vor allem an solche, die sich inzwischen auf Kontraktion spezialisiert haben und Muskelzellen wurden. Diese Reize weiterleitenden Zellen – nennen wir sie doch beim Namen: Nervenzellen – breiten sich immer weiter aus und steuern im Körper die Muskeln, die Reaktionen des Tieres auf Außenreize, ob es sich einer Sache zuwendet oder abwendet und die Flucht antritt. Die Nervenzellen schließen sich zu Netzen und Bahnen zusammen, solche Nervensysteme werden allmählich – jetzt eilen wir der Entwicklung voraus – zu Steuerungszentren für den ganzen Organismus. Wir sehen hier wieder einen für die Evolution so typischen Vorgang: die interne Differenzierung. Sowohl verschiedene Typen von Zellen als auch ganze Organsysteme entwickeln sich immer durch innere Differenzierung.

Die Haupt-Evolutionsbahnen entstehen, oder: „Niedere Tiere“ als Überlebenskünstler

Die Frage ist natürlich, wie denn aus Gallertoiden so unterschiedliche Tiere wie Schwamm und Regenwurm, Koralle und Saurier geworden sind.

Tatsächlich lassen sich von den Gallertoiden aus fünf Evolutionsbahnen rekonstruieren, aus denen durch weitere Aufzweigungen das ganze Tierreich entstand. In sehr einfachen Worten könnte man es auf den Punkt bringen: von den Gallertoiden wurde einer zum Zwerg, das ist der sonderbare *Trichoplax*; einige erhielten sich die massige Gallerte, sie wurden zu Rippenquallen; einige setzten sich am harten Untergrund fest und vermehrten die Kanäle hundertfach, sie wurden zu Schwämmen; andere setzten sich am Untergrund fest und erweiterten Kanäle zu flexiblen Verdauungsräumen, sie wurden zu Korallen- und Medusentieren; und einige waren länglich schlank und schwammen mit Wellenbewegungen durchs Wasser; aus ihnen wurden alle anderen Tiere, über 90% des Tierreiches, Wurm und Schnecke, Insekt und Krebs, Seestern und Fisch, und letztlich auch die Säugetiere und der Mensch.

Betrachten wir vier der fünf Bautypen näher: Der Zwerg *Trichoplax* ist etwa 1-1,5 mm groß und flach, besteht nur aus zwei Zellschichten, die zwischen sich einen feinen Spalt lassen, in dem sich nur ein paar Zellen, aber keine zähe Gallerte befindet. Sie würde die Bewegungen eher stören und wurde wegrationalisiert. *Trichoplax* ist das einzige Tier ohne kollagen-faseriges Bindegewebe, so nahe er den urtümlichen Gallertoiden auch stehen mag (siehe Exkurs S. 23).

Ein anderer Evolutionsweg führte zu den Rippenquallen, die heute noch in allen Meeren leben. Sie bestehen zum größten Teil aus gallertiger Bindegewebsmasse und sind deswegen glasig durchsichtig, sie sind von Kanälen durchzogen und schwimmen mit Hilfe von Cilien durchs Wasser, die

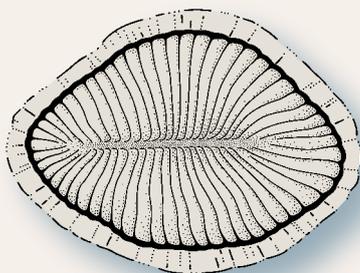
Zum Poster:

Trichoplax; Vendozoa

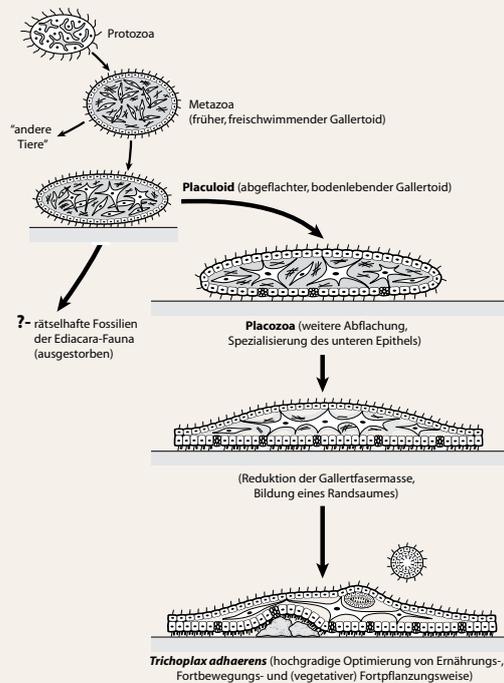
Es gibt heute keine urtümlichen Gallertoide mehr, aber mindestens ein Tier, das ihnen sehr nahe steht. Fossil sind zudem Formen bekannt, die auf eine frühe Gallertoidfauna hinweisen.

Der nur 1 mm große *Trichoplax* ist aus einer oberen und unteren Deckschicht (Epithelium) aufgebaut; zwischen ihnen liegt keine kollagen-faserige Gallerte, sondern ein Netzwerk verspannender Faserzellen. *Trichoplax* ist als extrem abgeflachter, kriechender Gallertoid zu verstehen, der seinen Vorformen ansonsten aber sehr nahe steht.

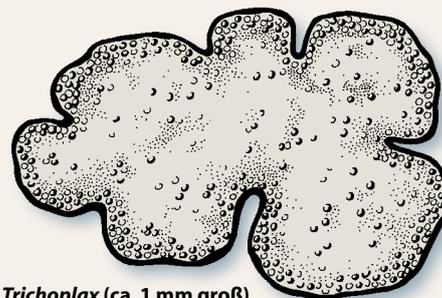
Die Vendozoa sind nur als Fossilien aus den 600 Millionen Jahre alten Gesteinen des Vendozoi-kums bekannt (u.a. Fundstätte Ediacara in Australien). Sie sind Abdrücke von rundlich-kissen-artiger Form mit einer Rinnenstruktur, die wahrscheinlich auf Gallertoide zurückgehen.



Vendozoa: *Dickinsonia*, bis zu 50 cm groß



Ableitungsmodell für *Trichoplax* (aus SYED 2006).



Trichoplax (ca. 1 mm groß)

sich zu Tausenden in hintereinander liegenden Platten organisiert haben. Die Nähe zu Gallertoiden ist unverkennbar (siehe Exkurs S. 24).

Die Schwämme sind - außer *Trichoplax* - wohl die merkwürdigsten aller Tiere. Die Kanäle vermehrten sich und filterten dadurch immer mehr Wasser auf Nahrungspartikel aus. Die Gallert-Bindegewebs-Masse wandelte sich weitgehend in Horn um, und zusätzlich produzierten Zellen starre Elemente aus Kalk oder Kiesel, wodurch der Körper stabilisiert und bewegungsunfähig wurde (Exkurs S. 24).

Die Korallen mit ihren beweglichen Polypen und die schwimmenden Medusen sind geradezu das Gegenprogramm zu den Schwämmen, doch auch ihre Evolution ist aus Gallertoiden zu erklären (siehe Exkurs S. 25).

An diesen relativ einfach gebauten Tieren kann man sich wieder etwas Grundlegendes für die Evolution verdeutlichen: Ein Zurück in der Evolution gibt es nicht. Schauen wir beispielhaft auf die Rippenquallen. Für ein Zurück zum Gallertoid müsste sich der hocheffiziente Schwimmantrieb

**Zum Poster:
Kammquallen, Schwämme, Stromatoporen,
Korallen, Medusen**

Ctenophoren

Die Kamm- oder Rippenquallen (Ctenophora) haben noch viel Ähnlichkeit mit den Gallertoideen, denn ihr voluminöser Körper besteht durchweg aus faseriger Gallerte. Zwei Tentakel fangen mit Hilfe spezieller Zellen die Nahrung. Gegenüber der Ausgangskonstruktion steigerten sich Schwimm-Leistung und Richtungs-Steuerung enorm, indem sich die **Cilien als Platten** („Cilien-Kämme“) in acht Bändern (Rippen genannt) anordneten; (je größer der Körper, desto weniger wirksam ist der Schlag gleichmäßig verteilter Cilien zur Fortbewegung). Damit konnten die Tiere eine weit über die urtümlichen schwimmenden Gallertoide hinausgehende Körpergröße erreichen; man könnte sie als die auf Schwimmen spezialisierten Giganten der Gallertoide bezeichnen.

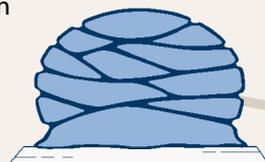


Sessile Gallertoide

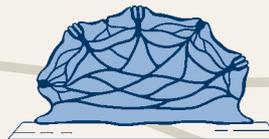
Andere Gallertoide schlugen einen den Ctenophoren entgegengesetzten Weg ein, sie wurden sessil, d.h. sie setzten sich auf Dauer am Untergrund fest und bewegten das Wasser durch ihre Kanäle hindurch, anstatt sich selbst durch das Wasser zu bewegen. Für diese sessilen Gallertoide gab es zwei Optionen zur weiteren Entwicklung: die Kanäle zu vermehren oder sie zu erweitern.

Schwämme

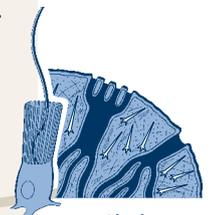
Auf der Evolutionsbahn hin zu den Schwämmen wurden die **Kanäle vermehrt**, wodurch sie immer mehr Feinpartikel fingen. Die Kanäle ordneten sich in einer solchen Weise an, dass kleine Einstrom- und große Ausstrom-Öffnungen entstanden. Zum Antrieb des Wasserstroms differenzierten sich zentral gelegene Zellen. Ihre Cilie wuchs zu einer langen Geißel, und um sie herum verlängerten sich die ursprünglich kurzen Zellfortsätze, so dass sie die Geißel jetzt wie einen Kragen umgeben. Diese „Kragengeißelzellen“ fangen auch allerfeinste Partikel ein. Das Gerüst aus verfestigten Kollagenfasern und Elementen aus Kalk oder Kiesel stützt den Körper, Muskelzellen gibt es nicht. Schwämme sind hocheffiziente Feinfilter-Konstruktionen. Sie haben sich eine unerschöpfliche Nahrungsquelle in den Ozeanen erschlossen: mikroskopisch kleine Partikel und Bakterien. Schwämme leben sogar in regelrechten Symbiosen mit ihnen zusammen.



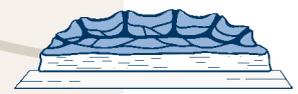
sessile Lebensweise



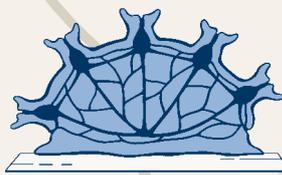
Kanalvermehrung



Skelett



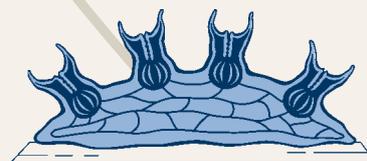
Abflachung



Verdauungsräume



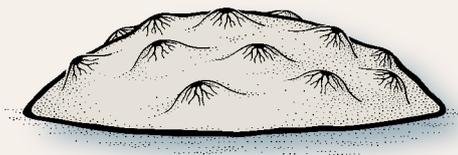
Wechsel Polyp/Meduse



Schlundrohr und Mesenterien

Stromatoporen

Stromatoporen kennt man nur als Fossilien in Form von porösen Kalkschichten. Höchstwahrscheinlich waren die Tiere, die diese Strukturen erzeugten, Schwämmen ähnlich, deren Körpermasse bis auf eine dünne Schicht mit wenigen Kanälen abgeflacht war und somit auch keine inneren stützenden Gerüst-Elemente aufbaute. Stromatoporen kamen im Paläozoikum, insbesondere im Devon und Silur so zahlreich vor, dass sie sogar kleine Riffe bildeten.

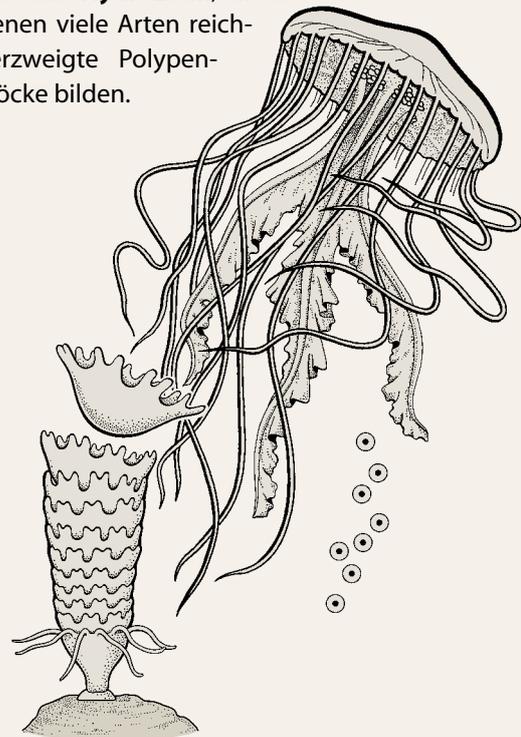


Korallentiere, Medusentiere

In der Evolutionsbahn zu den Korallentieren erweiterten sich die Kanäle der sessilen Gallertoiden, sodass auch größere Partikel gefangen werden konnten. Es entstand ein **Verdauungsraum** hinter dem Eingang eines jeden Kanals. Längsrinnen in den Kanalwänden erweiterten sich zu tiefen Spalten, den sogenannten Gastraltaschen, in die Körperwandung hinein. Diese Stufe der Entwicklung könnte man als Urkoralle oder Gallertoidkoralle bezeichnen. Die zwischen den Spalten stehenden Gewebefalten, die sogenannten **Mesenterien**, stabilisieren das Ganze gegen den inneren Wasserdruck. Der Kanalausgang konnte sich öffnen und schließen. Aus ihm entstand das spätere **Schlundrohr**. Vor ihm erweiterte sich der Rand um den Kanal zu einem Kranz von Greifarmen (Tentakel). Der ganze vordere Teil wurde vom inneren Wasserdruck stabilisiert und ragte immer weiter über die Körpermasse vor. Er hatte damit die Struktur eines typischen Korallenpolypen. Aus dieser Übergangs-Konstruktion entwickelten sich die verschiedenen Korallentiere (Anthozoa). Die-

sem ursprünglichen Bautyp entsprechen noch weitgehend die heutigen **Oktokorallen**; sie haben Kalksklerite entwickelt, die in der Gallertfaser-masse liegen. Die fossilen **Rugosen** und andere Korallentiere, zu denen die **Steinkorallen** und die See-Anemonen (Aktinien) gehören, entwickelten sich über Einzelpolypen, die aus der vielköpfigen Urkoralle durch Reduktion des gemeinsamen Körpergewebes hervorgingen.

