

Inhalt

Vorwort	5
A. Einleitung	7
1. Was ist Evolution?	7
2. Aktuelle Evolutionsprozesse	9
B. Die Entstehung des Lebens auf der Erde	12
1. Das Problem der Lebensentstehung	12
2. Evolutionsbedingungen in der Frühzeit der Erde	14
3. Die abiogene Bildung organischer Verbindungen	15
3.1 Simulationsexperimente zur Bildung kleiner organischer Moleküle	15
3.2 Die abiogene Bildung von Makromolekülen	19
4. Die Entstehung der Urlebewesen (Protobionten)	20
4.1 Koazervate und Mikrosphären	20
4.2 Die Evolution des Energiestoffwechsels	22
4.3 Die Evolution der Vererbungsmaschinerie	23
5. Evolution der Zelle	25
5.1 Protocyte – Eucyte	25
5.2 Die Endosymbiontentheorie	26
C. Ursachen und Mechanismen der Evolution	30
1. Kurze Geschichte der Evolutionstheorien	30
1.1 Ältere Vorstellungen	30
1.2 LAMARCK und die Vererbung erworbener Eigenschaften	33
1.3 DARWIN und die Theorie der natürlichen Auslese	36
1.4 Die Weiterentwicklung der Evolutionstheorie	41
2. Die Ursachenfrage in der Biologie	42
3. Evolutionsfaktoren	44
3.1 Die Bedeutung von Populationen im Evolutionsprozess	44
3.2 Ursachen der genetischen Variabilität	46
3.2.1 Mutation	46
3.2.2 Rekombination	50
3.2.3 Gendrift	52
3.3 Die natürliche Auslese oder Selektion	52
3.3.1 Die Wirkung der natürlichen Auslese	52
3.3.2 Selektionsfaktoren	56
3.3.3 Formen der Selektion	60
4. Die Entstehung der Artenvielfalt (Mikroevolution)	63
4.1 Bedeutung und Definition der Art	63
4.2 Mechanismen der Artbildung	65
4.2.1 Allopatrische Artbildung	66
4.2.1.1 Separation	66
4.2.1.2 Isolationsmechanismen	68

4.2.2 Sympatrische Artbildung	72
4.2.2.1 Polyploidisierung	73
4.2.2.2 Partnerwahl	74
4.3 Adaptive Radiation	75
5. Die Entwicklung der Baupläne (Makroevolution)	79
5.1 Die Theorie der additiven Typogenese	80
5.2 Die Theorie des unterbrochenen Gleichgewichts	82
5.3 Massenaussterben als Evolutionsfaktor	84
D. Die Stammesgeschichte der Organismen	89
1. Hinweise für die Stammesverwandtschaft der Organismen	89
1.1 Befunde aus Anatomie und Morphologie	89
1.2 Befunde aus der Paläontologie	95
1.2.1 Wie Fossilien entstehen	95
1.2.2 Altersbestimmung von Fossilien	95
1.2.3 Konsequenzen aus der Fossilgeschichte der Lebewesen	97
1.3 Befunde aus der Verhaltensforschung	100
1.4 Befunde aus der Embryologie	104
1.5 Befunde aus der Molekularbiologie	107
1.6 Befunde aus der Immunbiologie	110
2. Das natürliche System der Organismen	112
3. Die Entwicklung der vielzelligen Pflanzen und Tiere	118
E. Die Evolution des Menschen	125
1. Die Verwandtschaft des Menschen	126
1.1 Die Primaten	126
1.2 Menschenaffen und Menschen – ein Vergleich	128
1.3 Die Stellung des Menschen im natürlichen System	130
2. Die Vorläufer der Menschen	133
2.1 Die Vorläufer der Hominiden	134
2.2 Die Vormenschen	137
2.3 Die ersten Menschen	141
2.4 Die modernen Menschen	144
2.4.1 Die Neandertaler	144
2.4.2 Der anatomisch moderne Mensch	145
3. Ursachen der Menschwerdung	147
3.1 Der Erwerb des aufrechten Ganges	147
3.2 Die Größenzunahme des Gehirns	155
3.3 Der Übergang zur kulturellen Evolution	158
Quellenverzeichnis	160
Literaturverzeichnis	161
Lösungen	165
Glossar	174
Register	181



Die Evolution des Menschen

CHARLES DARWIN ahnte, was passieren würde!

