

Vom Urknall bis Adam und Eva

Die Evolution des Lebens

Vortrag von Dr. Heinz G. Klug
Buxtehude, 6.Juni 2012

Einführung

Die Evolution des Lebens gehört zu den faszinierendsten Gegenständen der Wissenschaft. Die wesentlichen Fakten gelten heute als geklärt. Das bedeutet natürlich nicht dass es keine offenen Fragen mehr gibt – die Forschung ist längst nicht am Ende. Aber an den großen Prinzipien gibt es keine Zweifel mehr.

Wer sich ernsthaft mit dem Thema auseinander setzen will, der kommt um die Literatur nicht herum. Es gibt viele gute, allgemeinverständliche Bücher. Ich kann heute Abend nur ein paar große Linien nachzeichnen.

1. Ich werde mit etwas Kosmologie beginnen – es geht um die große Zeitskala und um die Frage: Woher stammt die Materie aus der lebendige Körper aufgebaut sind?
2. Sodann werde ich mich den Grundgesetzen der Genetik und Evolution widmen: Wie funktioniert Evolution eigentlich?
3. Drittens werde ich – natürlich nur ganz grob - die Geschichte des Lebens auf der Erde nachzeichnen, bis hin zu unserer eigenen Art. Fast am Ende tauchen dann sogar Adam und Eva auf.
4. Ich werde mit einem kurzen Ausblick schließen.

Kosmologie

Schauen wir uns zunächst die Entwicklung des Universums an, in dem sich das Schauspiel der Evolution entfalten wird. (Fig.1)

Alles begann vor 13,72 Milliarden Jahren mit einer „**Singularität**“: das ganze Universum war nur in einem mathematischen Punkt beschlossen, mit Dichte, Temperatur, Druck weit jenseits dessen was unsere Physik beschreiben kann. Und dann ging alles ganz schnell. Die Singularität explodierte im „**Urknall**“. Das entstehende Universum dehnte sich zunächst extrem schnell aus – man spricht von der „**Inflation**“. Raum und Zeit, die vier physikalischen Kräfte, die Materie entstanden.

Nach einer Quintillionstel Sekunde – unsere Physiker kommen also dem Urknall wirklich nahe! - war das Universum schon so groß wie eine Orange, nach einer Tausendstel Sekunde so groß wie unser Sonnensystem.

Nach drei Minuten war die Bildung der Materie bereits abgeschlossen – aber da waren nur die leichtesten Elemente: **Wasserstoff und Helium**, ein wenig Lithium. Kein Kohlenstoff, kein Sauerstoff außer Wasserstoff nichts von all dem woraus lebendige Körper sind.

Das anfänglich extrem heiße Gas hatte sich nach **380 000** Jahren so weit abgekühlt dass es für Strahlung durchsichtig wurde. Die elektromagnetischen Wellen, damals als Licht ausgesandt, wurden durch die Dehnung des Raumes so weit auseinander gezogen, dass wir sie heute als Mikrowellen sehen: die sogenannte Hintergrundstrahlung, die wir aus allen Richtungen empfangen (entsprechend $2,7^\circ$ über dem absoluten Nullpunkt). Das was wir heute sehen stammt aus einem kugelförmigen Bereich des Universums der damals **84 Millionen Lichtjahre** Durchmesser hatte. Weiter zurück können wir nichts sehen.

Heute hat dieser gleiche Bereich sich auf einen Durchmesser von **93 Milliarden Lichtjahre** aufgebläht. So weit können wir natürlich nicht schauen – wir blicken ja immer in die Vergangenheit, weil das Licht seine Zeit braucht bis es zu uns kommt!

Zurück zur Hintergrundstrahlung! Kleine Unregelmäßigkeiten sind die Vorboten: Wir treten ein in das **Zeitalter der Galaxien**. (Fig.2)

Das im Urknall entstandene Gas zog sich unter dem Einfluss der Schwerkraft zusammen, es entstanden die Galaxien, die Sterne. (Neben der gewöhnlichen leuchtenden Materie wirkte dabei die „Dunkle Materie“ mit, von der es im Universum 6 mal mehr gibt. Was das eigentlich ist, darüber ist man noch nicht klar). Im Universum, von dem wir überhaupt Informationen haben, gibt es **100 bis 400 Milliarden Galaxien**. Und in jeder Galaxie gibt es typischerweise **100 Milliarden bis eine Billion Sterne**.

In den Sternen ballte die Schwerkraft den Wasserstoff zu solcher Dichte und Temperatur zusammen, dass **Wasserstoffkerne fusionieren** konnten, zunächst zu Helium. Dabei wird Masse in Energie umgewandelt – $E = m \times c^2$. Sie kennen das aus der Wasserstoffbombe. Über komplizierte Zyklen geht der Fusionsprozess weiter, wird weitere Energie freigesetzt. Es entstehen die schweren Elemente bis hin zum Eisen, sie werden zum Teil langsam im „Sternenwind“ abgestrahlt. Mit dem Eisen kommt der Prozess zu Ende: bei der Bildung noch schwererer Elemente wird nicht Energie frei, sondern man muss welche hineinstecken.

Diese Bildung der Elemente schwerer als Eisen geschieht, wenn sehr große Sterne explodieren. Ungeheure Energiemengen werden dann frei, als „**Supernova**“ strahlen solche sterbenden Sterne fast so hell wie eine ganze Galaxis. Hierbei werden die schweren Elemente in den Raum hinausgeschleudert, Kohlenstoff und Sauerstoff und Stickstoff und all die anderen. Der Stern bricht zu einem kleinen superdichten Neutronenstern zusammen oder gar zu einem Schwarzen Loch. (Fig. 3)

Jetzt stehen Gas und Staubwolken aus vielen verschiedenen Elementen und Verbindungen zur Verfügung, Wasserstoff ist noch reichlich vorhanden, aber auch schon organische chemische Verbindungen, bis hin zu Aminosäuren (auf deren Rolle wir später kommen werden). Das Spiel geht in eine neue Runde: Die Materie-Wolken ziehen sich zusammen und es entstehen **Sterne der zweiten Generation**. (Fig. 4)

Unsere Sonne ist ein solcher Stern einer späteren Generation. Ihn umkreisen große Gasplaneten (bekannt als Jupiter, Saturn etc.) und kleine feste Planeten. Einer davon ist unsere Erde.

Ihr Abstand zur Sonne – 7 Minuten braucht das Licht - ist günstig – die Sonneneinstrahlung ist nicht zu stark und nicht zu schwach - hier konnte Leben entstehen.

Wann war das? Die Sonne und unsere Erde entstanden **vor 4,5 Milliarden Jahren. Noch einmal eine Milliarde Jahre brauchte es bis Leben entstand.**

Alle benötigten Elemente dazu waren vorhanden. Unser Körper diene als Beispiel: Der Wasserstoff stammt noch aus dem Urknall, nach Gewicht sind es 9% unseres Körpers, das sind allerdings 63% der Atome. Der ganze Rest wurde in Sternen synthetisiert: Gewichtsmäßig bestehen wir zu 91% aus Sternenstaub - dank der in vorhergehenden Generationen als Supernova gestorbenen Sterne. (Fig.5)

Genetik und Evolution - Grundlagen

Damit verlassen wir die Kosmologie und wenden uns der Evolution zu. Zunächst wollen wir die Grundprinzipien der Genetik und der Evolution betrachten, damit wir danach die Abläufe besser verstehen können. (Anmerkung: Ich werde fast ausschließlich von Tieren reden. Tiere geben uns die anschaulichsten Beispiele. Und wir sind selber auch welche.)

Wir gehen aus von dem was uns **Charles Darwin** über die Evolution gesagt hat, und wollen dann seine Aussagen nachvollziehen. (Fig. 6)

1. Die Arten gehen auseinander hervor! Wir werden gleich ein paar Belege dafür sehen. Noch heute glaubt die Hälfte der US-Amerikaner, alle heute lebenden Arten seien vor 6000 Jahren vom lieben Gott fix und fertig hergestellt worden. Das glaubte zu Darwins Zeit schon kein gebildeter Europäer mehr.
2. Die Evolution erfolgt in ganz kleinen Schritten – es gibt keine Sprünge. Die Anhänger des „Intelligent Design“ wollen das nicht wahrhaben, weil es sich nicht mit ihrer Argumentation verträgt .
3. Die Lebewesen geben ihre Eigenschaften an die nächste Generation weiter - sie vererben sie - wir schauen ja alle genau hin ob wir uns körperlich und charakterlich in unseren Nachkommen wiedererkennen.

4. Nun haben aber die Individuen, sagen wir irgend einer Tierart, unterschiedliche vererbte Eigenschaften.
5. Einige sind stärker, schneller, schlauer als die anderen. Diese "tüchtigeren" haben eine größere Chance zur Fortpflanzung zu kommen. Sie geben vererbte günstige Eigenschaften an ihre Nachkommen weiter.
6. Günstige Eigenschaften breiten sich also in der Population aus. Die Art verändert langsam ihre typischen Eigenschaften – das nennen wir „Evolution“.

Belege

Werfen wir zunächst einen Blick auf die Belege dafür dass die Arten tatsächlich aus einander hervorgehen.

An erster Stelle stehen die **Fossilien** - die Versteinerungen. Heute kennen wir viel mehr Fossilien als Darwin. Und diese Fossilien bilden logische Reihen, zum Beispiel in den Schichten eines Sedimentgesteins. Am dichtesten sind diese Folgen natürlich da, wo Kleinlebewesen wie die Radiolarien selber das Sediment aufbauen (wie Kreide). (Fig. 7)

Die Chance, dass große Tiere zum Fossil werden, ist natürlich gering, man darf sich nicht wundern wenn auch mal eine größere Lücke klafft. Dann freut man sich über einen Fund wie den Archaeopteryx. Aus der Ähnlichkeit der Anatomie hatte man schon vermutet, dass die Vögel aus den Dinosauriern hervorgegangen sind – und voila! 1861 fand man ein Fossil das Merkmale beider Tiergruppen vereinigt.