In einer eigenen, von der Urkoralle ausgehenden Entwicklungslinie mit nur vier Gastraltaschen entstand eine merkwürdig erscheinende Art der vegetativen Vermehrung. Die Polypen-Oberteile wurden abgeschnürt, schwammen eine Zeit lang durchs Wasser und konnten neue Korallen gründen. Bei verlängerter Schwimmzeit begannen die Eier und Spermien an den Schwimmstadien zu reifen, und aus befruchteten Eiern gingen wieder Polypen hervor. Der **Wechsel Polyp/Meduse** war eingeleitet. Zu den Medusentieren (Medusozoa) zählen die großen **Quallen** der Scyphozoen ebenso, wie die kleinen Medusen der **Hydrozoen**, unter denen viele Arten reichverzweigte Polypenstöcke bilden.



der Cilien-Platten-Reihen in den schlechteren Antrieb der einzelstehenden Cilien verwandeln. Das heißt, es müsste ein energie-günstiger Zustand in einen energie-ungünstigen Zustand übergehen, und das ist bei Organismen gewiss nicht möglich, denn letztlich sichert sich ihr Weiterleben aus dem Verhältnis von Energie-Input und Nachkommen-Output, und der einzelne Organismus ist die Maschinerie, die diesen Umsatz von Stoff und Energie leisten muss. Evolution verläuft nur als Effizienzsteigerung in diesem Input/Output-Verhältnis, sie kann in diesem Sinn nicht rückwärts laufen.

All diese Entwicklungen haben sich vor etwa tausend Millionen Jahren abgespielt, in einer Zeit, aus der kaum Gesteine erhalten sind, die Fossilien führen. Die reichhaltige Fossil-Überlieferung setzt erst mit dem Kambrium vor etwa sechshundert Millionen Jahren ein, und zu dieser Zeit waren schon alle grundlegenden Bautypen des Tierreiches vorhanden. Man spricht von der „kambrischen Explosion“, ein Wort, das mehr die Überlieferung betrifft als die Evolution, denn Evolution als Wandel der Organismen verläuft nicht in explosiven Sprüngen, sondern in allmählichen zeitaufwendigen Umbauten, die nur in kleinen Schritten durchführbar sind.

Ziehen wir hier eine Bilanz. Im Vergleich zu allen anderen Tieren sind die genannten Bautypen recht einfach, und deswegen hat man diese Tiere in der traditionellen Zoologie „Niedere Tiere“ genannt. Allerdings sollten wir bedenken: auch sie haben Hunderte Jahrmillionen gelebt, und sind zeitlich genauso weit von den Gallertoiden entfernt wie wir selbst. Warum hat sich ihr einfacher Körperbau erhalten? Wohl deswegen, weil diese Konstruktionen in sich so abgerundete Funktionsgefüge sind, dass sie nicht mehr grundsätzlich veränderbar sind. Zudem haben sie sich, jede auf ihre Art und Weise, das Nahrungsangebot der schwelbenden Feinpartikel des Meeres erschlossen, das nie versiegt, solange es Leben auf der Erde gibt.

Rippenquallen leben in nur wenigen Arten, aber die sind von sehr unterschiedlicher Gestalt. Dagegen zählen die Schwämme heute gegen die zehntausend Arten und die Korallen-Medusen-Tiere ebenfalls, – von den unzähligen fossilen Arten gar nicht zu reden. In dieser Hinsicht erscheinen uns diese Tiere erfolgreich und in keiner Weise „nieder“. Sie haben Hunderte Jahrmillionen überlebt und können weiterhin für ihr eigenes Überleben ebenso wie für ihre Fortpflanzung sorgen, und genau darauf kommt es in der Evolution von Lebewesen an.

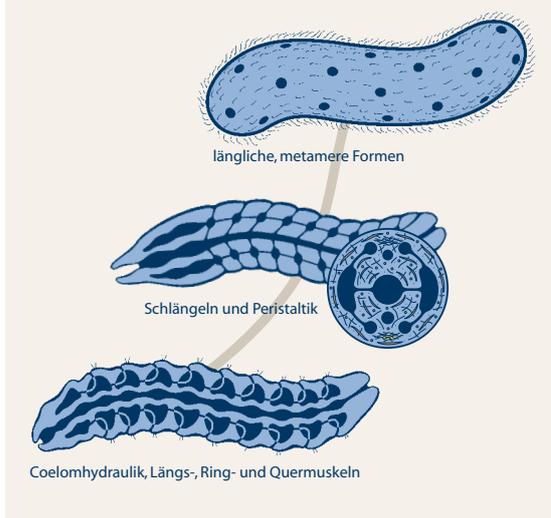
Die Coelomtiere entstehen

Doch nun zu der spannenden Frage, aus welcher Evolutionsbahn die Vielfalt von über 90% des Tierreiches stammt. Auch in diesem Fall fing alles mit ganz kleinen Veränderungen an. Längliche Gallertoiden konnten durch schlängelnde Bewegungen im Wasser vorwärts schwimmen, denn Schlängeln erzeugt im Wasser Vortrieb. Gerade bei größeren Gallertoiden bewirkte der Schlag der Cilien allein nur wenig. Um das Weitere zu verstehen, müssen wir jetzt eine technische Betrachtung anstellen: Die Wellenbewegung setzt die gallertige Bindegewebsmasse im Körper unter den Stress von Zug und Druck. Wenn der Körper sich biegt, so werden auf der Außenseite der Biegung die Fasern gezogen, auf der Innenseite gequetscht. Die Kräfte erzeugen erhebliche innere Reibung, und die Folge sind allmähliche Umbauten, die diese innere Reibung und damit den Energie-Aufwand verkleinern. In der Mittellinie sind die beiden Kräfte gleich Null, und ein hier längs laufender Kanal wird von diesen Kräften nicht gedehnt oder gedrückt; er wird zum Verdauungskanal, zum durchlaufenden Darm. Rechts und links von ihm, wo diese Kräfte stark wirken, ist es von Vorteil, wenn sich nach den Seiten laufende Kanäle erweitern. Sie werden zu hintereinander liegenden wassergefüllten Räumen, denn Wasser ist leichter zu verformen als Gallerte. Sie wirken als hydraulische Druckbehälter und als Kraftüberträger für die umgebenden Muskellagen. Diese Räume nennt man Coelome, vom grie-

Zum Poster:

Die Leibeshöhlen (Coelome) entstehen

Gallertoide von länglicher Körperform können mit schlängelnden Bewegungen voran schwimmen. Die Biegebewegungen setzen die Gallert-Faser-Masse des Körpers unter den Stress von Zug und Druck; das begünstigt, dass sich seitliche Kanäle zu flüssigkeitsgefüllten Räumen aufweiten, den Coelomen. Sie sind hydraulische Druckräume, umgeben von Bindegewebs- und Muskellagen; der Körper ist technisch gesehen ein **gegliedertes (=metameres) Hydroskelett**, genauer, eine gegliederte **Coelom-Hydraulik**. Der zentrale Kanal wird zum Darm. Der Mund ist flexibel, es entsteht ein muskulöser Schlund. Die Haupt-Nervenstränge liegen auf der Bauchseite; weswegen alle von hier aus entstandenen Tiergruppen als *Gastroneuralia* bezeichnet werden (*gaster* – Bauch; *neuron* – Nerv). Sie bilden den weitaus größten Teil des Tierreiches.



chischen *coeloma* – deutsch Höhle, Leibeshöhle, und alle aus dieser Evolutionsbahn stammenden Tiere heißen dementsprechend Coelomaten – Coelomtiere, Leibeshöhlentiere. Tiere dieses Konstruktionstyps haben ein Rechts und Links, Oben und Unten, und Vorn und Hinten. Das heißt, die-

Die Evolutionslinien im Vergleich

Tiere der bis hierher betrachteten Evolutionslinien unterscheiden sich konstruktionsmäßig in der Art, wie sie ihren Körper stabilisieren, das heißt, wie er in Form und damit funktionsfähig gehalten wird: Es stabilisieren sich:

- der Zwerg *Trichoplax* durch Faserzellen,
- die urtümlichen Gallertoide und die heutigen Ctenophoren durch Gallert-Faser-Masse,
- die Schwämme durch starre Stützelemente,
- die Coelenteraten durch das Hydroskelett des zentralen Verdauungsraumes, und
- die Coelomaten durch das Hydroskelett der hintereinander liegenden Coelomräume.

Bei den Coelomaten und bei den Coelenteraten kann der ursprüngliche Bau stark abgewandelt sein. In der weiteren Entwicklung der Coelomaten wurde das Coelom vielfach modifiziert. Coelomräume verkleinerten sich, vergrößerten sich, verschmolzen miteinander oder wurden verlagert; nur in wenigen Fällen verschwanden sie ganz. Zwei Hauptlinien haben sich frühzeitig getrennt: die Schlängel-/Peristaltik-Konstruktionen (siehe links) und die Achsenstab-Konstruktionen (siehe S. 32).

se Tiere sind rechts-links spiegelbildlich symmetrisch, das heißt bilateral symmetrisch, man nennt sie deswegen auch Bilateria.

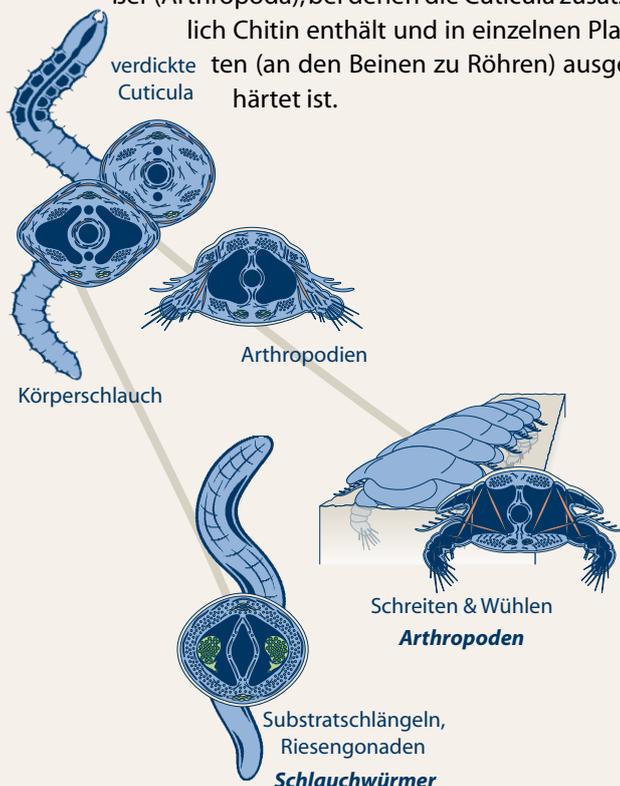
Die ganze Betrachtung war nun etwas sehr technisch, doch auf diese Weise lässt sich am besten verstehen, wie sich diese Evolutionsbahn entwickelte. Blicken wir nun auf diese Tiere. Gibt es sie noch? Nein, das nicht, aber es gibt ein Tier, an dem wir viele ihrer Eigenschaften studieren können: den Regenwurm. Er hat genau den technischen Bau wie eben für die urtümlichen Bilateria geschildert, doch mit vielen Spezialisierungen im Detail. Er kann sich schlängelnd bewegen, und er kann Längswellen von lang/dünn – kurz/dick über

Zum Poster:

Die verdickte Cuticula – Ecdysozoa

In dieser Evolutionsbahn wird die **Cuticula verdickt** und die Coelome verschmelzen zunehmend zu einem großen Raum. Der Körper wird zu einem einheitlichen hydraulischen Drucksystem, die Zugfestigkeit der Cuticula hält ihn in der runden Schlauchform, sie wirkt als außen liegendes Skelett (Exoskelett). Die Cuticula ist so dick, dass die Tiere sich von Zeit zu Zeit häuten müssen um zu wachsen. Dazu wird die äußere Schicht der Cuticula abgespalten („gehäutet“); durch den Mund wird Wasser aufgenommen, so dass der Darm vorübergehend aufgetrieben wird und den Körper dehnt; dann wird eine neue Schicht fester Cuticula ausgeschieden. Der Vorgang wird durch ein Hormon eingeleitet, das Ecdyson. Alle Tiere, (man unterscheidet nach traditioneller Einteilung sechs Gruppen), die von dieser Grundform abstammen, werden nach neuer Systematik als Ecdysozoa bezeichnet. Zwei davon sind im Poster dargestellt und im Hörbuch genannt: Die Schlauchwürmer (Nematoda), die extreme Vereinfachungen aufweisen, und die Gliederfüßer (Arthropoda), bei denen die Cuticula zusätz-

lich Chitin enthält und in einzelnen Platten (an den Beinen zu Röhren) ausgehärtet ist.



den Körper laufen lassen und sich damit im Erdreich grabend fortbewegen. Man nennt diese Bewegung peristaltisch. Zu beiden Bewegungsarten, Peristaltik und Schlängeln, waren auch die urtümlichen Coelomtiere in der Lage. Peristaltik war und ist auch die Bewegungsweise des Darmes, der ja seinerseits durch die Coelome von Bindegewebs-Muskel-Masse befreit wurde und sich dadurch erst peristaltisch bewegen kann.

Wir können uns diese urtümlichen Tiere jetzt besser vorstellen: manche schwimmen schlängelnd durchs Wasser und gehen schwebenden Feinpartikeln nach, von denen sie sich ernähren, und andere nutzen die Flexibilität ihres Körpers, um sich im sandigen und weichen Untergrund schlängelnd fortzubewegen und sich durch enge winklige Spalten zu drängen und hier größere Nahrungspartikel zu greifen. Tatsächlich entwickelten sich aus den Schwimmern und den Kriechern zwei Bautypen, die schon frühzeitig zwei entscheidende Evolutionswege bahnten. Der eine Weg führte letztlich zu den Wirbeltieren, der andere zu einer Vielfalt von Tieren, der wir uns zunächst zuwenden wollen: Würmer, Schnecken und Insekten.

Wurm, Schnecke, Insekt

Wollten wir aufzählen, welche Tiere von den urtümlichen Coelomaten abstammen, die bei der hohen Flexibilität ihres Körpers und der peristaltischen Bewegungsweise blieben, es würde ein gewaltig Wortgeklingel – sind ihrer doch über 20 Gruppen zu unterscheiden. Bevor wir uns einigen zuwenden, noch ein Wort zum Körperbau: die Spezialisierung auf Peristaltik und das Greifen der Nahrung mit zunehmend muskulöserem Mund führte vor allem zu zweierlei: erstens blieb der Körper zunächst auf ganzer Länge flexibel, und zum zweiten dehnten sich die wassergefüllten Leibeshöhlen immer mehr aus und drängten die Körpermasse immer weiter zur Peripherie, so dass sie immer dünnwandiger wurde. Das Leben am Boden und die allmählich entstehende Anordnung der Muskeln bewirkten, dass sich die von vorn bis hin-

Zum Poster:

Die Parapodien

Auf einer Evolutionsbahn der Wurm-Coelomaten erweiterten sich die Körperabschnitte mit den Coelomen seitlich zu Ruderplatten, den Parapodien. Sie haben einen oberen und einen unteren Lappen, und sind durch Chitinborsten verstärkt. Mehrere Evolutionslinien nahmen von hier ihren Ausgang.

