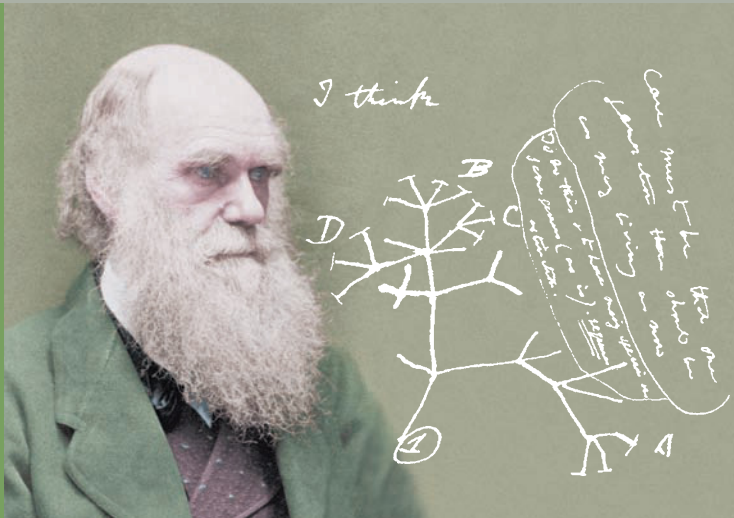


Heinz-Ulrich Reyer, Paul Schmid-Hempel (Hrsg.)

Darwins langer Arm – Evolutionstheorie heute



Darwins langer Arm – Evolutionstheorie heute

**Heinz-Ulrich Reyer,
Paul Schmid-Hempel (Hrsg.)**

Darwins langer Arm – Evolutionstheorie heute

Interdisziplinäre Vortragsreihe der Eidgenössischen Technischen
Hochschule Zürich und der Universität Zürich

Herbstsemester 2009

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Reihe Zürcher Hochschulforum, Bd. 47 


© 2011

vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

Coverabbildung:

Porträt Charles Darwin und Skizze «I think»
mit der Idee des Stammbaums

Das Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich
geschützt. Jede Verwertung ausserhalb der engen Grenzen des Ur-
heberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig
und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Überset-
zungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung
und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

ISBN: 978-3-7281-3284-0 (Print) 

ISBN: 978-3-7281-3382-3 (eBook)

DOI-Nr.: 10.3218/3382-3

www.vdf.ethz.ch

verlag@vdf.ethz.ch

Inhaltsverzeichnis

- 7 Vorwort
- HEINZ-ULRICH REYER
- 17 Alles nur Zufall? Darwins Evolutionstheorie
in ihrer heutigen Gestalt
- HOMAYOUN C. BAGHERI
- 37 Ursprung des Lebens und die Evolution biologischer
Organisationsformen
- MARCELO R. SÁNCHEZ-VILLAGRA
- 51 ‹Missing Links› – Zeugnisse der Evolution
- LUKAS KELLER UND ERIK POSTMA
- 65 Darwin und die Folgen der Inzucht
- SEBASTIAN BONHOEFFER
- 75 Evolution und Krankheit:
Was die Evolution für die Medizin bedeutet
- ANDREAS PLÜCKTHUN
- 89 Evolution im Reagenzglas
- PETER HAMMERSTEIN
- 107 Spieltheorie und Evolution: Eine glückliche Ehe zwischen
wissenschaftlichen Disziplinen
- PAUL SCHMID-HEMPEL
- 123 Das egoistische Gen – Evolution und die Soziobiologiedebatte
- CAREL P. VAN SCHAİK UND JUDITH M. BURKART
- 137 Die Evolution des Menschen und seiner Kultur

- THOMAS JUNKER
155 Geheimwaffe Kunst: Eine neue evolutionsbiologische Theorie
- ANDREAS FISCHER
169 Baum des Lebens, Baum der Sprache
- KLAUS-PETER RIPPE
189 Darwin und die zwei Gesichter des ethischen Individualismus
- HANS-KONRAD SCHMUTZ
201 Eugenische Utopien im Frühdarwinismus
- FRIEDRICH WILHELM GRAF
211 Theologische Debatten um die Evolutionstheorie
- HANS WEDER
221 Die Fitness und die Religion
- HANS-JOHANN GLOCK
235 Evolutionäre Erkenntnistheorie
- GEREON WOLTERS
251 Die Evolutionstheorie und die Philosophie
- HEINZ-ULRICH REYER & HEIDE REYER-SIEVERS
265 «Sein Charakter ist ausserordentlich verträglich». Briefe und Notizen von Charles und Emma Darwin
- 281 Autoren und Herausgeber



Reihe Zürcher Hochschulforum

Die Publikationen der Reihe «Zürcher Hochschulforum» entstehen auf Grundlage der interdisziplinären Veranstaltungsreihen von Universität und ETH Zürich. Zuletzt sind erschienen:

