

Christoph P. E. Zollikofer & Marcia S. Ponce de León

Wer sind wir? Woher kommen wir? Antworten und Fragen aus der Paläoanthropologie

(Ernst Mayr Lecture am 8. November 2005)

Sehr geehrte Damen und Herren,
Werte Mitglieder der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften,
Dear fellows of the Wissenschaftskolleg!

Wer sind wir? Woher kommen wir? – Seit Charles Darwins Evolutionstheorie gibt es auf diese beiden Grundfragen des Menschseins und der Menschwerdung eine erstaunlich einfache biologische Antwort: wir sind die Nachfahren von aufrecht gehenden, großhirnigen, afrikanischen Menschenaffen (Abb. 1). So einfach diese Antwort ist, so schwierig ist es, die tiefer liegenden Fragen, die sie aufwirft, im Detail zu beantworten. Welche evolutiven Prozesse haben dazu geführt, daß im Laufe von etwa 8 Millionen Jahren aus einer durchschnittlichen Population von afrikanischen Menschenaffen eine Vielfalt von Hominiden-Arten entstand, die alle auf zwei Beinen gingen und mit einem Gehirn ausgestattet waren, das eine in der gesamten Geschichte der Lebewesen bisher nie dagewesene Komplexität von Verhaltensweisen ermöglichte?

Wie wir im Verlauf unserer Ausführungen zeigen werden, können heute mit neuen Fossilfunden, neuen Untersuchungsmethoden und neuen theoretischen Konzepten Teilaspekte dieser Fragen mit großer Genauigkeit beantwortet werden. Gleichzeitig ist die Erforschung der menschlichen Stammesgeschichte aber auch die Geschichte des steten Abschiednehmens von lieb gewordenen Vorstellungen über die Menschwerdung. Dies läßt sich am besten veranschaulichen, indem wir einen „klassischen“ Stammbaum des Menschengeschlechts – die berühmte Haeckelsche Eiche – mit einem Verzweigungsschema vergleichen, das eher unseren heutigen Vorstellungen über den Gang und die Struktur der menschlichen Evolution entspricht (Abb. 2). Haeckels Eiche verkörpert die Idee der *Anagenese*, einer letztlich zielgerichteten Evolution, die von niederen, affenartigen Vorfahrenformen zum Menschen *hinauf* führt. Nicht von ungefähr ist das heutige Menschengeschlecht bei Haeckel in der

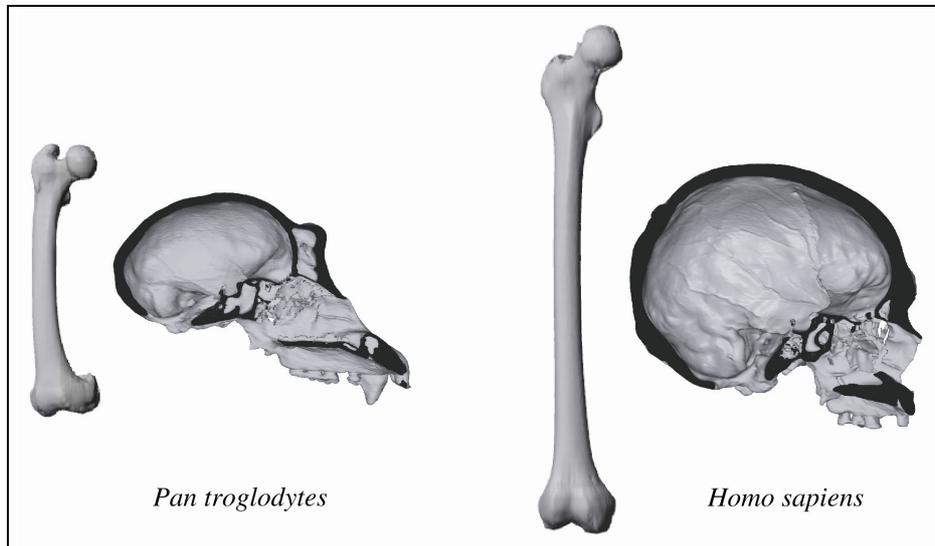


Abbildung 1

Schädel und Oberschenkelknochen von Schimpanse und Mensch (computertomographische Rekonstruktionen). Man vergleiche die Größenverhältnisse zwischen Schädel und Langknochen, sowie die Form- und Größenverhältnisse zwischen Hirn- und Gesichtsschädel bei beiden Arten.

Kronenregion der Eiche angesiedelt.¹ Der Stammbaum entspricht also der Idee des evolutiven Fortschritts, die Zeit verläuft vertikal, von unten nach oben. Im heutigen Verzweigungsschema verläuft die Zeitachse horizontal, und es lassen sich einigermaßen genaue Zeitmarken setzen. Die Zeit schreitet zwar immer noch irreversibel fort, aber der Prozeß der Evolution ist nicht mehr mit der Idee des Fortschritts verbunden. Unsere heutige Sicht der Evolution unterscheidet sich auch in struktureller Hinsicht von der Haeckels. Während vom mächtigen Eichenstamm gelegentlich Äste in malerisch-geordneter Art und Weise abzweigen, ist das heutige Verzweigungsschema eher mit einem wuchernden Buschwerk zu vergleichen, das in alle Richtungen ausschlägt, und bei dem sich kaum zwischen Haupt- und Seitentrieben unterscheiden läßt. Bei diesem als *Cladogenese* bezeichneten evolutiven Wuchern erscheint der moderne Mensch nicht mehr an ausgezeichneter Stelle, sondern als zufällig letzter Überlebender der einst weit verzweigten Gruppe der Hominiden.

¹ Diese evolutionsbiologische Version der Vorstellung des Menschen als Krone der Schöpfung ist insofern verhängnisvoll, als der Gedanke der Anagenese, angewandt auf *Homo sapiens* selbst, direkt zur biologisch begründeten Unterscheidung zwischen höheren und niedrigeren „Menschenrassen“ führte.