Regenwürmer und Verwandte

Auf einer Evolutionslinie wurden die Parapodien bis auf wenige **kleine Borsten** abgebaut wie bei den Regenwürmern (Oligochaeten – Wenigborster). Bei ihnen blieb der typische Körperschlauch mit vielen Coelomen erhalten, und an ihnen ist die typische **peristaltische Bewegung** „lang/dünn – kurz/dick“ am leichtesten zu beobachten. Auf dem Weg hin zu den Hirudineen, den Blutegeln, wurde das Coelom von Muskelzügen und von Zellmassen, dem sogenannten **Parenchym**, verdrängt, so dass der Darm in die Gewebs- und Muskelmasse des Körpers eingebunden ist. Körper und Darm arbeiten nun als einheitliche Saugpumpe zusammen.

Borstenwürmer des Meeres

Die Polychaeta (Vielborster, Borstenwürmer) stehen der ursprünglichen Konstruktion noch nahe und zeigen doch die Vielfalt der Möglichkeiten, in der die Grundform abgewandelt sein kann. Parapodien und ihre Borsten nahmen vielerlei Formen an, und hinter dem Mund entstand ein muskulöser **Pharynx**, der bei vielen mit Chitinzähnen bewehrt ist und nach vorn ausgestülpt werden kann.

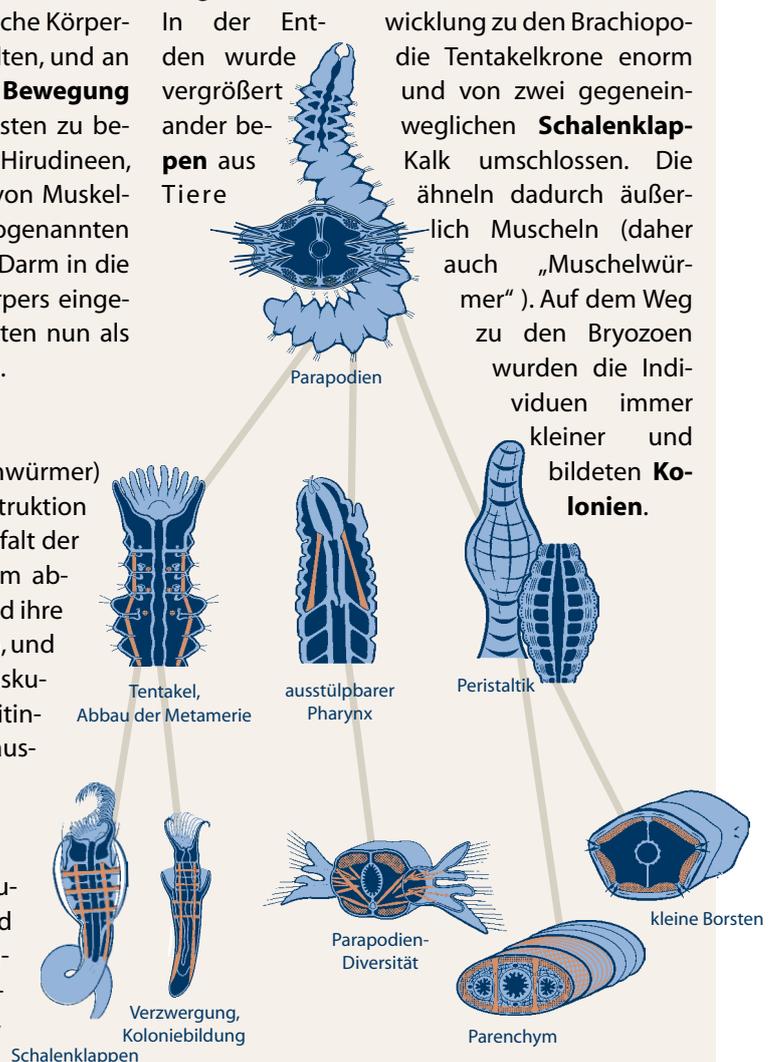
Tentakelkränze

Viele eindeutig den Polychaeten zuzuordnende Tiere leben festsitzend und haben Tentakelkränze zum Fangen von Feinpartikeln. Einige Tierformen, die ebenfalls von der urtüm-

lichen Parapodien-Wurmform abstammen, sind allerdings so stark verändert, dass man sie als eigenständig bezeichnet.

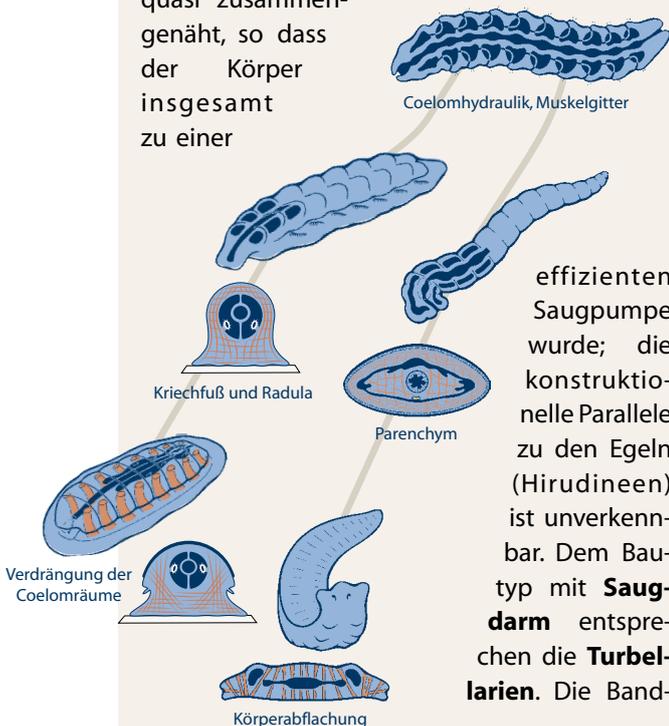
Die Bartwürmer (Pogonophoren) haben lange feine Tentakel, in die, anders als bei den Polychaeten, ein Coelomraum verläuft. Der Körper ist extrem lang und dünn, und sogar der Darm wurde abgebaut. Nahrungsstoffe werden durch die Haut aufgenommen. Segmente und Borsten sind nur noch am Hinterende des Körpers erhalten. Die Pogonophoren erschienen lange als eigenständige, ja rätselhafte Tiergruppe; inzwischen hat man sie (wieder) zu den Polychaeta eingereiht.

In der Entwicklung zu den Brachiopoden wurde vergrößert und von zwei gegenwärtigen **Schalenklappen** Kalk umschlossen. Die ähneln dadurch äußerlich Muscheln (daher auch „Muschelwürmer“). Auf dem Weg zu den Bryozoen wurden die Individuen immer kleiner und bildeten **Kolonien**.



**Zum Poster:
Plathelminthes, Plattwürmer
(Turbellarien, Cestoden)**

Eine andere Evolutionsbahn wurde von Wurm-Coelomaten eingeleitet, die ihre inneren Querwände nutzten, um ihren Körper abzuflachen. Das ermöglichte es ihnen, auf hartem Untergrund zu kriechen und sich festzusaugen. Diese Würmer konnten Beutetiere geradezu umwickeln, sich an ihnen festheften und schließlich mit ihrem stark muskulösen Mund aussaugen oder ganz verschlingen. Die **Körperabflachung** und die Saugfähigkeit wirkten um so effizienter, je mehr die Coelomräume von einem Füllgewebe, dem **Parenchym**, verdrängt wurden und je mehr Muskelzüge es gab. Die Cuticula, die bei den Vorfahren noch zum Zusammenhalt gegen den hydraulischen Druck der Coelome nötig war, konnte restlos abgebaut werden. Das dichte Körpergewebe konnte an beliebigen Stellen Saugnäpfe bilden, und der Mund verlagerte sich auf der Bauchseite immer weiter nach hinten bis zur Mitte. Darm- und Körper-Muskulatur sind quasi zusammengeknäht, so dass der Körper insgesamt zu einer



effizienten Saugpumpe wurde; die konstruktive Parallele zu den Egel (Hirudineen) ist unverkennbar. Dem Bautyp mit **Saugdarm** entsprechen die **Turbellarien**. Die Band-

würmer (**Cestoden**) haben keinen Darm mehr. Sie nehmen die Nahrung durch die Haut auf, und am hintern Körperende werden Teile abgegliedert, die mit reifen Eiern angefüllt sind.

Mollusken, Weichtiere

Die Entwicklung zu den Weichtieren, den Mollusken, begann zunächst in ähnlicher Weise wie die zu den Plattwürmern mit einer Abflachung der Bauchseite. Hier entwickelte sich ein immer dickeres Muskel-Faser-Gitter. Damit konnten sich die Tiere am Boden halten und über ihn kriechen. Es entstand so der flache, in sich bewegliche **Kriechfuß** der Mollusken. Die Coelomräume wurden nach der Rückenseite hin verdrängt. Oberhalb von ihnen blieb noch Cuticula erhalten, und unter ihr wurde eine Verstärkung aus Kalk ausgeschieden. Diese starren Platten legten Teile der Rückenseite fest. Von hier laufen starke Muskelzüge in den Kriechfuß. Die Tiere konnten sich zunehmend besser am Boden festhalten und dadurch ihren Mund auf den Bewuchs der Steine drücken und ihn abweiden. An der Unterseite des Mundrandes, sozusagen auf der Unterlippe, bildeten Hornzähne eine Art Reibeisen, die sogenannte **Radula**. Dieser starke Raspel hielt keine Oberfläche stand. Mit ihr konnten sogar Pflanzen abgeschabt werden. Die sich eröffnende Nahrungsbasis war nahezu endlos, die ökologischen Folgen dieses Evolutionsschrittes ebenso.

Die gegliederten Rückenplatten der **Käferschnecken** bilden nur indirekt die alte metamere Gliederung ab; die **Wurmollusken** sind weiter evolvierte Formen. Die einheitliche Schale der **Schnecken** ist hochgetürmt und spirilig gerollt, bei den Muscheln zu zwei Schalenklappen geteilt. Unter den **Cephalopoden** haben die fossilen Ammoniten und der lebende Nautilus eine gekammerte eingerollte Schale, und bei den Tintenfischen ist sie einfach gerade und ins Innere einer speziellen Tasche verlagert.

ten durchlaufenden Haupt-Nervenstränge auf der Bauchseite organisierten. Zellen an der Oberfläche schieden eine dünne Lage von Bindegewebs- und Chitinfasern ab, die Cuticula. Ihre Fasern sind äußerst zugfest und die Cuticula hat damit einen erheblichen Anteil daran, den unter innerem Flüssigkeitsdruck stehenden Körper zusammen zu halten.



Abb. 7: Auf dem Evolutionsweg zu den Schlauchwürmern verschmelzen die Coelome zu einem einheitlichen Raum, in dem jederseits eine große Gonade liegt (aus SYED 2006)

Schauen wir auf einige Tiere, die von diesem Bautyp abstammen, weil sie zeigen, wie enorm die Bandbreite der Umbau-Möglichkeiten von hier aus war.

Eine radikale Vereinfachung zeigt uns der Bauplan der Schlauchwürmer. Alle Coelome sind zu einem einzigen großen Raum verschmolzen, ihre Zellenwände mitsamt Cilien und der Blutkreislauf sind verschwunden, und es gibt nur noch Längsmuskelfasern, die

in Zellen entlang der Körperwand sitzen. Der Innendruck ist sehr hoch, die Cuticula ist sehr dick und hält ihm stand. Am Rande: dies ist ein weiteres Prinzip in der Evolution – oder sagen wir besser ein Kriterium, anhand dessen wir Evolutionsverläufe rekonstruieren – Strukturen, die Energie verbrauchen, ohne von Nutzen zu sein, werden abgebaut, sie werden eingespart.

Auch die Krebse, die Insekten, die Tausendfüßler, die Spinnen sind aus dem weichhäutigen urtümlichen Bautyp entstanden. Der Panzer ist einfach gehärtete Cuticula aus Chitin, und die Härtung lässt nur die Stellen weich, die als Gelenke arbeiten. Auch diese Tiere haben eine einheitliche Leibeshöhle und einen hohen inneren Flüssigkeitsdruck. Und auch diese Tiere sind letztlich

die alten hydraulischen Systeme geblieben. Aber die Besonderheit, die sich bei ihnen herausgebildet hat, sind die Beine. Ursprünglich war an jedem Segment auf der Bauchseite ein Beinpaar entstanden, bei den Hundertfüßlern und den Tausendfüßlern und vielen Krebsen sind noch viele Beinpaare zu sehen, bei Spinnen und Insekten hat sich ihre Anzahl vermindert. Die Besonderheit der Besonderheit ist es aber, dass die Beinpaare nahe dem Mund zu Werkzeugen der Nahrungsaufbereitung umgewandelt wurden, sie spezialisierten sich vielfältig zum Beißen, Kauen, Stechen, Saugen. Der Mund selbst ist weich und saugt nur die aufbereitete Nahrung ein. Es entstanden im Detail geradezu technische Geräte, wie Feilen, Sägen, Scheren, Zwickzangen, Quetschzangen, Löffel, Schaber, Nadeln, Giftspritzen, Saugröhren. Hinzu kommt die Vielfalt der Beingliederung. Bekannt sind die Greifzangen an den Beinen der Krebse, die bei Großkrebsen wie dem Hummer zu wahren Brechzangen werden können. Der Vielfalt scheinen keine Grenzen gesetzt, und tatsächlich machen diese Tiere zusammen den größten Teil des Tierreiches aus. Die heute bekannten Arten der Vielfüßler zählen nach Tausenden, die der Krebse und Spinnentiere nach mehreren Zehntausenden, die der Insekten gehen gegen die Million.

Eine ganz gegensätzliche Entwicklung, nämlich weg von der Coelomhydraulik hin zu Gittergeweben aus Zellen und Fasern, vollzog sich auf dem Weg zu den urtümlichen Schnecken, von denen wiederum Muscheln und Tintenfische abstammen. Die Cuticula verschwand bis auf einen kleinen Rest am Rücken. Unter ihm wurde Kalk eingelagert, und daraus entwickelten sich das bekannte Schneckenhaus und die Muschelschalen.

Blicken wir noch einmal auf die Schnecken, die Krebse und Insekten, und all die wurmförmigen Tiere: Etwas fehlt ihnen: harte Skelett-Teile im Inneren des Körpers. Harte Teile wurden immer nur außen aufgebaut: Die zum Chitinpanzer gewordene Cuticula der Krebse und Insekten, die Kalkschalen der Schnecken und Muscheln.

Vom Wurm zum Fisch

Gehen wir nochmals kurz zurück zu den urtümlichen Coelomtieren, unter denen wir Schwimmer und Kriecher unterscheiden konnten. Wir haben gesehen: Bei den peristaltisch kriechenden Tieren wurde der Körper immer flexibler und die Coelome dehnten sich aus und drängten die Muskeln zur Seite. Umgekehrt verlief es bei den Schwimmern: bei ihnen wurden die Längsmuskeln immer voluminöser und drängten die Coelome nach der Mitte hin zu immer kleineren Räumen zusammen. Es ist zunehmend die Muskel-Bindegewebs-Masse, die den Körper ausmacht und damit in seiner Form stabil hält, wie man an jedem Fisch sehen kann. Die Bewegungen konzentrierten sich immer mehr nur auf eines: auf den Vortrieb durch Schlängeln.

