

Heinz-Ulrich Reyer

Alles nur Zufall? Darwins Evolutionstheorie in ihrer heutigen Gestalt

Faszinierende Vielfalt des Lebens

«Biodiversität» – wohl jeder kennt diesen Begriff, mit dem heute die Vielfalt des Lebens auf unserer Erde zusammengefasst und zu ihrer Erhaltung aufgerufen wird. Das Wort gibt es zwar erst seit gut 20 Jahren, aber interessiert hat die Vielfalt an Tieren, Pflanzen, Pilzen und Mikroorganismen die Menschen schon immer. Und so hat es über die Jahrhunderte auch zahlreiche Versuche gegeben, diese Vielfalt zu ordnen und ihre Herkunft zu erklären. Bis in die Mitte des 18. Jahrhunderts herrschte nicht nur in religiösen Kreisen, sondern auch in der Wissenschaft die Idee einer «Konstanz der Arten» vor. Danach sind alle Arten vom Zeitpunkt ihrer Schöpfung oder natürlichen Entstehung bis heute unverändert geblieben (Abb. 1a). Nach und nach setzte sich jedoch in der Wissenschaft die Vorstellung durch, Arten hätten sich im Laufe der Erdgeschichte verändert, allerdings nur innerhalb ihrer Linien (Abb. 1b). Danach waren zwar Insekten schon immer Insekten, Fische schon immer Fische, Vögel schon immer Vögel, aber die heutigen Insekten, Fische und Vögel unterschieden sich von früheren. Und man nahm auch an, dass ihre Entwicklungslinien in verschiedenen Erdepochen begonnen hatten. Ursache für dieses Umdenken waren vor allem Fossilfunde, auf die ich gleich eingehe.

Die Evolutionstheorie, die Charles Darwin 1859 in seinem Buch *Über die Entstehung der Arten im Thier- und Pflanzen-Reich durch natürliche Züchtung* (so der Titel der deutschen Erstausgabe von 1860) veröffentlichte, unterschied sich in zwei wesentlichen Punkten von diesen früheren Vor-

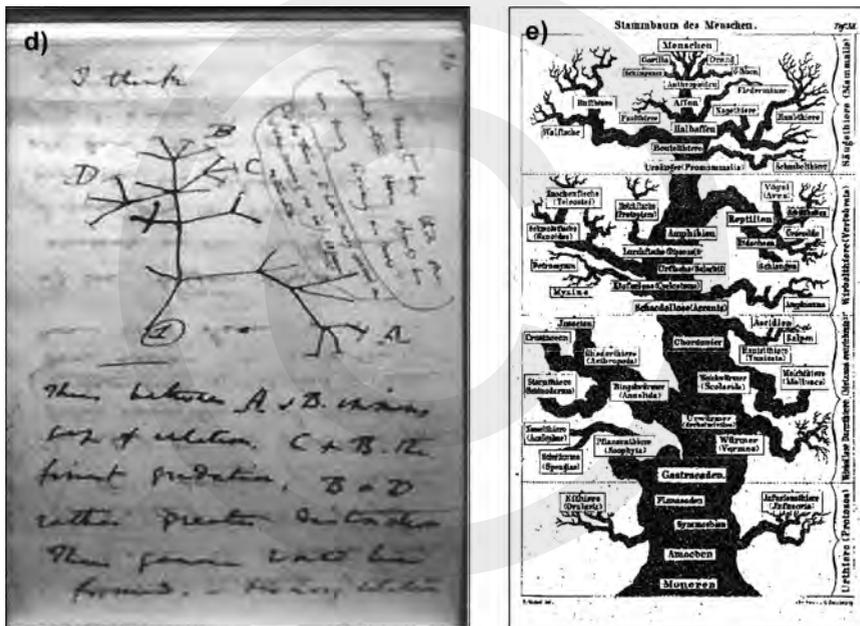
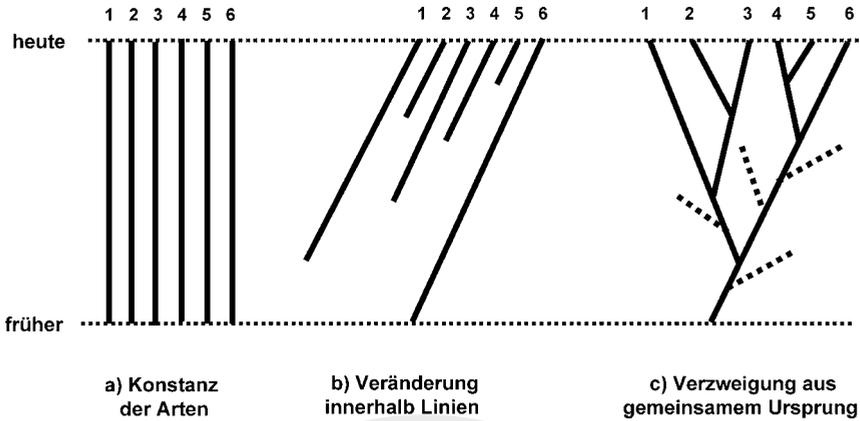


Abb. 1: Verschiedene Vorstellungen zur Entwicklung der biologischen Diversität. (a) Schöpfungsgeschichten und frühe wissenschaftliche Hypothesen gehen davon aus, dass alles Leben zum gleichen Zeitpunkt begonnen hat (früher) und alle Organismen (1–6) von ihren Anfängen bis heute unverändert geblieben sind. (b) Ab Mitte des 18. Jahrhunderts setzte sich – vor allem aufgrund von Fossilienfunden – in der Wissenschaft die Idee durch, dass verschiedene Organismen zu unterschiedlichen Zeitpunkten erstmals aufgetreten sind und sich im Laufe der Zeit verändert haben, aber nur innerhalb ihrer eigenen Linien. (c) Nach Darwins Evolutionstheorie entstand Vielfalt durch zunehmende Aufspaltung aus einer gemeinsamen Wurzel; gestrichelte Linien kennzeichnen ausgestorbene Linien. (d) Zeichnung in Darwins Notizbuch, mit der er 1837 seine Idee erstmals skizzierte. (e) Ernst Haeckels Darstellung der evolutionären Entwicklung als «Baum des Lebens» (1874).

stellungen (Abb. 1c). Erstens ist Entwicklung nicht durch parallele Linien gekennzeichnet, sondern durch zunehmende Verzweigung; zweitens gibt es nicht viele Ursprünge, sondern eine einzige Wurzel, aus der alle Linien hervorgegangen sind. Diese Vorstellung von Stammesentwicklung hatte er erstmals 1837 zu Papier gebracht (Abb. 1d). Die populär gewordene – weil sehr anschauliche – Darstellung in Form eines richtigen Baumes stammt von dem deutschen Biologen Ernst Haeckel (1834–1919) (Abb. 1e). Neuere wissenschaftliche Darstellungen sehen in der Regel weniger fantasievoll aus und haben auch nicht immer die Baumstruktur. Die Kernaussage aller Darstellungen ist aber immer dieselbe: die Vielfalt, die wir beobachten, entstand durch zunehmende Aufspaltung aus einem gemeinsamen Ursprung.