Originaltext

Du meine Güte! Wir sollen vom Affen abstammen? Wir wollen hoffen, dass das nicht stimmt. Aber wenn es wahr ist, dann wollen wir beten, dass es nicht bekannt wird!
(zit. nach GREBER/GREBER 1994)

Dies soll die Reaktion der Frau des Bischofs von Worcester bei einem Disput im Jahre 1860 über die Anwendung der DARWIN'schen Theorie auf den Menschen gewesen sein. In seinem Hauptwerk „Über die Entstehung der Arten ...“ hatte es DARWIN noch bei der lapidaren Bemerkung belassen, dass sein Buch auch Licht auf den Menschen und seine

Geschichte werfen werde. Erst mit seinem zweiten großen Werk über „Die Abstammung des Menschen“ im Jahre 1871 wagte er den Schritt, seine Selektionstheorie auch auf den Menschen anzuwenden. Doch er sah die Widerstände gegen ein solches Unterfangen vorher:

Originaltext

Die hauptsächlichste Folgerung, zu welcher ich in diesem Werke gelangt bin, nämlich dass der Mensch von einer niedriger organisierten Form abstammt, wird für viele Personen, wie ich zu meinem Bedauern wohl annehmen kann, äußerst widerwärtig sein.
(DARWIN 1992, S. 700)

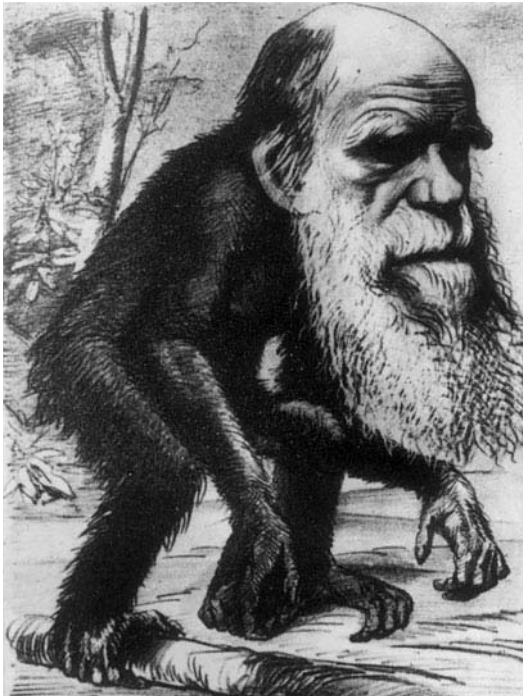


Abb. 69
Darwin-Karikatur aus dem Jahre 1871

Zwar hatte bereits LINNÉ den Menschen als *Homo sapiens* in seinem „Systema naturae“ zu den Primaten, den Herrentieren, an die Seite der Menschenaffen gestellt, aber zu jener Zeit galt diese Ordnung noch als das Werk Gottes und der Mensch als Krone dieser Schöpfung (vgl. Kap. C.1.1). Mit der DARWIN'schen Theorie jedoch wurde den Menschen eine schwere Kränkung zugemutet: Sollten sie nicht nur den Menschenaffen sehr ähnlich sein, sondern tatsächlich von ihnen abstammen?

Seit DARWINS Veröffentlichung ist zu dieser Frage eine ungeheure Fülle von Material zusammengetragen worden. Wir beschränken uns im Folgenden darauf, die wesentlichsten Zusammenhänge darzustellen.

1. Die Verwandtschaft des Menschen

1.1 Die Primaten

Die Abgrenzung der Säugetierordnung der **Primaten** geht auf LINNÉ zurück. Diese Tiergruppe entstand im Erdmittelalter in der Kreidezeit vor etwa 70–80 Millionen Jahren aus kleinen, wahrscheinlich schon auf Bäumen lebenden Insektenfressern. Sie haben sich seitdem zur **vielfältigsten und formenreichsten Säugetierordnung** entwickelt. Der vermutlich kleinste Vertreter, die Etruskerspitzmaus, wiegt nur etwa 2 g, während ein ausgewachsenes Gorilla-Männchen bis zu 250 kg auf die Waage bringt.

Die **Angepasstheit an das Baumleben** ist die einzige Gemeinsamkeit der Primaten. Sie zeigt sich in folgendem Merkmalskomplex:

- **Greifhände und -füße.** Daumen und große Zehe können bei vielen Primaten den anderen Fingern und Zehen gegenübergestellt werden (**opponierbar***).
- **Räumliches Sehen.** Die Augen liegen in der vorderen Gesichtshälfte, sodass sich die Gesichtsfelder überschneiden.
- **Großhirn.** Die Gehirnteile für die Bewegungssteuerung und das Sehen sind besonders stark entwickelt.
- **Verkürzung der Mundpartie.** Damit geht eine Abschwächung der Geruchswahrnehmung einher.
- **Aktive oder passive Traglinge.** Die Nachkommen der Baumbewohner mussten sich an das Fell der Mutter anklammern (vgl. Kap. D.1.3).