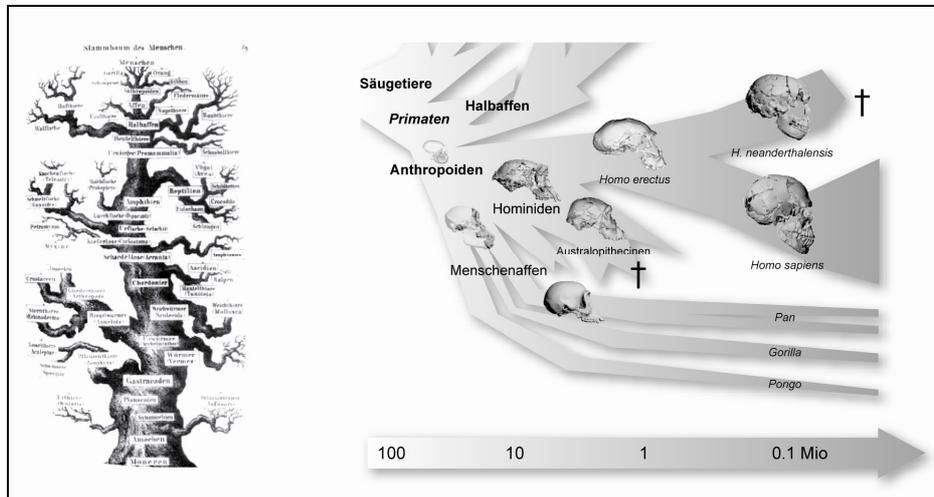


Abbildung 2

Stammbaum versus Stammbusch. Haeckels Eiche verkörpert die Idee der Anagenese, der zeitgenössische Busch die Idee der Cladogenese der Hominiden. Nach heutiger Sicht ist die Evolution des Menschen nicht als Resultat eines stetig fortschreitenden „Hominisierung“-Prozesses zu betrachten, sondern als historische Kontingenz, dank der wir heute als einzige Überlebende einer einst weit gefächerten evolutiven Radiation dastehen. Die moderne, logarithmische Zeitachse verläuft horizontal; die Zeitmarken sind als vorläufige beste Schätzungen zu verstehen. Der Eindruck, daß sich die evolutiven Ereignisse in Richtung Gegenwart beschleunigt haben, kommt daher, daß, je weiter wir in der Zeit zurückgehen, desto weniger Quellenmaterial zur Verfügung steht, das den genauen Verlauf der Evolution dokumentiert.

Während unseres nun folgenden Parcours entlang der evolutiven Zeitachse werden wir an einigen Stationen Zwischenhalt einlegen, um die eingangs gestellten Fragen aus verschiedenen Perspektiven angehen zu können. Die erste große Herausforderung bei diesem Unterfangen besteht darin, daß wir unser eigentliches Untersuchungsobjekt, den Prozeß der menschlichen Evolution, nicht mehr direkt beobachten können. Das liegt daran, daß wir lediglich die Muster beobachten können, die evolutive Prozesse uns hinterlassen haben. Wir müssen also aus den Wirkungen auf die Ursachen zurück schließen. Wie der alte Begriff der *Naturgeschichte* treffend ausdrückt, ist Evolutionswissenschaft letztlich eine historische Wissenschaft, die Prozesse zu rekonstruieren versucht, die in der Zeit abgelaufen sind. Als Paläoanthropologen sind wir somit zu intensivem Quellenstudium angehalten, wobei die Quellen natürlich vor allem Fossilfunde sind, und wir aus dem entlang der Zeitachse recht spärlich gestreuten Quellenmaterial den Gang der menschlichen Evolution zu rekonstruieren versuchen müssen.

Das Unterfangen, biologische Prozesse aus überlieferten Mustern herzuleiten, ist komplex. Physikalisch betrachtet, ist die Zeit eine eindimensionale Größe. Als Evolutionsbiologen müssen wir aber drei verschiedene Zeitskalen in Betracht ziehen, entlang derer biologisch relevante Prozesse stattfinden. Neben der bereits erwähnten Zeitskala der *Phylogenie*, die die Entstehung und das Aussterben von Arten in Jahrmillionen mißt, hat jede Art ihre eigene Zeitskala der *Ontogenie*, entlang derer sich die Entwicklungsprozesse und die Lebensgeschichte einzelner Individuen abspielen. Wie wir im Verlauf unserer Ausführungen sehen werden, besteht ein enger Zusammenhang zwischen Phylogenie und Ontogenie, das heißt, zwischen der Entstehung neuer Arten und der Entstehung neuer Entwicklungsprogramme, die den Bauplan einer Art bestimmen. Eine dritte Zeitskala ist die *Diagenese*. Sie umfaßt alle biologischen, geochemischen und geologischen Prozesse, die vom Zeitpunkt des Todes eines Individuums bis zu dessen Auffinden als Fossil ablaufen. Während sich diese Prozesse theoretisch klar voneinander unterscheiden lassen, erscheinen ihre Effekte in jedem konkreten Fossilfund übereinander gelagert, da sie sich ja entlang ein und derselben physikalischen Zeitachse akkumuliert haben. Die eigentliche Herausforderung besteht nun darin, die Zeit virtuell zurückzuspulen, um im morphologischen Gesamtmuster die jeweiligen Anteile ausfindig zu machen, die sich auf diagenetische, ontogenetische und phylogenetische Prozesse zurückführen lassen. Erst danach wird es möglich sein, Rückschlüsse auf den Verlauf der jeweiligen Prozesse ziehen zu können.

Wir werden nun jeder dieser Zeitachsen unsere Aufmerksamkeit zuwenden. Dabei stellen wir folgende Fragen:

- Wie läßt sich aus einigen wenigen deformierten Fossilfragmenten die Morphologie eines fossilen Individuums zum Zeitpunkt seines Todes rekonstruieren? Mit andern Worten: wie können Prozesse der Diagenese rückgängig gemacht werden?
- Wie lassen sich Prozesse der Individualentwicklung einer fossilen Menschenart rekonstruieren, und was sagen sie uns über die Evolution dieser Art aus?
- Wie lassen sich Prozesse der Phylogenese der Hominiden rekonstruieren, und welche Beziehung besteht dabei zwischen internen, biologischen Veränderungen, und externen, umweltbedingten Veränderungen?

Diese Fragen erörtern wir anhand von drei „Fundamentalereignissen“ der Homini-denevolution, die im Zentrum unserer täglichen Forschungsarbeit stehen. Wenn wir als einzige Überlebende der Gruppe der Hominiden rückwärts entlang der Zeitachse schauen, sind dies folgende Ereignisse:

- die Entstehung der letzten beiden Vertreter der Gattung *Homo*: *H. sapiens* und *H. neanderthalensis*
- die Entstehung der Gattung *Homo*
- die Entstehung der Hominiden

Moderne Methoden der Paläoanthropologie

Bevor wir uns diesen Ereignissen und ihrer Beziehung zu den drei Zeitskalen zuwenden, werfen wir einen Blick auf die wissenschaftlichen Methoden, die wir in der modernen Paläoanthropologie zu deren Erforschung verwenden. Die Herstellung und der intensive Gebrauch von Werkzeugen ist ein typisch menschliches Merkmal und somit auch ein Charakteristikum jeglicher wissenschaftlichen Tätigkeit. Dabei trägt die Entwicklung und Anwendung neuer wissenschaftlicher Werkzeuge theoretischer und praktischer Natur – das heißt neuer Methoden, Technologien und Theorien – in gleichem Masse zur wissenschaftlichen Innovation bei. Die Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts sind zweifelsohne die Computer- und die Gentechnologie; hinter beiden Technologien stehen gemeinsame Konzepte der Informationstheorie, die sich für die Evolutionsbiologie im Allgemeinen als auch für die Erforschung der menschlichen Evolution im Besonderen als ausgesprochen fruchtbar erweisen.