Ähnlichkeit in der Anatomie verschiedener Tiere – man spricht **von Homologie** – zeigt dass diese Tiere nicht unabhängig von einander entstanden oder gar einzeln, quasi von einem leeren Blatt Papier erschaffen worden sind. Zum Beispiel sind die vorderen Extremitäten von Mensch, Katze, Wal, Fledermaus, Pferd aus den gleichen Knochen aufgebaut, die nur eben in verschiedener Form erscheinen. Da muss es Zusammenhänge, Verwandtschaft geben! (Fig. 8)

Einen wichtigen Hinweis gibt auch die **Embryologie**. In den frühen Stadien der Entwicklung des Embryo sehen sich die verschiedenen Wirbeltiere, vom Fisch bis zum Menschen, sehr ähnlich – bis hin zur Anlage von Kiemenspalten! (Fig. 9)

Evolution ist nicht etwas Historisches, Abgeschlossenes. Nein, man kann die **Evolution hier und heute beobachten**. Evolutionsvorgänge in der freien Natur sind bei Spatzen, Kaninchen, Fischen, Eidechsen dokumen-

tiert, die von Menschen in neue Lebensräume verbracht wurden. Berühmtes Beispiel: „Birkenspanner“-Schmetterlinge haben sich in England des 19. Jahrhundert der verrußten Landschaft angepasst – nahmen eine dunkle Tarnfarbe an – und werden jetzt wieder heller. Finken auf den Galapagos-Inseln haben binnen weniger Jahre ihre Schnabelform geändertem Samenangebot angepasst. Systematische Zuchtversuche mit Bakterien über viele Generationen hin haben den Mechanismus bestätigt. (Fig. 10)

Und gänzlich unerwünscht: In der Landwirtschaft entstehen **pestizid-resistente Schädlinge**. In unseren Krankenhäusern entstehen gefährliche Erregerstämme die gegen Antibiotika resistent sind. (An der **Antibiotika-Resistenz** züchten unter uns alle diejenigen kräftig mit, die ihre vom Arzt verschriebene Antibiotika-Packung nicht aufbrauchen sondern nach dem Abklingen der Krankheitssymptome nicht weiter schlucken – auf diese Art können die widerstandsfähigsten unter den Bakterien überleben).

Die **Züchtung der Haustierrassen** zeigt, welche dramatischen erblichen Unterschiede binnen relativ kurzer Zeit entstehen. Darwin kannte sich besonders beim Taubenzüchten aus. Bemerkenswert ist der Versuch des Russen Belyaev. Füchse gelten ja als gänzlich ungeeignet als Haustier. Belyaev arbeitete mit einer sibirischen Variante. Er wählte in jeder neuen Generation immer wieder die zutraulichsten Welpen aus – nach gut 30 Generationen hatte er verspielte „Haushunde“ – dabei änderten sie sogar noch ihr Aussehen. (Fig. 11)

Genetik

Wie aber und wo sind eigentlich die Eigenschaften eines Lebewesens kodiert, so dass sie weitergegeben werden können? Darwin wusste es noch nicht. Gregor Mendels Versuche hat er wohl nie studiert. Erst im 20. Jahrhundert wurde die Sache klarer.

Man lernte dass die Erbanlagen in den Chromosomen sitzen. In jeder Zelle – typische Größe 1/100 mm – findet sich ein **Zellkern**, in diesem sitzen die **Chromosomen** – **beim Menschen 23** in doppelter Ausführung: 1 Satz vom Vater, einer von der Mutter. Und in den Chromosomen? Man kannte bald die chemische Substanz: **Desoxyribonukleinsäure - DNA**. Aber man hatte keine Ahnung wie die Vererbung im einzelnen funktionierte.

1953 konnten **Watson und Crick** zeigen, dass sich in den Chromosomen die DNA als ein langer, kompliziert aufgewickelter, verdrehter Doppelstrang findet, so etwas wie eine Strickleiter: die berühmte **Doppelhelix**. Könnte man die DNA einer Zelle auseinanderziehen und aneinander spleißen, käme man auf einen ganz dünnen Faden von fast 2m Länge! (Fig. 12)

Die Stufen der Leiter werden gebildet unter Verwendung von nur vier verschiedenen „Basen“, einfachen chemischen Stoffen (Cytosin, Thymin, Adenin, und Guanin), die sich in bestimmter Weise paaren. Sie kodieren als „Genom“ die erblichen Eigenschaften der Lebewesen. (Fig. 13)

Hier ist ein **Vergleich mit unserer Sprache** hilfreich.

Eine Base – oder auch ein Basenpaar – ist so etwas wie ein „Buchstabe“; für sich allein trägt ein Buchstabe noch keinen Sinn.

3 Basen (ein Triplet oder Codon) entsprechen einem „Wort“ – sie definieren eine **Aminosäure**.

Mehrere/viele Aminosäuren können in einem mehrstufigen Prozess aneinander gespleißt werden – es entsteht quasi ein „Satz“ – ein **Protein** (ein Eiweiß). Hunderte oder gar tausende Aminosäuren bilden hochkomplexe dreidimensionale Makromoleküle, die den Zellen nicht nur Struktur geben, sondern auch Stoffwechselprodukte transportieren, chemische Prozesse katalysieren, Signalstoffe erkennen uvm.

Zahlreiche solcher Sätze bilden im Zusammenhang einen „Text“, eine „Anweisung“ für Bau und Funktion eines Körpers: - das nennen wir ein **Gen**.

Und schließlich sind viele Gene in einem **Chromosom** zusammengefasst – gewissermaßen einem „Ordner“. Und alle zusammen sind so etwas wie eine Bibliothek. Die Summe aller Informationen nennen wir auch das „**Genom**“.

Gene werden immer als ganzes weitergegeben, sie sind die unteilbaren Einheiten der Vererbung, potentiell unsterblich. So ein Gen ist aber keine simple Sache. Ein Gen kann sich auf verschiedene Eigenschaften auswirken; eine Eigenschaft kann von zahlreichen Genen beeinflusst werden.

In allen Körperzellen eines Lebewesens findet sich der gleiche komplette Satz Gene; je nach Umgebung und Situation müssen sie von anderen

Genen ein – und ausgeschaltet werden. Das für die Herstellung von Insulin zuständige Gen soll schließlich nur in der Bauchspeicheldrüse aktiv sein, nicht sonst irgendwo im Körper!

An dieser Stelle wollen wir noch etwas wichtiges festhalten:

Alle Lebewesen verwenden in ihren Erbanlagen das gleich Alphabet, verstehen die gleich Sprache! Das geht bis zum Gen: Ein Gen kann in ganz verschiedenen Lebewesen die gleiche Wirkung entfalten! Wir kommen noch einmal darauf zurück.

Wie groß ist nun ein Genom?

Das menschliche Genom **hat 3,27 Milliarden Basenpaare**. Aber nur ein kleiner Teil bewirkt wirklich die Bildung von Proteinen – es ist viel Organisatorisches im Genom, viele Verdoppelungen, und viel „Junk“ – Schrott. Die Basenpaare sind in 25 000 Genen in 23 Chromosomen organisiert. Ein Gen hat zwischen 500 und 10 000 kodierenden Basenpaaren. Im Alltagsbereich entspricht das in einem Kochbuch – von einem simplen Rezept bis zu einem festlichen Menü

Rein von der Menge aller Buchstaben her könnte man mit dem menschlichen Genom ein paar hundert dicke Lexika-Bände füllen.

Andererseits aber: Die maximal kodierbare **Information beträgt 750 MB, die tatsächlich nutzbare wohl eher 50.**

Da fragt sich der PC-Benutzer doch gleich : Was – mit so wenig Information kann man einen ganzen Menschen zusammenbauen und betreiben?

Die erste Idee ist sicher im Genom müsse so etwas wie ein Konstruktionsplan für den zukünftigen Körper sein. Man erkennt schnell dass das unmöglich ist. Als man das erstemal Samenfäden unter dem Mikroskop sah, da glaubte man im Kopf sei ein Miniaturmensch drin – ein Homunculus. Aber in diesem Homunculus müssten noch kleinere sein – die zukünftigen Samenfäden, und in denen ein unendlicher Regress – unmöglich! Jedenfalls ist auch das Datenvolumen viel zu klein: 50MB! (Fig.14)

Man muss die Anweisungen zum Aufbau eines Embryos wohl eher mit einem Backrezeptbuch vergleichen – einer Folge von einzelnen Aktivitäten – oder mit der Anweisung für ein Origami. Niemand käme wohl auf die Idee eine Konstruktionszeichnung für ein Papierschiffchen anzufertigen, niemand könnte danach bauen. Aber eine Reihe von Faltanweisungen versteht jedes Kind.

Und tatsächlich gibt es in der Embryologie **Faltungsvorgänge** – aus der Blastula wird durch Einfalten die Gastrula, später wird das Nervenrohr – das zukünftige Rückenmark –eingefaltet. (Fig. 158)

Überwiegend erfolgt der Aufbau des Körpers durch einen Prozess den wir in der Technik nicht kennen: **die Ausbildung und Vermehrung funktionell geeigneter Körperzellen an der richtigen Stelle und in der richtigen Anzahl.**

Dass der ganze vielstufige Vorgang wahnsinnig kompliziert ist und noch nicht in jedem Detail verstanden, braucht wohl nicht betont zu werden. Der Prozess ist störungsanfällig – man erinnert sich an den Contergan-Skandal.

Die Strukturierung des Körpers erfolgt durch sogenannte Hox-Gene. Deren Abschnitte entsprechen den Körperabschnitten. Und sie sehen bei Fliege und Mensch ganz ähnlich aus! (Fig.16)

Kann man in diese Gene eingreifen? Ja, kann man. So hat man Fruchtfliegen erzeugt mit einem verdoppelten Flügelpaar.

Noch bizarrer erscheint das folgende Experiment. Ich sagte, alle Lebewesen verwenden die gleiche „Sprache“. Es gibt ein Gen das die Bildung eines Augenpaares auslöst. Es heißt „Eyeless“ weil seine Fehlfunktion die Ausbildung von Augen verhindert. Ein solches Gen hat man dem Genom einer Maus entnommen und in das Genom einer Fruchtfliege eingebaut. Das Ergebnis: Es entstanden Fruchtfliegen mit vier funktionsfähigen Augen – Fliegenaugen – die Bauweise des Auges wird offenbar von anderen Genen gesteuert. Der Ort für das zweite Augenpaar war nicht immer unbedingt optimal – auf den Fühlern haben Augen eigentlich nichts zu suchen. (Fig. 17)

Dass alle Lebewesen mit der gleichen Sprache kodieren, macht sich die Gentechnik zu Nutze. Eine der ältesten Anwendungen:

Das menschliche Gen für die Bildung von Insulin wurde 1982 in das Bakterium *Escherichia coli* eingeschleust. Fortan in „Fermentern“ vermehrt, produzieren die Bakterien menschliches Insulin.