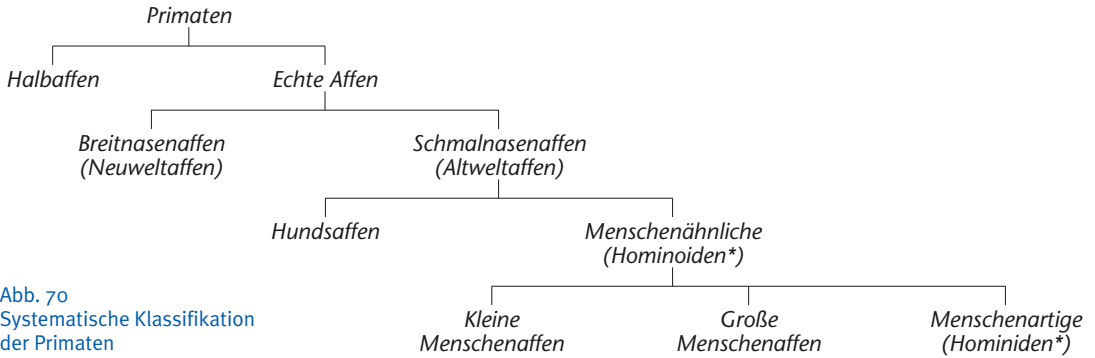


Abb. 70
Systematische Klassifikation
der Primaten

In der stammesgeschichtlichen Entwicklung sind diese Merkmale als **evolutive Trends** aufzufassen, die sich bei den verschiedenen Formen durch Anpassung an das Baumleben in unterschiedlichen Ausprägungen herausbildeten. Diese Anpassungen sind auch bei denjenigen Primaten noch erhalten, die wie die Menschen wieder zum Bodenleben zurückgekehrt sind. Wie wir noch zeigen werden, erlaubte überhaupt erst der primatentypische Merkmalskomplex die evolutive Weiterentwicklung und Anpassung an das Leben in einem völlig neuen Lebensraum, der Savanne. Die in Anpassung an das Baumleben entstandenen Merkmale können in diesem Sinne als Präadaptationen bzw. Prädispositionen interpretiert werden. Wir werden das am Beispiel der Entstehung des aufrechten Gangs genauer erläutern (vgl. Kap. E.3.1).

Abbildung 70 zeigt die systematische Untergliederung der heute lebenden Primaten.

80% der heute existierenden nichtmenschlichen Primaten leben hauptsächlich in

den Urwäldern der Tropen und Subtropen (Abb. 78).

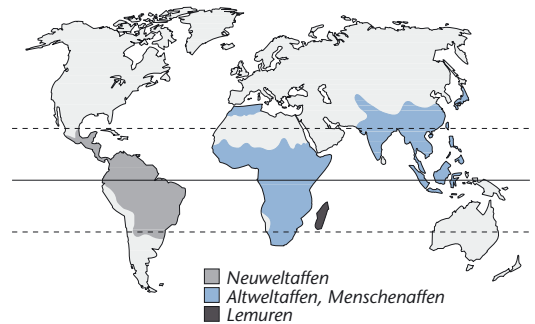


Abb. 71
Geografische Verbreitung der heute lebenden nichtmenschlichen Primaten

Einige Primaten passten sich auch an trocken-heiße, gemäßigte oder subalpine Lebensräume an, so z.B. die Berggorillas oder die Wüstenpaviane.



Die große Ausnahme unter den Primaten ist *Homo sapiens*, sowohl hinsichtlich seiner universellen geografischen Verbreitung als auch wegen seiner Anpassungsfähigkeit an extrem unterschiedliche Umweltbedingungen.

1.2 Menschenaffen und Menschen – ein Vergleich

Eine der ältesten Kontroversen betrifft das genaue verwandtschaftliche Verhältnis zwischen uns Menschen und den großen Menschenaffen. Durch Vergleich vor allem der körperlichen Merkmale (*Tabelle 4*) wurden traditionell die großen Menschenaffen in einer gemeinsamen Familie (*Pongidae*) zusammengefasst, der eine eigenständige Familie der Menschenartigen (*Hominidae*) gegenübergestellt wurde.

Wir wollen einige Merkmale und Merkmalskomplexe, die zur Begründung dieser Einordnung herangezogen werden, etwas genauer betrachten.

Die deutlichen Unterschiede im Körperbau und in der Körperhaltung (*Abb. 72*) stehen in direktem Zusammenhang mit der unterschiedlichen **Fortbewegungsweise**.

Zwar kann man auch bei Menschenaffen zeitweise beobachten, dass sie auf zwei Beinen laufen, aber nur über kurze Strecken. Ein völliges Aufrichten lassen die anatomischen Verhältnisse auf Dauer nicht zu. Die Menschen können die Knie völlig durchdrücken und die Beine senkrecht stellen. Durch die S-förmige, federnde Konstruktion der Wirbelsäule kann auch der Oberkörper vollständig aufgerichtet werden. Der Greiffuß der Menschenaffen mit abspreizbarer großer Zehe ist beim Menschen in einen Standfuß umgewandelt, der zwar keine Greiffunktionen mehr ausführen, aber dafür das gesamte Körpergewicht tragen kann (*Abb. 73*).