Unter diesen Umständen musste in diesen urtümlichen Schlänglern ein entscheidender Umbau erfolgen. Die Längsmuskeln rechts und links brauchten zwischen sich einen Kraftüberträger, damit

die Kontraktion der einen Muskeln die anderen wieder dehnt. Bei den urtümlichen Schlänglern entwickelte sich ein effizienter Kraftüberträger in einer geradezu bahnbrechenden technischen Lösung. In der Körpermitte oberhalb des Darmes lag noch gallertiges Bindegewebe, und aus ihm organisierte sich ein fester, doch biegsamer Stab über die ganze Länge des Körpers. Dieser runde Stab ist die Chorda, der Vorläufer der Wirbelsäule. Alle Tiere, die sich von hier aus entwickelten, werden Chordaten genannt (siehe Abb. 8).

Die Chorda hält die Länge des Körpers, und die Längsmuskeln können ihn nicht zusammenziehen wie eine Ziehharmonika. Kontrahieren sich Muskelgruppen rechts, so biegen sie die Chorda und dehnen die Muskeln links. Jetzt ist die Schlängelbewegung viel effizienter als zuvor. Von hier an steht der weiteren Entwicklung nichts mehr im Wege. Die Längsmuskeln, umhüllt von ihren Bindegeweben, werden größer und rücken bis an die Chorda heran. Coelome vereinen sich bauchseits zu einer großen einheitlichen Leibeshöhle, in der Darm, Leber und andere Organe ihren Platz finden. Der vordere Bereich nimmt zunehmend weniger an den Schlängelbewegungen teil, er organisiert sich zum Kopf mit Mund und Kiemen, die früher seitlich abgehende Wasserkanäle waren. Im Kopf organisieren sich Hauptsinnesorgane und Gehirn, und von ihm ausgehend zieht der Hauptnervenstrang – das Rückenmark – auf der Rückenseite durch den gesamten Körper und steuert von dort aus die Muskeln an. Die Haut formt sich aus den Resten von Muskel-Bindegewebsmasse, die nicht zum Bestandteil der dicken Längsmuskeln wurden. Und entlang am Rücken und an der Bauchseite rechts und links entsteht ein Flossensaum, der um das Schwanzende herumreicht.

Solche Chordaten haben über viele Millionen Jahre hinweg die Meere bevölkert. In reichem Maße kennt man ihre Fossilien: bizarr geformte Zahnleisten, die zum Teil in Serien liegen. Man nannte sie Conodonten, und es blieb rätselhaft, von welchen Tieren sie stammten. Erst 1984 wurde ein Fossil

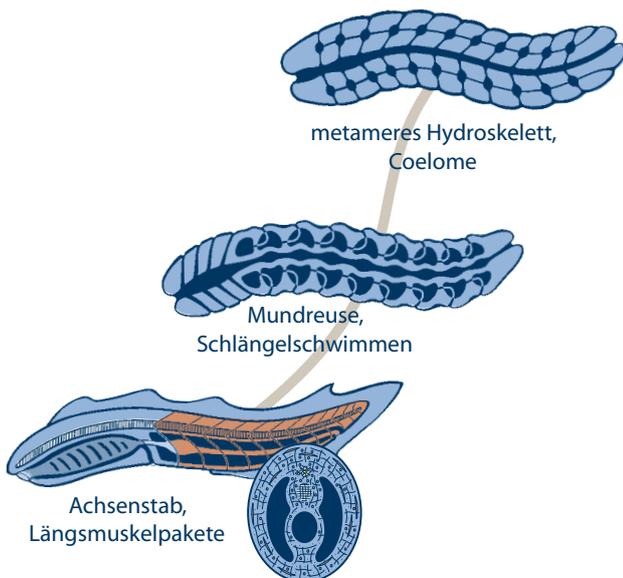


Abb. 8: Evolution der Achsenstab-Konstruktionen. Die Schlängelbewegung wird effizienter, wenn sich im Inneren eine Achse bildet, die den Körper in der Länge festlegt. Sie organisierte sich aus Bindegewebe oberhalb des Darmes: die Chorda dorsalis, die Rücken- säule. Sie ist der Vorläufer der Wirbelsäule.

gefunden, dessen Weichkörper erhalten war: ein längliches Tier mit zwei Augen und mit Muskelblocks ähnlich wie bei einem Fisch.



Die Sensation in der Fachwelt war groß; heutzutage zweifelt niemand mehr, dass die Conodonten-Tiere Chordaten sind.

Nur ein urtümlicher Chordat lebt heute noch: Das Lanzett-Fischchen, *Branchiostoma*. Es hat Chorda und Flossensäume, viele Kiemen, aber keine Schuppen und keine Knochen. Es ist auf der Stufe nahezu stehen geblieben, aus der sich die Fische entwickelten, und es überdauerte die Jahrtausenden als einfaches Chordat-Tier.

Wie entstanden nun aus solchen Chordaten die Fische? Sie haben doch Flossen, Kiefer und Zähne im Mund, Schuppen auf der Haut und ein richtiges Knochenskelett. Betrachten wir die Körper-Konstruktion und wie sie funktioniert.

Günstig ist es, wenn bei den schlängelnden Bewegungen der vorderste Teil des Körpers ruhig gehalten wird, denn er gibt die Richtung vor. Hier entsteht der Kopf mit seinen Sinnesorganen. Der lange dahinter liegende Teil schlängelt und schiebt den Kopf voran. Das Schlängeln geht besser, wenn der Körper nicht rund ist, sondern seitlich flach, so wie die Schwanzflosse flach ist. Nun ist es gar nicht so einfach, ohne inneres Skelett den Körper abzuflachen. Dennoch geschah das, aber auf andere Weise. Die Haut war nicht Teil des Bewegungsapparates, sie bot ruhig gehaltene Bezirke. Im vorderen Teil, im Kopf, entstanden in ihr deswegen große Knochenplatten, im hinteren schlängelnden Teil entstanden dicke kleine Knochenplatten. Sie liegen in Reihen übereinander dicht an dicht, und mit der dahinter liegenden Reihe können sie sich ein wenig überlappen wie Dachziegel, wenn

der Körper schlängelt. Diese Reihen pressen den Körper in eine flachere Form.

Es sind gewaltig erscheinende Knochenpanzer, die diese Fische des Erdaltertums für viele Millionen Jahre trugen. Und man hat sich gefragt, gegen welche Feinde die Fische sich mit solcher Panzerung wohl schützten. Doch diese Frage ist falsch gestellt. Die Knochenplatten waren eine Folge des damaligen Körperbaus, sie entstanden aus technischer Notwendigkeit (siehe Exkurs S. 34).

Betrachten wir einen zweiten Gesichtspunkt des Schwimmens, nämlich die Richtungs-Steuerung. Ein länglicher Körper, der von hinten angetrieben wird, braucht horizontal liegende Stabilisatoren, sonst kippt er über. Man sieht es an den Flugzeugen: die großen vorderen Tragflächen reichen nicht aus, es müssen am Heck zwei weitere kleinere stehen. Nur so ist das Flugzeug flach liegend in der Luft zu halten. An den Fischen haben die beiden Brustflossen und die beiden Bauchflossen eben diese Funktion. Sie entstammen den alten Flossensäumen früherer Chordaten, die bis auf diese beiden technisch notwendigen Flossenpaare reduziert wurden. Aus ihnen entstehen viel später die vier Beine der Land-Wirbeltiere, und damit letztlich auch unsere zwei Beine und zwei Arme.

Die Panzerfische haben ein Evolutionsniveau erreicht, von dem aus die Knochenfische entstehen konnten, die „richtigen“ Fische, die uns vertraut sind. Dazu ist wieder etwas technisch-biologisches zu sagen: Körpergewebe, die ruhig gehalten werden, organisieren sich um. Wir kennen das aus eigener Erfahrung: Ohne Bewegung bauen sich Muskeln ab, versteifen sich Gelenke, ja können sogar verknöchern. Genau das passiert in der Evolution auch, und hier ist es sogar von Vorteil, wenn nicht bewegte Körperbereiche versteifen. Sie benötigen dann weniger Energie, denn sie halten ihre Form durch die steifen Strukturen. Solche Strukturen kennen wir als Knorpel oder Knochen. Überall dort, wo dauerhafte Druckspannungen auftreten, bilden sich die Gewebe zu Knorpel und schließlich

**Zum Poster:
Die Vielfalt der Achsenstab-Konstruktionen**

Die Ambulacraria

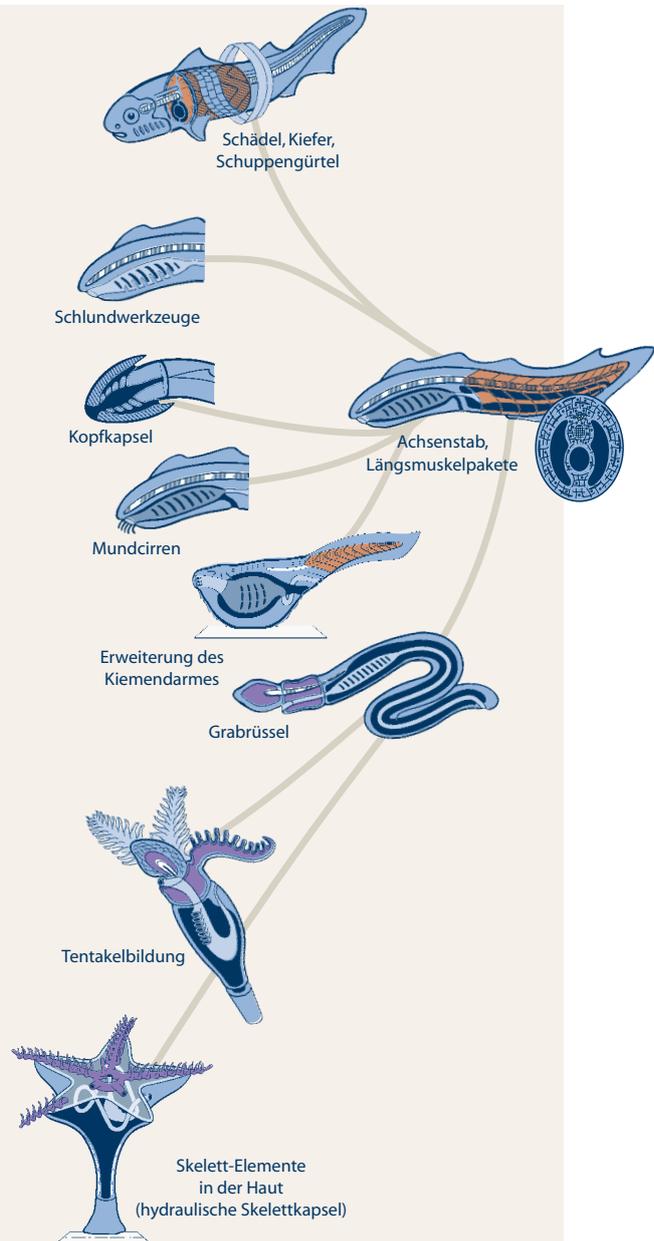
So merkwürdig es auch erscheinen mag: Von den schlängelschwimmenden Chordaten aus gab es eine Möglichkeit, die versteifende Chorda abzubauen und somit quasi wieder zum Wurm zu werden. Diese Entwicklung ging von solchen Chordaten aus, die überwiegend am Boden lebten, wo sich von oben abgesunkene Nahrungspartikel an der Oberfläche und den ihr nahen Schichten anreicherten. Die Beweglichkeit des noch vorhandenen Muskel-Faser-Gitters am vorderen Körperende konnte benutzt werden um zu wühlen, ja sogar um mit peristaltischen Bewegungen das Sediment beiseite zu drücken und den Körper einzugraben. Die Fortbewegung durch Schlängeln wurde dadurch immer weniger wichtig, die Chorda und die dafür nötige Muskulatur wurde abgebaut. Das Vorderende entwickelte sich zum weichen, peristaltisch beweglichen **Grabrüssel**. Hinter ihm blieb ein hydraulisch dehnbare Bereich, der sogenannte Kragen, der das Tier im Sediment festhält, wenn der Grabrüssel nach vorn drückt. Der lange hintere Körperabschnitt hat nur Längsmuskeln, aber nahezu keine Ringmuskeln, er kann nur nachgeschleppt und beigezogen werden. Jeder dieser drei Teile hat einen eigenen Coelomraum, man spricht von einem *trimeren* Bauplan.

Enteropneusten (Eichelwürmer)

Dem geschilderten Bautyp entsprechen die Eichelwürmer (Enteropneusta). Hinter dem Kragen steht eine lange Reihe von Kiemen, die von einer Hautfalte überdeckt sind. Im Bereich des Kragens liegt ein versteifter Teil, der als Rest der im übrigen gänzlich abgebauten Chorda gedeutet werden kann.

Pterobranchia und Graptolithen

Eine weitergehende Entwicklung machten Tiere, die das Sediment als Lebensraum beibehielten,



aber ihr Vorderende zum Nahrungsfang ins freie Wasser vorschoben; bei ihnen erweiterte sich der Kragen zum Trichter und schließlich zu **Tentakeln**. Die sehr kleinen Pterobranchia, die nur zwei Kiemenspalten und zwei Tentakel haben, sowie die fossilen Graptolithen bauten schließlich eigene Wohnröhren.

Echinodermen, Stachelhäuter

Der Entwicklungsweg zu den Echinodermen, den Stachelhäutern, nahm seinen Anfang bei feststehenden wurmförmigen Tieren mit Tentakelkronen. Der Kragen samt seinem Coelom erweiterte sich an drei oder fünf Stellen zu Tentakeln. Von hinten wuchs der Körper über den Kragen und die Tentakel nach vorn, er umwallte und stützte sie. Dieser Bereich wurde ruhig gehalten, er konnte deswegen mit **Kalkplatten in der Haut** versteift werden. Es entstand auf diese Weise eine unter **hydraulischem Druck stehende Skelettkapsel**. Der ehemals lange Hinterkörper wurde verkürzt, so dass sich der Darm in Schlingen in der Skelettkapsel anordnete, was wiederum zur Folge hatte, dass die Skelettkapsel sich an fünf Stellen seitlich ausweiten konnte. Da die fünf Auswüchse aber dank des hydraulischen Druckes automatisch gleichförmig wurden, entstand die fünfstrahlig-symmetrische Anordnung, die an Seesternen so augenfällig ist. Das Ergebnis ist der kompliziert verschachtelte Körperbau der Echinodermen: Im Inneren des weiträumigen Skelettkapsel-Coeloms liegt ein kleines Coelom (der Rest des abgebauten Grabrüssels) und das ringförmige Tentakelcoelom, das Abzweigungen in die Arme hat.

Die fossilen **Carpoideen** bilden einen frühen Seitenzweig dieses Evolutionsweges. Sie haben eine Reihe von Öffnungen, offenbar Kiemenspalten. Die **Seelilien** haben einen langen Stiel, der den kleinen Zentralkörper mit seiner großen Tentakelkrone trägt. Die sich frei bewegenden **Seesterne** und Schlangensterne sowie die **Seeigel** und Seegurken gehen auf Tentakelkronen zurück, die sich von ihrem Stiel abgelöst und verselbständigt haben.