Eine neuere Anwendung: Ein Gen des *Bacillus thuringiensis*, übertragen auf Mais und Baumwolle, veranlasst diese Pflanzen zur Produktion von Gift gegen Schadinsekten.

In jedem Zellkern finden sich **zwei Satz Chromosomen**, der eine vom Vater, der andere von der Mutter. Die Gene für ein bestimmtes Merkmal darin sind nicht unbedingt identisch – es finden sich Variationen, die man als „**Allele**“ bezeichnet. Das Gen für die Augenfarbe kann blau oder grünbraun kodieren. Die Gene für die Körpergröße können einen schwächtigen Körper oder einen Klitschko definieren. Die Gene selbst vermischen sich nie. Das Lebewesen, das wirklich entsteht – das heißt dann „der Phänotyp“ – kann einen Mittel zwischen zwei Allelen realisieren; bei der Körpergröße dürfte das so sein. Oder aber es kann sich grundsätzlich immer ein Allel gegenüber dem anderen durchsetzen: das Gen für dunkle Augen ist dominant über das Gen für blaue Augen. Die Gene selber bleiben erhalten und können weitergegeben werden. Nach Generationen dunkeläugiger Vorfahren kann wieder ein blauäugiger auftauchen – wenn zufällig zwei Blaue-Augen-Allele zusammenkommen. (Achtung: Dies ist ein vereinfachtes Modell nach Davenport, in Wirklichkeit sind mehrere Gene beteiligt).

In der Regel werden die Gene über viele Generationen unverändert weitergegeben – sie erzeugen sich immer wieder selbst – man bezeichnet sie deswegen auch als **Replikatoren**. Die Gene können sich allerdings verändern: durch „Kopierfehler“, Umordnung, Verdopplung oder „Mutationen“. Das alles sind eher seltene Ereignisse. Aber so entstehen immer **neue Allele**.

Regelmäßig werden bei der Bildung der Geschlechtszellen (Samenzellen, Eizellen), der sogenannten Meiose, die beiden Chromosomensätze durcheinander gemischt. Es entsteht eine unendliche Zahl **neuer Kombinationen**. Und weil viele Eigenschaften von mehreren Genen bestimmt werden, bedeuten neue Kombinationen auch neue Eigenschaften.

Wenn jetzt ein Kind gezeugt wird, dann kommt vom anderen Elternteil noch einmal ein so gemischter Chromosomensatz hinzu – das kombinierte Ensemble der Gene (auch als **Genotyp** bezeichnet) wird im den komplizierten Prozess der Embryologie einen ganz einmaligen „**Phänotyp**“ hervorbringen. (Zufällige äußere Umstände spielen natürlich auch eine Rolle: die sehr gute Ernährung unserer Kinder hat dazu geführt dass sie uns über den Kopf gewachsen sind. Der genetische Spielraum scheint ausgenutzt: Die Menschen z.B. in Deutschland werden jetzt nicht mehr größer). Aber solche Effekte können nicht vererbt werden, spielen also für unsere Betrachtungen keine Rolle).

Das Prinzip der Evolution

Wenn denn nun Lebewesen einer Art mit unterschiedlichen Eigenschaften zur Auswahl stehen, dann kann die natürliche Selektion angreifen: Die unterschiedlichen Eigenschaften geben unterschiedliche Überlebenschancen, unterschiedliche Chancen bei der Partnerwahl..... unterschiedlich viel Nachkommenschaft.

Gene, die ein Lebewesen tüchtiger machen, setzen sich über viele Generationen hin durch – die Lebewesen bewegen sich schneller, sind stärker, haben schärfere Sinne, zeigen vorteilhafte Verhaltensweisen ... Kleine Veränderungen summieren sich im Laufe der Zeit Das nennen wir Evolution. (Fig. 18)

Was treibt die Evolution an?

Naheliegender sind zunächst einmal **Änderungen in der Umwelt**. Paradebeispiel: Wenn das Klima kälter wird haben Tiere mit zufällig dichtem Fell eine bessere Überlebenschance .

Auch konkurriert man um **begrenzte Ressourcen**: Der Fuchs mit der feinsten Nase fängt die meisten Mäuse, kann die meisten Welpen ernähren. Das am besten kletternde Wildschaf findet im Gebirge die meiste Nahrung

In einer Jäger-Beute-Beziehung gibt es so etwas wie „**Wettrüsten**“, z.B. zwischen Gepard und Gazelle. Die schnellsten Geparden werden sich am meisten fortpflanzen, auf der anderen Seite die schnellsten Gazellen.

Aber wer läuft da eigentlich gegen wen? Vielleicht haben Sie die folgende Geschichte schon einmal gehört: Zwei Abenteurer sitzen in Kanadas Wildnis beim Frühstück, da nähert sich bedrohlich ein Grizzlybär. Schnell zieht sich einer der beiden Männer seine Laufschiene an. „Was soll der Quatsch?“ sagt der andere, „der Bär kann sowieso schneller laufen“. „Stimmt!“ sagt der erste, „aber mit den Schuhen laufe ich schneller als **du!**“

Also: im Sinne der Evolution laufen die Gazellen gegeneinander, und die Geparden laufen gegen andere Geparden!

Wettbewerb um **Paarungserfolg**: Welches Männchen darf sich mit dem oder den Weibchen paaren? Die Konkurrenz kann „intrasexuell“ erfolgen: Im Duell zwischen zwei Hirschen, in den endlosen Zweikämpfen

von See-Elefanten-Bullen. Wer gewinnt, der paart sich, darf einen Harem unterhalten. Oder „intersexuell“: Welcher Pfau oder Paradiesvogel dem Weibchen am besten gefällt, der darf ran!

Faszinierend, weil auch für uns Menschen bedeutsam, ist die **Selektion auf Verhalten in der Gruppe**:

Ganz normal bei höheren Tieren die in Gruppen leben ist **Altruismus auf Gegenseitigkeit** ("Reziproker Altruismus"). Man hilft sich in der Erwartung, selbst im Gegenzug, umgehend oder später, geholfen zu bekommen. Dieses Verhalten dient dem Individuum / seinen Genen, aber auch der ganzen Gruppe (die ja vielfach verwandt ist). Die Erwartung zukünftiger Hilfe muss durchaus nicht bewusst sein, es genügt dass die genetische Veranlagung solches Verhalten auslöst. Gene, die dieses Verhalten begünstigen, setzen sich durch.

Häufig kann man Gruppenverhalten am besten verstehen aus dem Blickwinkel des „**egoistischen Gens**“, eine Betrachtungsweise die Richard Dawkins in seinem berühmten gleichnamigen Buch propagiert hat. Dazu muss man sich vor Augen halten: Gene sind diejenigen Einheiten die in der Lage sind identische Kopien ihrer selbst zu erzeugen („Replikatoren“). Gene sind potentiell unsterblich: Keiner von uns wird in 100 Jahren noch leben, aber unsere Gene können in 10 000 Jahren noch leben.

Die Individuen sind nur „Überlebensmaschinen“ für die Gene. Sie können geopfert werden wenn es dem Überleben der Gene dient. Entsprechende Verhaltensweisen werden von der Evolution belohnt: Solche Gene leben weiter.

Das kommt zum Ausdruck im "**Verwandtenaltruismus**": Eltern und Großeltern opfern ihr Leben für Kinder und Enkel. (50% resp. 25% gemeinsame Gene!). Menschen opfern sich für ihre Geschwister (50% gemeinsame Gene!).

Achtung: Man kann Verwandtschaft i.A. nicht äußerlich sehen. Das Verhalten wird durch „familiäre Vertrautheit“ aufgerufen. Darum kann solches Verhalten beim Menschen auch anerzogen werden – in Pseudo-Familien. Deswegen kann man Menschen zur Aufopferung des eigenen Lebens „für Vaterland und Volksgemeinschaft“ bewegen, oder zu Selbstmordattentaten veranlassen.

Halten wir noch einmal fest:

Evolution besteht aus der zufälligen Veränderung des Erbgutes und der systematischen Selektion der unter den gegebenen Umständen Tüchtigsten. Die Selektion über Tausende Generationen nach gleichbleibendem Kriterium erweckt den Eindruck eines zielgerichteten Vorgangs.

Einschränkungen

Die schier unübersehbare Fülle der Lebensformen suggeriert, der Evolution müsse alles möglich sein. Aber das stimmt nicht. Natürlich hat die Evolution nicht wirklich freies Spiel. Es gibt viele Grenzen.

Da gibt es zunächst einmal **physiologische Grenzen**. Insekten zum Beispiel können nicht beliebig groß werden weil dann die Atmung durch Tracheen nicht mehr funktioniert.

Evolution muss immer einen **optimalen Kompromiss** finden. Eine Gazelle mit Giraffen-langen Beinen z.B. könnte besonders schnell laufen – aber sie würde sich regelmäßig die Beine brechen ...

Die Anpassung an eine veränderte Umwelt **benötigt Zeit**, weil immer nur kleine Schritte möglich sind. Wenn die Umwelt sich zu schnell ändert, wenn der Mensch zum Beispiel Ratten auf eine Insel einschleppt, dann haben die am Boden brütenden Vögel schlechte Karten Oder wenn ein großer Meteorit auf der Erde einschlägt und das Klima auf Jahre verändert ...

Es gibt immer nur eine **endliche Variationsbreite**. Vielleicht steht die gerade benötigte Änderung nicht zur Verfügung.

Organe oder Körperteile können nicht neu erfunden werden, sie können nur aus vorhandenen Körperteilen abgeleitet werden, und jede Zwischenstufe muss sich bewähren!

Gerade die letzte Einschränkung kann zu mancherlei Problemen, ja geradezu absurden Lösungen führen. Die Anhänger des „Intelligent Design“ behaupten ja, der liebe Gott Sorge für all die wunderbaren Lösungen in der Natur. Es gibt genug Beispiele wo der große Designer gepuscht hat (Fig. 19) :

Unter Menschen fortgeschrittenen Alters muss man nicht ausführlich darstellen, dass Rücken, Hüftgelenke, Knie, Füße Schwachpunkte der „Konstruktion Mensch“ sind – Kollateralschäden des aufrechten Ganges.