Die Molekulargenetik zeigt uns, daß unser Genom eine zeitliche Tiefenstruktur hat, die sich quantifizieren läßt. Die DNA als „Fossil in uns“ ergibt ein recht präzises Bild der letzten 100.000 Jahre der menschlichen Evolution, während die Analyse fossiler DNA einen punktuellen Einblick in die Verwandtschaftsbeziehungen mit unseren evolutionären Cousins, den Neandertalern, gibt. Aus physikochemischen Gründen hat das in der DNA konservierte phylogenetische Signal aber nur eine beschränkte Lebensdauer, die auch unter den besten Fossilisierungsbedingungen bei etwa 50.000 Jahren liegt. Sobald wir einen weiteren evolutionären Zeithorizont ins Auge fassen, sind wir deshalb weiterhin auf Fossilfunde und deren vergleichend-morphologische Analyse angewiesen. Hominiden-Fossilien sind allerdings ausgesprochen selten, und die wenigen vorhandenen Exemplare sind meist nur in einigen Fragmenten überliefert. Wie können wir nun aus dem wenigen vorhandenen Material ein Maximum an Information gewinnen?

Hier kommt die computerunterstützte Paläoanthropologie (Computer-Assisted Palaeoanthropology, CAP) zum Einsatz, die wir im Lauf der letzten 15 Jahre als neues Forschungsgebiet etabliert haben. CAP besteht im wesentlichen aus einer Kombination von vier Methodenkomplexen (Abb. 3):

1. Methoden der biomedizinischen Bildgebung, vor allem die Computertomographie (CT), werden zur nicht-invasiven Erfassung von digitalen Volumendaten von Fossilien benötigt.
2. Methoden der Computergraphik erlauben es, die Präparation und Rekonstruktion von deformierten und fragmentierten Fossilien in der virtuellen Realität auszuführen, das heißt, die zerstörerische Wirkung von diagenetischen Prozessen am Bildschirm rückgängig zu machen.
3. Methoden des Rapid Prototyping (RP) werden benötigt, um virtuell rekonstruierte Fossilien wieder in die physische Realität überzuführen, und zwar in Form von Kunstharz-Modellen.

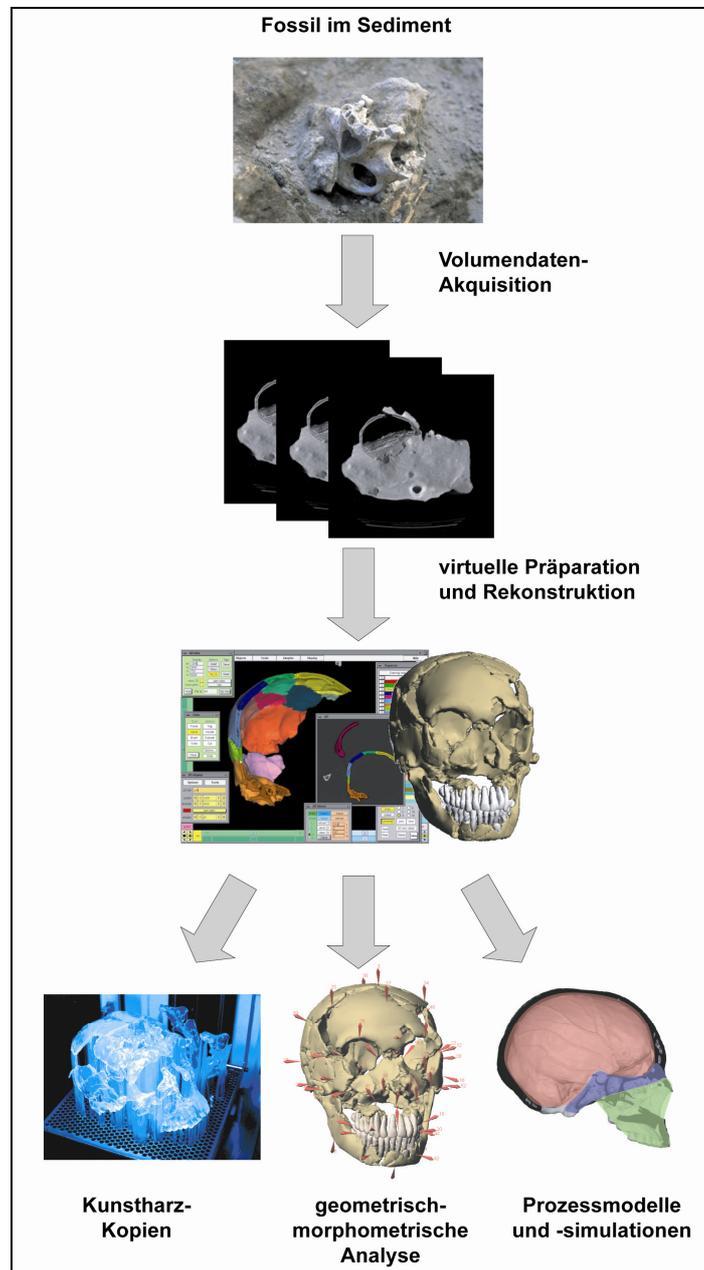


Abbildung 3
(Legende auf gegenüberliegender Seite)

4. Methoden der geometrisch-morphometrischen Analyse ermöglichen es schließlich, die dreidimensionale Morphologie der rekonstruierten Fossilien quantitativ-vergleichend zu erfassen, um komplexe Muster der Formvariabilität und Formveränderung zu analysieren und damit Rückschlüsse auf die zugrunde liegenden ontogenetischen und phylogenetischen Prozesse ziehen zu können.

Diagenese

Bevor Fossilfunde einer eigentlichen biologischen Analyse zugeführt werden können, müssen wir versuchen, möglichst alle Störsignale, die von diagenetischen Prozessen herrühren, zu eliminieren, also die Morphologie des fossilen Individuums zum Zeitpunkt seines Todes zu rekonstruieren. Wie bereits angedeutet, besteht eine der Grundideen der computerunterstützten Paläoanthropologie darin, sämtliche Arbeiten, die typischerweise während der Freilegung und Rekonstruktion eines Hominiden-Fossils anfallen, von der physischen Realität in die virtuelle Realität zu verlegen, das heißt, sie mit Werkzeugen der Computergraphik an digitalen Replikaten der Originalfossilien vollkommen nicht-invasiv auszuführen. Dies bietet gegenüber traditionellen Methoden der physischen Bearbeitung eine ganze Reihe von Vorteilen. Aufgrund von computertomographischen Bilddaten lassen sich nicht nur die Außenflächen, sondern auch die Innenstrukturen von Fossilien und des Sediments, in das sie eingebettet sind, visualisieren. Damit eröffnet sich ein weites Feld der „Fossil Diagnostik“ anhand bisher unzugänglicher morphologischer Merkmale, aber auch der taphonomischen Diagnostik, das heißt der Analyse der das Fossil umgebenden Sedimentschichten. Nach dieser visuellen Inspektion kann nun mit Hilfe eines „elektronischen Mei-