Im ersten Teil dieses Beitrages werde ich Belege für diese zunehmende Aufspaltung aus einer gemeinsamen Wurzel präsentieren, im zweiten beschreibe ich die Mechanismen, die zur Aufspaltung führen. In beiden Teilen werde ich sowohl Fakten und Ideen schildern, die schon zu Darwins Zeit vorhanden waren, als auch Erkenntnisse, welche die Forschung seitdem gewonnen hat. Ich werde dabei in der Regel auf Details und spezifische Literaturangaben verzichten. Stattdessen verweise ich gelegentlich auf geeignete Übersichten und auf andere Kapitel dieses Buches, in denen die betreffenden Punkte ausführlicher behandelt werden. Ziel dieses Kapitels ist, einige Grundkenntnisse zu vermitteln (oder aufzufrischen), damit es Ihnen leichter fällt, die Spezialthemen der folgenden Kapitel in das Gesamtkonzept ›Evolution‹ einzuordnen.

Belege für zunehmende Aufspaltung aus gemeinsamem Ursprung

Geografische Verteilung

Wie kam Darwin auf die Idee einer zunehmenden Aufspaltung aus einer gemeinsamen Wurzel? Ein wichtiger Datensatz war die geografische Verteilung von Pflanzen und Tieren. Solche Daten waren schon vor Darwin auf diversen Forschungsreisen gesammelt worden, z.B. auf der Endeavour-Expedition von James Cook (1768–1771) und auf den Südamerika-Expeditionen von Alexander von Humboldt (1799–1804). Aber viele Daten hat Darwin selbst von seiner Weltumseglung mit der HMS *Beagle* mitgebracht (1831–1836). In all diesen Daten fiel vor allem die ungewöhnliche Fauna und

Flora von ozeanischen Inseln auf. Verglichen mit ähnlichen Gebieten auf Kontinenten haben diese Inseln einige Besonderheiten: (1) Es gibt dort relativ wenige Arten, auf Galapagos z. B. nur etwa 20 Arten von Landvögeln. (2) Unter den vorkommenden Arten sind manche Gruppen besonders stark vertreten und sehr variabel; 14 der gut 20 Galapagos-Vogelarten sind Finken mit einer Variabilität in Schnabelform und Nahrungsspektrum, wie man sie sonst nirgendwo unter Finken findet. (3) Viele Arten sind endemisch, d. h., sie kommen nur auf diesen Inseln vor und sonst nirgendwo in der Welt. Das gilt für die Galapagosfinken, es gilt aber auch für zahlreiche Tier- und Pflanzenarten auf anderen Inseln, z. B. Hawaii, Mauritius, Tahiti und den Kanarischen Inseln. (4) Manche Gruppen fehlen auf ozeanischen Inseln völlig, etwa die Amphibien und Säugetiere.

Alles nur Zufall? – Nein! Man kann nämlich alle vier Besonderheiten auf die gleiche Erklärung zurückführen (vgl. Grant 1998). Die meisten ozeanischen Inseln sind durch Vulkantätigkeit aus dem Meer emporgestiegen. Sie hatten also zunächst kein Leben, sondern mussten aus anderen Gebieten besiedelt werden. Das ist aber gar nicht so einfach, vor allem dann nicht, wenn sie weit entfernt von Festland liegen. Dass ein Säugetier von der Küste Südamerikas ca. 1'000 km übers offene Meer schwimmt und dann zufällig auf einer Galapagosinsel landet, ist extrem unwahrscheinlich. Das erklärt das Fehlen von Säugetieren. Und selbst Vögel, die solche Distanz fliegend überwinden können, werden in der Weite des Ozeans nur selten die neuen Lebensräume entdeckt haben, weshalb ihre Arten nur in geringer Zahl vorkommen. Die Fauna und Flora dieser Inseln dürfte also auf wenige ursprüngliche Besiedler zurückgehen. Die wenigen Individuen, welche die Inseln erreichten, fanden dort kaum Konkurrenz und konnten sich in viele ökologische Nischen ausbreiten, z. B. unterschiedliche Nahrungstypen fressen. Im Laufe der Zeit haben sie sich an diese Nischen angepasst und eigene Arten entwickelt. Daher resultiert die starke Variabilität innerhalb einer Gruppe (wie z. B. der Finken) und die Beschränkung dieser Arten auf ein eng begrenztes Gebiet (‘Endemismus’). Neuere Forschungen zu den Besonderheiten solcher isolierten und zum Teil kleinen Populationen beschreiben Lukas Keller und Erik Postma (siehe S. 65).

Fossilien

Ein anderer ausführlicher Datensatz, der zu Darwins Zeit schon vorhanden war und von ihm selbst beträchtlich erweitert wurde, sind Fossilien. Das

sind Überreste von Organismen – versteinert, eingeschlossen in Bernstein oder in anderer Weise erhalten. Solche Fossilfunde zeigen dreierlei:

- 1) Die verschiedenen Pflanzen- und Tiergruppen treten erstmals in unterschiedlichen Schichten der Erdoberfläche auf. Innerhalb der Wirbeltiere z. B. findet man fossile Fische in tieferen Schichten als Amphibien, diese in tieferen als Reptilien und diese wiederum tiefer als Vögel und Säuger.
- 2) Nach dem ersten Auftauchen einer Gruppe in einer bestimmten Schicht gibt es in höheren Schichten oft weitere Fossilien, die den vorhergehenden ähneln, sich aber doch in einigen Merkmalen unterscheiden. In manchen Fällen haben wir inzwischen so viele Funde, dass wir den Übergang von den frühesten zu den heutigen Formen fast lückenlos durch Fossilien belegen können. Die Entwicklungsgeschichte der Pferde ist ein solches Beispiel (siehe S. 54).
- 3) Manche Fossilien, sogenannte Brückenfossilien, vereinigen Merkmale von verschiedenen, heute klar getrennten Gruppen. Ein berühmtes Brückenfossil, das allerdings erst zwei Jahre nach Darwins Veröffentlichung gefunden wurde, ist das Skelett des ausgestorbenen Urvogels *Archaeopteryx*. Zähne und eine lange Schwanzwirbelsäule sind typisch für Reptilien; Federkleid und Bau des Fusses lassen ihn den Vögeln ähneln.

Alles nur Zufall? – Nein! Erd- und Gesteinsschichten entstehen durch Ablagerungen: in Meeren, Flüssen und Seen sinken Sand und andere Bestandteile nach und nach zu Boden; auf den Landmassen werden Erde, Pflanzenteile und andere Dinge angeweht und lagern sich auf bereits vorhandenes Substrat. Daraus folgt, dass oben die jüngsten und unten die ältesten Schichten liegen. Wenn ich dann in tiefen Schichten zwar Fische, aber keine Amphibien finde, in etwas höheren zwar Amphibien, aber keine Reptilien, in noch höheren zwar Reptilien, aber Vögel und Säuger erst in noch höheren, dann ist die logische Folgerung, dass diese Gruppen im Laufe der Evolution nacheinander aufgetreten sein müssen. Und während die Brückenfossilien belegen, dass verschiedene Gruppen sich aus gemeinsamen Vorfahren entwickelt haben, zeigen uns die Übergangsformen, welche Veränderungen im Laufe der Zeit aufgetreten sind.