Wir schleppen nutzlose oder potentiell gefährliche Körperteile mit uns herum: die Brustwarzen der Männer, die Mandeln, den Blinddarm.

Oder denken sie nur einmal daran dass bei uns Speiseröhre und Luftröhre sich überkreuzen!!! Wie viele Leute sind wegen dieser Fehlkonstruktion schon erstickt!

Oder nehmen sie den Nerv der vom Gehirn zum Kehlkopf führt: Er muss zuerst nach unten, sich um eine Aorta schlingen, und dann wieder hoch! Wie viele unnütze Meter sind das bei einer Giraffe?! Um die beiden letzten Beispiele zu erklären, muss man in der Reihe unserer Vorfahren bis zu den Fischen zurückgehen

Oder: Welcher menschliche Konstrukteur käme auf die Idee, die lichtempfindlichen Zellen des Auges nach hinten, hinter die Nerven zu legen und bei der Durchleitung der gebündelten Nervenfasern nach hinten den „Blinden Fleck“ zu erzeugen, den wir gewöhnlich nur deswegen nicht bemerken weil unser Gehirn die Lücke interpoliert?

Das mit dem verkehrten Aufbau des Auges müsste nicht so sein – bei den Weichtieren ist es anders herum! (Fig. 20)

Tatsächlich kann man bei den Weichtieren gut studieren, wie sich ihr Auge entwickelt hat: Flachauge – Grubenaug – Becherauge – Lochkamera-Auge – Linsenaug – Aug mit veränderlicher Linse. Jedes Aug funktioniert, tut den Tieren, die es nutzen, ausreichende Dienste. Wenn die Kreationisten behaupten, das Aug sei ein so wunderbares Organ und hänge so sehr vom perfekten Funktionieren aller seiner Bestandteile ab, dass es nur als komplettes Gebilde dem Geist eines Schöpfergottes entsprungen sein könne ... dann ist das schlicht Unsinn. 10% Sehkraft ist besser als blind .. 20% ist besser als 10% das Aug hat sich in kleinen Schritten entwickelt wie jedes andere Organ auch. (Fig. 21)

Mindestens 40 mal wurde das Aug im Tierreich unabhängig entwickelt, mindestens 9 verschiedene Bauprinzipien sind im Einsatz! Alle diese Augen erfüllen ihre Aufgabe – sonst könnten diese Tierarten nicht überleben! (Fig.22)

Nun gut, wir können uns die Evolution einzelner Körperteile in kleinen Schritten vorstellen. Wie aber sieht es aus mit der **Entwicklung der Ar-**

ten? Kann eine Art schrittweise entstehen? Selbstverständlich – der Mechanismus ist weitgehend verstanden.

Zunächst : **Was ist eigentlich eine Art, einer Spezies?**

Eine Art ist eine Fortpflanzungsgemeinschaft – eine Anzahl von Tieren die sich untereinander paaren und deren Nachkommen wieder untereinander fruchtbar sind. (Alle Hunde sind eine Art, wie so manch seltsame Promenadenmischung beweist. Maulesel sind keine Art: Sie können sich nicht fortpflanzen).

Die Mitglieder einer Fortpflanzungsgemeinschaft tauschen von Generation zu Generation Gene aus; die Gesamtheit der Gene einer Art wird als ihr Genpool bezeichnet. Evolution kann man als trendmäßige Änderung des Genpools beschreiben.

Diese Definition einer Art ist für lebende Arten praktisch eindeutig. Fast 2 Millionen heute lebenden Arten sind beschrieben, 10 Millionen werden vermutet.

Heikler wird der Begriff der Art wenn wir über die Evolution reden. Selbstverständlich gibt es im Zeitlauf keine scharfen Grenzen. Niemals haben Eltern und Kinder verschiedenen Arten angehört! Beim Studium zum Beispiel von Fossilien muss man sich mit anderen Kriterien behelfen – aus körperlichen Unterschieden auf die Zugehörigkeit zu verschiedenen Arten schließen (die, hätten sie zur gleichen Zeit gelebt, sich nicht hätten fruchtbar miteinander paaren können.) Gewöhnlich gibt es zwischen Fossilien ausreichende Lücken für diese Überlegung! Die Schätzung, dass es **1 Milliarde Arten** gegeben habe, kann also nur grob sein – eine Größenordnung.

Wenn im Laufe der Evolution immer neue Arten aus alten hervorgegangen sind, dann liegt die Vorstellung, das **Bild eines Stammbaumes**, nahe. In der Tat stammt die erste Skizze eines solchen Stammbaumes von Darwin selber. (Fig.23)

Bei 1 Milliarde Arten sollte man sich anstatt eines Baumes besser einen riesigen Busch vorstellen. Im Laufe der Zeit folgten Arten aufeinander, sie haben sich aufgespalten, und ganz viele Arten sind ausgestorben. Schließlich sind aus den überlebenden die heutigen Arten hervorgegangen. Wenn eine Art schon sehr lange existiert, über Zeiten hinweg wo andere Arten sich vielfach abgelöst haben, dann spricht man gerne von einem lebenden Fossil .

Wie spalten Arten sich auf? **Wie entstehen neue Arten?**

Als Regelfall gilt die „**Allopatrische Speziation**“. Gemeint ist: Die Gesamtpopulation einer Art wird durch ein geografisches Hindernis aufgespalten: ein Bergzug, ein Flusslauf, ein Meeresarm.... Die anfänglich gleich zusammengesetzten Genpools nehmen unterschiedliche Entwicklungen - Zufall? Unterschiedliche Umwelt? – und wenn dann eines Tages das geografische Hindernis wegfällt, dann sind die beiden Populationen unterschiedlich genug, dass sie sich fortan als getrennte Arten fortpflanzen. (Fig.24)

Das klassische Beispiel sind die Galapagos-Inseln. Ganz wenige Arten haben den langen Weg von Südamerika zurückgelegt – ein Finkenpaar vielleicht im Sturm, eine Echse mit befruchteten Eiern auf einem treibendem Baumstamm – das langt. Auf den nahe beieinander liegenden Inseln haben sie sich zu eigenen Arten entwickelt. Insbesondere den Meereschnecken mit ihrem halb-aquatischen Leben ist dabei eine ganz eigene Entwicklung gelungen.

Systematik

Bevor ich in die Geschichte des Lebens einsteige, will ich kurz in das Thema der **Systematik** behandeln.

Sie wissen alle: Es ist unheimlich schwierig ein gutes Ablagesystem zu schaffen – Bücher, CDs, Dokumente, Schriftwechsel.... Wie oft muss man in seinem Computer aufräumen?!

Bei den Lebewesen ist es auch nicht einfach die passenden „Schubladen“ zu definieren.

In der klassischen, auf den Schweden Linné zurückgehenden Methode werden Lebewesen nach einem gewissen Schema nach Ähnlichkeit ihres Körperbaus sortiert und lateinisch bezeichnet. Sie wissen: wir hier gehören zur Familie der Menschenaffen, Gattung *Homo*, Art *Homo sapiens* (ob wir den Namen verdienen, wollen wir hier nicht diskutieren)

Reich: Vielzellige Tiere

Stamm: Cordatiere

Klasse: Säugetiere

Ordnung: Primaten

Familie: Menschenaffen

Gattung: Menschen *Homo*

Art: Moderner Mensch – *Homo sapiens*

Eine andere, heute gern gebrauchte Form ist das **Cladogramm**. (Eine Clade ist eine Tiergruppe, auf irgendeiner Ebene). Es ist eine grafische Darstellung. Man baut einen Evolutionsbaum auf; an jeder Verzweigungsstelle gibt es immer nur zwei Zweige, die sich in einem Merkmal unterscheiden.

Diese Darstellung erfasst primär die evolutionären Zusammenhänge, eignet sich daher besonders auch die Historie der Evolution nachzuvollziehen – mit mancherlei überraschender Erkenntnis: Das Cladogramm für die Entwicklung der Wale zeigt: die nächsten lebenden Verwandten der Wale sind die Flusspferde! (Fig. 25)

Häufig wird dem Cladogramm auch eine Zeitskala beigegeben. Wie kommt man dazu?

Zum einen gibt es die geologischen Überlegungen, die Auswertung der Folge der Fossilien. Zum andern gibt es die sogenannte **Molekulare Uhr**. Sie funktioniert so:

Größere Mutationen am Erbgut sind in der Regel schädlich und werden ausgelesen; kleinere sind häufig neutral, zum einen weil verschiedene Aminosäuren durch mehr als ein Triplet von Basen kodiert werden können, zum anderen im nicht kodierenden Teil des Erbgutes. Diese Änderungen sammeln sich im Lauf der Zeit an, und man weiß etwa wie schnell das geht. Man untersucht also das Erbgut zweier heute lebender Tierarten – stellt fest an wie viel Stellen sie sich unterscheiden – und schließt daraus wie viel Zeit vergangen sein muss seit sich ihre Vorfahren getrennt haben. Den Trennungzeitpunkt einer ausgestorbenen Tierart muss man natürlich auf andere Weise interpolieren.

Früher hat man sich vorgestellt es gebe in der Welt eine Stufenleiter der Wertigkeit, vom unbelebten Stein bis hinauf zu Engeln und Erzengeln und schließlich Gott, mit dem Mensch ziemlich weit oben, jedenfalls über den Tieren. (Fig. 26)

Solche Denkweise hat heute in der Wissenschaft keinen Platz mehr. Die Komplexität eines Säugetieres, zum Beispiel eines Menschen, gibt ihm deswegen keinen höheren Wert im Sinne der Evolution. Die einfachen Bakterien sind bis heute die erfolgreichste Lebensform. Ihr Gesamtgewicht liegt wohl deutlich über dem aller Wirbeltiere zusammen. Sie finden sich in den unterschiedlichsten Lebensräumen.

Beispiel Mensch: Im gesunden menschlichen Körper leben 10-100 mal mehr Bakterien und andere Mikroorganismen als der menschliche Kör-

per Zellen hat (10-100 Billionen Zellen)! Sie gehören über 1000 verschiedenen Arten an und wiegen zusammen mindestens ein paar hundert Gramm – die Angaben gehen bis 1,5 kg!