Zu Abbildung 3: Computerunterstützte Paläoanthropologie (CAP) besteht im wesentlichen aus drei Schritten. (1) Mittels Computertomographie (CT) werden digitale Volumendaten von noch in Sediment eingebetteten Fossilfunden aufgenommen. Alle folgenden Bearbeitungs- und Analyseschritte können nicht-invasiv ausgeführt werden, und zwar mit Computergraphik-Werkzeugen. (2) Die virtuelle Präparation der Fossilien erfolgt mit Datensegmentationswerkzeugen. Die segmentierten Volumendaten können anschließend in dreidimensionale geometrische Objekt-Repräsentationen übergeführt werden. Computermodelle von taphonomischen Prozessen werden eingesetzt, um deformierte Fossilien zu entzerren. Die so erhaltenen, digital restaurierten Fossilfragmente bilden die Grundlage für die interaktive virtuelle Rekonstruktion von Fossilien an einem Graphik-Computer. (3) In der virtuellen Realität lassen sich die rekonstruierten Fossilien in allen Dimensionen des Raumes vermessen. Methoden der geometrischen Morphometrie erlauben die vergleichende Analyse von komplexen Mustern der Formvariabilität, die Rückschlüsse auf evolutionäre und entwicklungsbiologische Prozesse erlauben. Die Resultate solcher Untersuchungen können mit Prozeßmodellen und Computersimulationen der Formvariabilität verglichen werden. Schließlich können die virtuellen Rekonstruktionen mittels Rapid Prototyping-Technologie in reale Kunstharz-Replikat überführt werden. Damit ist der Kreis von der Realität zur virtuellen Realität und zurück zur realen Virtualität geschlossen.

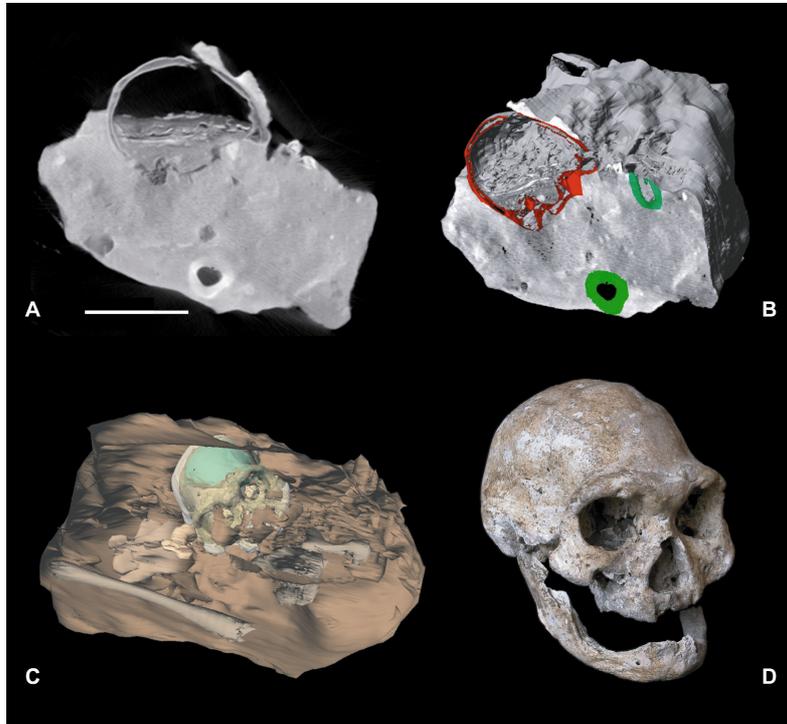


Abbildung 4

Virtuelle Präparation eines frühen Vertreters der Gattung *Homo* von der Fundstelle Dmanisi in Georgien. A: Ein computertomographisches Schnittbild durch den noch im Sediment eingebetteten Neufund (Maßstab: 10 cm). Man beachte die partielle Füllung des Hirnschädels mit geschichtetem Sediment und die vielen Langknochen von großen Wiederkäuern, die gleichzeitig mit dem Hominidenschädel eingebettet wurden. Beides deutet auf eine rasche, aber ruhig verlaufene Sedimentation ohne nachfolgende geologische Störungen hin. B: Elektronische Segmentation der Volumendaten (Farben bezeichnen verschiedene Fossilien; rot: Hominidenschädel). C: Visualisierung der virtuell präparierten Fossilien. D: Der fertig präparierte Schädel mit der dazugehörigen Mandibel. Dies ist das erste bisher bekannte zahnlose Individuum aus der frühen Fossilgeschichte der Menschen (s. Text weiter unten).

ßels“ Gestein vom virtuellen Fossil wegpräpariert werden, ohne den Originalfund zu gefährden. Wird zuviel wegpräpariert, ist das wertvolle Original nicht endgültig beschädigt, sondern der Prozeß kann einfach in verbesserter Form wiederholt werden. In Abbildung 4 wird im Detail gezeigt, wie diese Methodik bei der taphonomischen Analyse und virtuellen Präparation eines frühen Vertreters der Gattung *Homo* von der Fundstelle Dmanisi (Georgien) zur Anwendung kommt – auf die evolutionsbiologischen Fragestellungen, die dieses Fossil aufwirft, werden wir später zurückkommen.

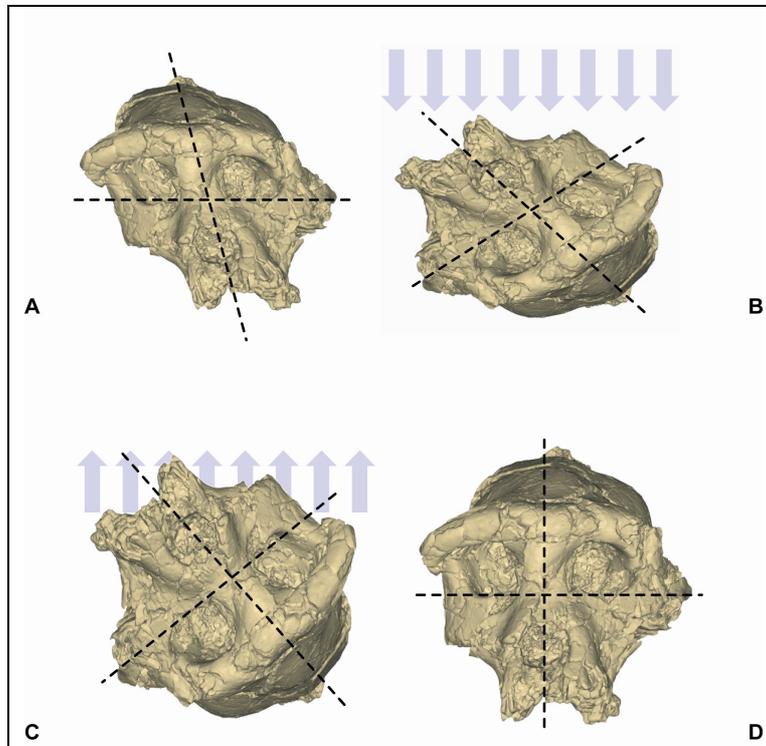


Abbildung 5

Virtuelle Entzerrung des Schädels von *Sahelanthropus tchadensis*. A: Der Schädel ist beinahe vollständig erhalten, aber durch den Sedimentationsdruck stark verformt. Das Ausmaß der Kompression kann aus der systematischen Scherung von ursprünglich senkrecht zueinander stehenden anatomischen Achsen geschätzt werden. B: Orientierung des Schädels in der vermuteten Einbettungslage im Sediment. C: Entzerrung durch Dekompression. D: Zurückdrehen in die anatomische Normallage.