- Band 44 Christoph Zollikofer, Marco Baschera (Hrsg.)
Klon statt Person
2011, 160 Seiten, ISBN 978-3-7281-3208-6
auch als eBook erhältlich
Die Möglichkeit, Individuen zu klonen, stellt die Begriffe «Person» und «Individualität» grundsätzlich in Frage und bringt somit das abendländische Grundverständnis des Menschen ins Wanken.
- Band 45 Philipp Rudolf von Rohr, Peter Walde, Bertram Batlogg (Hrsg.)
Energie
2009, 224 Seiten, ISBN 978-3-7281-3219-2
auch als eBook erhältlich
Das Buch zeigt u.a., warum in China Energiesparen zweitrangig ist und wie der «Nanomotor» der Zelle funktioniert. Es bietet einen Überblick über zentrale Aspekte internationaler energiepolitischer Problemlagen.
- Band 41 Peter Walde, Franta Kraus (Hrsg.)
An den Grenzen des Wissens
2007, 280 Seiten, ISBN 978-3-7281-3105-8
auch als eBook erhältlich
Es wird aufgezeigt, was wir heutzutage auf einem bestimmten Gebiet wissen und ob es natürliche Grenzen gibt, die unserem Wissen Schranken setzen.

Weitere Bände in Vorbereitung. Detaillierte Informationen zu allen Titeln unter www.vdf.ethz.ch.



vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, VOB D, Voltastrasse 24, CH-8092 Zürich
Tel. +41 (0)44 632 42 42, Fax +41 (0)44 632 12 32, verlag@vdf.ethz.ch, www.vdf.ethz.ch

Vorwort

Sucht man nach Buchtiteln zu den Stichworten ‹Darwin› und ‹Evolutionstheorie› so finden sich schnell über 800 deutsche und fast 3'000 englische Titel. Sie beleuchten dieses Thema unter den verschiedensten Gesichtspunkten – nicht nur in der Biologie, sondern auch im Rahmen anderer Gebiete der Naturwissenschaften, der Medizin, Kultur, Sprachwissenschaften, Technik, Wirtschaft, Wahrnehmung und Denken, Philosophie, Moral, Religion und vieler weiterer Bereiche des menschlichen Lebens. Schon die Aufzählung dieser Schlagwörter zeigt: die Bedeutung der Evolutionstheorie geht heute weit über die Erklärung der Artenvielfalt hinaus, für die Charles Darwin (1809–1882) sie entwickelte und die er 1859 in seinem epochemachenden Buch veröffentlichte: *On the origin of species by means of natural selection* (deutsch 1860: *Über die Entstehung der Arten im Thier- und Pflanzen-Reich durch natürliche Züchtung*). Im ‹Darwinjahr› 2009 jährten sich zum 150. Mal das Erscheinen dieses Werkes und der 200. Geburtstag seines Autors am 12. Februar 1809.

Das Doppeljubiläum wurde weltweit mit zahlreichen Veranstaltungen gefeiert – darunter in Zürich unter anderem mit der Ringvorlesung ‹Evolution›, auf deren Vorträgen dieses Buch basiert.¹ Bei der Planung der Veranstaltung setzten wir, die Organisatoren und Herausgeber, uns folgende Ziele: Die Vorlesungen sollten nicht (wie die meisten Bücher) Teilbereiche der Evolution beleuchten, z. B. nur *Evolutionbiologie* oder *evolutionäre Erkenntnistheorie* oder *Evolution* und Religion. Vielmehr sollten in ein und derselben Veranstaltungsreihe die vielfältigen natur-, geistes- und sozialwissenschaftlichen Gesichtspunkte des Evolutionsgedankens zur Sprache kommen. Auch sollten die Entwicklung der Theorie und ihre empirische Untermauerung von den Anfängen bis zu den neuesten Ergebnissen vorgestellt sowie einige praktische Konsequenzen für unser Leben aufgezeigt werden.

Und schliesslich sollten vor allem lokale Wissenschaftler zu Worte kommen, um einen Überblick zu bieten, was am Hochschulstandort Zürich und im nahen Ausland im weiteren Bereich der Evolutionsforschung getan wird. Das fiel uns umso leichter, als Zürich über eine exzellente und weltweit anerkannte Forschergemeinschaft in diesen Bereichen verfügt.

Das Konzept fand Anklang. Im Schnitt besuchten deutlich mehr als 300 Personen jede der wöchentlichen Vorlesungen des Herbstsemesters 2009 – darunter viele, die fast keinen Anlass versäumten. Die Hörerschaft war über Altersgruppen und Berufsbilder breit gestreut; ehemalige und aktive Akademiker, interessierte Laien und Studierende aller Fachrichtungen waren gleichermaßen vertreten. Die Diskussionen waren lebhaft und mussten regelmässig aus Zeitgründen abgebrochen werden, aber nie aus Mangel an Wortmeldungen. Das grosse Interesse äusserte sich auch in zahlreichen Anfragen (vor allem von Lehrerinnen und Lehrern), ob ihnen das Vortragsmaterial zur Verfügung gestellt werden könnte. Diesem positiven Echo entnahmen wir, dass trotz des oben erwähnten riesigen Angebots an schon vorhandenen (mehr oder weniger spezifischen) Veröffentlichungen offenbar Bedarf für eine umfassendere und fächerübergreifende Betrachtung der Evolutionstheorie besteht. Damit war die Idee für dieses Buch geboren.