Auch das schüsselförmige Becken ist eine Anpassung an den aufrechten Gang (*vgl. dazu Kap. E.2.2*). Einige Schädelmerkmale fügen sich ebenfalls in dieses Anpassungsmuster, vor allem die Lage des Hinterhaupts-

Merkmale	Menschenaffen	Menschenartige
Körperhaltung	vorgebeugt	aufrecht
Wirbelsäule	einfach gekrümmt	S-förmig gekrümmt
Fortbewegung	meist vierfüßig	zweifüßig
Fuß	Greiffuß	Standfuß
Hand	kurzer Daumen; „Affengriff“	verlängerter Daumen; opponierbar
Becken	schaufelförmig	schüsselförmig
Gesichtsschädel	lang vorgezogen, ohne Kinn	kurz, senkrecht unter dem Hirnschädel, Kinn
Hinterhauptsloch	weit hinten am Schädel	in der Mitte der Schädelbasis
Kiefer	lang mit U-förmigen Zahnbögen	kurz mit parabolischen Zahnbögen
Zahnlücken	im Ober- und Unterkiefer zu den Eckzähnen	keine; geschlossene Zahnreihen
Gehirngewicht im Durchschnitt Schwankungsbreite	450 g 300 bis 720 g	1450 g 900 bis 2200

Tabelle 4
Vergleich von Menschenaffen und Menschen

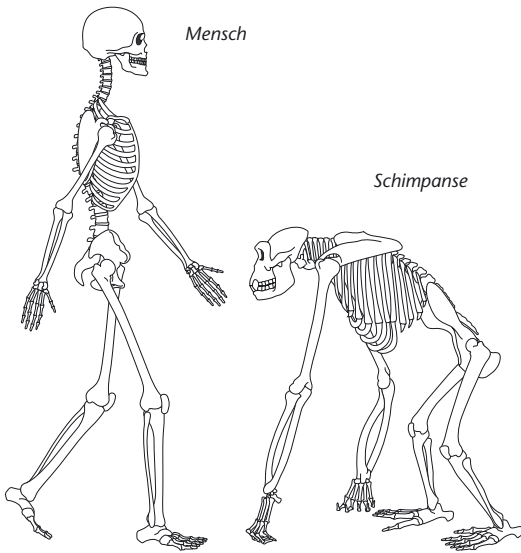


Abb. 72
Skelettvergleich von Schimpanse und Mensch

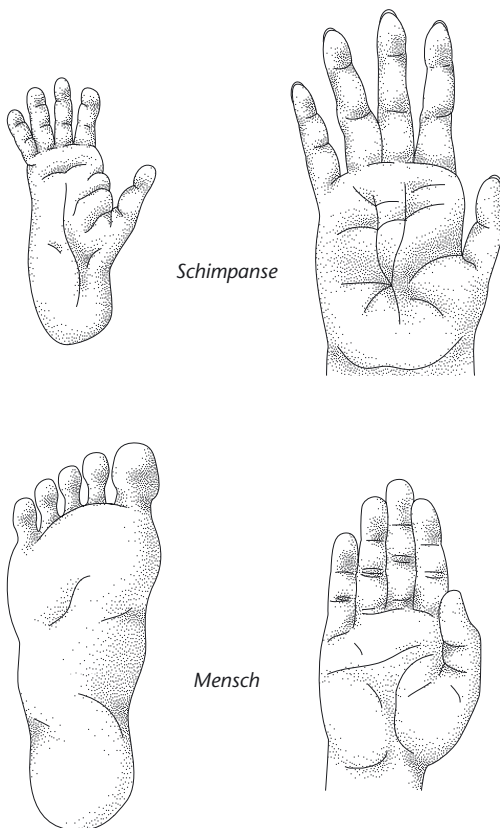


Abb. 73
Fuß- und Handvergleich von Schimpanse und Mensch

lochs, durch das das Rückenmark aus dem Gehirn austritt (Ansatzstelle der Wirbelsäule, *Abb. 74b*). Während beim Menschen der Schädel, mit einem geringen muskulären Aufwand ausbalanciert, auf der senkrecht stehenden Wirbelsäule sitzt, muss er bei den Menschenaffen durch kräftige Nackenmuskeln in Position gehalten werden.

Bei der Betrachtung von der Seite (*Abb. 74a*) fällt der Unterschied in der Struktur des Gesichtsschädels auf. Affen haben noch eine deutlich erkennbare Schnauze, während der Menschenschädel fast senkrecht abfällt. Auch die ausgeprägten Überaugenwülste der Affen fehlen. Dagegen ist die Hirnschale extrem groß. Diese Unterschiede in der Schädelform resultieren einerseits aus der verschiedenen Ernährungsweise und der Nutzung des Gebisses, andererseits aus der veränderten Größe des Gehirns.