Allerdings sind Hominiden-Fossilien selten so perfekt erhalten, wie diejenigen aus Dmanisi. Viele Fundstücke sind stark deformiert. Das Erkennen und Korrigieren von Fossildeformationen ist mithilfe quantitativ-geometrischer Verfahren möglich: Am Computer können virtuelle Fossilisationsszenarien durchgespielt werden, die den Jetztzustand des Fossils erzeugen; läßt man sie im Computer zeitlich „rückwärts laufen“, kann das Fossil zu seiner Originalform entzerrt werden. Ein Beispiel für die virtuelle Entzerrung eines Fossilfundes findet sich in Abbildung 5. Es handelt sich hier um den fast vollständig erhaltenen, aber durch den Sedimentationsdruck stark deformierten Schädel des ersten Hominiden, *Sahelanthropus tchadensis* – auf ihn werden wir gegen Schluß unserer Ausführungen zurückkommen.

In den allermeisten Fällen liegen von Hominiden-Fossilien nur vereinzelte Bruchstücke vor, die nur einen Teil der Morphologie repräsentieren. Somit gleicht die Rekonstruktion eines solchen Fossils dem Zusammensetzen eines dreidimensionalen Puzzles, bei dem ein Großteil der Stücke verloren gegangen, erodiert oder verbogen ist, und bei dem das Gesamtbild unbekannt ist. Wie wird bei einer solchen Rekonstruktion verfahren, um ein möglichst getreues Bild der Originalmorphologie zu erhalten? Hier brauchen wir eine Analogie aus der Mathematik. Bei einem Gleichungssystem, das mehr Unbekannte als Gleichungen aufweist, werden Rahmenbedingungen definiert, welche die Verhältnisse zwischen einzelnen Variablen festlegen und somit das System auf einige wenige mögliche Lösungen einengen.

Entsprechend wird die virtuelle Rekonstruktion eines Fossils nach im voraus festgelegten biologischen Kriterien geplant und ausgeführt. Bei der Positionierung der Fragmente im anatomischen Raum geht es darum, nichts in das Fossil hineinzuninterpretieren, sondern nur allgemeine anatomische Rahmenbedingungen zu verwenden, von denen man erwarten kann, daß sie allen Vertretern der Hominiden gemeinsam sind. Um die ursprüngliche räumliche Form eines Fossils möglichst korrekt zu rekonstruieren, müssen oft fehlende Teile ergänzt werden. Eine wichtige Hilfe bildet hier die Tatsache, daß der Bauplan des Wirbeltier-Skeletts grundsätzlich spiegelsymmetrisch ist. Sind Teile von der einen Körperseite erhalten, können ihre dreidimensionalen virtuellen Spiegelbilder als Platzhalter auf die Gegenseite „kopiert“ werden. Abbildung 6 zeigt die Logik der virtuellen Rekonstruktion am Beispiel des fragmentarisch erhaltenen Schädels eines Neandertaler-Kindes von der Fundstelle Devil's Tower in Gibraltar.

Sobald die Effekte diagenetischer Prozesse nach bestem Wissen korrigiert worden sind, können die am Computer erzeugten virtuellen Fossilien schließlich wieder in die physische Realität zurückgebracht werden. Das technische Verfahren, das dies ermöglicht, heißt *Stereolithographie* und stammt ursprünglich aus den Ingenieurwissenschaften. Es handelt sich dabei um ein automatisiertes Modellbauverfahren, bei dem computergenerierte dreidimensionale Objekte durch Aufeinanderlagern von Materialschichten gebildet werden, bis das Objekt aus der virtuellen Realität vollständig in die „reelle Virtualität“ zurückverwandelt ist. Dies entspricht der automatisierten und verfeinerten Version der klassischen Konstruktion von Geländereiefs aus übereinander gestapelten Kartonschichten. Während der Fossilrekonstruktion stellen RP-Verfahren ein wichtiges Hilfsmittel dar, um komplexe Rekonstruktionsaufgaben, die auf dem Bildschirm visuell ausgeführt wurden, mit physischen Modellen zu überprüfen. Zudem steht damit der Paläoanthropologie ein nicht-invasives Abgußverfahren zur Verfügung.

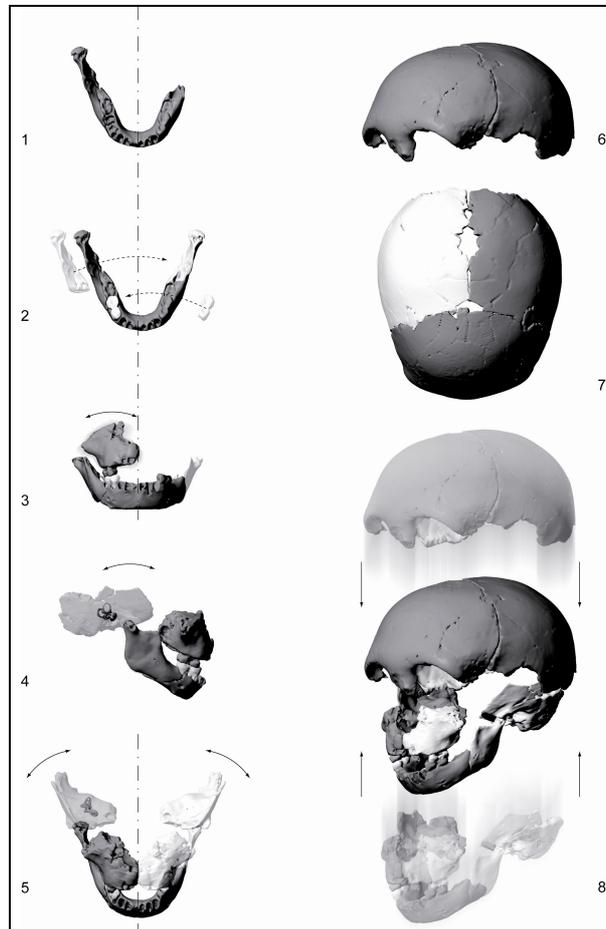


Abbildung 6

Virtuelle Rekonstruktion des fragmentarisch erhaltenen Schädels eines Neandertaler-Kindes von der Fundstelle Devil's Tower, Gibraltar. Nur fünf Originalfragmente sind erhalten (dunkel): Teile des Unterkiefers, des rechten Oberkiefers und Schläfenbeins, das Stirnbein und das daran anschließende linke Scheitelbein. Die virtuelle Rekonstruktion umfasst 8 Stufen. 1: Orientierung des Unterkieferfragments in der virtuellen anatomischen Mittelebene; 2: Vervollständigung des fehlenden linken Kieferastes und der linken Milchbackenzähne durch spiegelbildliche Ergänzung (weiß); 3: Erstellen des Beißkontakts zwischen den Zähnen des Unter- und Oberkiefers; Ausrichtung des Oberkiefers nach der Mittelebene; 4: Wiederherstellung des rechten Kiefergelenks durch Aufsetzen des Schläfenbeins und Ausrichtung desselben nach den anatomischen Achsen des darin enthaltenen Innenohrs; 5: spiegelbildliche Ergänzung der linken Gesichtshälfte; 6: Zusammenfügen des Stirn- und Scheitelbeins; 7: spiegelbildliche Ergänzung des rechten Scheitelbeins; 8: Zusammenfügen der unabhängigen Rekonstruktionen von Gesicht/Schädelbasis (1–5) und Schädelkapsel (6–7).