Welche Fortschritte haben wir auf diesem Gebiet seit Darwin gemacht? Einer ergibt sich allein aus der verstrichenen Zeit: man hat in den vergangenen 150 Jahren zahlreiche weitere Fossilien gefunden. Zu Darwins Zeit fehlten Fossilien, die den Übergang von wasserlebenden Fischen zu landlebenden Amphibien belegten. Heute haben wir nicht nur mehrere dieser

Fossilien, wir kennen auch lebende Tiere, die uns mögliche Vorstufen zeigen, z. B. den Quastenflosser. Auch für die gemeinsame Abstammung von Mensch und anderen Primaten gab es Mitte des 19. Jahrhunderts keine fossilen Belege. Darwin hat die Verwandtschaft allein aufgrund von anatomischen Merkmalen postuliert. Heute haben wir auch dafür Brückenfossilien und Übergangsreihen; und ihre Zahl nimmt ständig zu.

Wichtig waren auch Fortschritte im technologischen Bereich. Die Fähigkeit, Bohrkerne aus tieferen Erdschichten oder dem Meeresboden zu holen, dann zu schleifen und zu schauen, welche Organismen in welchen Schichten vorkommen, hat eine Fülle neuer Fossilien ans Licht gebracht. Einen weiteren wichtigen Durchbruch brachten Techniken, die es erlauben, das absolute Alter der Funde zu bestimmen, also zu sagen, dieses Fossil bzw. die Schicht, in der es liegt, ist ungefähr 15'000 Jahre alt oder 1 Million oder 300 Millionen Jahre. Für eine solche Altersbestimmung gibt es verschiedene Methoden. Viele beruhen auf dem Zerfall natürlicher radioaktiver Elemente. Sie erlauben uns heute, das Alter der Erde mit einer Genauigkeit von +/- 1 % auf 4,5 Milliarden Jahre zu schätzen und die ältesten Formen des Lebens auf 3,5 Milliarden Jahre zu datieren. Mehr über Fossilien finden Sie in Marcelo Sánchez-Villagras Beitrag (siehe S. 51).¹

Ähnlichkeiten in Bau und Entwicklung bei lebenden Organismen

Eine dritte Informationsquelle, die Darwin und seinen Zeitgenossen zur Verfügung stand, waren Merkmale von heute lebenden Formen, vor allem ihr Körperbau (Morphologie) und ihre Embryonalentwicklung.²

Morphologische Untersuchungen zeigen beispielsweise, dass der Grundbauplan innerhalb einer Gruppe unverändert ist, selbst wenn die Untereinheiten dieser Gruppe völlig verschieden aussehen und leben. So haben alle Säugetiere sieben Halswirbel – gleich ob sie einen langen Hals haben wie eine Giraffe oder einen kurzen wie ein Maulwurf. Und die Gliedmassen aller Wirbeltiere haben denselben Grundbauplan – gleich ob es sich um die Beine eines laufenden Hundes, die Flossen von schwimmenden Delphinen oder die Flügel von fliegenden Vögeln oder Fledermäusen handelt. Morphologische Untersuchungen enthüllten auch manche Strukturen, die offenbar keine Funktion haben. Manche Schlangen und Wale z. B. haben – äusserlich nicht sichtbare – Reste von Beinen und Beckengürtel, die sie überhaupt nicht brauchen, denn sie laufen ja nicht. Höhlenfische haben reduzierte Augen,

die ihnen aber nichts nützen, weil sie in der Dunkelheit der Höhle ohnehin nichts sehen.

Die Untersuchung der Embryonalentwicklung zeigte, dass Organismen, die als Erwachsene völlig unterschiedlich aussehen, oft sehr ähnliche Frühstadien haben. Der menschliche Embryo ist ein gutes Beispiel. Seine frühesten Stadien ähneln den Embryonen aller anderen Wirbeltiere. Später sieht er zumindest noch so aus wie die Embryonen von Vögeln und Säugetieren. Und erst in einem noch späteren Stadium zeigt er spezifisch menschliche Eigenschaften. Dazu kommen übereinstimmende Details in frühen Stadien, z. B. Kiemenspalten, wie Fische sie haben.

Alles nur Zufall? – Nein! Alle diese Eigenschaften werden nämlich verständlich – und *nur* dann verständlich –, wenn man Evolution annimmt. Die verschiedenen Gliedmassen der Wirbeltiere sind das Erbe von einem gemeinsamen Vorfahren, dessen Extremität in Anpassung an die spezifische Fortbewegungsweise in Wasser, zu Land und in der Luft abgewandelt wurde. Die heute sinnlosen Reste von Bein- und Beckenknochen bei Schlangen und Walen oder die vorhandenen, aber nicht funktionstüchtigen Augen bei Höhlenfischen ergeben nur dann Sinn, wenn man sie als Erbe von Vorfahren ansieht, die laufen oder sehen konnten.

Neuere Befunde

Was hat in diesem Bereich die Forschung nach Darwin geleistet? Sie hat vor allem den Merkmalsvergleich in Bereiche ausgedehnt, die Darwin aus methodischen Gründen noch nicht zugänglich waren. Einer dieser Bereiche ist die Zellbiologie. Die ständige Verbesserung von Mikroskopen, bis hin zur Entwicklung von Elektronenmikroskopen (um 1930), erlaubte, immer kleinere Bestandteile der Lebewesen zu untersuchen. Dabei stellte sich heraus, dass die Zellen, aus denen Organismen aufgebaut sind, im Wesentlichen immer die gleiche Grundstruktur haben. Ein anderer moderner Forschungsbereich, die Biochemie, hat gezeigt, dass die chemischen Prozesse, mit denen Nahrung verdaut, Energie produziert und neue Substanzen hergestellt werden, von einfachsten Formen bis zum Menschen weitgehend gleich sind. Einen detaillierteren Einblick in die Arbeit der Biochemiker bietet Andreas Plückhuhn (siehe S. 89). Beides, die Struktur der Zelle und die biochemischen Prozesse, liefern also deutliche Hinweise, dass alles Leben aus der gleichen Wurzel stammt. Die betreffenden «Erfindungen» sind offenbar sehr früh in der

Hälfte des 19. Jahrhunderts und erlebte einen entscheidenden Durchbruch mit der Entschlüsselung des genetischen Codes in der Mitte des 20. Jahrhunderts. Wir wissen heute – vielleicht für Sie nur Wiederholung – dass die Erbsubstanz, die DNA, in Form einer Doppelhelix vorliegt (Abb. 2). Das ist eine Art in sich gedrehte Strickleiter, deren Seitenstränge mit nur vier chemischen Elementen verknüpft sind: den Basen Adenin (A) und Thymin (T) sowie Guanin (G) und Cytosin (C). Dabei erfolgt die Verknüpfung immer nur über die Paare A–T und G–C. Jeweils drei aufeinanderfolgende Basen (ein Triplet) enthalten die Information, welche Aminosäure gebildet wird. Diese Aminosäuren – es gibt insgesamt 20 – verbinden sich dann in mannigfaltigster Weise zu verschiedenen Proteinen (Eiweissen). Und Proteine sind die Grundbausteine des Lebens. Ohne sie geht nichts. In Form von Enzymen ermöglichen sie die Verdauung von Nahrung. In Form von Hormonen leiten sie Information durch den Körper. Als Hämoglobin binden und transportieren sie Sauerstoff. In Sinnesorganen garantieren sie die Wahrnehmung von Licht, Schall, Geruch und Geschmack. Und sie sind auch an der Struktur des Körpers beteiligt, z. B. Keratin in Haut, Haaren und Fingernägeln.