Auffällig am Schimpansengebiss (*Abb. 74b*) sind die U-förmige Anordnung der Zähne, die vergleichsweise großen Schneidezähne, die beiden großen spitzen Eckzähne und die dazwischen liegende Zahnlucke (Diastema*), in die die Eckzähne des Unterkiefers passen (*vgl. Abb. 74a*). Da beim Menschen die Eckzähne der Größe der Schneidezähne angeglichen sind, erübrigt sich die Zahn-

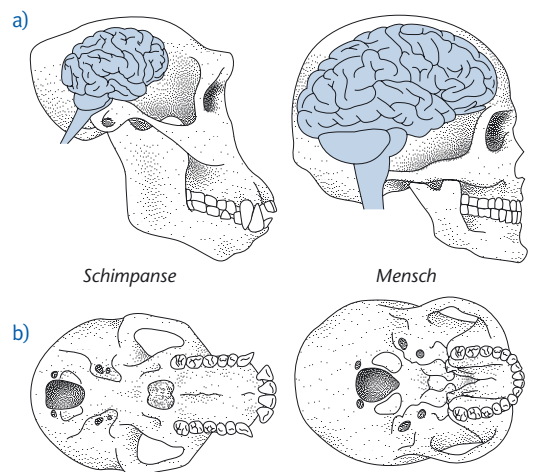


Abb. 74
Schädel von Schimpanse und Mensch a) Seitenansicht mit Lage des Gehirns, b) Unterseitenansicht mit Oberkiefer und Hinterhauptloch

lücke (Abb. 74b). Der Kiefer ist insgesamt etwas kleiner und die Zähne sind parabolisch angeordnet.

Der deutlichste Unterschied zeigt sich im Gewicht bzw. im Volumen des Gehirns (Abb. 74a). Wir kommen darauf noch ausführlich zurück (vgl. Kap. E.3.2).

1.3 Die Stellung des Menschen im natürlichen System

Aufgrund der Gemeinsamkeiten wurden die großen Menschenaffen zu einer monophyletischen Gruppe zusammengefasst (Abb. 75a), die von einem gemeinsamen Vorfahren abstammen soll.

Gegen diese Zuordnung wurde argumentiert, dass es ebenso gut möglich sei, die aufgeführten gemeinsamen Merkmale der großen Menschenaffen als ursprüngliche (plesiomorphe) Merkmale eines gemeinsa-

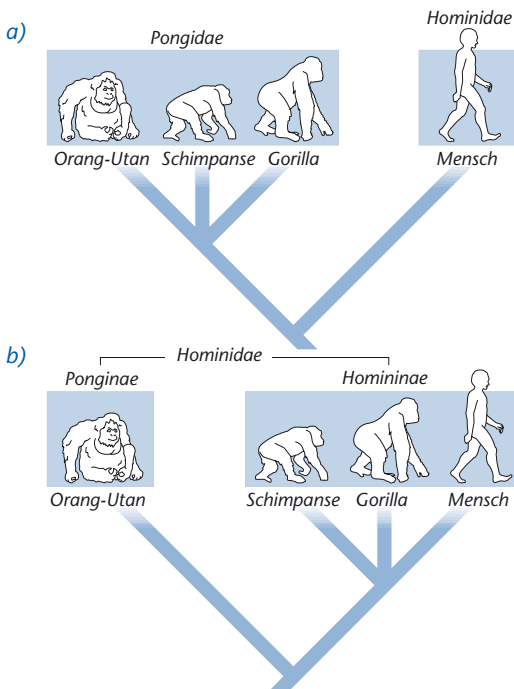


Abb. 75 Zwei konkurrierende Hypothesen über die Verwandtschaftsbeziehungen zwischen Orang-Utan, Schimpanse, Gorilla und Mensch