Ontogenese

Oft herrscht unter Biologen die Idee vor, daß nur ausgewachsene Individuen für die Diagnose einer fossilen Art und ihrer Position im Geäst des menschlichen Stammbuschs geeignet sind. Es mag deshalb auf den ersten Blick merkwürdig anmuten, sich mit der Individualentwicklung von bereits ausgestorbenen Hominidenarten zu befassen. Wie wir gleich sehen werden, ist das keineswegs der Fall. Ebenso herrscht die Meinung vor, daß Evolution hauptsächlich durch die allmähliche Veränderung der Umwelt angetrieben wird, an die sich Populationen im Lauf der Zeit anpassen müssen und dabei neue Arten bilden. Auch dies ist nur der halbe Teil der Wahrheit. Wenn wir nach den eigentlichen Prozessen biologischer Innovation fragen, so sehen die Sachverhalte komplexer aus. Genetische Variabilität innerhalb einer Population entsteht durch Mutation und sexuelle Reproduktion. Entscheidend ist nun, daß genetische in phänetische Variabilität, das heißt in morphologische und verhaltensbiologische Vielfalt, umgesetzt werden muss. Dies geschieht durch den Prozeß der Ontogenie. Die durch die Individualentwicklung realisierte morphologische Variabilität wird anschließend durch Prozesse der natürlichen Selektion wieder eingeschränkt. Die Phylogenie ist somit ein stetiges Wechselspiel zwischen Produktion genetischer Variabilität, deren ontogenetischer Umsetzung in morphologische Variabilität und deren Reduktion durch Selektion. Wenn wir also den Entstehungsprozeß neuer Arten von Grund auf verstehen wollen, spielt die evolutionär-entwicklungsbiologische Betrachtungsweise eine entscheidende Rolle.

Wir können nun diese Gedankengänge auf eines der spannendsten Kapitel der menschlichen Evolution anwenden, nämlich die Entstehung unserer eigenen Art, *Homo sapiens*, und der unserer evolutionären Cousins, der Neandertaler², *Homo neanderthalensis*. Oft werden die Neandertaler als archaische, ans arktische Leben angepaßte Hominidenspezies angesehen, während wir selbst eher als ursprünglich tropische Spezies gelten. Allerdings ist unklar, welche Rolle die jeweiligen Umweltverhältnisse bei der evolutionären Bifurkation dieser letzten zwei Hominidenarten gespielt haben, da sich deren Verbreitungsgebiete stark überlappten. In verhaltensbiologischer Hinsicht sind sich die Arten so ähnlich, daß archäologische Fundstellen ohne Skelettfunde nur schwer der einen oder andern Art zuzuordnen sind. Dies ist

² Die Neandertaler haben ihren Namen über Umwege von Joachim Neumann (gräzisiert Neander), dem Autor des berühmten Chorals „Lobe den Herrn, den mächtigen König der Ehren“, erhalten. Das von der Düssel durchflossene pittoreske Tal, von den Romantikern zu Neumanns Ehren „Neander-Thal“ genannt, wurde durch Kalkabbau im 19. Jahrhundert vollständig zerstört, lieferte dabei aber 1856 das Typus-Exemplar des Neandertalers. – Das erste Neandertaler-Fossil überhaupt wurde allerdings bereits in vor-darwinscher Zeit, nämlich 1830, durch Jean-Philippe Schmerling in der Grotte d’Engis in der Nähe von Liège gefunden. Da es sich um einen Kinderschädel handelte, wurde das Fossil erst 100 Jahre später als Neandertaler erkannt.

nicht weiter erstaunlich, wenn wir in Betracht ziehen, daß sich beide Arten durch extrem große Gehirne (ca. 1.200–1.500 ccm) und entsprechend komplexe Verhaltensweisen und große kulturelle Vielfalt auszeichneten. So ist es sinnvoll, *H. neanderthalensis* und *H. sapiens* als zwei moderne Menschenarten anzusehen, von denen die eine erst vor kurzem (wohl vor etwa 25.000 Jahren) ausgestorben ist. Hier werden wir uns also nicht mit der klassischen Frage befassen, inwiefern die charakteristische Neandertaler-Morphologie eine Adaptation an das Leben in der eiszeitlichen Kälte darstellt, sondern wir fragen, welche evolutiven Veränderungen in der Individualentwicklung unserer gemeinsamen Vorfahren zur Dichotomie Mensch-Neandertaler geführt haben.

Diese Frage läßt sich deshalb gut untersuchen, weil etwa die Hälfte aller bekannten Neandertaler-Fossilien von jugendlichen Individuen stammt. Aus der diagenetischen Perspektive betrachtet, sind Fossilfunde von Kleinkindern äußerst unwahrscheinlich, da die noch nicht vollständig verknöcherten Skelettelemente unter natürlichen Bedingungen nur schlecht fossilisieren und rasch erodieren. Wir müssen also davon ausgehen, daß wir die große Zahl von Neandertalerkinderfossilien dem Umstand zu verdanken haben, daß es sich dabei um Grabfunde handelt.

Unter Verwendung der eben dargestellten virtuellen Rekonstruktionswerkzeuge konnten wir im Lauf der vergangenen Jahre eine ontogenetische Serie von Neandertalerschädeln zusammenstellen, welche die Individualentwicklung von der Geburt bis zum Erwachsenen dokumentiert. Nun galt es, die Formveränderung des Neandertalerschädels während der Entwicklung mit derjenigen unserer eigenen Art zu vergleichen. Dabei kamen Methoden der geometrisch-morphometrischen Analyse zur Anwendung, deren Grundkonzepte hier kurz erläutert werden sollen. Während in der klassischen Morphometrie Distanz- und Winkelmasse zwischen anatomischen Fixpunkten (sogenannten Landmarken) auf dem Schädel gemessen werden, basiert die geometrische Morphometrie auf der Messung der dreidimensionalen Koordinaten der gesamten Landmarken-Konstellation. Jede Schädelform wird also als Liste von Landmarken-Koordinaten quantifiziert. Diese wiederum kann als multidimensionaler Punkt in einem abstrakten Gestaltraum dargestellt werden. Das Entscheidende ist, daß jeder Punkt in diesem Gestaltraum einer genau definierten physischen Schädelform entspricht, und jeder Trend im Gestaltraum einem genau definierten Muster der dreidimensionalen Veränderung der Schädelform.