Die „Peribranchialia“

Die Kiemenspalten funktionieren am besten, wenn sie fein und zahlreich sind; das aber destabilisiert die Körperwand. Deswegen sind die Stege zwischen den Spalten meist durch Knorpel verfestigt. In mehreren Fällen bildete sich eine

zusätzliche Stütze, indem der Körper sich seitlich verbreiterte und um den Kiemendarm herumwuchs. Es entstand damit der sogenannte Peribranchialraum (griechisch: *peri* – um herum; *branchios* – Kieme), offenbar unabhängig auf einigen Evolutionslinien.

Kieferlose Panzerfische

Hiervon ausgehend waren nun breite flache Körperformen möglich. Große Tiere, deren Vorderkörper mit starken Knochen-Platten versteift war, sind die fossilen **kieferlosen Fische**, wie die fossilen Heterostraci und Osteostraci.

Das Lanzettfischchen

Lanzettfischchen *Branchiostoma* ist von typischer Fischgestalt. Der Kiemendarm ist lang und hat zahlreiche Kiemenspalten. Bewegliche Fortsätze (**Mundcirren**) können den Mund verschließen. Der Peribranchialraum ist geschlossen bis auf die mittig liegende Ausstromöffnung. Die Chorda erstreckt sich über die ganze Länge des Tieres bis weit ans Vorderende.

Tunikaten, Manteltiere

Tiere mit einem ausgedehntem Kiemendarm konnten zur feststehenden, sessilen, Lebensweise übergehen. Aus dem durch den Kiemendarm laufenden Wasserstrom wird Nahrung gesammelt, ohne dass die Tiere sich fortbewegen. Damit wurde der Weg zu den Tunikaten, den Manteltieren, eingeschlagen. Der gesamte Bewegungsapparat wurde zurückgebildet, nur die frei schwimmenden Larven haben noch ein Stück Chorda und Längsmuskelpakete. Der **Kiemendarm** weitete sich zu einem überdimensionierten Raum, umgeben von einem am Boden festgehefteten, zäh dickwandigen Peribranchialraum, dessen Wand, die sogenannte Tunika, Horn und Chitin enthält. Die **Seescheiden**, Ascidien, sind ständig feststehend, die **Salpen** sind dünnwandig und leben frei schwimmend.

zu Knochen um. Überall dort, wo Zugspannungen anhalten, bilden sich Bänder und Sehnen, überall dort, wo Spannung und Entlastung wechselweise wirken, bleiben Muskelstränge erhalten.

Es sind die Kräfte, die schon zum Schuppenhemd der Panzerfische geführt haben, und die nun im Inneren bewirken, dass Knorpel und Knochen entsteht, weil die äußere Stabilisierung dazu führte, dass innere Teile nur noch wenig gewalzt wurden. Um die Chorda herum entstehen schließlich die Wirbel, zwischen den Muskeln die Rippen und andere Knorpel und Knochen, in Kopf und Kiemen die inneren Knorpel und Knochen, mit ihnen auch Kiefer mit ihren Zähnen.

Die Fische sind die artenreichsten Wirbeltiere. Sie sind aber nur ein Zweig innerhalb der Chordaten. Ein anderer Zweig führte zu eigentümlichen Tierformen. Zu ihnen zählen die Seescheiden und Salpen und die Stachelhäuter, von denen die Seesterne und Seeigel allgemein bekannt sind. Wir wollen diese Evolutionslinien hier nicht weiter betrachten. Sie waren bis in neueste Zeit hinein rätselhaft, doch sie konnten nach den gleichen Prinzipien, wie wir sie für die Entstehung der Fische aufgezeigt haben, schlüssig rekonstruiert werden (siehe Exkurs S. 34-35).

Der Fisch geht an Land: die Amphibien

Der 100 Millionen Jahre andauernde Zeitraum von Silur und Devon war das Zeitalter der Fische. Mit dem Ende des Devon und dem Beginn des Karbon vor 340 Millionen Jahren war es dann so weit, dass es Fische gab, die allmählich zum Leben an Land übergehen konnten. Viele kleinere Veränderungen waren notwendig, bis manche Fische zu diesem Schritt in der Lage waren. Welche körperlichen Voraussetzungen aber waren das? In welcher Umwelt konnte das geschehen? Warum sind sie überhaupt an Land gekommen, warum sind sie dort geblieben, und wie haben sie es geschafft, dort dauerhaft zu leben? Durch viele Fossilfunde weiß man heute recht gut Bescheid, wie sich der Körperbau wandelte und wie die Umstände dieser Übergangsphase waren.

Tatsächlich hatten sich im Zeitalter der Fische alle Strukturen entwickelt, die nötig waren, um zum Landleben überzugehen. Knochenskelett, Schädel mit Ober- und Unterkiefer, Zähne, Lungen, und auf der Bauchseite zwei Paar Flossen. In einigen Fischkonstruktionen waren diese Voraussetzungen vereint, und sie eröffneten den Schritt vom Wasser auf das Land. Diese Fische waren die so genannten Quastenflosser: sie hatten dicke fleischige Flossen, und sie hatten Lungen. Es waren längliche Tiere, mit breit-flachem Schädel, großem, weit aufreißbarem Mund und spitzen Zähnen. Der ganze Körper war auf schnelles Zuschnappen ausgerichtet, so wie heute der Hecht, der auch rein äußerlich eine gewisse Ähnlichkeit mit diesen Fischen des Erdalters hat. Offenbar ernährten sie sich von kleineren Fischen, Krebsen und Wasserinsekten. Und zweifellos konnten sie Landinsekten schnappen, die dem Wasser zu nahe gekommen waren. Man kann sich richtig vorstellen, wie sie im Uferbereich lagen und lauerten. Und gerade hier sind die vier kräftigen Fleischflossen von großer Hilfe: sie bieten im weichen Untergrund einen Halt, wenn der Fisch vorstößt, um ein Beutetier zu greifen. Doch nicht nur das. Diese Fische lebten in den Gewässern der feuchten tropischen Wälder, und

ihr Körperbau erlaubte ihnen, das Wasser zu verlassen, wenn es zu flach wurde oder überfüllt war. Sie robbten über den feuchten Boden, bis sie ein anderes Gewässer gefunden hatten, und konnten unterwegs ruhen und im Dickicht nach Insekten schnappen. Jegliche Verbesserung an den vier bauchseits stehenden Extremitäten war von Vorteil, denn das erweiterte letztlich die Nahrungsbasis und die Überlebens-Chance.

Allerdings, so weit beschrieben könnte der Fisch noch nicht wirklich an Land laufen, er kann hier allenfalls voran robben. Man muss wieder etwas Technisches bedenken: Die Fischflosse lässt sich im Wasser mit wenig Muskelkraft bewegen, und um die Flosse im Körper festzuhalten braucht es nur ein paar kleine Knochen und Bindegewebsbänder. Die Beine eines Landtieres müssen aber das Körpergewicht hochstemmen und brauchen dazu eine viel festere Verankerung im Körper. Die Aufgabe übernehmen der Schultergürtel und der Beckengürtel. In diesen beiden Knochen-Muskelringen ist die Wirbelsäule eingehängt. Werden nun die beiden Ringe durch die Extremitäten emporgehoben, so hebt sich der gesamte Körper vom Boden ab. Eine weitere Effizienzsteigerung,

denn nun reibt der Bauch nicht mehr am Boden, was weitere Energie für die Fortbewegung einspart. Die Möglichkeiten, die sich nun eröffnen, sind vielgestaltig.

Wir kennen viele Amphibien aus dem Fossilbericht, die dem beschriebenen Körperbau sehr nahe stehen. Die heutigen Amphibien – Frösche, Molche, Kröten, Salamander, Blindwühlen – sind hochspezialisierte und hochabgeleitete Formen. Sie zeigen sicherlich nicht urtümliche Stadien.

Amphibien – die Doppellebigen – die auf zwei Seiten Lebenden, gemeint sind Wasser und Land – sind merkwürdige Geschöpfe der Evolution. Einen Teil ihres Lebens verbringen sie als Larve im Wasser, einen Teil ihres Lebens an Land. Sogar bis in die Wüsten und die eisigen Kälten Sibiriens hinein sind einige Frösche vorgedrungen. Es grenzt an ein Wunder, dass Tiere, die eigentlich auf Wasser angewiesen sind, in den scheinbar unwirtlichsten Regionen unseres Planeten überleben können. – Aber: Wunder gibt es für die Wissenschaften nicht, sondern lediglich ungelöste Fragen, die zu neuen Forschungen anregen. Es gilt Rätsel zu lösen, welche die Natur für uns bereithält.

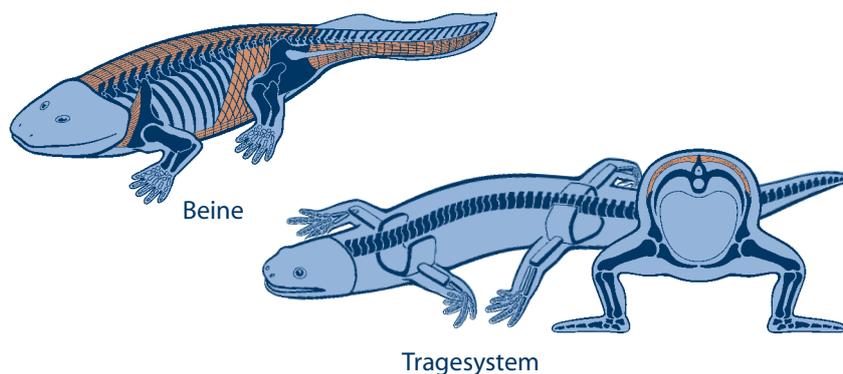


Abb. 9: Die Landwirbeltiere entstanden aus Fischen, die die Voraussetzungen zu einem längeren Aufenthalt an Land hatten. Außer den Kiemen hatten sie Lungen, und der untere Teil ihrer Flossen war muskulös und von Knochen gestützt. Diese Flossen konnten zu Beinen werden, und im Inneren des Körpers entstanden große Knochen, an denen die Beine ansetzten: der Schulter- und der Beckengürtel. Diese Knochenringe bilden zusammen mit der Wirbelsäule ein Tragesystem, mit dem der Körper über den Boden gehoben wird. Man kennt eine ganze Reihe von Fossilien aus dieser Übergangsphase. Die Anzahl der Zehen war noch nicht festgelegt, es gab sechs- und sieben-zehige neben fünf-zehigen Füßen, die sich schließlich als alleinige durchsetzten.

Die Eroberung des Landes: die Reptilien

Kommen wir aber wieder zurück zu unserer Evolutionsgeschichte. Die Fische waren an Land gegangen; wir haben die Amphibien kennen gelernt als eine Variante der ersten landlebenden Wirbeltiere. Reptilien stellen höchst wahrscheinlich eine eigene Linie dar. Wir wollen sie nun etwas genauer betrachten, denn in die weitere Verwandtschaft der Reptilien gehören auch dieje-

nigen ausgestorbenen Organismen, die uns Menschen am meisten faszinieren: Die Dinosaurier. Sie erscheinen uns riesengroß, gepanzert, mit wilden Zacken und Hörnern, *Tyrannosaurus* hat ein grässliches Gebiss, und vielleicht könnten wir sie doch wieder zum Leben erwecken wie im „Jurassic Park“. Doch langsam.

Wo kommen die Reptilien her? Warum können sie auf dem trockenen Land leben, ganz im Gegensatz zu den Amphibien, die auf die Nähe des Wassers angewiesen sind? Im Grund entstammen auch sie den Fischen und ersten Landtieren der Wälder des Karbon. Schon dort haben einige die Voraussetzung zum dauerhaften Landleben entwickelt. In ihren Eiern gab es nämlich eine zusätzliche Hülle um den Embryo herum; dazu eine feste äußere Hülle, die Luft herein aber keine Feuchtigkeit hinaus lässt, und vor allem: die Eier haben einen großen Nahrungsvorrat, nämlich den Dotter. Aus ihm ernährt sich der Embryo und es schlüpft ein bereits fertiges Tier, das dem erwachsenen Tier schon ähnlich sieht und selbständig Nahrung aus der Umgebung aufgreifen kann.

Den Reptilien standen nach und nach auch trockene Gebiete, ja sogar Wüsten, als Lebensraum offen, wenn nur genügend Trinkwasser zu finden war. Daneben gab es immer aufs Neue Reptilien, die den Lebensraum Wasser für sich wieder erschlossen haben, so wie die Krokodile und viele Schildkröten. Sie sind aber darauf angewiesen, Luft zu atmen und ihre Eier an Land zu legen, denn eigentlich sind sie ja schwimmende Landtiere.

Die urtümlichen Reptilien, die Stammeltern aller weiteren, teilten sich schon sehr bald in fünf Evolutionslinien auf: Neben Fischechsen und Schildkröten auch Saurier, unter ihnen die Archosaurier, die herrschenden Saurier. Sie beherrschten nämlich mit ihrer Vielfalt die Erde des gesamten Erdmittellalters von der Trias bis zum Ende der Kreide, mithin über einen Zeitraum von um die 180 Millionen Jahre.

Die Dinosaurier: Riesen und Zwerge. Entstehen und Aussterben

Warum waren die Dinosaurier so groß? Warum sind sie ausgestorben? Beide Fragen kann man so wie sie gestellt sind, nicht beantworten, denn sie sind falsch gestellt, weil sie an den Mechanismen der Evolution vorbei gehen.

Zunächst: Riesen und Zwerge finden sich in allen Tiergruppen, aber bleiben wir hier bei den Wirbeltieren. Walhai und Weißer Hai sind die größten heute lebenden Fische, der gewaltige *Dinichthys* – der Name bedeutet Schreckensfisch – aus dem Devon war wohl noch größer und schwerer. Ein Zwerg-Guppy, einer der kleinsten unter den Fischen, wiegt kaum ein Gramm, diese Kolosse wiegen das Millionenfache. Es ist zu bedenken: eine Tonne ist eine Million Gramm. Nicht anders ist das Verhältnis eines Zwerg-Salamanders, wohl eines der kleinsten Wirbeltiere, zu einigen seiner fossilen Verwandten, plumpen Labyrinthodontier-Amphibien im Riesenformat einiger Meter Länge.

Brontosaurus, *Brachiosaurus* und *Diplodocus* als größte Landtiere aller Zeiten mögen an die Grenzen des physikalisch Machbaren gestoßen sein – neue Rekorde werden durch Einzelfunde aufgestellt, die Namen sind ebenso fantasievoll wie beeindruckend: *Ultrasaurus*, *Supersaurus*, *Kosmosaurus*. Körpergewichte von um die 100 Tonnen werden vermutet. Allein ein Schulterblatt eines solchen Giganten misst über 270 cm. Ebenso beeindruckend der Flugsaurier *Quetzalcoatlus* mit seinen 12 Metern Flügelspannweite und der tonnenschwere furchteinflößende *Tyrannosaurus rex* – allen wohl aus dem Film „Jurassic Park“ bekannt – wenn er sich auf seinen zwei Beinen erhob, doch auch sie waren die Ausnahmen. Die weit überwiegende Anzahl der Dinosaurier war in einer Größenordnung zwischen Eidechse und Krokodil. Unter den Säugetieren leben die größten im Wasser, nämlich die großen Wale, und mit den heutigen Riesen des Landes, wie Mammut, Elefant und Nashorn, sind sie sichtlich die Minderheit gegenüber

den Mittelgroßen und den Kleinen: Die meisten Säugetiere haben eine Größe wie Maus, Eichhörnchen und Wolf.