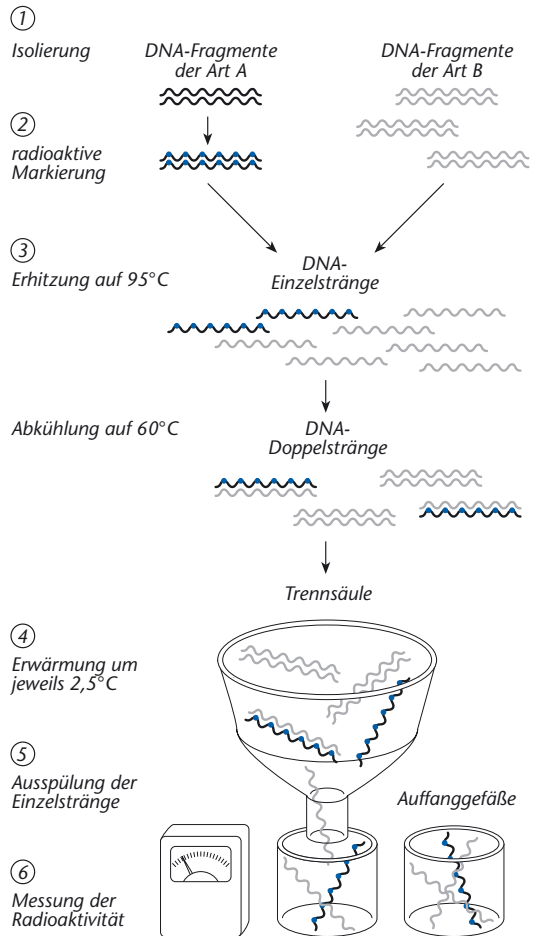


Abb. 76 Schema der DNA-Hybridisierung, vgl. Experiment Eo6, S. 131

men Vorfahren von Menschenaffen und Menschen und die Menschen-Merkmale als abgeleitete (apomorphe) zu interpretieren (vgl. Kap. D.3). Demnach müssten Gorilla, Schimpanse und Mensch enger miteinander verwandt sein und deshalb in einer gemeinsamen taxonomischen Einheit unter Ausgrenzung der Orang-Utans zusammengefasst werden (Abb. 75b).

Diese Interpretation wurde in den letzten Jahren durch molekular- und immunbiologische Untersuchungen bestätigt. Bei Proteinanalysen (z.B. β -Kette des Hämoglobins, vgl. Kap. D.1.5) und bei Präzipitin-Tests (vgl.

Experiment

Eo6

- ① Zunächst isoliert man aus Zellen der beiden Arten, deren Verwandtschaft untersucht werden soll, die DNA. Diese wird durch Enzyme in kürzere Stücke (Fragmente) von etwa 500 Nukleotidpaaren zerlegt.
- ② Die Fragmente der Art A werden radioaktiv markiert und mit einer deutlich größeren Menge unmarkierter DNA-Fragmente der Art B zusammengebracht.
- ③ Durch Erhitzen des Gemisches auf 95 °C „schmelzen“ die DNA-Doppelstränge zu Einzelsträngen. Wird das Gemisch danach auf 60 °C abgekühlt, bilden sich wieder Doppelstränge aus, wobei jetzt neben wenigen AA- und vielen BB-Doppelsträngen einige Hybrid-Doppelstränge aus A- und B-Einzelsträngen entstehen.
- ④ Dieses Gemisch wird nun durch eine Trennsäule geschickt, die nur einzelsträngige DNA passieren lässt. Die Temperatur wird schrittweise um 2,5 °C erhöht; dadurch werden auch die Doppelstränge schrittweise wieder geschmolzen.
- ⑤ Auf jeder Temperaturstufe werden die Einzelstränge ausgewaschen und in separaten Gefäßen aufgefangen.
- ⑤ Am Ende misst man die Radioaktivität in den Gefäßen; die Intensität ist ein relatives Maß für den Anteil der bei einer bestimmten Temperatur geschmolzenen Hybrid-Doppelstränge.

Kap. D.1.6) ergab sich eindeutig, dass die afrikanischen Menschenaffen dem Menschen ähnlicher sind als beide im Vergleich mit dem Orang-Utan. Die genetischen Ähnlichkeiten der „Afrikaner“ (Gorilla, Schimpanse, Mensch) sind sogar so groß, dass die Verwandtschaftsbeziehungen innerhalb dieser Gruppe mit den herkömmlichen molekularbiologischen Methoden nicht zu klären waren. Das gelang erst mit der Anwendung einer besonderen Methode zum indirekten Vergleich der Nukleotidsequenzen der DNA: der Technik der **DNA-Hybridisierung*** (Abb. 76).

Die Temperatur, bei der 50% der Hybrid-Doppelstränge geschmolzen sind, wird als DNA-Schmelzpunkt oder T_{50} H-Wert bezeichnet. Die Hybrid-DNA schmilzt um so eher (d. h. bei niedrigeren Temperaturen), je weniger komplementäre Basenpaare ausgebildet wurden. Je ähnlicher die Nukleotidsequenzen der gemischten Einzelstränge waren,

desto höher liegt der Schmelzpunkt. Den höchsten Schmelzpunkt hat artreine DNA. Er liegt für die reine DNA von Schimpanse, Gorilla und Mensch bei 88,2 °C. Hybrid-DNA von Mensch und Schimpanse schmilzt bei 86,4 °C, die von Mensch und Gorilla bei 85,8 °C. Aus den Unterschieden zwischen den Schmelztemperaturen wird der ΔT_{50} H-Wert ermittelt. Er dient als Maß für die „genetische Distanz“ und damit für den Grad der Verwandtschaft zwischen zwei Arten.