Was macht den Evolutionsgedanken so attraktiv und für viele Bereiche relevant? Ein wichtiger Faktor dürfte die Tatsache sein, dass – trotz aller Unterschiede in den Untersuchungsobjekten – dieselben grundlegenden Fragen gestellt werden, welche uns alle berühren: Wie sind die Organismen, deren Formenvielfalt und die Prozesse des Lebens entstanden? Wie verändern sie sich im Laufe der Zeit? Wann und warum bleiben sie manchmal auch konstant? Warum unterscheiden oder ähneln sich Merkmale zwischen Individuen, zwischen Gesellschaften und Lebensräumen? Wozu sind gewisse Merkmale überhaupt gut, welche Aufgaben erfüllen sie? Wie kommt es, dass Organismen scheinbar so perfekt auf ihre Umwelt angepasst sind? Und schliesslich: Woher kommen wir, welche Gemeinsamkeiten oder Unterschiede zum Rest der belebten Welt zeichnen uns Menschen aus? Solche Fragen zielen auf die Ursachen und die Herkunft von Lebewesen und ihren Eigenschaften und ihrer geschichtlichen Entwicklung – gelten also ihrer «Evolution».

Reaktionen auf Darwins Theorie

Doch kann eine Evolutionstheorie auch eine überzeugende Antwort auf solch vielfältige Fragen liefern? Die Diskussion darüber ist so alt wie die Evolutionstheorie selbst. Und anfangs gingen die Meinungen sogar innerhalb der Naturwissenschaften auseinander. Es gab Leute, die Darwins Ideen und Beweise von Anfang an akzeptierten und verbreiteten. Dazu gehörten in England der bedeutende Botaniker Joseph Dalton Hooker (1817–1911) und der Biologe Thomas Henry Huxley (1825–1895), der die Evolutionstheorie «bissig» verteidigte, was ihm den Spitznamen «Darwins Bulldogge» einbrachte. In Deutschland gehörte der Zoologe Ernst Haeckel (1834–1919) zu den einflussreichen und erfolgreichen Verfechtern der Evolutionstheorie, in Amerika der Botaniker Asa Gray (1810–1888) – interessanterweise ein tief religiöser Mensch, der aber Glauben und Wissen trennen konnte. Andere Wissenschaftler, darunter der grosse Geologe Charles Lyell (1797–1875), stimmten zwar der Grundidee der Evolution zu, folgten ihr aber nicht in allen Bestandteilen. Lyell, dessen eigenes Standardwerk zur Geologie (*Principles of Geology* 1830) nachhaltigen Einfluss auf die Entwicklung von Darwins Ideen hatte, war überzeugt, dass die Selektion von Varianten nicht mit dem von Darwin beschriebenen Mechanismus, sondern durch eine schöpferische Macht erfolgt. Und wiederum andere lehnten Darwins Theorie rundweg ab. Einer ihrer prominentesten und einflussreichsten Vertreter in England war der Biologe und Paläontologe Richard Owen (1804–1892), damals Leiter der naturwissenschaftlichen Abteilung des Britischen Museums. Er war ein Anhänger von Jean Baptiste de Lamarcks (1744–1829) *Transformismus-Theorie* und verriss Darwins Werk in einer Besprechung, allerdings anonym. Owen war es auch, der 1860 in Oxford beim berühmten «Show-down» zwischen dem Bischof Samuel Wilberforce (1805–1873) und Thomas H. Huxley die kirchliche Seite mit argumentativer «Munition» versorgte. Ein anderer prominenter Gegner von Darwins Theorie kam ursprünglich aus der Schweiz, lebte und arbeitete aber später in Amerika: der Zoologe, Paläontologe, Geologe und Verfechter der Eiszeitentheorie, Louis Agassiz (1807–1873). Er war ein Anhänger der *Katastrophen-Theorie*, welche durch den Vater der modernen Paläontologie und Vergleichenden Anatomen Georges Cuvier (1769–1832) vehement vertreten wurde. Nach dieser Theorie wurden alle Pflanzen- und Tierarten im Lauf der Erdgeschichte mehrfach vernichtet und ebenso oft neue Arten von Gott erschaffen.