Der genetische Code und der Weg, auf dem die Information von der DNA zu den Proteinen weitergegeben wird, ist in der gesamten Natur praktisch identisch – bei Pflanze und Tier, bei Einzeller und Mensch. Die «Sprache», in der das Erbgut Anweisungen für Aufbau und Funktionieren von Lebewesen gibt, ist – mit wenigen kleinen Abweichungen – also immer dieselbe und muss daher ganz früh in der Evolution entstanden sein. Aber der Inhalt der Information hat sich laufend und in verschiedene Richtungen verändert.

Weil wir heute den genetischen Code entziffern können, können wir auch die Entwicklungsgeschichte der Lebewesen entschlüsseln. Dazu gebe ich Ihnen ein Beispiel zur Illustration. Abb. 3 zeigt die Basensequenzen aus einem Abschnitt des Genoms, das bei der Hautpigmentierung eine Rolle spielt. Veränderungen in diesem Abschnitt können zu Albinos führen. Die Sequenzen von Mensch und Schimpanse unterscheiden sich nur in einer Base in einem einzigen Triplet, die von Mensch und Maus jedoch an insgesamt elf Stellen in acht der 17 Triplets. Die genetische Analyse bestätigt also, was man vorher schon aus dem Vergleich von morphologischen und anderen Merkmalen wusste: der Mensch ist mit dem Schimpansen näher verwandt als mit Nagetieren. Diese Erkenntnis mag Sie nicht gerade vom Hocker reissen. Aber man kann diese Art der Analyse natürlich auch für feinere und weniger klare Verwandtschaften benutzen, z. B. nur innerhalb

Schimpanse

AAC CAG ACA GGA GCC CGG TGC CTG GAG GTG TCC ATC CCT GAC GGG CTC TTC

Mensch

AAC CAG ACA GGA GCC CGG TGC CTG GAG GTG TCC ATC TCT GAC GGG CTC TTC

Maus

AAC CAG TCA GAA CCT TGG TGC CTG TAT GTG TCC ATC CCA GAT GGC CTC TTC

Abb. 3: Teil eines Genoms, das die Hautpigmentierung beeinflusst. In dem gezeigten Abschnitt mit 51 Basen in 17 Tripletten unterscheiden sich Mensch und Schimpanse in nur einer Base (unterstrichen), Mensch und Maus jedoch in elf Basen in acht Tripletten (Pfeile).

der Primaten. Und dann zeigen DNA-Analysen, dass der Schimpanse mit dem Menschen näher verwandt ist als mit dem Gorilla und dem Orang-Utan. Das ist sicher schon weniger selbstverständlich und auch interessanter – nicht zuletzt in Hinblick auf die Evolution des Menschen, seiner Sprache und seiner Kultur, einschliesslich der Kunst. Diese Themen werden in den Beiträgen von Carel van Schaik und Judith Burkart (siehe S. 137) und Thomas Junker (siehe S. 155) behandelt.

Die Anwendung verschiedener Vergleiche (Fossilien, Morphologie, Embryonalentwicklung, Genetik und so weiter) ist aber selbst in Fällen wertvoll und notwendig, wo Abstammung und Verwandtschaft eindeutig zu sein scheinen. Je mehr Merkmalsvergleiche zum selben Ergebnis kommen, desto sicherer können wir sein, dass unsere Schlussfolgerungen über Verwandtschaft und gemeinsame Herkunft der tatsächlichen Evolution entsprechen. Manchmal macht man dabei erstaunliche Entdeckungen. So gibt es beispielsweise Fossilien und Rudimente auch auf der genetischen Ebene. In praktisch allen bisher untersuchten Arten hat man DNA-Abschnitte gefunden, die bei ursprünglicheren Formen wichtige genetische Information enthielten, später aber zerfielen, weil sie nicht mehr nötig waren. Zum Beispiel tragen wir Menschen noch alle Gene, die nötig sind, um Vitamin C aus einfacheren chemischen Bausteinen herzustellen, aber das Gen für die letzte Stufe ist nicht mehr aktiv. Deshalb müssen wir Vitamin C mit der Nahrung zu uns nehmen. Die Deaktivierung dieses Gens ist vermutlich damit zu erklären, dass unsere Primatenvorfahren genügend Vitamin C mit Früchten aufnahmen. Daher konnten sich genetische Veränderungen ansammeln, ohne dass sie zu Vitaminmangel führten. Die Existenz solcher funktionslosen geni-

schen Reste ist genauso nur durch ein evolutionäres Erbe zu verstehen, wie die Existenz von funktionslosen Augen bei Höhlenfischen oder Beinresten bei Schlangen und Walen.

Allerdings ist es keineswegs immer so, dass Schlussfolgerungen aus verschiedenen Merkmalen zum gleichen Schluss führen. So stellen etwa manche genetische Vergleiche die Wale in die verwandtschaftliche Nähe der Flusspferde, bestimmte Knochenmerkmale unterscheiden sie aber deutlich von Flusspferden (und allen anderen Paarhufern). Stammesgeschichtliche Zusammenhänge werden aber heute nicht auf der Basis von einem einzigen Merkmal analysiert, sondern mit einer Kombination von mehreren Merkmalen. Deshalb kann man bei solchen widersprüchlichen Informationen aus verschiedenen möglichen Stammbäumen meistens dennoch den wahrscheinlichsten ermitteln. Weil durch die Forschung laufend neue Informationen dazukommen, müssen Stammbäume aber ab und zu umgeschrieben werden. Dabei kann es durchaus vorkommen, dass eine ganze Gruppe von Arten einer völlig anderen Domäne zugeordnet werden muss. So sind beispielsweise die Archaea heute keine Bakterien mehr, sondern neben den Bakterien und Eukaryoten eine eigene Domäne von Organismen. Die Tatsache, dass man Zuordnungen ab und zu ändern muss, stellt die Evolutionstheorie jedoch nicht grundsätzlich infrage; sie bedeutet lediglich, dass unser Wissen und unsere Hypothesen über den tatsächlichen Ablauf der Entwicklung zunehmend verbessert werden.