Dennoch, beide Fragen bestehen: „Warum gibt es Riesen und Zwerge? Warum sind so viele ausgestorben?“ Natürlich könnte man etwas trivial gegenfragen: Ja, warum eigentlich nicht? Und man wäre damit dem Kernpunkt beider Antworten gar nicht so fern. Wir müssen einen kurzen Einblick nehmen, wie Evolution eigentlich funktioniert.

Evolutionärer Wandel wird dadurch angetrieben, dass bei jedem Fortpflanzungsvorgang kleine Unterschiede gegenüber der Elterngeneration auftreten. Mit anderen Worten, es werden ständig neue Varianten in die Welt gesetzt. Und hierbei gibt es keine bestimmte Richtung, es gibt lediglich die Eingrenzung, dass Neues nur vom schon vorhandenen Körperbau aus erfolgen kann. Überleben und weiter fortpflanzen werden sich diejenigen Varianten, die in sich selbst funktionieren und ein Auskommen in der Umwelt finden. Die Folge ist: Organismen wandeln sich ständig im Laufe der Zeit, und da sie sich ausbreiten und somit räumlich getrennt werden, sind sie schließlich in jeder Hinsicht so weit voneinander entfernt, dass sie sich irgendwann nicht mehr fruchtbar kreuzen können.

So wundert es jetzt nicht mehr, dass es die große Vielfalt gibt, Riesen und Zwerge, schnelle und langsame, mobile und sesshafte. Mit dem ständigen Wandel der Organismen – wir sollten auch die Pflanzen, Pilze, Einzeller und Bakterien nicht vergessen – wird allerdings auch das Gleichgewicht aller Organismen untereinander und ihrer Umwelten andauernd geändert. Das Ganze ist ein fließendes Gleichgewicht. Damit ist es auch nicht mehr verwunderlich, dass manche Arten in die Lage kommen, nicht mehr zum geänderten Gleichgewicht zu passen. Praktisch heißt das: vielleicht verlieren sie ihre Nahrungsbasis oder ihren benötigten Raum, ihre Fortpflanzungsraten engen sich ein, oder ihre Wandlungsoptionen sind so gering geworden, dass sie entweder als „lebende Fossilien“

Jahrtausenden überdauern, oder dass ihre Nachkommen letztendlich nur noch dysfunktional sind – letztlich sterben sie aus. Wir sehen: Neu-Entstehen und Aussterben sind die beiden Seiten einer Medaille: des unabwendbaren evolutionären Wandels – katastrophale Ereignisse wie Meteoriteneinschläge, Vulkanausbrüche und Klimakatastrophen sind nicht primär für evolutiven Wandel und für Aussterben verantwortlich – schon gar nicht für das Aussterben der Dinosaurier. Sie waren schon längst auf einem absteigenden Ast, als der in Fachkreisen berühmt gewordene gewaltige Meteorit vor 65 Millionen Jahren die Erde getroffen hat. Er hat vielen Organismen die Lebensgrundlage entzogen, auch den schon recht vielfältig entwickelten Säugetieren, und er hat gewiss erhebliche Veränderungen ausgelöst, aber die Naturgesetze und damit die Mechanismen der Evolution hat er nicht zerschlagen.

Eine dritte Frage, die etwas fantastisch, vielleicht kindlich vorkommen mag, ist damit auch beantwortet: Können wir ausgestorbene Tiere wie die Dinosaurier wieder zum Leben erwecken wie im Jurassic Park? Nein, wir können es nicht. In der Evolution hat sich viel zu viel geändert, und das Gleichgewicht, in welchem *Diplodocus* oder *Tyrannosaurus* ihren Platz hatten, gibt es längst nicht mehr. Die Saurier des Jurassic Park bleiben Fantasie, und diese Fantasie spielt mit einer – vielleicht weit verbreiteten – Fehleinschätzung. Es ist nämlich ein Irrtum zu glauben, ein Organismus sei so etwas wie ein kompliziert gebautes Gerät voll Chemikalien, deren Reaktionen von ein paar Genen gesteuert werden, und die man nur etwas zu verändern braucht, um nach Belieben Saurier, Riesen-Fische oder Kolibris zu erzeugen.

Vögel, die glorreichen Saurier

„Die Saurier sind gar nicht ausgestorben. Sie fliegen heutzutage durch die Luft und heißen Vögel.“ Der scherzhafte Satz bezeichnet eine wissenschaftliche Wahrheit. In der Tat bedurfte es nur weniger Änderungen, um aus einem Archosaurier,

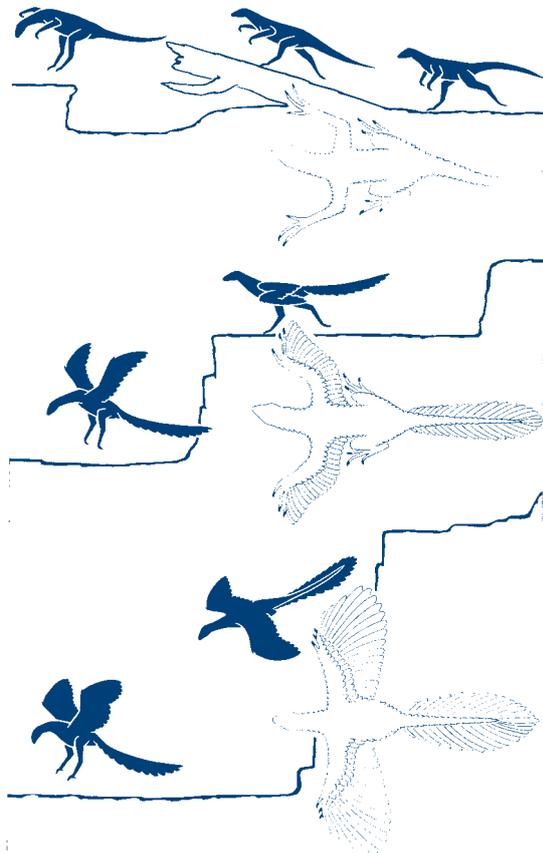


Abb. 10: Die Ausgangsform der Vögel waren kleine, befiederte Dinosaurier (Theropoden), die sich im Gelände laufend und springend fortbewegten. Sie setzten ihre Vorderbeine und ihren Schwanz dazu ein, das Gleichgewicht zu halten und einen nach unten gehenden Sprung abzubremsen. Indem der Bewegungsablauf besser und die Federn größer wurden, konnten größere Sprünge über Hangkanten zum Gleitflug führen. Diese Evolutionsschritte haben nicht nur einmal stattgefunden, wie die inzwischen reichlichen Fossilfunde zeigen. Der berühmte *Archaeopteryx* ist in diesem Zusammenhang auch weit weniger bedeutend, denn er stellt kein Übergangsstadium von Theropoden zu Vögeln dar, sondern steht auf einem Seitenzweig der echten Dinosaurier, wie auch das kürzlich entdeckte 10. Exemplar deutlich zeigte (aus PETERS 1992).

den wir für ein typisches Reptil halten würden, einen Vogel zu machen. Viele Bauteile, die für Vögel typisch sind, kommen auch bei anderen Archosauriern vor, wie der zweibeinige Gang und die Federn. Allerdings haben Saurier einen langen Schwanz, heutige Vögel nicht, doch das ist kein

Problem, denn der kann leicht abgebaut werden. So verwundert es nicht, dass die Vögel in manchen modernen Lehrbüchern im Kapitel Archosauria mit behandelt werden.

Doch wie entwickelten sie die Fähigkeit zu fliegen? Wir dürfen uns gefiederte, auf zwei Beinen laufende Saurier vorstellen, vielleicht so groß wie Hühner, in einer Gebirgslandschaft mit Felsen und Hängen, wo diese Tiere laufen, jagend oder fliehend über Spalten hüpfen, einen Hang hinunter springen. Auf ihren langen Beinen rennen sie schnell, balancieren im Sprung mit ihren Armen, um nicht nach rechts oder links abzukippen. Allerdings, Laufen allein reicht nicht aus, um eine Startgeschwindigkeit zu erreichen, mit der sich die Tiere in die Luft erheben könnten um zu fliegen. Nur durch den Sprung über eine hohe Hangkante ist das möglich. Auch das kann man sich lebhaft vorstellen: Der gefiederte Saurier springt mit ausgebreiteten Armen, gleitet der Schwerkraft entsprechend zunächst nach unten, weil die Geschwindigkeit aus dem Sprung nicht zum Aufsteigen reicht, gewinnt aber beim Abwärtsgleiten erheblich an Geschwindigkeit, so dass er fliegt und nicht abstürzt. Mit den Flügeln steuernd kann er vielleicht sogar den Aufwind der Thermik am Hang nutzen um seinen Gleitflug auszudehnen, der jedoch unaufhaltsam talwärts geht. Diese Saurier waren mithin Hang-Gleiter. Von unten mussten diese Tiere den Felshang dann wieder nach oben klettern. Nun weiß man von heutigen bodenlebenden Vögeln, wie Hühnern, dass sie heftig mit den Flügeln schlagen, wenn sie einen steilen Hang hinauf laufen. Tatsächlich drückt dieses Flattern die Füße gegen den Boden, und Hühnervögel können auf diese Weise eine senkrechte Wand hochlaufen, wohlgemerkt laufen, nicht fliegen. Gleiches ist für die damaligen gefiederten Saurier anzunehmen. Und bei ihnen haben der Gleitflug und das Flügelschlagen zunehmend die Flugtechnik des Körpers verbessert (siehe Abb. 12).

Die Federn hatten sich als Einrichtung zur Regelung der Körpertemperatur entwickelt, schon lan-

ge bevor sie zum Fliegen genutzt wurden. Die Hanggleiter, aus denen die Konstruktion Vogel hervorging, lebten im unteren oder mittleren Jura, vor 200 oder 180 Millionen Jahren, vielleicht sogar noch früher, jedenfalls noch längst vor dem berühmten *Archaeopteryx*. Ihn hatte man lange Zeit für den Urvogel schlechthin gehalten, doch er steht auf einer Nebenlinie, die nicht zu den heutigen Vögeln weiterführte. Auch er konnte nicht vom Boden auffliegen, auch er war ein Hanggleiter, doch in einer Gegend, wo es Flachwasser gab, in dessen Sediment er eingeschlossen und überliefert werden konnte.

Hoch entwickelt haben sich bei den Vögeln dann die Leistungen des Gehirns im sozialen Leben, im Nestbau und der Versorgung der Jungtiere, und im Orientierungsvermögen in Raum und Zeit. So orientieren sich Zugvögel am Magnetfeld der Erde. Diese Fähigkeiten sind zum größten Teil vererbt, doch sind Vögel durchaus noch lernfähig – ähnlich wie Säugetiere. Trotz aller Vielfalt: am anatomischen Bau hat sich hin zu den heutigen Vögeln nichts Entscheidendes mehr verändert.

Die Säugetiere

Wenn wir uns den Säugetieren zuwenden wollen, so lassen uns die Reptilien doch immer noch nicht los, einfach deswegen weil die Säugetiere von ihnen abstammen.

Schon im Karbon vor rund 320 Millionen Jahren, lange bevor die Dinosaurier die Erde bevölkerten, ging aus den ersten Reptilien die Evolutionslinie hervor, aus der sich sehr viel später die Säugetiere entwickelten. Für viele Jahrtausende hatten diese Tiere noch einen Körperbau ähnlich dem von Eidechsen, doch in der Trias, vor 250 bis 200 Millionen Jahren, wurde er dem der Säugetiere ähnlicher. Es sind eine ganze Reihe von kleineren und größeren Umbauten, die sich von jetzt an einstellen, und die einander mehr oder weniger beeinflussten. So wurden aus typischen Reptilien all-

Exkurs:

Das Schatten-Dasein der Säugetiere?

Die Fossilüberlieferung zeigt zwar, dass die Dinosaurier über den langen Zeitraum von Perm, Trias, Jura und Kreide, mithin von rund 280 Millionen Jahren, eine erhebliche Formenvielfalt hervorbrachten, und dass es daneben nur relativ wenige Säugetiere gab. Man spricht bildlich von den Säugern im Schatten der Reptilien. Das darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass auch die Säugetiere in ihrer langen Geschichte, seit dem Perm neben den Reptilien lebend, schon viele Formen hervorbrachten; auch in ihnen ging der ständige Wandel, nämlich die Evolution, immer weiter. Man kennt heute Tausende Fossilien und Hunderte Säuger-Arten aus diesem Zeitraum. Aussterbeereignisse haben die Säugetiere ebenfalls mehrfach durchlaufen – ebenso wie die Dinosaurier. Lediglich beim letzten großen Aussterbeereignis zum Ende der Kreidezeit waren die großen Dinosaurier verschwunden, und nur die kleinen, die sich bereits zu Vögeln weiterentwickelt hatten, konnten fortbestehen. Auch die Säugetiere benötigten mehrere Millionen Jahre, um sich von dem Kreide-Tertiär-Ereignis zu erholen, dann aber eröffneten sich neue Optionen. Die Säugetiere entwickelten Riesenformen, wie einst die Dinosaurier. Im Falle der Wale hatte man lange Zeit gute Gründe, den Blauwal mit 30 Metern Länge und weit über 100 Tonnen Körpergewicht als größtes Tier aller Zeiten anzusehen. Erst 1993 wurde ihm durch den Fund des kreidezeitlichen Dinosauriers *Argentinosaurus huinculensis* der Rang abgelassen, für den eine Länge von 42 Metern und 100 Tonnen Gewicht anzunehmen sind.

mählich über die lange Zeitspanne von circa 100 Millionen Jahren die Säugetiere.