Wenn schon für manche Wissenschaftler der Glaube an Gott ein Hindernis für die volle Akzeptanz der Evolutionstheorie war, dann ist es nicht verwunderlich, dass für die meisten Menschen jener Zeit Darwins Ideen eine furchtbare Revolution bedeuteten. Skandal! Ketzertum! Provokation! Und das ist verständlich. Im 19. Jahrhundert spielte die Religion eine zentrale Rolle in der Gesellschaft. Die weitaus meisten Menschen waren gläubig oder hatten sich dem Glauben unterzuordnen, und die Kirche als Institution hatte grossen politischen Einfluss. Anstelle eines Schöpfers und seines göttlichen Planes wurden aber nun einfache Naturgesetze von Zufall, Konkurrenz und Selektion für die Entstehung der Vielfalt der belebten Welt benannt. Für die einzelnen Gläubigen bedeutete die Evolutionstheorie Verunsicherung, Zweifel, persönliche Konflikte und Verlust der Werte, die ihrem Leben bisher Halt gegeben hatten. Für die Kirche als Institution bedeutete die Theorie zusätzlich eine Gefährdung ihrer gesellschaftlichen Vormachtstellung.

Der Widerstand war nicht zuletzt deshalb so heftig, weil Darwin seine Theorie letztlich nicht auf die Evolution von anatomischen und physiologischen Merkmalen beschränkte. Nachdem er in seinem Hauptwerk über den Ursprung der Arten (1859) nur den berühmten Satz am Ende des Buches einfügte, wonach seine Theorie auch den Ursprung des Menschen erhellen würde, ging er in seinen 1871 und 1872 erschienenen Büchern über *Die Abstammung des Menschen* und *Gemütsbewegungen bei Menschen und Tieren* viel weiter. Er beschreibt darin auch die Evolution unserer Wahrnehmung, unseres Denken und Fühlens. Mit anderen Worten: er sah geistige Leistungen sowie moralische und sogar religiöse Empfindungen des Menschen als schrittweise Weiterentwicklung aus Vorstufen im Tierreich. Das aber stellte die von vielen angenommene und gewünschte Sonderstellung des Menschen in der Natur infrage. Es bedeutete auch, dass kirchliche Dogmen und moralische Leitlinien keinen Anspruch auf absolute und unwandelbare Wahrheit haben. Das zu akzeptieren, fiel nicht nur den Menschen im 19. Jahrhundert schwer; auch heute noch trägt es dazu bei, dass viele Menschen die Evolutionstheorie – oder zumindest Teile von ihr – ablehnen und auch ihre prominente Stellung im Gebäude unseres Wissens nicht einordnen können oder wollen. So hat Papst Johannes Paul II. in einer Botschaft an die Päpstliche Akademie der Wissenschaften 1996 zwar die moderne Evolutionstheorie im Grossen und Ganzen akzeptiert, hat aber die geistigen und moralischen Fähigkeiten des Menschen dezidiert ausgenommen. Und der jetzige Papst Benedikt XVI. hat 2007 gesagt, die Frage, woher unsere Rati-

onalität stamme, könne und dürfe von der Naturwissenschaft nicht beantwortet werden.

Auch moderne Forschungsrichtungen wie die evolutionäre Erkenntnistheorie, evolutionäre Psychologie und evolutionäre Ethik stossen bei vielen Menschen auf Widerstand, wohl nicht zuletzt aus der Verunsicherung heraus: Wenn unsere Wahrnehmung, unser Denken, Fühlen und Wollen ein Ergebnis der Evolution ist, wie frei sind wir Menschen dann noch in unseren Entscheidungen? Müssten wir dann nicht endgültig zugeben, dass wir weder die Krone der Schöpfung sind noch die komplexeste und fortschrittlichste Form des Lebens, die jemals in der Evolution entstanden ist? Es soll an dieser Stelle natürlich angemerkt werden, dass Darwins Evolutionstheorie weder eine allumfassende Theorie der Erkenntnis ist, noch notwendigerweise mit Glaubenssystemen in Konflikt geraten muss. Asa Gray, der bereits erwähnte, tief religiöse, frühe Verfechter von Darwins Theorie, und zahlreiche gläubige Naturwissenschaftler in unserer Zeit belegen, dass ein Nebeneinander von Glauben und Wissen möglich ist.

Zunehmende Akzeptanz und Bestätigung der Evolutionstheorie

Trotz dieser anfänglichen und noch andauernden Widerstände hat sich Darwins Evolutionstheorie sehr schnell in der Wissenschaft etabliert. Sie war einfach logisch zu überzeugend und die Belege dafür waren zu umfassend. Diese Belege kamen aus den verschiedenen Disziplinen: Geologie, Paläontologie, Pflanzen- und Tiergeografie, vergleichende Morphologie, Embryologie, Tier- und Pflanzenzüchtung, Ökonomie und anderen Bereichen. Es waren also zahlreiche Puzzlestücke für die Evolutionstheorie bereits vorhanden. Darwins herausragende Leistung liegt darin, dass er aus diesen heterogenen Einzelteilen sowie seinen eigenen Ideen, Daten und Beobachtungen das Gesamtbild einer überzeugenden Theorie geschaffen hat. Diese Theorie lag in der Luft. Mitte 1858 bekam Darwin einen Artikel von Alfred Russel Wallace (1823–1913) zugeschickt, bei dessen Lektüre er mit Schrecken feststellte, dass es sich im Prinzip um eine Kurzfassung seiner eigenen Evolutionstheorie handelte. Wallace war seit vielen Jahren als Naturforscher und Sammler in Südostasien unterwegs, hatte zwar mit Darwin hin und wieder korrespondiert, ihn aber nie getroffen. Und er hat mit Sicherheit die Grund-

züge der Evolutionstheorie völlig unabhängig von Darwin entwickelt. Das Umdenken lag also in der Luft; der Nährboden für die Evolutionstheorie war vorhanden.