Darwins Theorie: Abstammung mit Veränderungen

Soweit zu alten und neuen Belegen zur Erklärung der Vielfalt des Lebens. Aber wie kam es zu dieser Vielfalt? Über die allerersten Anfänge tapen wir im Dunkeln. Zwar haben Chemiker einige Grundbausteine des Lebens wie Zucker, Fette, Aminosäuren und Bestandteile der DNA im Labor aus einfacheren Molekülen herstellen können – Molekülen, wie sie vermutlich in der Frühzeit der Erde in den Ozeanen vorkamen. Es ist aber bisher nicht gelungen, auf diese Weise Organismen zu schaffen, die Stoffwechsel betreiben, sich selbst vervielfältigen und die DNA mit dem genetischen Code enthalten, den wir heute kennen. Über einige dieser Grundbedingungen für den Ursprung des Lebens berichtet Homayoun C. Bagheri in (siehe S. 37).

Wie aber aus den ersten Lebensformen – ganz gleich wie sie ausgesehen haben mögen – die spätere Vielfalt entstanden ist, darauf lieferte Darwin

eine überzeugende Antwort. Seine Evolutionstheorie besteht aus mehreren, logisch verknüpften Argumentationsschritten:

- 1) Individuen derselben Art, die in einer Population leben, unterscheiden sich in zahlreichen Merkmalen, z.B. in Körpergrösse, Gesundheit, aber auch in ihren Verhaltensweisen (Prinzip der *Variation*).
- 2) Ein Teil der Unterschiede zwischen Individuen ist erblich, wird also von Eltern an ihre Nachkommen weitergegeben (*Erblichkeit*).
- 3) Es werden mehr Nachkommen produziert, als die begrenzten Ressourcen (z.B. die Nahrung) in einem Gebiet tragen können. Dadurch entsteht *Konkurrenz*.
- 4) Die Varianten, die für die Konkurrenz um Ressourcen am geeignetsten sind («the fittest»), werden besser überleben und mehr Nachkommen hinterlassen als solche, die weniger geeignet sind (*natürliche Selektion*). Dadurch trägt auch die Gesamtheit der Nachkommen etwas häufiger die geeigneten Merkmale als die Elterngeneration.
- 5) Auf längere Sicht werden sich daher die erfolgreichen Linien und ihre Merkmale durchsetzen. Im Verlaufe der Evolution erfolgt dadurch eine Anpassung an die spezifischen Umweltbedingungen (*Adaptation*).
- 6) Wenn Umwelten an verschiedenen Orten sich unterscheiden, wird die Ausgangsform sich in verschiedene Richtungen entwickeln. Es kann dabei zu einer endgültigen Aufspaltung kommen – *neue Arten* sind entstanden.

Auch hier wollen wir uns fragen: Welche Belege hatte Darwin für diesen Erklärungsmechanismus, welche haben wir heute? Die Existenz von Variation und Erblichkeit war belegt – nicht zuletzt durch die Pflanzen- und Tierzüchtung. Darwin selbst hat Tauben gezüchtet. Er wusste daher, dass Eigenschaften der Eltern sich auch in den Nachkommen finden, dass die Nachkommen sich aber dennoch von ihren Eltern und untereinander unterscheiden. Es war auch belegt, dass man durch fortgesetzte gezielte Züchtung von bestimmten Formen über längere Zeiträume die Merkmale verändern konnte. Neue Tauben- und Hunderassen sind dafür ein Beleg, ebenso die Züchtung von ergiebigeren Getreidesorten, Kühen mit mehr Milchleistung oder schnelleren Rennpferden. Selektion kann also Organismen drastisch verändern. Darwin nannte das künstliche Selektion, im Gegensatz zur natürlichen Selektion, die er für natürliche Populationen postulierte. Und schliesslich war auch bekannt und gut belegt, dass in der Natur und in menschlichen Gesellschaften eine Überproduktion von Nachkommen

herrscht. Die führt zur Konkurrenz um Nahrung, Platz und andere Ressourcen. In dieser Konkurrenz schneiden Individuen verschieden gut ab.

Aber in drei wichtigen Bereichen der Evolutionstheorie fehlten zu Darwins Zeiten die Belege: 1) Man kannte nicht die Ursachen der Variation und den Mechanismus der Vererbung. 2) Im Gegensatz zu den beobachtbaren Veränderungen durch künstliche Selektion gab es keine direkte Beobachtung von Veränderung und Anpassung durch natürliche Selektion. 3) Es gab keinen Beweis, dass Veränderungen innerhalb einer Art zur Aufspaltung in verschiedene Arten führen konnten. Auf diese drei Punkte möchte ich mich konzentrieren, denn hier hat die moderne Forschung enorme Fortschritte gemacht und faszinierende Erkenntnisse geliefert.

Ursachen von Variation und Mechanismus der Vererbung

Zunächst zu den Ursachen der Variation und dem Mechanismus der Vererbung. Wie wir gesehen haben, ist die Erbinformation eines jeden Individuums als genetischer Code in der DNA enthalten. Die wiederum ist in Chromosomen lokalisiert, die sich in den Zellkernen befinden. Bei der Fortpflanzung wird die vorhandene Erbinformation zunächst verdoppelt (Abb. 2). Das geschieht dadurch, dass die DNA-Doppelhelix sich aufspaltet und jeder Einzelstrang durch einen komplementären wieder zum Doppelstrang ergänzt wird. Dabei kann es – wie beim Abschreiben eines Textes – zu Fehlern kommen, so etwa zum Einschieben von ein oder mehr zusätzlichen Buchstaben oder zum Wegfall von Buchstaben. Diese Kopierfehler – Genetiker sprechen von Mutationen – verändern die Erbinformation. In jeder Generation entstehen in jedem Genom etwa 100 solcher Mutationen. Viele von ihnen sind harmlos, einige sind schädlich, wenige sind vorteilhaft. Der nächste Schritt hängt davon ab, um welche Organismen es sich handelt, aber bei denen, die sich geschlechtlich fortpflanzen – und das ist die grosse Mehrheit aller Organismen –, besteht er in einer völligen Neukombination der ursprünglichen Erbanlagen (Abb. 4). Das Ergebnis ist, dass die Zusammensetzung der Erbanlagen sich von Generation zu Generation ändert und auch zwischen Individuen derselben Generation unterscheidet. Zusammen mit den neu hinzugekommenen Mutationen schafft das eine grosse Variation. Die Entstehung dieser Variation ist zufällig. Zwar können äussere Einflüsse die Wahrscheinlichkeit verändern, mit der Mutationen auftreten, und Fehler bei der Neukombination des Erbgutes entstehen. Dazu gehören UV- und