Mit der Annahme, DNA-Moleküle verhielten sich wie „molekulare Uhren“ (vgl. Kap. D.1.5), lassen sich die ΔT_{50} H-Werte in Zeiträume seit der Artaufspaltung umrechnen. Dazu muss die „Uhr“ mithilfe des paläontologisch gut gesicherten Zeitpunktes der Abspaltung der Orang-Utans vor etwa 16 Millionen Jahren geeicht werden (vgl. Kap. E.2.1). Dividiert man diese Zahl durch den ΔT_{50} H-Wert der Orang-Utans von 3,55–

Aufgabe

E01

In der folgenden Tabelle sind die Delta-T₅₀H-Werte verschiedener Hybrid-DNAs angegeben. Es handelt sich um Mittelwerte, die aus bis zu 70 Einzelexperimenten gewonnen wurden.

Art	Mensch	Schimpanse	Gorilla	Orang-Utan
Mensch	0			
Schimpanse	1,63	0		
Gorilla	2,27	2,21	0	
Orang-Utan	3,60	3,58	3,55	0

Untersuchen Sie die Werte in der Tabelle und äußern Sie eine Vermutung zu den Verwandtschaftsverhältnissen der aufgelisteten Arten.

3,6, so erhält man für einen Delta-T₅₀H-Wert von 1,0 einen Zeitraum von etwa 4,5 Millionen Jahren. Daraus lassen sich die Zeitpunk-

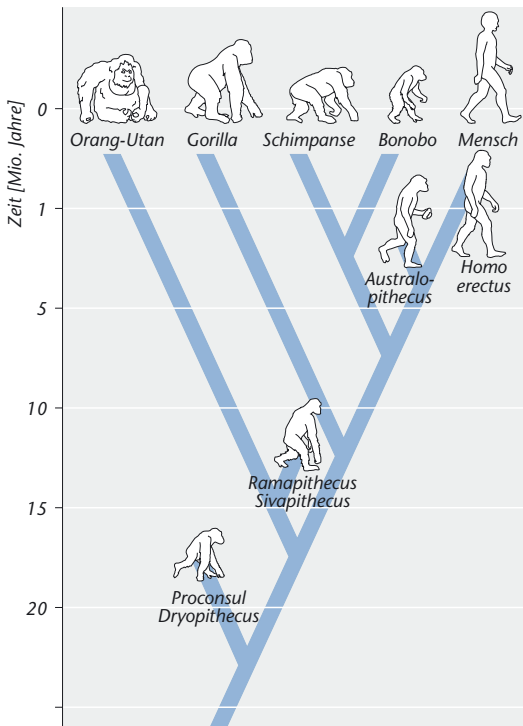


Abb. 77
Stammbaum der Altweltaffen nach DNA-Hybridisierung

te der Abspaltung der anderen Arten errechnen. Das Ergebnis zeigt Abbildung 77.

Aus den molekulargenetischen Untersuchungen ergibt sich also folgendes Bild:

- Unter den großen Menschenaffen sind die afrikanischen Arten näher mit dem Menschen verwandt als mit dem asiatischen Orang-Utan.
- Innerhalb der Gruppe der Menschenähnlichen (*Homininae*) bilden Mensch und Schimpanse die evolutionäre Schwestergruppe zum Gorilla, da sie einander genetisch ähnlicher sind als beide im Vergleich zum Gorilla.
- Die Aufspaltung der Linien von Mensch und Schimpanse aus einem gemeinsamen Vorfahren erfolgte vermutlich erst vor 7,5 Millionen Jahren.

Es werden allerdings auch Einwände gegen die enge Verwandtschaft von Mensch und Schimpanse erhoben:

- Trotz der großen genetischen Übereinstimmung – 98% der Gene sind identisch – weichen die Chromosomensätze voneinander ab: Wir Menschen besitzen 46 Chro-

mosomen (23 x 2), die Schimpansen 48 (24 x 2, wie alle großen Menschenaffen). Der Unterschied beruht allerdings schlicht darauf, dass die Informationen, die beim Schimpansen auf zwei kleinen Chromosomen sitzen, beim Menschen auf dem großen Chromosom Nr. 2 vereint sind.

- Ein weiterer Einwand bezieht sich auf die Fortbewegungsweise: Schimpanse und Gorilla bewegen sich beide im Knöchelgang (Abb. 78). Am Fossilmaterial von Vormenschen wurden aber keinerlei Hinweise für diese Gangart festgestellt.

Dieser Befund spricht für eine monophyletische Abstammung der afrikanischen Menschenaffen.