Warum hat es dann so lange gedauert, bis Darwin seine Theorie veröffentlichte? Von seiner ersten berühmten Skizze der Theorie («I think») aus dem Jahr 1837 bis zur Veröffentlichung seines Buches *On the origin of species* 1859 vergingen über 20 Jahre. Warum war Darwin immer wieder von Zweifeln geplagt und hat die Veröffentlichung so lange hinausgeschoben, bis in Wallace ein Konkurrent mit fast identischen Ideen auftauchte? Ein Grund war, dass er ein absolut integrierter Wissenschaftler war und nichts veröffentlichen wollte, was er nicht mehrfach selbstkritisch hinterfragt und gegenüber Alternativen abgewogen hatte. Ein weiterer Grund waren aber seine Zweifel und Ängste, dass er sich als nach seiner Reise auf der HMS *Beagle* (Dezember 1831–Oktober 1836) bekannt gewordener und angesehener Wissenschaftler blamieren würde. Der innere Konflikt wurde noch dadurch verschärft, dass er sich vor dem zu erwartenden Aufschrei in der Bevölkerung fürchtete und dass seine Frau Emma sehr religiös war und er sie nicht verletzen wollte. Aber 1844 schreibt Darwin in einem Brief an Joseph D. Hooker: «Am Ende aber war [der Unglaube] unabweisbar und vollständig... [und ich habe] auch seither keine Sekunde an der Richtigkeit meiner Schlussfolgerung gezweifelt ...» (Burkhardt und Smith 1988). Die gewaltige Fülle an Fakten sowie zwingende logische Überlegungen liessen für Darwin nur den einen Schluss zu: es muss anders gewesen sein, als es in der Bibel beschrieben ist und meine Theorie liefert eine wissenschaftlich überprüfbare, alternative Erklärung.

Diese Theorie hat in den 150 Jahren seit ihrer Formulierung durch Darwin eine Unmenge wissenschaftlicher Bestätigungen erfahren, sowohl aus den «klassischen» Disziplinen, deren Ergebnisse Darwin schon zugänglich waren, als auch aus Gebieten, von denen er noch gar nichts ahnen konnte. In diesem Zusammenhang sind vor allem Genetik, Molekular- und die moderne Entwicklungsbiologie zu nennen, aber auch die Fortschritte in der Geologie und deren Datierungsmethoden. Dank ständig verbesserter technischer Möglichkeiten können wir heute Untersuchungen mit einer Genauigkeit und auf Ebenen durchführen, die früher undenkbar waren. Und – das ist das Faszinierende – die Ergebnisse stützen nicht nur das Grundkonzept der Evolutionstheorie, sondern sie bestätigen auch weitgehend die Details zu gemeinsamer Abstammung, Artbildung und Verwandtschaft, die Darwin und seine Zeitgenossen mit den damals verfügbaren Methoden gefunden

hatten. Kann es eine überzeugendere Untermauerung einer Theorie geben als die Bestätigung ihrer Vorhersagen aus Forschungsbereichen, die bei der Formulierung der Theorie noch gar nicht existierten? Weitere Bestätigungen kommen aus Langzeitstudien im Freiland und Selektionsexperimenten im Labor. Sie zeigen, dass Evolution in vielen Fällen beobachtbar ist, d. h. in viel kürzeren Zeiträumen abläuft, als man früher annahm.

Auch auf der konzeptionellen Seite hat es bedeutende Fortschritte gegeben. Ein Problem, das Darwin – und vielen nach ihm – Kopfschmerzen bereitet hat, war die Evolution von Sozialverhalten, vor allem die «selbstlose» Tätigkeit von Arbeiterinnen in den Staaten sozialer Insekten wie den Bienen, Wespen, Ameisen oder Termiten. Darwins Theorie, die davon ausgeht, dass diejenigen Eigenschaften sich in der Evolution durchsetzen, die zu möglichst vielen eigenen Nachkommen führen, konnte den «Verzicht» auf eigene Nachkommen durch die sterilen Arbeiterinnen zugunsten einer Königin nicht erklären. Das in den 60er-Jahren des 20. Jahrhunderts entwickelte Konzept der «Verwandtenselektion» lieferte eine Lösung des Problems, die in vollem Einklang mit dem Grundkonzept von Darwins Theorie steht.