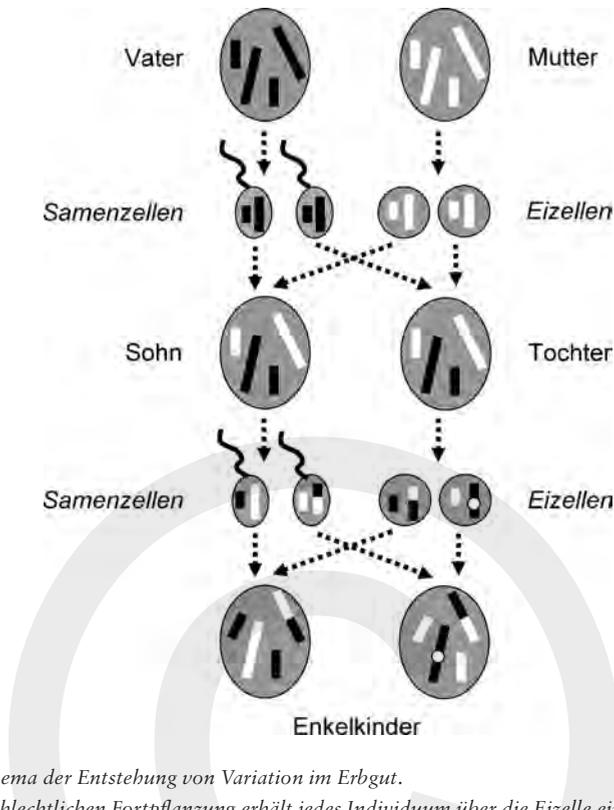


Abb. 4: Schema der Entstehung von Variation im Erbgut.

Bei der geschlechtlichen Fortpflanzung erhält jedes Individuum über die Eizelle einen Satz des mütterlichen Erbgutes (weiss) und über die Samenzelle einen Satz des väterlichen Erbgutes (schwarz). Im Vorgang der Meiose (= Reifeteilung) werden die Erbanlagen der Eltern durchmischt, sodass die Eizellen einer Tochter und die Samenzellen eines Sohnes eine andere Kombination von Erbanlagen tragen als die ihrer Eltern. Je nachdem, welche Ei- und Samenzellen bei der nächsten Fortpflanzung verschmelzen (normalerweise natürlich nicht – wie hier dargestellt – die von Geschwistern), kommt es zu weiteren Neukombinationen. Auf diese Weise verändert sich die Zusammensetzung des Erbgutes nicht nur von Generation zu Generation. Sie unterscheidet sich auch zwischen Geschwistern derselben Generation, in diesem Fall den Enkelkindern. Zusätzliche Veränderung entsteht durch Mutationen (weisser Punkt auf schwarzem Chromosom), also Fehlern, die beim Kopieren der DNA entstehen (vgl. Abb. 2). Die schematische Darstellung gilt für diploide Organismen mit einem doppelten Chromosomensatz ($2n$), die sich über haploide Ei- bzw. Samenzellen mit einem einfachen Satz ($1n$) fortpflanzen. Das Grundprinzip der Variation durch Neukombination und Mutation gilt aber auch für Organismen mit anderen Chromosomensätzen (z. B. $4n$).

radioaktive Strahlung, Chemikalien, Alter der Eltern und weitere Faktoren. Aber welche Mutationen auftreten und in welche Richtung die Veränderung erfolgt, das lässt sich nicht vorhersagen. Hier kommt der Zufall ins Spiel.

Natürliche Selektion und Adaptation

Damit können wir die zweite von Darwin nicht gelöste Frage angehen: Kann unterschiedlicher Erfolg der verschiedenen, zufällig entstandenen genetischen Varianten zu Veränderungen und immer besserer Anpassung an die spezifischen Umweltbedingungen führen, vor allem zu komplexen Anpassungen?

Dass Darwin dafür keine Beispiele hatte, ist nicht erstaunlich. Bis eine vorteilhafte Mutation sich in der ganzen Population ausgebreitet hat, dürfen in der Regel Hunderte, wenn nicht Tausende von Generationen vergehen. Und für komplexe Strukturen, wie ein Auge, das scharf und farbig sieht, sind oft zahlreiche genetische Veränderungen nötig. Wenn wir in der Regel den Ablauf der Anpassung nicht entdecken, so liegt das vor allem an der Langsamkeit des Prozesses. Das heisst aber nicht, dass Anpassungen nicht stattfinden. Es dürfte Ihnen auch unwahrscheinlich erscheinen, dass Sie mit einem Startguthaben von zehn Franken bei einem Zinssatz von 1 % rund 1 Million Franken erwirtschaften können. Aber das geht. Nur müssten Sie 1'157 Jahre warten. Das mag Ihnen etwas lang erscheinen, aber in der Evolution ist das eine kurze Zeitspanne. Evolution läuft in Tausenden, Hunderttausenden, Millionen Jahren ab. Und in solchen Zeiträumen können selbst geringfügige Unterschiede enorme Veränderungen bewirken.

Es gibt aber sogar Fälle, in denen wir evolutionäre Veränderungen im Zeitraum eines Menschenlebens beobachten können. Ein typisches Beispiel sind Krankheitserreger, z.B. Malariaerreger oder Bakterien, die Lungenentzündung hervorrufen. Solche Mikroorganismen kommen in ungeheuren Zahlen vor und manche von ihnen vermehren sich im Schnitt alle 30 Minuten. Wir Menschen tun das im Schnitt alle 30 Jahre. Das heisst, wenn wir in unseren Kindern eine neue Generation hinterlassen haben, hat ein Bakterium mehr als eine halbe Million Generationen hinterlassen. Bei einer so riesigen Zahl und kurzen Generationenfolge können selbst ursprünglich seltene Mutanten sich in kürzester Zeit ausbreiten. Das Ergebnis dieser rasanten Evolution sehen wir in immer wieder neuen Stämmen, die gegen Antibiotika und andere Medikamente resistent sind. Mehr zu diesem Thema berichtet Sebastian Bonhoeffer (siehe S. 75).

Ein anderes – sehr berühmtes – Beispiel dafür, dass Selektion und Anpassung in relativ kurzer Zeit erfolgen können, stammt aus Untersuchungen an Darwinfinken, die Peter und Rosemary Grant über mehr als 30 Jahre lang

auf Daphne Major, einer kleinen Insel im Galapagosarchipel, durchgeführt haben (Weiner 1994). In diesem Gebiet gibt es stark wechselnde Klimabedingungen. In regnerischen El-Niño-Jahren gedeihen vor allem Pflanzen mit kleinen Samen. Das schafft gute Nahrungsbedingungen und damit bessere Überlebens- und Fortpflanzungschancen für Finken mit kleinen Schnäbeln. In trockenen La-Niña-Jahren dominieren grössere Samen, was bessere Bedingungen für Vögel mit dicken Schnäbeln schafft. Dieser wechselnde Selektionsdruck schlägt sich messbar in der Schnabelgrösse der Nachkommen nieder: nach trockenen Jahren waren deren Schnäbel grösser, nach feuchten Jahren kleiner als im langjährigen Mittel.