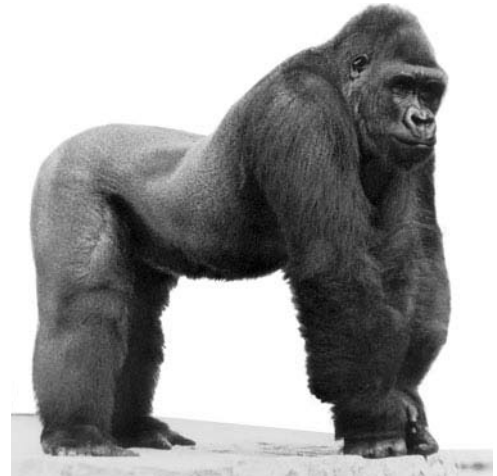


Abb. 78
Knöchelgang beim Gorilla

Aufgabe

E02

Weshalb muss das Fehlen des Knöchelgangs beim Menschen nicht gegen die Monophylie von Mensch, Schimpanse und Gorilla sprechen?

2. Die Vorläufer der Menschen

Immer wieder sorgen Ausgrabungen und Entdeckungen von menschlichen Fossilien für Schlagzeilen. Oft werden dadurch bisherige Forschungsergebnisse bestätigt, manchmal müssen sie auch revidiert werden. Tatsächlich haben Paläoanthropologen* in den letzten Jahrzehnten viel Feldforschung

betrieben und bedeutende Funde gemacht, vor allem in Ostafrika (vgl. Tabelle 6, S. 140). Trotzdem gibt es weltweit nur etwa 3000 Fundstücke, die auf die Evolution des Menschen hinweisen. Zur gegenwärtigen Forschungssituation der Paläoanthropologie
FRIEDEMANN SCHRENK:

Originaltext

Es gibt mehr Forscher als Fundstücke ... Außerdem muss man Funde interpretieren, Knochen sprechen nicht. Was wir aus diesen paar tausend Funden rekonstruieren, ähnelt dem Versuch, die Geschichte Europas aus einem Schuh von Karl dem Großen und einer Cola-dose zu erklären.

(SCHRENK 2006)

Seite 117 **D13**

Diese Moleküle sind in der Evolution erst zu relativ späten Zeitpunkten entstanden, so dass dadurch nicht alle Lebewesen erfasst werden können.

Seite 121 **D14**

Aufgrund des Vorhandenseins fester Skelettelemente musste nicht mehr der gesamte Hautmuskelschlauch unter Druck gehalten werden, sondern die Motorik konnte durch gezielte Muskelkontraktionen, die feste Elemente bewegen, erzeugt werden.

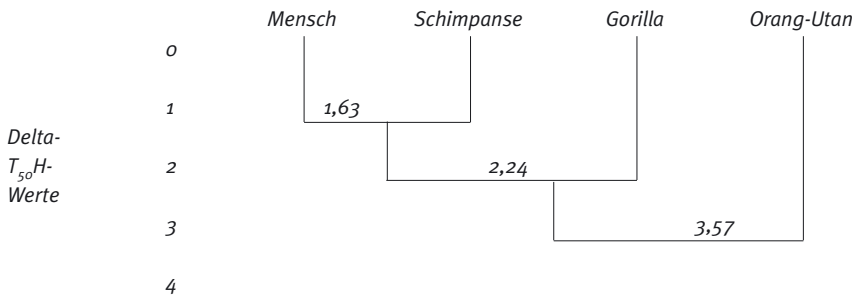
Seite 122 **D15**

- Wurzel: Verankerung im Boden, Wasser – und Nährsalzaufnahme;
- Festigungselemente: Aufrichtung in der Luft gegen die Schwerkraft;
- Leitungsbahnen: Wasser- und Nährstofftransport in der Pflanze;
- Epidermis mit Kutikula: Verdunstungsschutz;
- Spaltöffnungen: Koppelung des Gasaustausches und Wasserhaushaltes mit der Fotosynthese.

Teil E

Seite 132 **E01**

Die genetische Distanz ist vom Menschen zum Schimpansen am geringsten. Zum Gorilla ist sie etwas größer, aber fast genauso groß wie dessen Distanz zum Schimpansen. Am größten ist sie vom Menschen zum Orang-Utan, der aber fast die gleiche Distanz zu Schimpanse und Gorilla hat. Demnach bildet der Mensch mit dem Schimpansen eine Schwestergruppe. Diese bilden wiederum gemeinsam mit dem Gorilla eine Schwestergruppe zum Orang-Utan:



Seite 133 **E02**

Es ist möglich, dass der gemeinsame Vorfahre der afrikanischen Menschenaffen und der Menschen ein Knöchelgänger war und dieses Merkmal nach Abspaltung der Hominiden verloren ging.

Seite 141 **E03**

Der insgesamt kräftigere Kauapparat der robusten Vormenschen lässt darauf schließen, dass sie härtere Pflanzenteile aufschließen mussten.

Seite 142 **E04**

- a) Der Schädel von *Homo rudolfensis* zeigt deutlich größere Ähnlichkeiten mit dem von *Australopithecus africanus*.
- b) Daraus kann geschlossen werden, dass sich *Homo rudolfensis* aus *Australopithecus africanus* und nicht aus *Parathropus robustus* entwickelt hat.