Kritik an der Evolutionstheorie

Trotz dieser überwältigenden und ständig zunehmenden Fülle an Belegen für die Richtigkeit der Evolutionstheorie gibt es eine ebenfalls zunehmende Zahl an ablehnenden Stimmen. Zahlreiche Internetseiten und Buchtitel wie *Der Irrtum des Jahrhunderts* oder *Der Kollaps der Evolutionstheorie* zeugen von dem Versuch, die Theorie in ihrer Gesamtheit oder zumindest auf Teilgebieten zu widerlegen, z. B. in der Intelligent-Design-Bewegung. Deren Anhänger behaupten, dass es Merkmale von Organismen gäbe, die nur durch den physischen Eingriff einer höheren Macht – des «intelligenten Designers» – zustande kommen könnten. Zu bestimmten Zeitpunkten in der Geschichte des Lebens würde dieser Designer also konkret und real in den Lauf der Dinge eingreifen, sodass neue Arten oder spezielle Strukturen und Organe entstünden. Wir möchten hier nicht auf die Diskussion um die «Wissenschaftlichkeit» des Intelligent Design eingehen. Wir merken jedoch an, dass hier ein schwerer Argumentationsfehler gemacht wird: Noch-nicht-Wissen wird gleichgesetzt mit «widerlegt». Wissenschaft ist ein stetig fortschreitender Prozess des Erkenntnisgewinns und für einen Fakt in einem konkreten Fall ist nicht immer alles schon verstanden und vollständig erklärt.

Bis etwa zur Zeit des Aristoteles (im 4. Jahrhundert v.Chr.) glaubte man, dass die Erde eine Scheibe sei, bis ins späte Mittelalter, dass sie im Zentrum des Universums stünde, und bis vor rund fünfzig Jahren wussten wir nicht, wie die Rückseite des Mondes aussieht. Aber dieses Noch-nicht-Wissen war keine Widerlegung der – aufgrund von Beobachtungen der Gestirne formulierten – grundlegenden Theorie, dass alle Planeten kugelähnliche Gestalt haben müssten, dass die Erde um eine Sonne kreist (wie dies für die Jupitermonde und den Jupiter gilt) oder dass die Rückseite des Mondes mit hoher Wahrscheinlichkeit ähnlich beschaffen ist wie dessen Vorderseite. Erst wenn die Rückseite des Mondes wirklich aus «grünem Käse» bestünde, wären unsere zugrunde liegenden Theorien über die Planeten und Gestirne falsch und man müsste sie korrigieren.² Wissenschaftlich widerlegen kann man Hypothesen und Theorien nur, wenn Fakten auftauchen, die zu ihren Vorhersagen im eklatanten Widerspruch stehen. Die Evolutionstheorie in ihrer heutigen Form müsste beispielsweise stark angezweifelt werden, falls Fossilien von Menschenaffen in einer alten Schicht des Erdmittelalters gefunden würden. Das ist bisher nicht geschehen, sondern man hat solche Fossilien in jenen jungen Schichten gefunden, die auch zeitlich zum Stammbaum der Evolution passen. Zum anderen weisen wir darauf hin, dass die Theorie des Intelligent Design nichts anderes ist, als was die meisten Zeitgenossen Darwins als seinerzeit gültige wissenschaftliche Theorie für den Ursprung der Arten angesehen haben, nämlich deren Entstehung durch einen physischen Akt des Schöpfers. Gerade dies ist aber durch die Evolutionstheorie seit 150 Jahren überholt worden. Es besteht also keine Notwendigkeit, eine schon lange widerlegte Theorie wieder zu beleben; schliesslich wird in den Schulen auch nicht mehr Alchemie oder Astrologie als gültige Alternative zur modernen Chemie oder Astronomie gelehrt.

Aktuelle Herausforderungen

Trotz der enormen Fortschritte der Evolutionsforschung gibt es immer noch Bereiche, die wir nicht ausreichend verstehen. Wie sind die ersten einfachen Lebensformen überhaupt entstanden? Wie entwickelt sich eine einfache befruchtete Eizelle zu einem differenzierten Organismus mit komplexen Merkmalen, Prozessen und Anpassungen? Warum ist es der Selektion nicht «gelingen», scheinbare Fehlentwicklungen wie Krankheiten oder Altern zu beseitigen? Welche Konsequenzen hat die vielfältige Veränderung der

Umwelt durch den Menschen für die Evolution? Warum pflanzen sich 99 % aller Tierarten geschlechtlich fort, obwohl – gemessen an der Ausbreitung des Erbgutes – ungeschlechtliche Fortpflanzung viel effektiver ist und sich in der Evolution durchsetzen sollte? Zu all diesen und weiteren Fragen gibt es bereits Hypothesen und Ergebnisse, aber komplexe Probleme sind auch auf der Grundlage von Darwins Theorie nicht immer schnell und einfach lösbar, sondern bedürfen der langwierigen Forschungsarbeit und des genauen Nachdenkens. Das macht die Evolutionsforschung auch 150 Jahre nach Darwins *Origin of Species* zu einer hochaktuellen, spannenden und dynamischen Wissenschaft, die sich zahlreichen Herausforderungen gegenüber sieht.