Die Ergebnisse dieser Formanalysen sind in Abbildung 7 dargestellt und können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Mensch und Neandertaler bilden morphologisch klar getrennte Gruppen.
2. Die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen sind unabhängig vom Individualalter, das heißt bereits im Jugendalter etwa gleich groß wie im Erwachsenenalter.
3. Beide Gruppen entwickeln sich entlang paralleler Trajektorien durch den Gestaltraum, wobei das Neandertaler-Trajektorium etwas länger ist.

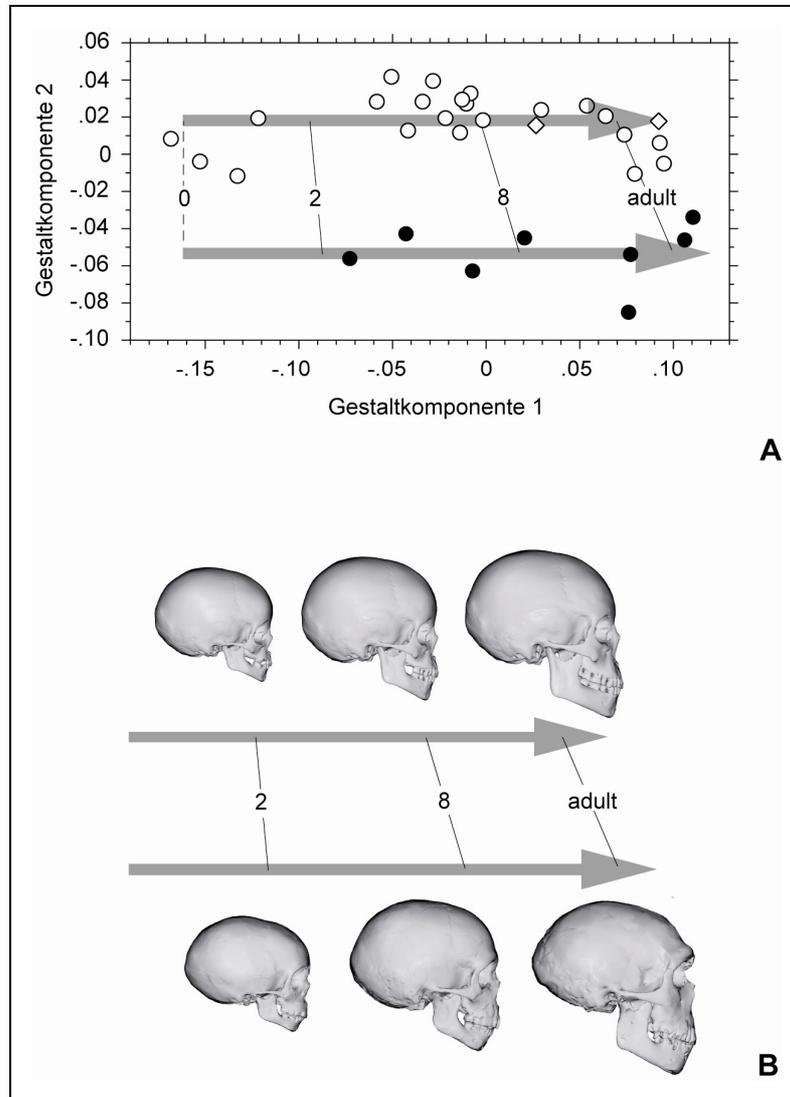


Abbildung 7

Geometrisch-morphometrische Analyse der Schädelentwicklung beim Neandertaler und beim modernen Menschen. A: Jeder Punkt im Gestaltraum entspricht der dreidimensionalen Schädelform eines Individuums (schwarze Punkte: *Homo neanderthalensis*; Kreise: *Homo sapiens*). Während der Ontogenese „wandern“ die zwei Arten entlang paralleler, aber verschieden langer Trajektorien durch den Gestaltraum (Zahlen entsprechen Lebensjahren). B: Virtuelle „mittlere“ Schädelformen von Neandertalern und modernen Menschen im Alter von 2 und 8 Jahren und als Erwachsene.

Rückübersetzt in die Sprache der evolutionären Entwicklungsbiologie bedeutet dies, daß die wesentlichen Unterschiede zwischen Mensch und Neandertaler bereits zum Zeitpunkt der Geburt vorhanden, mithin also bereits vorgeburtlich festgelegt waren. Ferner bedeuten die parallelen Entwicklungstrajektorien, daß beide Gruppen dasselbe nachgeburtliche Entwicklungsprogramm durchlaufen. Die unterschiedliche Länge der Trajektorien bedeutet schließlich, daß sich die zwei Gruppen in der nachgeburtlichen Entwicklungsintensität unterscheiden, wobei wohl beim modernen Menschen das Trajektorium evolutiv verkürzt wurde. Ausgehend von diesen Entwicklungsmustern können wir nun die entscheidende prozeßorientierte Frage stellen: Was sind die wichtigsten entwicklungsbiologischen Modifikationen, die der evolutiven Aufspaltung unseres gemeinsamen Vorfahrs in *H. neanderthalensis* und *H. sapiens* zugrunde liegen? Offensichtlich sind es genetische Innovationen im vorgeburtlichen Entwicklungsprogramm, die für den entscheidenden Unterschied verantwortlich sind, während die postnatale Entwicklung vergleichsweise konservativ verläuft und höchstwahrscheinlich vom gemeinsamen Vorfahren übernommen wurde. Wir gehen davon aus, daß die entsprechenden Mutationen im Genom relativ geringfügig waren, aber an strategisch entscheidender Stelle erfolgten. Je früher nämlich während der Entwicklung und je höher in der Hierarchie des genetischen Regelwerks eine Veränderung erfolgt, desto größer ist der zu erwartende Einfluß auf das morphologische Resultat.

Die morphologischen Unterschiede zwischen Neandertalern und *Homo sapiens* lassen sich also vielleicht alle auf eine einzige entwicklungsbiologische Ursache zurückführen. Jedenfalls zeigen unsere Untersuchungen, daß wir die Morphologie dieser zwei Geschwisterarten als Ganzes verstehen müssen, nicht als Akkumulation von Einzelmerkmalen. Diese Idee ist in Abbildung 8 visuell umgesetzt, in der wir computertomographische Datensätze von modernen Menschenkindern benützen, um mittels „Morphing“ das Gesicht eines Neandertalerkindes zu rekonstruieren.