Die Darwinfinken zeigen noch einen weiteren Punkt, der für das Verständnis von Anpassungen wichtig ist – vor allem für das Verständnis von komplexen Anpassungen und markanten Unterschieden zwischen Arten und grösseren Gruppen. Viele markante Unterschiede in Aussehen und Funktion werden auf der genetischen und entwicklungsbiologischen Ebene offenbar recht einfach erreicht. So basiert die unterschiedliche Schnabelgrösse und -form der Finken nicht auf völlig unterschiedlicher genetischer Information. Vielmehr werden die Gene, welche die Schnabelbildung bestimmen, von dem Protein Calmodulin zu unterschiedlichen Zeiten an- und abgeschaltet. Calmodulin selbst wird von einem anderen Gen produziert, einem Schaltergen, auch «Homöobox» genannt. Solche Schaltergene hat man bei einer Vielzahl von Organismen gefunden. Diese Gene zeigen erstaunliche Übereinstimmungen zwischen Tiergruppen, die auf den ersten Blick wenig Ähnlichkeit zeigen, z.B. Insekten und Wirbeltieren. Obwohl die beiden Gruppen völlig unterschiedliche Augentypen haben – Komplexaugen bei Insekten, Kameraugen bei Wirbeltieren –, ist an ihrer Ausbildung das gleiche Gen beteiligt, *Pax-6* genannt.

Die Evolution greift also offenbar immer wieder auf Bausteine und Programme zurück, die sich in der Vergangenheit bewährt haben. Das macht die Entstehung von komplexen Anpassungen durch Auslese zufälliger genetischer Veränderungen nicht so unwahrscheinlich, wie es Gegner der Evolutionsbiologie gern hinstellen und mit krassen Beispielen illustrieren. Da heisst es, die Wahrscheinlichkeit, dass eine komplexe Anpassung wie das Auge durch Zufall entstehen könnte, sei nicht höher als die Wahrscheinlichkeit, dass ein Tornado über einen Schrottplatz fegt und dabei ein Jumbo Jet (Boeing 747) entsteht, oder dass ein Schimpanse auf einer Schreibmaschine herum tippt und daraus ein Werk von Shakespeare resultiert. Solche Vergleiche sind irreführend. Wir sprechen nämlich nicht über Zufall in dem

Sinne, dass jedes Ereignis völlig unabhängig vom vorhergehenden ist, so wie beim Würfeln eine Zahl unabhängig davon ist, was vorher gewürfelt wurde. Wir sprechen über zufällige Veränderungen, die dazu führen, dass bereits bewährte Bausteine und Mechanismen infolge von Selektion schrittweise zu immer komplizierteren Strukturen und besseren Anpassungen führen. Das ist die ‹Theorie der erleichterten Variation› (Kirschner und Gerhart 2007; siehe auch Dawkins 2008).

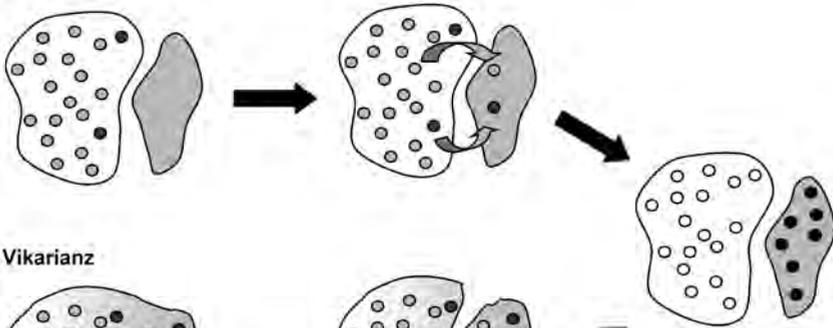
Ausserdem besteht die Zufallskomponente in der Evolution nur in der Bereitstellung verschiedener Materialien, sprich der genetischen Variation in Form von Mutationen und neuen Mischungen des Erbgutes. Was daraus entsteht, ist keineswegs Zufall, sondern das Ergebnis von Selektion. Die führt in unterschiedlichen Umwelten zu unterschiedlichen Anpassungen. Diese Anpassungen können wir in vielen Fällen vorhersagen und die Vorhersagen dann mit den Befunden vergleichen.

Artbildung: Reicht eine kleine zufällige Variation für Aufspaltung?

Aber können solche Anpassungen auch zur Aufspaltung in verschiedene Arten führen? Das ist der dritte Punkt, für den Darwin keine Belege hatte. Die evolutionären Veränderungen, die wir betrachtet haben, sind ja relativ klein: neue Resistenz bei Bakterien, veränderte Schnabelgrösse bei Finken. Das ist Mikroevolution. Das macht die leicht veränderten Organismen nicht gleich zu neuen Arten. Artbildung ist Makroevolution. Haben wir heute Belege, dass natürliche Selektion zur Bildung neuer Arten führt?

Für eine detaillierte Antwort auf diese Frage muss ich auf Spezialwerke verweisen (z. B. Coyne und Orr 2004). In diesem Kapitel kann ich nur kurz die wesentlichen Bedingungen für die Aufspaltung in verschiedene Arten skizzieren (Abb. 5). Die wichtigste Bedingung ist, dass zwischen den verschieden angepassten Varianten der Genfluss unterbunden oder zumindest stark eingeschränkt wird. Mit anderen Worten: Fortpflanzung sollte nur noch – oder zumindest überwiegend – *innerhalb* der beiden Variantengruppen erfolgen, aber nicht *zwischen* ihnen, denn dadurch würden die Unterschiede wieder verwässert. Nehmen wir an, wir haben in einer Population zwei Varianten, von denen eine häufiger vorkommt als die andere, etwa unterschiedliche Schnabelgrössen und -formen bei Finken. Nun wandern einige Individuen in ein neues Gebiet ein oder das ursprünglich zusammen-

a) Ausbreitung



b) Vikarianz

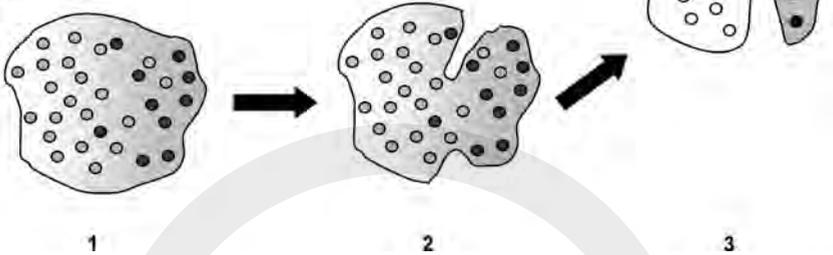


Abb. 5: Grundprinzipien der allopatrischen Artbildung.