Neben den Herausforderungen in der Forschung sollten wir aber eine andere wichtige Herausforderung nicht vergessen: die bessere Vermittlung des Evolutionskonzeptes in der Ausbildung. Angesichts der weitreichenden Bedeutung des Evolutionsgedankens für viele Bereiche unseres Lebens sowie der ideologisch motivierten Opposition gegen Darwins Theorie hat Evolution an Schulen oder Universitäten einen viel zu geringen Stellenwert und wird oft Fächern geopfert, die scheinbar wichtiger, ökonomischer oder drängender sind. Es wird zwar als selbstverständlich vorausgesetzt, dass ein gebildeter Mensch sich in der Geschichte auskennt, die Grundregeln der Wirtschaft versteht und die wichtigsten Werke der Weltliteratur gelesen hat, doch – so der Literaturprofessor Dietrich Schwanitz (1999) in seinem Buch *Bildung*: «Naturwissenschaftliche Kenntnisse müssen zwar nicht versteckt werden, aber zur Bildung gehören sie nicht», denn sie trügen wenig zum Verständnis der Kultur bei. Doch nichts könnte abwegiger sein – unsere belebte Welt und unsere eigene biologische Geschichte beeinflussen uns genauso wie unsere kulturelle Evolution. Das hat nichts mit falsch verstandenem «Biologismus» zu tun, sondern mit Wahrhaftigkeit in der Suche nach unseren Ursprüngen und dem, was Menschen ausmacht.

Wir hoffen deshalb, liebe Leserinnen und Leser, dass dieses Buch mit seinem breiten Spektrum an Betrachtungsweisen nicht nur spannend und unterhaltend zu lesen ist, sondern auch die Faszination und Bedeutung der Evolutionstheorie vermittelt und damit zum Denken und Nachdenken anregt – so wie dies alle wahrhaft grossen Ideen der Menschheitsgeschichte zu tun vermögen.

Zürich, August 2010

Heinz-Ulrich Reyher
Universität Zürich

Paul Schmid-Hempel
ETH Zürich

Anmerkungen

- ¹ Weitere Informationen und Dokumentationen zu den Zürcher Veranstaltungen finden sich unter www.darwinyear09.ch.
- ² Diese These dient lediglich zur Illustration, denn das ‚Grüne-Käse-Modell‘ von A. Nonymus ist nicht ganz ernst gemeint. Es besagt, dass die äussere Schicht des Mondes aus einer grünen Substanz besteht, deren chemische Zusammensetzung der von Käse ähnlich ist. Diese Schicht soll verschiedene Schimmelpilzarten beherbergen, welche für die Färbung der Mondoberfläche verantwortlich sind. Auf der Mondoberfläche leben als Mondmäuse bezeichnete Tiere, die sich von der Käseschicht ernähren. Diese Erkenntnisse werden angeblich von den Regierungen der Vereinigten Staaten und Russlands in einer bewussten Verschwörung unterdrückt.

Literatur

Burkhardt F, Smith S (Hrsg.) (1988) *The correspondence of Charles Darwin*, Vol. 3 (1844–1846). Cambridge University Press, Cambridge

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 (deutsch 1860: *Über die Entstehung der Arten im Thier- und Pflanzen-Reich durch natürliche Züchtung*. Schweizerbart'sche Verlagshandlung, Stuttgart)

Schwanitz D (1999) *Bildung – Alles, was man wissen muss*. Eichborn, Frankfurt am Main