Das klassische Bild des "March of Evolution" kann man heute nur noch ironisch zitieren (Fig. 27)

Die Entwicklung des Lebens

Bitte erwarten Sie nicht dass ich all die Verzweigungen der Evolution nachvollziehe, wenn ich jetzt in die historische Entwicklung des Lebens, speziell der Tiere, einsteige. Ich werde zur Illustration der Tierformen, von denen ich rede, vorzugsweise rezente, heute lebende Arten benutzen. Wo ausgestorbene Tiergruppen erwähnt werden müssen, werde ich in der Regel auf Fossilien zurückgreifen.

Beginnen wir am Anfang – bei der **Entstehung des Lebens**. Und schon stehen wir vor einer besonderen Schwierigkeit: Es gibt keine allgemein akzeptierte Erklärung. Von den ersten Anfängen gibt es ja keine Fossilien !

Wir wissen wann es geschehen sein muss: etwa 1 Milliarde Jahre nach der Entstehung der Erde. Wir wissen in etwa wie es damals auf der Erde aussah: Ungemütlich! Immer noch prasselten zahlreiche Meteoriten auf die Erde; starker Vulkanismus gestaltete die Oberfläche um; Radioaktivität heizte noch nach. Erst vor 3,8 Milliarden Jahre konnte sich Wasser zu Ozeanen zusammenfinden.

Die Atmosphäre verlor immer mehr ihrer ursprünglichen leichten Elemente Wasserstoff und Helium; dafür gaben die Gesteine aus: Wasserdampf + Kohlendioxid + Schwefelwasserstoff + Ammoniak + Methan bildeten das neue Gemisch. Was fehlt? Richtig Sauerstoff!

Was sollte unter diesen Umständen eigentlich entstehen? Welche Eigenschaften musste das neue Etwas eigentlich haben um als „Leben“ bezeichnet zu werden?

Es mussten gegen ihre Umgebung abgegrenzte, aber mit ihr im Stoff- und Energieaustausch stehende, wachsende, sich vermehrende Einheiten entstehen. Bei der Vermehrung mussten sie ihre Eigenschaften auf die neuen Einheiten übertragen: Sie mussten „Replikatoren“ sein. Wesentlicher chemischer Baustein ist beim irdischen Leben Kohlenstoff, der wie kein anders Element in der Lage ist, lange und verzweigte Ketten zu bilden, in die vor allem Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Schwefel und

Phosphor eingebunden sind, plus einer Reihe weiterer Elemente in kleinen Mengen.

Wo und wie konnte so etwas entstehen? In einem Schritt, durch Zufall? Unmöglich.

Darwin hat in einem Brief von einem kleinen warmen Teich gesprochen. Das klingt heute etwas naiv, aber wie sollte er es besser wissen?

Urey und Miller mischten 1953 etwas zusammen was als „Ursuppe“ bekannt wurde. In einem Glaskolben wurden Methan, Ammoniak, Wasser und Kohlendioxid erhitzt. Elektrische Entladungen simulierten Blitze. Ergebnis: Es entstanden organische Verbindungen, aber keine wirklich komplexen Kettenmoleküle. (Fig.28)

Heute sieht man den Ort der Entstehung eher nicht in der Atmosphäre oder im freien Meer. Kandidaten sind heute „Schwarze Raucher“, Schloten in der Tiefsee, aus denen wässriges Chemikaliengemisch ausströmt. Diese Schloten sind heute von einer Zone vielfältigen Lebens umgeben, Bakterien aber auch Gliedertiere, Würmer, Muscheln - Leben, das seine Energie nicht aus dem Sonnenlicht bezieht, sondern aus dem was der Raucher an Wärme und Stoffen zu bieten hat. Dort könnten in Ritzen und Spalten sich in höchst komplizierten Kreisprozessen schrittweise Leben gebildet haben.

Ganz allgemein gilt für Entstehung des Lebens auch Tonerde als ein gutes Substrat– wie man sie bisweilen am Rande und Grunde stehender Gewässer findet – womit wir wieder bei Darwins warmem Tümpel sind!.

Wir gehen jetzt durch die großen **Perioden der Erdgeschichte**.

Im **Archaikum** (Fig.29), vor 3,8 bis 25 Milliarden Jahren, finden wir erste Lebensformen die Fossilien hinterlassen haben. Es sind Lebensformen noch ohne Zellkern, sogenannte **Prokaryonten**. Ihre DNA schwimmt verteilt im Zellplasma. Viele von ihnen haben sich mehr oder minder unverändert bis heute erhalten: Die **Archäen**, die gerne in extremen Biotopen leben, z.B. in heißen Schwefelquellen, und die **Bakterien**. Unter den Bakterien besonders bemerkenswert: Die **Cyano-Bakterien**, einzelne Zellen oder Stränge. Ihre verschiedenen Formen haben es als erste geschafft, mit der Energie des Sonnenlichtes aus Wasser und Kohlendioxid Kohlenhydrate aufzubauen – die sogenannte „Photosynthese“. Den Sauerstoff der aufgespaltenen Ausgangsstoffe geben sie an die Atmosphäre ab – aus dieser Quelle stammt der Sauerstoff in unserer Atmo-

sphäre – nur aus dieser Quelle – ich komme gleich darauf zurück! Cyanobakterien haben die Stromatolithen vor Australiens Westküste aufgebaut: Vielschichtige Steinkissen.

Cyanobakterien gibt es heute noch, nicht nur vor Australien - wir alle haben sie schon einmal gesehen: Der grüne Schmier auf Teichböden enthält sie!

Im Archaikum passierte noch etwas Aufregendes: Cyanobakterien wanderten in andere größere Bakterien ein und fuhren dort mit ihrer Nutzung des Sonnenlichtes fort. Aus ihnen wurden die **Chloroplasten** in den Pflanzenzellen, das „Blattgrün“ - unser heutiger Sauerstofflieferant! (Fig. 30)

Ein zweite vergleichbare „**Endosymbiose**“ ereignete sich: Aus eingewanderten anderen Bakterien entstanden die „**Mitochondrien**“ unserer Körperzellen, die kleinen „Energiekraftwerke“, in denen die angelieferten Nährstoffe in **Adenosintriphosphat** umgewandelt werden, den sofort verfügbaren hochkonzentrierten Betriebsstoff der Zellen.

► Im langen **Proterozoikum** vor 2,5 Milliarden bis 540 Millionen Jahren finden sich zunächst einmal die ersten „**Eukarionten**“, also die ersten Lebewesen die einen Zellkern haben in dem das Erbmaterial konzentriert ist. Aber immer noch sind sie einzellig. (Fig 31)



Eher gegen Ende der Zeit tauchen als erste mehrzellige Strukturen die **Schwämme** auf und die **Hohltiere** auf; ihre Nachkommen haben sich bis heute gehalten. (Fig. 32)

Wir finden in dieser Periode aber auch die vielfältige **Ediacara-Fauna**, die uns nur Fossilien in Australien hinterlassen hat – was das wirklich war, das weiß man nicht, eben weil es keine Abkömmlinge gibt. (Fig. 33)

Und jetzt das **Kambrium** vor 540 bis 490 Millionen Jahren! Dieser Zeitabschnitt hat die Forscher immer besonders fasziniert, weil jetzt eine Fülle gut fossilisierender Meeresbewohner auftaucht. Man hat von der „Kambrischen Explosion“ geredet, aber das ist wahrlich übertrieben: immerhin hat diese Periode 50 Millionen Jahre gedauert! Tatsache ist allerdings, dass alle Tierstämme die wir heute kennen (man sagt 35), hier schon auftauchen – in frühen, sich allmählich verändernden Formen, aber identifizierbar. Andere sind ausgestorben.

Überlebt haben zunächst einmal die **Weichtiere** – die Muscheln und Schnecken. Sodann die **Stachelhäuter** – uns von den heutigen am besten vertraut die Seesterne und die Seeigel. (Fig. 34)

Weiter haben wir die **Gliederfüßer**: Unsere Krebse und Tausendfüßler und Spinnen. Besonders altertümlich: Die **Pfeilschwanzkrebse**. Im Kambrium am weitesten verbreitet waren freilich die **Trilobiten**, uns nur noch von vielen Fossilien vertraut. (Fig. 35)

Und dann gibt es im Kambrium sogar die ersten **Cordatiere** – die ersten Tiere mit einem Knorpelstrang im Rücken aus dem später einmal die Wirbelsäule wird. Zu den lebenden Nachkommen zählen die Seescheiden, die nur als freischwimmende Larven einen Rückenstrang haben; das kleine Lanzettfischchen; und die etwas unheimlichen Neunaugen und Inger, für die ich kürzlich einen netten Vergleich fand: sie seien so etwas wie ein „Strumpf mit Zähnen“. (Fig. 36)

Alle die genannten Tiere werden sich im Lauf der Zeit mehr oder weniger weiterentwickeln, bis hin zu den heutigen Nachkommen.

Das **Ordovizium** vor 490 bis 440 Millionen Jahren (Fig. 37) ist die hohe Zeit der **Kopffüßer**. Die ausgestorbenen **Ammoniten**, bekannt von wunderschönen Fossilien, waren gewöhnlich kleiner als 30 cm, eine Art erreichte aber satte 1,80 m Durchmesser. Den fossilen Formen noch am ähnlichsten ist der **Nautilus**, alias das Papierboot. **Tintenfische** (die Sepia war Lieferant der braunen Tusche für die Zeichnungen von C.D.Friedrich), **Kalmare**, **Kraken** gehören heute dazu. Den Kalmaren durchaus ähnlich war eine später zu Hochform auflaufende und wieder ausgestorbene Form: die **Belemniten**.

Im **Silur** vor 440 bis 410 Millionen Jahren (Fig. 38) entwickelt sich die Fülle der Fische, **Knorpelfische**, **Knochenfische**, und die wieder ausgestorbenen **Panzerfische** (so genannt wegen der Knochenplatten hinter dem Kopf), schreckerregend mit Längen bis 10 m. Eine aus zwei Gründen besonders interessante Form waren die **Quastenflosser**. Vom nachfolgenden Devon bis zur Zeit vor 70 Millionen Jahren durch Fossilien nachgewiesen, galten sie als ausgestorben – bis sie 1938 im Indischen Ozean vor Afrika wieder entdeckt wurden. Inzwischen hat man eine zweite Art gefunden.