Die beschriebenen und in Abb. 2 und 4 skizzierten Vererbungsmechanismen produzieren laufend neue genetische Varianten (hell- und dunkelgraue Kreise in Stadium 1). Davon «passen» einige besser in die jeweilige Umwelt als andere, d. h., sie pflanzen sich erfolgreicher fort, z. B. die hellgraue Variante in der weissen Umwelt, die dunkelgraue Variante in der grauen Umwelt. Wenn jetzt die graue Variante sich aus einer für sie ungeeigneten weissen Umwelt in eine isolierte graue Umwelt ausbreitet (Stadium 2 oben) oder eine Umwelt mit einem Gradienten von Weiss bis Grau nach und nach in verschiedene Gebiete aufgetrennt wird (Vikarianz; Stadium 2 unten), finden sich nicht nur beide Varianten in ihren geeigneten Umwelten, sondern es wird auch die Fortpflanzung – und damit der Genaustausch – zwischen ihnen unterbunden. Dies und die zunehmende Anpassung an die unterschiedlichen Bedingungen führt schliesslich zu verschiedenen Arten (weisse und schwarze Kreise in Stadium 3), die auch dann keine fruchtbaren Nachkommen mehr produzieren können, wenn sie wieder aufeinander treffen.

hängende Gebiet wird aufgetrennt. In diesem neuen, isolierten Gebiet herrschen jetzt andere Bedingungen (z. B. andere Nahrungstypen), welche die Eigenschaften der ursprünglich seltenen Variante begünstigen. Auf diese Weise entwickeln sich die beiden Formen immer mehr auseinander, spezialisieren sich mehr und mehr auf die vorherrschende Nahrung. Irgendwann sind sie so verschieden, dass sie sich auch dann nicht mehr miteinander fortpflanzen können, wenn sie wieder aufeinander treffen. Oder wenn sie es tun, entstehen Mischformen (Hybride), deren Schnäbel weder zur einen noch zur anderen Nahrung passen. Damit werden Hybriden von der Selektion eliminiert und die Unterschiede zwischen beiden Varianten werden erhalten und verstärkt. Da in diesem Fall die Aufspaltung von einer Ausgangsart in

zwei neue Arten in räumlich getrennten Gebieten erfolgt, nennt man diesen Vorgang ‚allopatrische‘ Artbildung (griech. allos = anders, patria = Vaterland). Es gibt andere Formen der Artbildung (sympatrisch, parapatrisch). Und es gibt neben der Selektion auch Zufallseinflüsse, welche eine Rolle spielen (z. B. genetische Drift), aber für diese Details bleibt hier nicht Platz.

Ich will zum Abschluss nur noch ein riesiges Experiment erwähnen, mit dem uns die Natur die Aufspaltung in verschiedene Gruppen durch räumliche Trennung über viele Millionen von Jahren demonstriert hat: die Kontinentalverschiebung. Vor mehr als 200 Millionen Jahren hingen alle grossen Landmassen in einem einzigen riesigen Kontinent (Pangaea) zusammen. Danach trennten sie sich zunehmend bis zu dem Kontinentalmuster, das wir heute kennen. Schaut man sich die Fossilien an, so findet man manche sehr alte Pflanzen- und Tiergruppen, die gemeinsam im heutigen Südamerika und Afrika oder sogar auch noch in Indien, Australien und der Antarktis vorkamen. Fossilien von neueren Formen sind dagegen auf die Kontinente beschränkt, in denen ihre heutigen Nachfahren leben. Diese Muster der Verbreitung zeigen uns, dass ähnliche Formen über einen weiten Bereich vorgekommen sind, solange der grosse Kontinent Pangaea zusammenhing. Nach der Trennung durch die Kontinentalverschiebung kam es zu unterschiedlicher Entwicklung und zunehmender Differenzierung.

Ausblick

Ich hoffe, ich konnte Sie überzeugen, dass die Theorie der Evolution, wie sie Darwin 1859 veröffentlicht hat, durch wissenschaftliche Erkenntnisse immer und immer und immer wieder bestätigt worden ist. Das gilt nicht nur für Bereiche, aus denen schon Darwin seine Belege bezog – also Fossilien, Morphologie, Embryologie und Pflanzen- und Tiergeografie. Es gilt auch in Bereichen, die zu seiner Zeit in der heutigen Form überhaupt nicht zugänglich waren, vor allem die Genetik und moderne Entwicklungsbiologie. Eine stärkere Bestätigung kann eine Theorie überhaupt nicht erfahren. Diese zunehmende Bestätigung aus den verschiedenen Bereichen ist für mich ein Grund, warum ich die Evolutionstheorie so faszinierend finde. Ein zweiter Grund ist, dass die Anwendung der Theorie inzwischen weit über die Erklärung der Biodiversität hinausgeht, für die Darwin sie entwickelt hat.

Die Evolutionstheorie ist beispielsweise relevant, um die Vielfalt, Verwandtschaft und Verbreitung von Sprachen und Sprachfamilien zu verstehen

(S. 169). Das Evolutionskonzept hilft uns auch, unser menschliches Verhalten zu verstehen, wie etwa das Sexualverhalten, Kooperation und Konflikt (S. 123), und es hat sich als fruchtbarer Ansatz zum Verständnis von ökonomischen Prozessen erwiesen (S. 107). Evolutionäres Denken hat zu neuen Erkenntnissen in der Medizin geführt und zum besseren Verständnis beispielsweise für die Fragen, warum wir altern, wie sich Krankheitserpedemien ausbreiten, wie Schädlinge gegen Pestizide oder Krankheitserreger gegen Medikamente resistent werden (S. 75). Und nicht zuletzt sind auch unsere Wahrnehmung, unser Denken und Fühlen ein Ergebnis der Evolution; und damit ist Darwins Theorie relevant für die Philosophie, Ethik, Religion und Kultur. All diese Themen kommen in den Kapiteln ab S. 155 zur Sprache.

Anmerkungen

- ¹ Ein attraktives Buch über wichtige Fundstellen stammt von Selden und Nudds (2007).
- ² Eine informative und unterhaltsame Darstellung dieses Themenkomplexes liefert Shubin (2008).

Literatur

- Carroll SB (2008) Die Darwin DNS – Wie die neueste Forschung die Evolutionstheorie bestätigt. S. Fischer, Frankfurt am Main
- Coyne JA, Orr HA (2004) Speciation. Sinauer Ass., Sunderland
- Darwin C (1859) On the origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life. John Murray, London (Deutsche Übersetzung (2000) Die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl. Parkland, Stuttgart)
- Dawkins R (2008) Der blinde Uhrmacher – Warum die Erkenntnisse der Evolutionstheorie beweisen, dass das Universum nicht durch Design entstanden ist. Deutscher Taschenbuch Verlag, München
- Grant P (1998) (Hrsg.) Evolution on islands. Oxford University Press, Oxford
- Kirschner MW, Gerhart JC (2007) Die Lösung von Darwins Dilemma – wie die Evolution komplexes Leben schafft. Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek
- Selden PA, Nudds JR (2007) Fenster zur Evolution: Berühmte Fossilfundstellen der Welt. Elsevier, München
- Shubin N (2008) Der Fisch in uns: Eine Reise durch die 3,5 Milliarden Jahre alte Geschichte unseres Körpers. Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt am Main
- Weiner J (1994) Der Schnabel des Finken – Oder: Der kurze Atem der Evolution. Droemer Knauer, München