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-

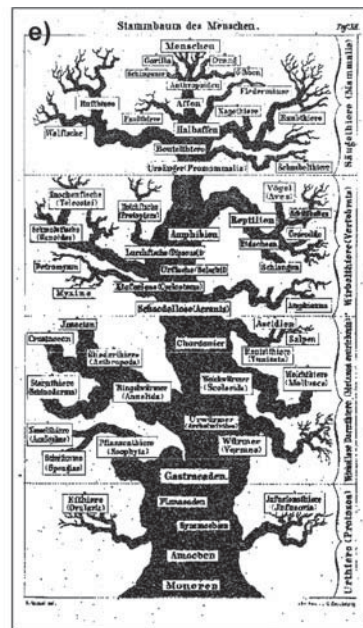
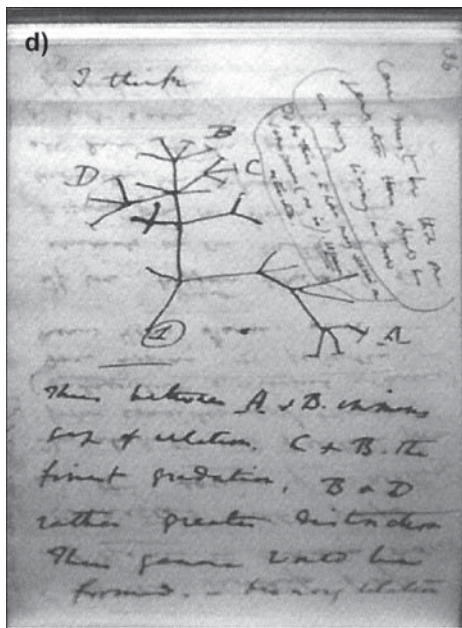
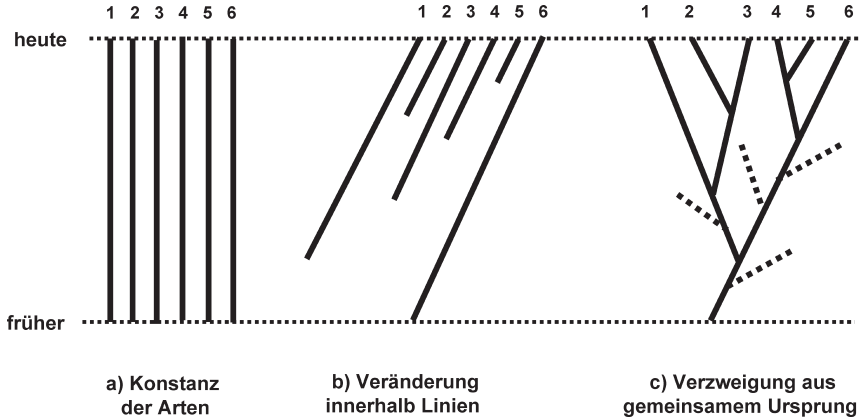


Abb. 1: Verschiedene Vorstellungen zur Entwicklung der biologischen Diversität. (a) Schöpfungsgeschichten und frühe wissenschaftliche Hypothesen gehen davon aus, dass alles Leben zum gleichen Zeitpunkt begonnen hat (früher) und alle Organismen (1–6) von ihren Anfängen bis heute unverändert geblieben 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

Evolution aufgetreten, haben sich bewährt und wurden in alle Verzweigungen des Baumes weitergegeben.

Die Disziplinen, die diese gemeinsame Herkunft und zunehmende Aufspaltung am deutlichsten dokumentieren und unser Verständnis der Evolution am stärksten erweitert haben, sind sicher Genetik und Entwicklungsbiologie (Caroll 2008). Sie haben faszinierende Erkenntnisse geliefert, wie Eigenschaften vererbt werden und wie aus einfachen, befruchteten Eizellen unterschiedlichste Organismen entstehen. Es begann mit der Entdeckung der Vererbungsgesetze durch Gregor Mendel (1822–1884) in der zweiten

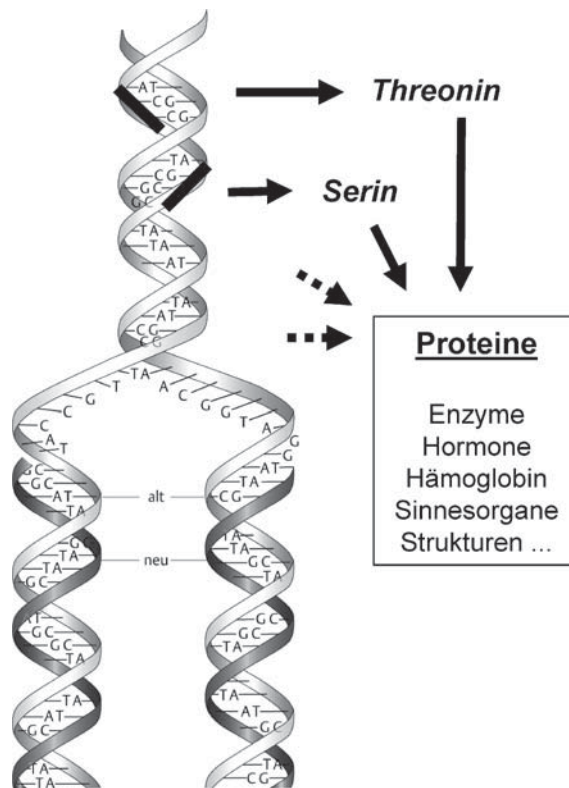


Abb. 2: Schema der DNA-Doppelhelix, der Trägerin der Erbinformation. Die beiden Stränge sind chemisch über vier Basen verknüpft: Adenin (A), Cytosin (C), Guanin (G) und Thymin (T). Die Abfolge von jeweils drei Basen (= Triplet) bestimmt, welche Aminosäure gebildet wird, z. B. Threonin durch das Triplet ACC, Serin durch das Triplet AGC (schwarze Balken). Aminosäuren wiederum lagern sich zu Proteinen zusammen, den Grundbausteinen allen Lebens. Bei der Fortpflanzung wird die Erbinformation weitergegeben, indem die Doppelhelix sich aufspaltet und danach jeder Einzelstrang wieder zu einem Doppelstrang ergänzt wird. Dabei kann es zu Kopierfehlern kommen (Mutationen).

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