Im **Devon** vor 410 bis 350 Millionen Jahren passiert etwas aufregendes: Die Fische gehen an Land! (Fig.39)

Neil Shubin fand 2004 die fossilen Reste eines Fisches, der neue Merkmale hatte: Er konnte sich auf Quastenflossen hochstemmen, die schon in Vorstufe die typischen Knochen der kommenden Landbewohner enthielten, und er besaß ein Genick, konnte also den Kopf wenden. Shubin fand diesen **Tiktaalik** in Kanada an einer Stelle, die er vorab durch geologische und paläontologische Überlegungen als geeignet für den Übergang vom Wasser auf das Land identifiziert hatte. Kein Zufallsfund also! Wissenschaftliche Logik!

Das **Karbon** vor 350 bis 290 Millionen Jahren (Fig.40) ist die Zeit der gewaltigen Wälder von **Farnen und Schachtelhalmen**, die später zu unserer Steinkohle wurden. In den Wäldern lebten Amphibien; sie hatten noch eine feuchte Haut und mussten zur Eiablage in das Wasser zurückkehren.

Allem Anschein nach war der Sauerstoffgehalt der Luft damals mit 35% besonders hoch. Das erlaubte den **Insekten** und ähnlichem Getier ungewohnte Größe: Es gab Libellen mit 70 cm Spannweite, und eine Art Tausendfüßer mit 2m Länge. Ganz allgemein war das Karbon eine Hoch-Zeit der Insekten, aber sie haben sich bis heute bestens gehalten. Fast 1 Million Arten wurden beschrieben – mehr als die Hälfte aller überhaupt beschriebenen rezenten (gegenwärtigen) Arten. (Fig.41)

Irgendein Witzbold hat einmal bemerkt, der liebe Gott müsse eine besondere Liebe zu den Käfern haben: Mit 350 000 beschriebenen Arten ist es die größte Ordnung der Insekten. (In der ganzen Klasse der Säugetieren gibt es nur 5420 Arten).

Im **Perm** vor 290 bis 250 Millionen (Fig. 42) Jahren treten landlebende Tiere auf den Plan, die eine trockene Haut haben und durch eine harte Schale geschützte Eier ablegen. Unter der Bezeichnung „**Reptilien**“ laufen seit Brehms Zeiten verschiedene solcher Tiergruppen, die ihrer Geschichte in der Evolution nach sich stark unterscheiden. Besonders nah an alten Formen sind die Brückenechsen im neuseeländischen Raum; es scheint dass sie das Auftreten des *Homo sapiens* nicht überleben werden.

Am Ende des Perm starben 95% aller damals meerbewohnenden und 66% aller Landbewohner aus – Ursache unklar.

Trias, Jura und Kreide vor 250 bis 65 Millionen Jahren (Fig. 43) sind das große Zeitalter der **Saurier**, die mit kleinen wie mit riesigen Formen das Land, die See und die Luft beherrschten. Unmöglich, auf die Vielfalt der Formen einzugehen.

Ohnehin sind vor 65 Millionen Jahren, wahrscheinlich als Folge der Klimaänderungen nach einem Meteoriteneinschlag, alle Saurier ausgestorben.

Alle? Nein nicht alle!

Aus der letzten Periode, der **Kreidezeit**, sind eine Reihe von **gefiederten Sauriern** bekannt. Unter solchen Sauriern befindet sich mit Sicherheit der Vorfahr unserer Vögel. **In moderner Cladistik gehören die Vögel in die Clade „Dinosauria“.** (Fig. 44)

Schon viel früher, im Perm, im Trias, in der Kreide finden sich säugetierähnliche Tiere. Aber erst als die Herrschaft der Dinosaurier zu Ende war, konnten die **Säugetiere** die freien ökologischen Nischen besetzen und sich zur heutigen Vielfalt ausbreiten. Diese Zeit wird als Tertiär bezeichnet. (Fig. 45)

Am Ende dieser Epoche kündigt sich die **Herrschaft des Menschen** an.

Wir Menschen bilden uns ja besonders etwas auf unser **Gehirn** ein. In der Evolution der Wirbeltiere lässt sich beobachten dass das Gehirn mehrfach zusätzliche Teile bekam. Noch heute ist das Gehirn ein unglaubliches Konglomerat von uralten Teilen (Stammhirn) bis zu recht neuen Teilen (Stirnhirn). Der Funktion dieser Teile können wir uns hier nicht widmen. Generell kann man sagen, dass in den ältesten Teilen die Steuerung der elementaren Lebensfunktionen zentriert ist, in den neuesten, insbesondere im Stirnhirn, die höheren kognitiven Funktionen. Aber das ist alles aufs komplizierteste verschaltet. (Anmerkung: Das Gehirn der Vögel ist etwas anders strukturiert als unseres. Bei einem Raben oder einem Graupapagei sitzen die kognitiven Funktionen im hinteren Großhirn (Nidopallium caudolaterale)). (Fig. 46)

Ehe wir uns gar zu viel einbilden auf unser Gehirn: Alle lebenden Tiere haben genau das Gehirn das sie für ihre Lebensweise brauchen – sonst würden sie ja aussterben. Ob wir mit unserem Gehirn auf lange Zeit überlebensfähig sind, das muss sich erst noch zeigen!

Fragen wir nach der **Größe des Gehirns** (seinem Gewicht), so müssen wir sie natürlich im Verhältnis zur Größe (dem Gewicht) des ganzen Tieres sehen (Fig. 47). In der Tat nimmt das menschliche Gehirn hier eine Spitzenposition ein. Es ist aber nicht nur relativ groß, wesentlich größer als der Mittelwert für ein Säugetiergehirn. Die Großhirnrinde ist zudem mit kleinen Neuronen eng gepackt, das menschliche Gehirn hat die

meisten Neuronen unter allen Tieren (doch kommen Wale und Elefanten nahe). Die Verknüpfungen durch Nervenfasern sind besonders dicht, die Signalwege also kurz, der Bau der Nerven (dicke Myelinschicht) ergibt eine hohe Signalleitungsgeschwindigkeit – es resultiert insgesamt eine besonders schnelle Informationsverarbeitung (6 .. 10 mal schneller als beim Delphin). Die Gehirne aller intelligenten Tiere (Kraken! Raben!) sind nach dem gleichen Prinzip gebaut dem Prinzip moderner Computer!

Und dann besitzt das heutige Gehirn des Menschen **zwei Sprachareale**: Mit dem evolutionär älteren **Wernicke-Zentrum** kommt man bis zu 2...3 - Wort –Sätzen – womit unsere Kinder anfangen zu sprechen, was man auch Schimpansen beibringen kann (z.B. in der Taubstummengebärdensprache); das **Broca-Areal** hingegen ist für komplexe Handlungsabfolgen, Syntax, Grammatik zuständig ist, also für Merkmale welche keine tierische Sprache besitzt – und unsere Kinder erst ab 2 ½ Jahren wenn das Broca-Zentrum ausreift! (Fig. 48)

Unsere komplexe menschliche Sprache erwies sich als Intelligenzverstärker (Weitergabe von detaillierten Informationen zwischen Gruppenmitgliedern und von Generation zu Generation).

Also: Unser das Gehirn ist wirklich gut! Aber wie wurde es so gut im Laufe der Evolution? Ist das leistungsfähige Gehirn der Auslöser der Menschwerdung? Oder eine Folge? Schauen wir uns die Evolution etwas genauer an!

Vor 63 Mio Jahren trennten sich die Primaten auf in die Halbaffen und die Affen. Vor 40 Millionen Jahren, als Südamerika und Afrika endgültig aus einander drifteten, trennten sich die Neuweltaffen ab. Vor 27 Millionen Jahren sind es dann die Altweltaffen, vor 18 Millionen Jahren die Gibbons, vor 14 Millionen Jahren die Linie des Orang Utans, vor 7 Millionen Jahren der Gorilla. Und schließlich trennen sich vor die Wege der Schimpansen (es gibt ja zwei Arten) und des 6 Millionen Jahre Menschen. (Fig. 49)

Kein Zweifel: **der nächste Verwandte des Schimpansen ist nicht etwa der Gorilla, sondern der Mensch**. Nur 1,5% der Basenpaare im Genom unterscheiden Schimpanse und Mensch.

Als die Vorläufer des Menschen und die der Schimpansen sich trennten, wechselten die Vorläufer des Menschen die Lebensweise. Vor 6 Millionen Jahren gingen sie in Ostafrika aus dem schrumpfenden Urwald hin-

aus in die sich ausbreitende Savanne, richteten sich auf und wurden zum aufrecht laufenden Sammler, Kleintierjäger und Aasverwerter. Im einzelnen ist der Stammbaum unserer Vorfahren nicht klar, dafür gibt es zu wenig Fossilien. (Fig. 50)

Unter den aufrecht gehenden Vorläufern scheint mir eine Form besonders erwähnenswert: *Australopithecus afarensis*. Zum einen gibt es von ihm gute Fossilien, darunter das fast vollständige Skelett „Lucy“ und der Kleinkindschädel "Selam". Das Skelett lässt nicht den mindesten Zweifel dass *Australopithecus* aufrecht ging. Aber es gibt auch noch dies: Fußspuren! Zwei dieser Wesen sind durch ein frisches Feld von Vulkanasche gestapft, und diese Spuren sind versteinert und wurden gefunden, bei Laetoli in Tansania. Dort sind eine große und eine kleine Person neben einander gegangen. Und: sie sind im Gleichschritt gegangen! Vielleicht hat eine Mutter ein Kind an der Hand geführt, das besonders große Schritte gemacht hat? (Fig. 51)

So viel allerdings ist klar: die Gattung *Homo* entsteht erst vor etwa 2,5 – 2 Millionen Jahren.

Die Gattung *Homo* ist in Afrika entstanden. Eine erste Auswanderungswelle des *Homo erectus* vor 2 Millionen Jahren nach Eurasien hatte keinen Bestand. Erst vor 100 000 Jahren begann *Homo sapiens* mit seinem langen Marsch der ihn schließlich zur Besiedelung der ganzen Erde führte. Diese Ausbreitungsgeschichte ist nicht nur durch Skelett- und Werkzeugfunde belegt, sondern spiegelt sich auch in den Genomen der heute lebenden Menschen. (Fig. 52)

Aber wie war das nun mit dem Gehirn? Wann ist es so groß geworden wie es heute ist?