Schauen wir zunächst auf das, was man an Fossilien erkennen kann, auf den Knochenbau und seine Veränderungen. Die Beine rückten zuneh-

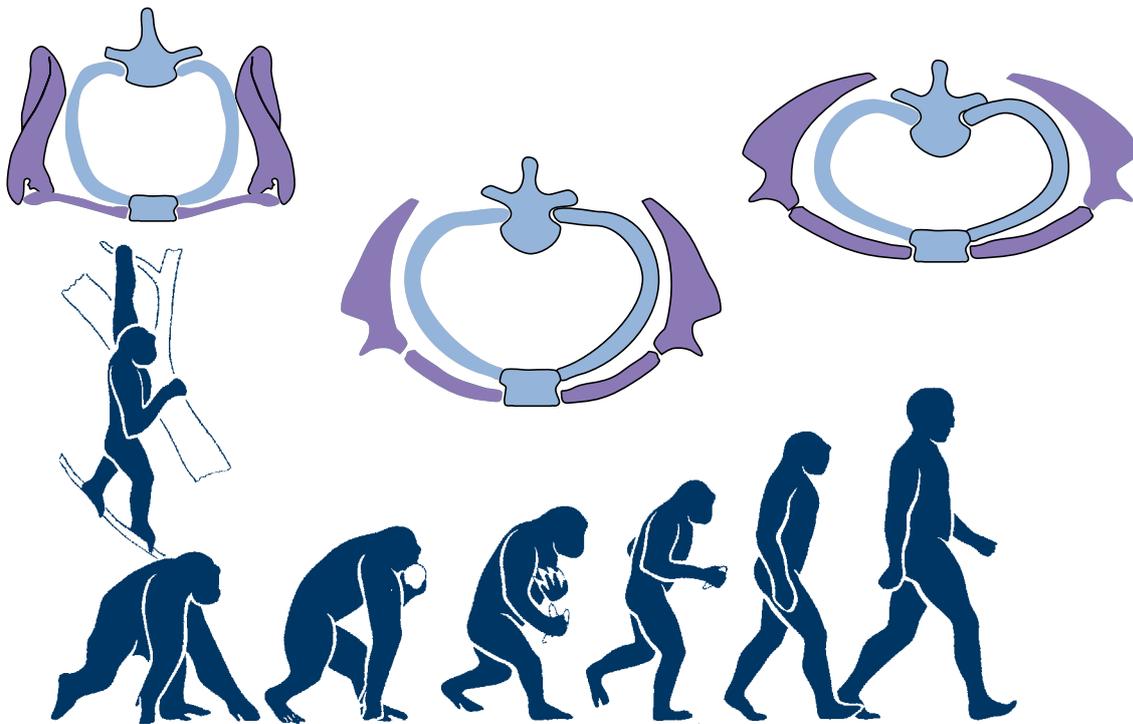


Abb. 11: Die Evolution des Menschen ist maßgeblich bestimmt durch die Entstehung des aufrechten Ganges und der damit verbundenen Vergrößerung des Gehirnes. Die Ursache für den aufrechten Gang ist in einer Ökonomisierung der Fortbewegung zu sehen. Der Brustkorb wurde schon bei den Schwinghanglern flacher und die Schultergelenke gerieten immer weiter nach außen. Das erfordert beim vierbeinigen Laufen eine ständige muskuläre (und damit energieaufwändige) Stabilisierung des Gelenkes durch die Muskeln des Schultergürtels. Der aufrechte Gang entlastet den Schulterapparat nicht nur von dieser energiezehrenden Aufgabe, er ist sogar wesentlich ökonomischer. (Ergänzt nach FRANZEN 1997).

mend unter den Körper und die Gleitflächen der Gelenke drehten sich entsprechend. Diese Beinhaltung war energetisch günstiger, um auch größere Strecken in einem Stück zu laufen. Am Bau des Kopfes änderte sich Vieles, und auf der Haut wurden die Hornschuppen vermindert und schließlich zugunsten eines Felles ganz abgeschafft.

Die Säugetiere entwickelten sich in der langen Zeit des Erdmittelalters im Schatten der Reptilien. Zum Ende der Kreidezeit vor 65 Millionen Jahren hatte für die Masse der Reptilien die Stunde geschlagen und für die Säuger war die Stunde gekommen. Die ersten Säuger waren mausgroße Insektenfresser, von ihnen aus und von nun an entwickelte sich in geradezu explosiver Geschwindigkeit die Vielfalt der Säuger, die wir kennen. Mäuse

und Elefanten, Wale und Fledermäuse, Wölfe und Gazellen, mögen die Bandbreite ins Bewusstsein rufen. Für uns von weiterer Bedeutung sind die Halbaffen und Affen, die so genannten Primaten, die mit ihren Greifhänden und Greiffüßen im Geäst klettern und zu erstaunlichen Gehirnleistungen fähig sind. Nur ein einziger Primat hat sich auf ein Leben auf dem Boden spezialisiert und verdankt seine besonderen Gehirnleistungen dieser Spezialisierung: der Mensch.

Vom Affen zum Menschen

Das Schlüsselereignis in der Evolution hin zum Menschen war die Entstehung des aufrechten Ganges. Die Ursachen für den aufrechten Gang zu finden ist seit jeher eine der großen Fragen in der

Evolutionsforschung. Es ist der aufrechte Gang, der den Menschen so stark vom Tier unterscheidet, und weswegen der Mensch sich selbst oft auch als das „andere Tier“ betrachtet. Sicherlich sind mit dem aufrechten Gang eine ganze Reihe an Veränderungen des Körpers einhergegangen. Sicherlich trägt der Mensch aufgrund des aufrechten Ganges sein Haupt erhaben über der Erde, und sicherlich steht die Entwicklung des großen Gehirnes in Beziehung zu dem aufrechten Gang. Wie aber kam dieser Körperbau zustande?

Die gemeinsamen Vorfahren von Menschenaffen und Mensch waren so genannte Schwinghänger. Es sind Affen, die sich mit ihren Händen an den Ästen hielten und hangelnd fortbewegten. Ihre Arme waren lang, der Schwerpunkt liegt tief, ein idealer Zustand um schwingend im Sprung an andere Äste zu gelangen. Gibbons bewegen sich heute in der Weise, wie man auch im Zoo beobachten kann. Solche Primaten waren in der Lage, am Boden zu laufen, indem sie sich mit den Armen und den Handknöcheln aufstützten, die Wirbelsäule schräg aufgerichtet. Diese Schwinghänger konnten ihre Fähigkeit einsetzen, am Boden zu gehen, andere Waldteile zu erreichen, und so ihren Aktionsradius auch am Boden auszuweiten. Die Hände konnten Gegenstände aufsammeln, und beim zweibeinigen Gang festhalten, und die Kinder konnten gepackt und getragen werden, vor allem in Augenblicken der Gefahr, bis die nächste Baumgruppe erreicht war. Jede Verbesserung dieser Bewegungsabläufe war vorteilhaft. Und auf den zwei Beinen allein läuft es sich schneller, als wenn man die Arme als zusätzliche Stütze braucht (siehe auch Abb. 11).

Irgendwann war eine Anordnung erreicht, bei der es viel ökonomischer war, den Oberkörper mit Hilfe der Rücken- und Beinmuskulatur aufzurichten und ihn über dem Becken zu balancieren, als auf vier Beinen zu laufen und ständig Schultern und Kopf durch Muskelkraft zu stabilisieren. Der aufrechte Gang war schließlich ein Schritt aus „Bequemlichkeit“, er war ein „Energiespar-Schritt“.

Der flache Brustkorb, die weit auseinander stehenden Schultern, und die langen Arme blieben in der Folge erhalten, doch die Beine wurden zunehmend länger, und vor allem, der Schädel veränderte sich ganz dramatisch.

Vergleichen wir den Kopf des Menschen mit dem der Menschenaffen und nehmen wir die Seitenansicht (siehe Abb. 14). Bei den Menschenaffen ist der Gehirnschädel niedrig, das Gesicht ist vorgewölbt, weil Ober- und Unterkiefer vorspringen, und die Zähne sind groß. Beim Menschen ist der Gehirnschädel hoch gewölbt, das Gesicht ist flach, weil die Kiefer klein sind und nicht vorspringen, und die Zähne sind klein. Warum hat sich der Schädel so verändert? Mehrere Funktionsbereiche spielten dabei mit. Kiefer, Gebiss und Kaumuskulatur konnten verkleinert werden, weil die Hände einen großen Teil der Arbeit übernahmen, die zuvor das Gebiss ausführte, nämlich die Nahrung aufzubereiten. Die Hände, vom Stützen befreit, führten immer feinere Bewegungen durch. Zudem wurde der Lauf dank der langen Beine immer schneller. Alles das verlangte nach einer Vergrößerung der Koordination im Großhirn, es musste wachsen, und es konnte wachsen, denn der Schädel war befreit von der zuvor so gewaltigen Nackenmuskulatur, die über ihm gelegen hatte.

Das alles ging vor mehr als 4 Millionen Jahren in Afrika vor sich, wie man heute aus Fossilfunden weiß. Ein besonders aufschlussreicher Fund ist das in großen Teilen erhaltene Skelett, das den wissenschaftlichen Namen *Australopithecus afarensis* erhielt, familiär schlicht Lucy genannt, weil es eine Frau ist. Lucy ging und stand aufrecht, ihre Beine waren schon recht lang, doch ihr Schädel war noch der eines Menschenaffen, nicht der hochgewölbte des modernen Menschen. Die vielen anderen Funde zeigen uns, dass die Wandlung vom Affen zum Menschen an mehreren Stellen in Afrika in dem reich zergliederten Grenzland zwischen Wald und Savanne stattfand. Das heißt, Menschen entwickelten sich mehrfach in durchaus unterscheidbaren Evolutionslinien, und mittlerweile

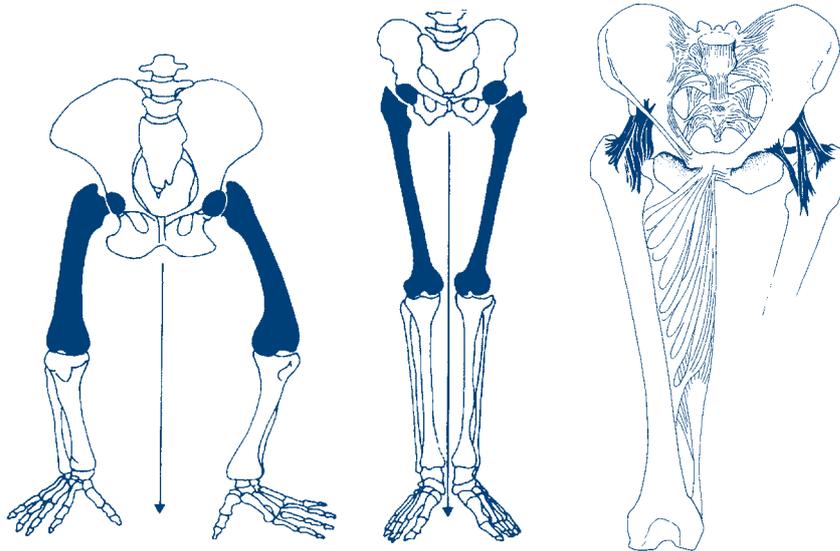
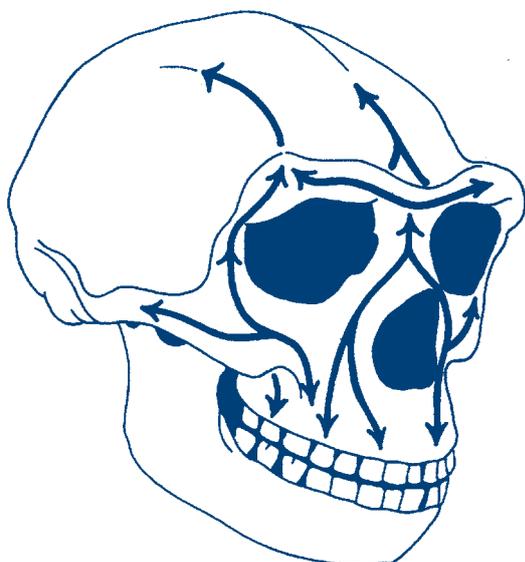


Abb. 12: Der aufrechte Gang erfordert ein ökonomisches Balancieren des Körpers über den Beinen. Die kräftigen Innenschenkelmuskeln veränderten die Stellung der Beine, d.h. sie ziehen die Kniegelenke unter den Körperschwerpunkt. Die Beine sind nunmehr gestreckt und können auch weitere und ausladendere Schritte vollführen (aus FRANZEN 1997).

kennt man einen ganzen Stammbusch von Hominiden.

Zu den bekanntesten und jüngsten zählt der Neandertaler, der erst vor etwa 27000 Jahren verschwand. Er lebte lange Zeit neben dem *Homo sapiens*, war aber nicht sein Vorfahre, sondern eine evolutionäre Seitenlinie. Er hatte sogar ein größeres Gehirn als der moderne Mensch, aber er hatte seine Stärken in anderen Bereichen. Sein Bild

vom primitiven brutalen Urmenschen musste schon längst revidiert werden, denn die Neandertaler hatten ihren eigenen Lebensstil und ihre eigene Kultur. Es können sowohl kulturelle wie klimatische oder soziale Faktoren gewesen sein, die zum Verschwinden des Neandertalers geführt haben. Einige Wissenschaftler glauben, dass er in uns weiterlebt, dass sich Neandertaler mit anderen Menschen vermischten und im Geschlecht des *Homo sapiens sapiens* aufgegangen sind.



Noch etwas zeichnet den Menschen aus: die Sprache. Der vordere Halsbereich, also Kehle, Zunge, Mundboden, wurde durch die aufrechte Kopfhaltung stärker gestreckt, und so wie sich die schwere Kaumuskulatur verminderte, so wurde die feinmotorische Steuerung verbessert. Die Schwingungen der Stimmbänder konnten jetzt im Mund

Abb 13: Die Überaugenwülste der Vormenschen sind keineswegs „Schutzeinrichtungen“ oder gar „Schattenspendler gegen die grelle Sonne“, wie man oft zu lesen bekommt. Es handelt sich vielmehr um Kräfteleitstrukturen, welche die Kaudrucke der Kiefermuskulatur aufnehmen und über den Schädel ableiten. Mit der zunehmend aufrechten Körperhaltung verlagerten sich nicht nur die Nackenmuskeln, auch die Kiefermuskeln wurden kleiner und änderten ihre Verlaufsrichtung. Infolge dessen werden geringere Kaudrucke über den Schädel geleitet, die Überaugenwülste werden abgebaut (aus FRANZEN 1997).

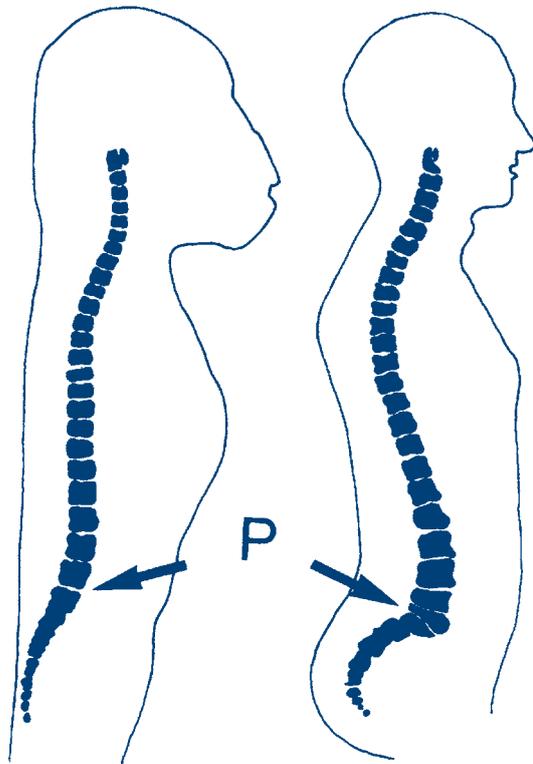


Abb. 14: Das Balancieren des Körpers über den Beinen wird durch eine Änderung in der Stellung der Wirbelsäule nochmals ökonomisiert: Sie ist im Lendenwirbelknick, dem Promontorium (P), aufgerichtet. Während bei einem Gorilla (links) der Rückenmuskelapparat die Aufrichtung bewirkt, müssen beim Menschen (rechts) die Rücken- und Rumpfmuskeln den Körper lediglich über Beinen und Becken balancieren, d.h. verhindern, dass er über dem Becken abkippt (aus FRANZEN 1997).

zu fein differenzierten Lauten und zu Worten formuliert werden. Dass die Gehirnteile, die diese Region steuern, sich enorm verbesserten und sich ebenfalls vergrößerten, bedarf kaum der besonderen Betonung. Zudem wird im Gehirn die Verarbeitung der Laute und der Worte immer weiter differenziert, Worte erhalten immer feinere Bedeutungen: Es entwickelt sich Sprache und im Gefolge davon Tradition und Kultur.