Vor 6 Millionen Jahren haben sich die Vorfahren des Menschen aufgerichtet, aber was geschah mit dem Gehirn? Nichts! Es blieb fast auf der Größe eines Schimpansengehirns! Erst nach 3 Millionen Jahren aufrechten Ganges, vor 3 Millionen Jahren, begann das Wachstum des Gehirns, erst nur langsam, dann schneller. Seit 150 000 Jahren ändert sich die Größe unseres Gehirns nicht mehr – vielleicht, weil die Geburt durch den engen Geburtskanal zu viel Opfer fordert? Aber die Größe allein macht es ja nicht – die Mikrominiaturisierung der Neuronen und die Erhöhung der Signalgeschwindigkeit können durchaus weiter gegangen sein – das kann man am Knochenschädel nicht ablesen. (Übrigens: der Neanderthaler hatte tatsächlich ein etwas größeres Gehirn ... und trotzdem hat *Homo sapiens* ihn verdrängt. Nach neueren Erkenntnissen

muss es ein geringes Maß an Vermischung der Arten gegeben haben – ein paar Prozent unserer DNA stammt vom Neanderthaler). (Fig. 53)

Was hat die Entwicklung des menschlichen Gehirns ausgelöst?

Es gibt wohl keine solche einfache Beziehung „eine Ursache > eine Wirkung“. Richtiger wohl ist die Annahme selbstverstärkender Wirkungskreise, Rückkoppelungen, zwischen der Evolution des Gehirns und der Lebensweise – der Kultur im allgemeinsten Sinne. Woher gerade vor drei Millionen Jahren der Anstoß kam – der „Evolutions-Druck“ – das wissen wir nicht. Nach einer neueren Theorie war es eine Periode von 200 000 Jahren, in der das Klima in Afrika sich mehrfach schnell änderte – Anpassungsfähigkeit war gefragt. Was wir wissen: Ein positiv rückgekoppelter Regelungskreis kann durch eine winzige äußere Störung ange-regt werden.

Der aufrechte Gang per se war nicht der Auslöser, das ist sicher. Aber: er setzte die Hände frei zu ausgiebigem Gebrauch und zur Herstellung feiner Werkzeuge, zum Umgang mit dem Feuer. (Werkzeuge benutzen auch Tiere, aber die fein hergerichteten Steinwerkzeuge erfand erst *Homo habilis* vor rund 2 Millionen Jahren.)

Als ein wichtiges Rad im Evolutions-Getriebe wurde das Leben in großen Gruppen mit seinen vielfältigen Interaktionsmöglichkeiten identifiziert - es stellt besondere Anforderungen an das Gehirn: Das eigene Gehirn muss sich vorstellen was in den anderen Gehirnen in der Gruppe vor sich geht! „Theory of mind“ heißt das in der Literatur, manchmal auch „Gedankenlesen“. Die intelligentesten Tiere, wie die Raben oder die Menschenaffen, beherrschen das in gewissem Maße – der Mensch kann es noch viel besser. Vielleicht hat gerade diese Notwendigkeit, sich die geistigen Prozesse in anderen Gruppenmitgliedern klarzumachen, zum Bewusstsein des eigenen Ichs geführt.

Nach Untersuchungen von Robin Dunbar zum Zusammenhang zwischen Hirnstruktur und Gruppengröße bei Affen liegt die maximale Gruppengröße des *Homo sapiens* bei etwa 150 Personen. Die Zahl wurde durch Concalves/Perra/Vespignani sogar für soziale Netzwerke im Internet bestätigt (Twitter). Andererseits weiß man von Untersuchungen an Vögeln, dass solche mit einem monogamen Paarungssystem größere Gehirne besitzen. Das schnelle Wachstum des menschlichen Gehirns könnte also mit dem Übergang zu Paarbindung in gleichzeitig immer größerem Sozialverband zusammenhängen.

Eine andere Argumentation lautet: Das Gehirn konnte wegen seines hohen Energieverbrauchs (> 20%) erst dann wachsen, als die (Vor-) Menschen gelernt hatten große Tiere zu jagen. Aber erfolgreiche Jagd ohne Klauen und Reißzähne setzt natürlich Intelligenz und eine gut funktionierende Gruppe voraus. Bevorzugte Jagdmethode in Afrika auf Tiere wie Antilopen war wohl das Hetzen bis zum Zusammenbruch des Wildes. Der Mensch ist durch seine Zweibeinigkeit und die Fähigkeit des weitgehend unbehaarten Körpers zum Schwitzen ein überragender Läufer unter sengender Sonne. Heute noch hetzen Buschleute ihr Wild bis es durch Hitzschlag zusammenbricht. Alles erweist sich mit allem verbunden...

Eine differenzierte Sprache ist bei alledem ein wirkungsvoller Intelligenzverstärker Es wird vermutet dass die menschliche Sprache erst vor etwa 100 000 - 80 000 Jahren voll entwickelt war – danach entwickelte sich in immer schnellerem Tempo unsere Kultur.

Und jetzt endlich kommen wir zu **Adam und Eva** .

Zuerst einmal die simple Aussage: **Die mitochondrische Eva** lebte vor etwa 150 000 Jahren, der **Adam des Y-Chromosoms** vor rund 60 000 Jahren.

Jetzt fragen Sie natürlich was diese seltsamen Attribute sollen. Und woher man die Daten weiß. Ich will mich der Antwort auf einem kleinen, aber nicht reizlosen Umweg nähern.

Gemeinsame Vorfahren

Jeder von uns hat zwei Eltern, vier Großeltern, 8 Urgroßeltern ... Gehen wir 10 Generationen – 250 Jahre – zurück, hat jeder schon 1024 Vorfahren. Im Hochmittelalter war es schon eine Milliarde. Und zur Zeit Karls des Großen 280 Billionen! Das sind 280 000 Milliarden! So viele Leute haben damals natürlich nicht gelebt – in Europa einige 50 Millionen. Also kann nicht jeder seine eigenen Vorfahren haben. Vielmehr: Wir haben viele – sehr viele – Vorfahren gemeinsam .Die Chancen, dass wir alle von Karl dem Großen abstammen, sind nicht schlecht! Aber bewiesen ist es natürlich nicht. (Fig. 54)

Diese Frage – nach dem nächsten allen gemeinsamen Vorfahren – war Gegenstand wissenschaftlicher Analysen. Die Frage wird dort erweitert auf die Frage nach dem nächsten Vorfahren **aller** Menschen, also dem uns zeitlich nächsten Menschen, der allen heute Lebenden irgendwelches Erbmaterial hinterlassen haben kann weil sie in direkter Linie ver-

wandt sind. Dieser Mensch läuft unter der Bezeichnung „MRCA“, d.h. „Most Recent Common Ancestor“.

Professor Joseph T. Chang hat erste mathematische Untersuchungen angestellt, Douglas L.T. Rohde hat extrem aufwendige Simulationen durchgeführt, unter Berücksichtigung von Aspekten wie Wanderungsbewegungen und Heiratsgewohnheiten! Das verblüffende Ergebnis:

Der **MRCA aller Menschen** lebte vor etwa 3500 Jahren in Asien. (Einschränkung: Es könnte natürlich am Amazonas letzte Stämme geben, die weder von einem Konquistador noch von einem Missionar Erbmasse abbekommen haben; dann lebte der MRCA früher, vor der Besiedelung Amerikas, also vor 12 000 Jahren).

Der **MRCA aller Europäer** lebte vor etwa 1000 Jahren.

Noch etwas Verblüffendes ergab sich: Der MRCA ist ja nur der zeitlich nächste Ahne aller Menschen. Je weiter man in der Zeit zurück geht, desto mehr Menschen sind in direkter Linie unsere Ahnen. Es ergibt sich dass von den vor etwa 8 000 Jahren lebenden Menschen 80% Ahnen **aller** heute Lebenden sind, 20% aber keine heute lebende Nachkommen hinterlassen haben.

Nun haben wir bisher gar nichts darüber gesagt, ob der MRCA eine Mann oder eine Frau war, es war uns völlig einerlei welches Erbgut sie uns hinterlassen haben. Wir suchen aber nach einem Mann (den wir Adam nennen) und einer Frau (die wir Eva rufen).

Geschlechtsgebundenes Erbgut

Tatsächlich gibt es ein Erbgut, das den Mann kennzeichnet und nur von Mann zu Mann übertragen werden kann: die kurze Variante des 23. Chromosoms, bekannt als Y-Chromosom. 95% davon rekombinieren nicht mit dem X-Chromosom, werden unvermischt als verschnürtes Paket weitergeben. Wenn wir den Weg des Y-Chromosoms zurückverfolgen, kommen wir dann bei Adam an? Ja, so ist es. Aber wie kommt es dass nur **ein** Mann uns sein Y-Chromosom vermacht hat? Hier kommt die sogenannte „**Gendrift**“ ins Spiel.



Wenn von alternativen Genen – „Allelen“ – eines sich besonders günstig auswirkt, dann wird es sich in der Population durchsetzen. Bei gleichwertigen Allelen kann nur der Zufall Regie führen – hier gibt es einen Vorgang den die Genetiker und Evolutionsstatistiker „Gendrift“ nennen:

Nach ausreichend Zeit ist nur noch eine Allel übrig. Es ist ein reiner Zufallseffekt. Schwer vorzustellen? Vielleicht hilft ein Vergleich.

Sie kennen das Monopoly-Spiel? Es ist im wesentlichen ein Glücksspiel; die Kindervariante „Monopoly-Cars“ ist sogar ein lupenreines Glücksspiel. Am Anfang stehen alle Mitspieler gleich. Ein Mitspieler nach dem anderen scheidet aus, am Ende bleibt nur einer übrig. Das Spiel kann auch mal hin und her gehen, aber am Ende steht immer ein eindeutiger Sieger. Der Zufall hat dafür gesorgt.

Was für ein einzelnes Gen gilt, das gilt natürlich auch für eine zusammenreisende Gruppe von Genen, wie das Y-Chromosom.

Der Effekt funktioniert am besten in einer kleinen Population, zum Beispiel beim Entstehen einer neuen Art in der Gründerpopulation, oder in einem „genetischen Flaschenhals“, wenn die Population aus äußeren Gründen zeitweise sehr klein ist. Die Menschheit ist vermutlich vor etwa 70 000 Jahren durch einen solchen Flaschenhals gegangen, als der Ausbruch des Toba-Supervulkans auf Sumatra das Klima zeitweise so abkühlte, dass nur noch 1000 oder wenige 1000 Menschen lebten. Und nur die Hälfte waren Männer!

Auch wenn ein Allel (oder eine zusammen weitergegebene Gruppe von Genen) sich durchgesetzt hat, dann bleibt es nicht unverändert, es erfährt weiter Veränderungen. Auch das eine, am Ende verbliebene Y-Chromosom erfuhr im Lauf der Zeit Mutationen.

Erinnern Sie sich jetzt bitte an die „Molekulare Uhr“. Wenn man die Unterschiede in den Y-Chromosomen heutiger Männer untersucht, dann kann abschätzen wann sie sich getrennt haben, und ob sie insgesamt auf **einen** Mann hinweisen. Das tun sie: **der Adam des Y-Chromosoms hat vor rund 60 000 Jahren** gelebt. Ein einziger Mann ist der Urahn von allen heutigen Männern. Natürlich haben zu seiner Zeit noch andere Männer gelebt, und wir haben mit hoher Wahrscheinlichkeit anderes Erbgut von ihnen bekommen, aber eben nicht das Y-Chromosom.

Nebenbemerkung: In Asien findet sich bei 8% der Männer ein Typ des Y-Chromosoms, dessen weite Verbreitung mit hoher Wahrscheinlichkeit auf Dschingis Khan zurückgeht. Der Mann war fleißig – er soll ein paar hundert Kinder gezeugt haben.

Jetzt zu den Frauen! Da ist die Sache noch raffinierter!

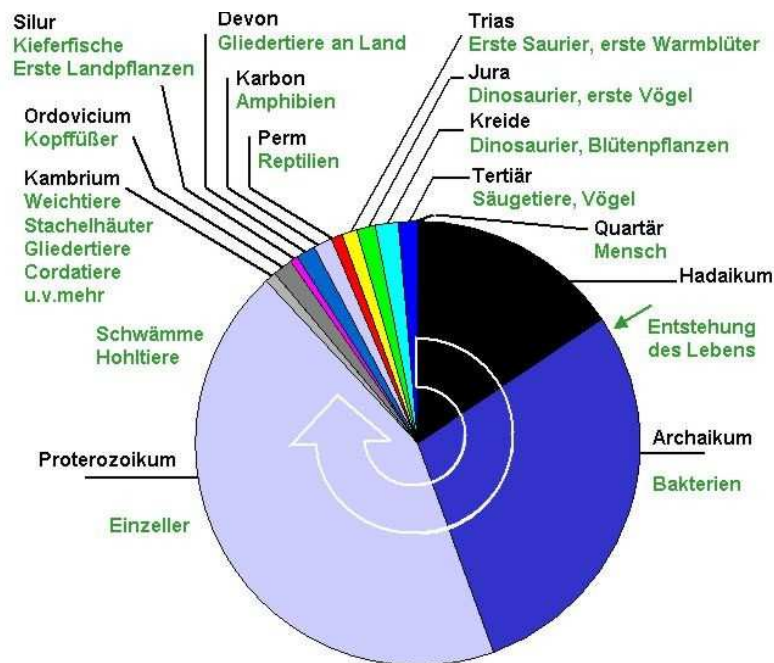
Ich habe bisher den Eindruck erweckt, Erbmateriale – DNA – gebe es nur in den Chromosomen im Zellkern. Stimmt nicht! Die **Mitochondrien**, die

kleinen Kraftwerke, sind ja aus eingewanderten Bakterien entstanden, und diese Einwanderer haben ihre eigene DNA mitgebracht und behalten. In der Zelle vermehren sie sich eigenständig, und ihre DNA wird bei der Fortpflanzung separat übertragen, indem die Eizelle Mitochondrien mitnimmt. Nur die große Eizelle kann das! Die Spermienzellen sind zu klein, da passen keine brauchbaren Mitochondrien hinein. Also: Mitochondrien und ihre DNA können immer nur von einer Frau weitergegeben werden. Auch wir Männer haben unsere Mitochondrien von unserer Mutter bekommen – aber wir können sie selbst nicht weitergeben! **Mitochondrien-DNA** kann also auch niemals durchgemischt werden. (Bild 55)

Was jetzt kommt, kennen wir schon: Von den zu einem gewissen Zeitpunkt vorhandenen Allelen verschwinden im Laufe langer Gendrift alle bis auf eine, am schnellsten natürlich in kleinen Populationen (und vom *Homo sapiens* gab es ja eine Zeitlang höchstens ein paar tausend).

Wann hat Eva gelebt? Auch Mitochondrien-DNA erfährt im Verlauf der Zeit Mutationen, und aus diesen heutigen Unterschieden können wir ableiten wann und wo Eva gelebt hat. Die „Molekulare Uhr“ gibt die Antwort: **Die Mitochondriale Eva hat vor etwa 150 000 Jahren gelebt – irgendwo in Afrika! Wir sollten sie also besser mit dunkler Haut zeigen** (Bild 56)

Zusammenfassung



Dieses Tortendiagramm fasst zusammen was wir über die Entwicklung des Lebens erfahren haben. Die ganze Torte steht für die 4,5 Milliarden Jahre seit Entstehung der Erde. Der schwarze Bereich: noch gar kein Leben! Der sattblaue Bereich: Nur Bakterien! Im Hell-Violetten: Zuerst nur Einzeller. Erst zum Ende der Periode: Schwämme. Aber dann wird es bunt! In erdgeschichtlich kurzen Zeiten übernehmen immer neue Tiergruppen die Vorherrschaft. Ganz am Ende der Mensch - in allerfeinster Strichstärke!

Darwin hat sein Bild der Evolution im berühmten Schluss seiner „Entstehung der Arten“ zusammengefasst, ich übersetze den englischen Text:

*So folgt aus dem Krieg der Natur, aus Hunger und Tod, direkt der erhabenste Gegenstand den wir uns vorstellen können: die Entstehung der höheren Tiere.
Es liegt Größe in diesem Blick auf das Lebens, mit all seinen Kräften, das anfänglich nur wenigen oder gar nur einer Form eingehaucht wurde; und darin dass, während dieser Planet immer weiter kreiste entsprechend dem festen Gesetz der Schwerkraft, aus so einfachem Anfang unzählige Formen, überaus schön und wundervoll, entwickelt wurden und weiterhin entwickelt werden.*

„... und weiterhin entwickelt werden.“ Die Evolution ist nicht am Ende!

Ausblick

Es drängt sich die Frage auf:
Wie geht es weiter? Was wird aus *Homo sapiens*?

Nur wenige Worte dazu!

Zunächst: Was wird aus uns heute Lebenden? Werden wir ein genetisches Erbe hinterlassen?

Die Chancen sind nicht schlecht: Wenn die alten Spielregeln gälten, würden 80% von uns Ahnen der ganzen Menschheit in 8 000 Jahren sein. Ob der Prozess in Zukunft langsamer geht (7 Milliarden Menschen, Tendenz zunehmend) oder schneller (weil die weltweite Durchmischung des Genpools im "Globalen Dorf" so viel schneller geht), kann man kaum sagen. Auf ein paar Jährchen soll es auch nicht ankommen ...

Übrigens: Wer keine eigenen Kinder hat, kann seinen Genen doch etwas Gutes tun, nämlich wenn er/sie Neffen und Nichten fördert. Mit denen ist ein Mensch genetisch genau so verwandt wie Großeltern mit ihren Enkeln: 25% genetische Übereinstimmung.

Die Art *Homo sapiens*?

Als typische Lebensdauer einer Säugetierart gelten 2 Millionen Jahre. Beim Menschen und seinen Vorfahren sah es eher nach einer halben Million aus. Großes ABER: Der Mensch ist in der Lage in sein Erbgut gezielt einzugreifen, und wird es eines Tages sicherlich tun. Er ist andererseits auch in der Lage (und das heute schon) sich selbst als ganze Art auszurotten. Das freilich wäre nur konsequent angesichts des großen Artensterbens das er ohnehin anrichtet.

Um den Kreis zu schließen: Unsere Kosmologische Zukunft?

Die Sonne hat genug Material für noch 5 Milliarden Jahre. Sie wird zunehmend heißer strahlen, das Leben muss sich vielleicht in das Meer zurückziehen. Wenn die Brennstoffvorräte der Sonne zur Neige gehen, wird sie sich zu einem Roten Riesen aufblähen, der die inneren Planeten verschlingt. Die Erde wird wohl ziemlich am Rand liegen.

Wenn es dann noch Nachkommen von uns gibt, dann sind sie sicher längst in ein anderes Sternsystem umgezogen. Von ihrem neuen Heimatplaneten aus könnte sich ihnen ein wunderbarer Anblick bieten: Die Sonne hat einen Teil ihrer Hülle abgestoßen, die sich als „Planetarischer Nebel“ ausbreitet und langsam verblasst. Die Sonne selbst schrumpft zum „Weißen Zwerg“ um schließlich ganz zu erlöschen.

Anmerkung

Der Großteil der im Vortrag gezeigten Bilder und eine sehr viel detailliertere Darstellung vieler Punkte finden sich auf meiner Homepage im Abschnitt "Mensch und Realität – Ergänzungen" in den Kapiteln

Kosmologie <http://www.hg-klug.de/mrganz/kosmo/kosmo.html>

Evolution <http://www.hg-klug.de/mrganz/evolu/evolu.html>

An diesen Stellen finden sich auch umfangreiche Literaturlisten.

..... sowie im Internetportal "Mensch und Realität" in den Kapiteln

1.3 Der Stammbaum des Menschen <http://www.airflag.com/Hirn/w1/w1entst.html#3Stam>

7.2 Bio- und Gentechnologie <http://www.airflag.com/Hirn/w7/w7techno.html#biogen>

Literaturhinweise finden sich hier: <http://www.airflag.com/Hirn/hjw-li/hjw-li.html>

<http://www.airflag.com/Hirn/hgk-li/hgk-li.html>