Zweifellos haben sich beim werdenden Menschen die intellektuellen Leistungen verbessert, wenn er Eindrücke und Mitteilungen kombinierte und

formulierte. Und zweifellos ist die Fähigkeit zum abstrakten Denken und damit zu Erkenntnis immer weiter ausgebaut worden. Der Verstand erweiterte sich gewaltig. Was die Vernunft anbetrifft, müssen wir wohl doch mit ALBERT EINSTEIN erkennen: Es sind nur zwei Dinge unendlich groß, das Universum und die Unvernunft des Menschen. Aber beim Universum, meinte er, sei er sich noch nicht so ganz sicher. Wir hoffen auf einige verbessernde Schritte der Evolution, doch sie verläuft langsam, sehr langsam.

Literaturhinweise (auch für Beitrag S. 46-47)

- ADOUTTE, A. et al. (2000): The new animal phylogeny: Reliability and implications. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 97: 4453-4456.
- COOK, C.E. et al. (2004): The Hox gene complement of acoel flatworms, a basal bilaterian clade. *Evol. Dev.* 6: 154-163.
- FRANZEN J.L. (1993): Die Evolution des Menschen. *Praxis der Naturwissenschaften* 42(8): S. 25-34.
- FRANZEN J.L. (1997): Eine begründete Rekonstruktion der Evolution des Menschen? *Natur und Museum* 127(8): 246-263.
- GUDO, M. (2004): Der Generationswechsel der Tunikaten: Ein evolutionsbiologisches Erklärungsmodell. *Senckenbergiana biologica* 84(1/2): 97-117.
- GRASSHOFF, M. & GUDO, M. (2001): Die Evolution der Tiere – Poster mit Erläuterungen. - 16 S., Frankfurt am Main.
- LOVELOCK, J. (1991): Das GAIA-Prinzip. - 316 S., München (Artemis & Winkler).
- MARGULIS, L. (1999): Die andere Evolution. - 180 S., Heidelberg, Berlin (Spektrum).
- MARGULIS, L. & FESTER, R. (1991): Symbiosis as a Source of Evolutionary Innovation. - 454 S., Cambridge, Mass., London (MIT Press).
- PETERS D.S. (1993): Konstruktionszwänge bei der Skelettentwicklung am Beispiel der Tetrapoden-Gliedmaßen. *Praxis der Naturwissenschaften* 42(8): S.38-43.
- PETERS D.S. (1994): Entwicklung des Vogelfluges. *Praxis der Naturwissenschaften* 43(7): S.10-28.
- PETERS D.S. (1994): Die Entstehung der Vögel - Verändern die jüngsten Fossilfunde das Modell? *Senckenberg-Buch.* Frankfurt am Main: Waldemar Kramer. - S. 403-424.
- PRUD'HOMME, B. et al. (2003): Arthropod-like expression patterns of *engrailed* and *wingless* in the annelid *Platynereis durmelii* suggest a role in segment formation. *Current Biology* 13: 1876-1881.
- SYED, T. (2006): Zur Großphylogenie der Metazoa: Molekularbiologische Befunde („New Animal Phylogeny“) und morphologische Rekonstruktionen in der Synthese. *Dissertationsschrift, Johann Wolfgang Goethe-Universität.* Frankfurt. - 216 S.
- WALOSSEK, D. & MAAS, H. (2007): Systematik und Evolution der Tiere, Teil 2 (online ressource). biosys-serv.biologie.uni-ulm.de/Sektionsordner/lehre/Skripte/vl_4_2007.pdf. - S.110.

3. Der molekularbiologische Stammbaum der Tiere

DR. TAREQ SYED, Morphisto GmbH, Frankfurt am Main, e-mail: tsyed@morphisto.de

Seit Mitte der 1990er Jahre spielen molekularbiologische Methoden eine immer wichtigere Rolle bei der Klärung stammesgeschichtlicher Verwandtschaftsverhältnisse. Primär dient dieser Forschungsansatz dazu, die zeitliche Verzweigungsfolge (**Kladogenese**) der verschiedenen Evolutionslinien durch Vergleich bestimmter Genabschnitte zu ermitteln. Sekundär lassen sich außerdem Rückschlüsse auf die morphologischen Umwandlungen (**Anagenese**) in bestimmten Evolutionslinien ziehen. Besonders zu nennen ist hier die für nobelpreiswürdig erachtete Entdeckung so genannter „Segmentierungsgene“ bei zweiseitig-symmetrischen Tieren (Bilateria). Sie sind bei den drei typisch segmentierten Bauplänen der Ringelwürmer, Gliederfüßer und Wirbeltiere (plus Lanzettfischchen *Branchiostoma*) derart ähnlich organisiert, dass sie auf einen gemeinsamen Vorfahren zurückgehen müssen, der wahrscheinlich vielfach segmentiert war (PRUD' HOMME et al. 2003; siehe auch Abb. 15). Auf konstruktionsmorphologischer Grundlage kann man präzisieren, wie dieser segmentierte Urahn ausgesehen hat und warum er segmentiert war (Evolution des gegliederten Hydroskelettes, vgl. Exkurs S.27). Die aktuellen molekularbiologischen Daten unterstützen also das in seinen Anfängen schon über vierzig Jahre alte „Hydroskelett-Modell“ der Frankfurter Evolutionstheorie (vgl. Querschnitte, Heft Nr. 6). Den traditionellen Stammbaum-Entwürfen wird hingegen in ihren zentralen Aussagen widersprochen.

Nach traditioneller Vorstellung sind unter den zweiseitig-symmetrischen Tieren diejenigen mit wenigen Segmenten sehr früh, die mit vielen Segmenten später evoluiert. Entwicklungsgenetische Forschungen zeigen, dass es gerade umgekehrt ist. Demnach entstehen nahezu alle Gruppen **nach** Ausbildung der typisch organisierten „Segmentierungsgene“ (Abb. 15), und die wenig oder gar nicht segmentierten unter ihnen müssen ihre Segmentierung allmählich verloren haben. Besonders zu nennen sind hier u.a. die unsegmentierten Plattwürmer und Schlauchwürmer, sowie die Tentakulaten (u.a. Brachiopoden und Bryozo-

en) mit drei Segmenten, denn sie sind jene drei „Wurm-Baupläne“, die in der traditionellen Zoologie fast immer als urtümliche Gruppen angesehen wurden. Schon konstruktionsmorphologisch wurde gezeigt, dass diese Wurmbaupläne später entstanden sein müssen (vgl. S. 30 u. Abb. 7). Lediglich für eine kleine Gruppe plattwurmähnlicher Tiere wurde angenommen, dass sie noch vor Entstehen der Segmentierung abgezweigt sein könnten. Auf molekularer Grundlage wurde auch diese Annahme bestätigt (Cook et al. 2004); es handelt sich um die Acoela (vgl. Abb. 15).

Bemerkenswert ist auch, wo die oben erwähnten Gruppen der Schlauchwürmer und Tentakulaten in dem neuen molekularen Großsystem stehen. Die Schlauchwürmer stehen den Gliederfüßern nahe und bilden mit ihnen die Abstammungsgemeinschaft Ecdysozoa, die „Häutungstiere“ (vgl. Abb. 15). Die traditionelle Zoologie wurde von diesem Verwandtschaftsverhältnis vollkommen überrascht, während es konstruktionsmorphologisch gut zu begründen ist (Exkurs S. 28). Die Tentakulaten schließlich wurden als vermeintlich urtümliche Gruppe fast immer den Notoneuralia (=Deuterostomia) zugeordnet, doch führen molekulare Resultate zum genauen Gegenteil: Es sind relativ spät evoluierte Gastroneuralia (=Protostomia). Genau diesen Status hatten sie aber schon immer im Modell der Frankfurter Theorie, da sie konstruktionsmorphologisch nicht von Achsenstabkonstruktionen abzuleiten sind. Vielmehr stammen sie von metameren Gastroneuralia ab und gehören in die neue Großgruppe der Lophotrochozoa (vgl. Position der „Brachiopods“ in Abb. 15).

Innerhalb der Notoneuralia (vgl. „Deuterostomes“ in Abb. 15) ging die traditionelle Zoologie fast immer davon aus, dass die Pterobranchier und Stachelhäuter urtümlich sind. Molekulare Resultate zeigen jedoch, dass diese Gruppen hochspezialisierte Seitenentwicklungen sind und keinesfalls Vorfahren von Achsenstabkonstruktionen sein können (vgl. Position der „Hemichordates“ und

Exkurs:**Wie reagiert die traditionelle Zoologie?**

Zu fragen ist, wie Vertreter der traditionellen, merkmalszentrierten Zoologie damit umgehen, dass die Ergebnisse der Frankfurter Theorie massive Bestätigung von molekularbiologischer Seite erfahren. In traditionellen Ansätzen werden Tiere als auszählbare Merkmalsmuster, nicht als funktionierende Gesamtgefüge, in die Evolutionsbiologie eingeführt. Die Annahme eines metameren Ur-Bilateriers wird als extrem unwahrscheinlich eingeschätzt, mit der Begründung, dass hierbei für zahlreiche spätere Evolutionslinien ein sekundärer Verlust von Coelom (vgl. S. 26) und Vielfach-Segmentierung angenommen werden muss. Die Crux ist nun, dass dieser Segmentverlust merkmalsstypologisch nicht gedeutet werden kann, hierfür muss die Gesamtkonstruktion verstanden werden! Ohne dieses konstruktive Verständnis jedoch wird weiter davon ausgegangen, dass es bei urtümlichen Bilateriern keine Coelome gab (genetische Ähnlichkeiten werden als zufällig abgetan). Dass auch die Hydraulik-Funktion des Coeloms merkmalsstypologisch nicht nachvollzogen werden kann, zeigt u.a. die Behauptung, dass „Hydroskelette nur bei einigen wenigen spezialisierten Formen wie z.B. Regenwürmern auftreten“. Mit diesem „Sachargument“ - das freilich elementarste Erkenntnisse über die Hydrauliknatur *aller* Organismen ausblendet - ist jüngst in offiziellem online-Lehrmaterial für Zoologie-Studenten gegen die Rekonstruktionen der Frankfurter Theorie argumentiert worden.

„Echinoderms“ in Abb. 15). Genau dies ist auch das Resultat der konstruktionsmorphologischen Rekonstruktion (vgl. Exkurs S. 34).

Auch bei den nicht zweiseitig-symmetrischen Tieren (vgl. Exkurs S. 24) bestätigen molekularbiologische Resultate das konstruktionsmorphologische Modell in einigen sehr spezifischen Punkten. Vor allem sind nicht die Schwämme die urtüm-

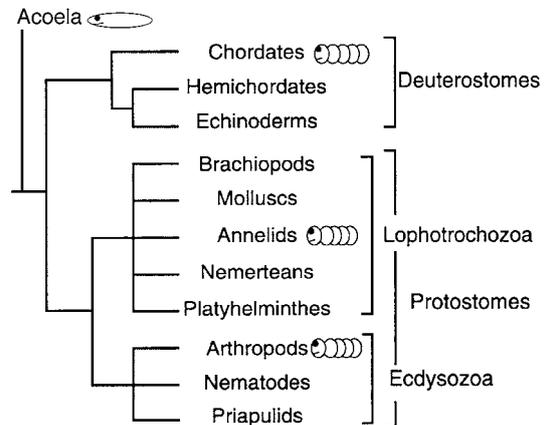


Abb. 15: Gezeigt ist die aktuell diskutierte, molekularbiologisch ermittelte Großeinteilung des Tierreiches („New Animal Phylogeny“). Die wichtigsten Ergebnisse betreffen die zweiseitig-symmetrischen Tiere (Bilateria). Zunächst wurde ein neuer „Dreigruppen-Stammbaum“ etabliert, gebildet von den Großgruppen Deuterostomia, Ecdysozoa und Lophotrochozoa. Ebenso unerwartet wie diese Neueinteilung waren Resultate vergleichend-entwicklungsgenetischer Studien, denen zufolge der letzte gemeinsame Vorfahre dieser drei Hauptgruppen wahrscheinlich ein vielfach segmentiertes (=metameres) Tier war. Die vielfache Segmentierung bei Chordaten, Anneliden und Arthropoden (im Bild stilisiert dargestellt) wäre damit ein sehr alt-tümliches Merkmal. Im Jahre 2004 wurde dieses Stammbaumschema durch den Befund einer einzelnen, früh abzweigenden Bilaterierlinie, der Acoela, ergänzt. Die Acoela galten vorher als Teilgruppe der Plattwürmer („Platyhelminthes“ im Schema). In ihrer Gesamtheit stehen diese Ergebnisse in unvereinbarem Widerspruch zu merkmalsstypologischen Einteilungen des Tierreiches, nicht aber zu konstruktionsmorphologischen Rekonstruktionen. (Ergänzt aus PRUD'HOMME et al. 2003).

lichsten Tiere (wie in der Mehrheit zoologischer Lehrbücher dargestellt): Stattdessen sind die Placozoa, d.h. *Trichoplax adhaerens*, die ältesten heute noch lebenden Vielzeller (vgl. Exkurs auf S. 23).

Es ist somit ein wissenschaftliches Kuriosum, dass die molekularen Ergebnisse pünktlich zur Jahrtausendwende als „New Animal Phylogeny“ („Neue Stammesgeschichte der Tiere“, ADOUTTE et al. 2000) in den Fachzeitschriften publik gemacht wurden: In ihren wichtigsten „neuen“ Punkten sind sie mit den Rekonstruktionen der Frankfurter Evolutionstheorie konfliktfrei vereinbar (ausführlich dazu SYED 2006).

QUERSCHNITTE

Materialien für Unterrichtsvorbereitung
und Selbststudium

Themen der kommenden Hefte:

Heft 8: Praxis und Theorie der Histologie – Ein Leitfaden für die praktische Arbeit im Labor.

Heft 9: Begleitheft zum Poster: Die Evolution der schwimmenden Vierfüßer

Weitere geplante Themen:

- Anthropologie
- Embryologie
- Klima und Klimawandel
- Sprache

Erscheint in unregelmäßigen Abständen

ISSN 1862-4839