Phylogenese

Das Beispiel der Neandertaler hat gezeigt, daß mit neuen Analysemethoden und Fragestellungen aus bereits bekannten Hominidenfossilien noch immer neue Erkenntnisse über den Gang der menschlichen Evolution gewonnen werden können. Die Erforschung von zeitlich weiter zurückliegenden Ereignissen hat in den letzten Jahren aufgrund neuer Fossilfunde große Fortschritte gemacht. Die ersten bekannten Vertreter der Gattung *Homo* sind etwa 2 Millionen Jahren alt; sie stammen aus Ostafrika, wo sie wahrscheinlich aus Australopithecinen-Vorfahren entstanden sind. Lange Zeit galt es nun als ziemlich sicher, daß *Homo erectus* die erste kosmopolitische Spezies dieser neuen Gattung darstellte. Gemäß dieser Hypothese hatte *H. erectus* den „cerebralen Rubikon“ eines Hirnvolumens von ca. 1.000 ccm überschritten, womit es ihm möglich war, den Herausforderungen einer Auswanderung aus Afrika mit

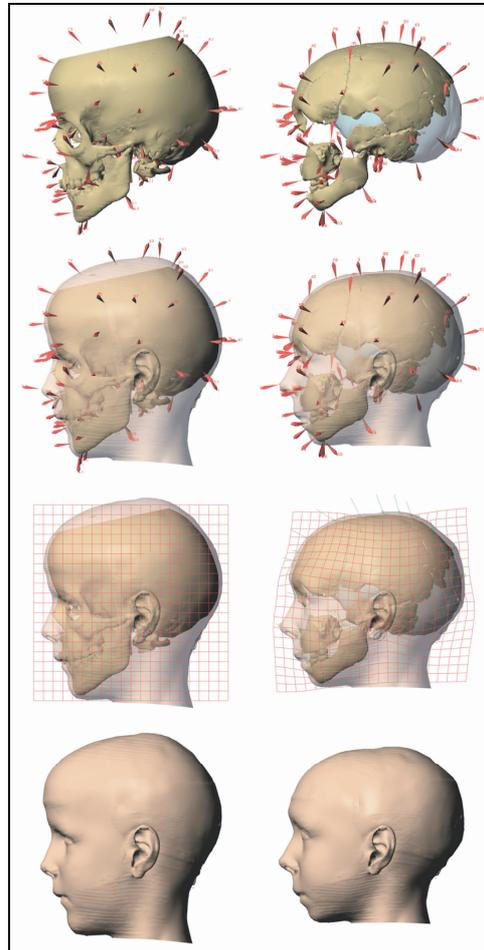


Abbildung 8

Rekonstruktion der Weichteile des Neandertalerkindes von Devil's Tower (vgl. Abb. 6). Die Artunterschiede zwischen Neandertaler und *Homo sapiens* lassen sich anhand von Weichteilrekonstruktionen oft einfacher erkennen, als am Skelett selbst. Hier werden klinische Datensätze von modernen Menschenkindern (links) kombiniert, um die Weichteile des Neandertalerkindes zu rekonstruieren. Dazu werden auf den Schädeln der Vertreter beider Spezies 75 sich jeweils entsprechende Landmarken definiert. Das Überführen der Landmarkenkonstellation des *Homo sapiens*-Schädels in diejenige des Neandertalerschädels definiert eine sogenannte Morphing-Funktion (dargestellt durch ein Deformations-Gitter). Diese läßt sich anschließend auch auf die menschlichen Weichteile anwenden, um diejenigen des Neandertalerkindes zu extrapolieren. Man beachte die typischen Neandertaler-Merkmale: ein fliehendes Kinn, ein vorstehendes Mittelgesicht („Backen“) und ein flacher, aber lang gezogener und breiter Hirschkädel.

fortgeschrittener Werkzeugkultur und entsprechend großen kognitiven Fähigkeiten zu begegnen. Dieses Bild begann sich erst um die Jahrtausendwende zu verändern, als aus der bereits erwähnten Fundstelle von Dmanisi im Süden Georgiens innert weniger Jahre die bis jetzt größte und besterhaltene Serie von frühen Vertretern der Gattung *Homo* zutage gefördert wurde. Die Einmaligkeit dieses Fundortes wurde noch dadurch erhöht, daß neben den menschlichen Fossilien auch Steinwerkzeuge sowie eine reichhaltige Fauna und Flora gefunden wurde, die über das Verhalten und die Umweltbedingungen der Hominiden detaillierte Aufschlüsse gab. Um das Paläoanthropologen-Glück noch vollständig zu machen, ließen sich die für Dmanisi charakteristischen vulkanischen Basalt- und Tuffschichten gut datieren.

Nach heutigem Erkenntnisstand handelt es sich hier um etwa 1.7 Millionen Jahre alte *Homo*-Fossilien, die am Übergang vom Pliozän zum Pleistozän lebten und wohl alle ein und derselben Paläopopulation angehörten. Das Hirnvolumen der Dmanisi-Hominiden ist unerwartet klein; es beträgt zwischen 600 und 800 ccm und liegt damit weit unter dem hypothetischen „cerebralen Rubikon“. Diese Frühmenschen stellten Werkzeuge vom Oldowan-Typ her, die bedeutend einfacher sind als die klassischen *Homo erectus*-Werkzeuge vom Acheuléen-Typ³. Ein weiteres erstaunliches Faktum ist die große morphologische Variabilität, die die Dmanisi-Individuen aufweisen (Abb. 9). Sie hat einige Anthropologen dazu geführt, die Anwesenheit von zwei oder sogar drei verschiedenen Hominidenarten zu postulieren. Unsere geometrisch-morphometrischen Analysen der Schädelkunde zeigen indessen, daß sich die Individuen letztlich in der dreidimensionalen Schädelarchitektur so ähnlich sind, daß sie klar einer einzigen Art angehören. Allerdings weisen sie individuelle morphologische Ausprägungen des oberflächlichen Knochenbaus (sogenannte Superstrukturen; siehe Abb. 9) auf, die man sonst nur von geographisch weit auseinander liegenden Populationen des frühen *Homo* aus Asien (*H. erectus*) und Afrika (*H. ergaster*) kennt.

Welche Folgerungen über den Gang der Evolution der Gattung *Homo* lassen sich nun aus diesen keineswegs den Erwartungen entsprechenden morphologischen und archäologischen Mustern ziehen? Betrachten wir noch einmal die Voraussagen der Rubikon-Hypothese im Detail. Sie besagen, daß relativ großhirnige Vertreter von *Homo erectus* mit fortgeschrittener Werkzeugtechnologie (Acheuléen) aus Afrika auswanderten. Ein solcher Auswanderungsprozeß würde eine relativ rasche Bewegung von Populationen aus Afrika bedeuten, die sich in einer entsprechend geringen morphologischen Variationsbreite der Fossilfunde außerhalb Afrikas niederschlagen sollte. Das ist aber offensichtlich nicht der Fall, womit wir ein anderes Prozeßmodell

³ Werkzeugkulturen werden oft nach dem Typus-Fundort benannt; das Oldowan nach der Olduvai-Schlucht im westafrikanischen Grabenbruch, das Acheuléen nach der Fundstelle St. Acheul in Frankreich. Die Oldowan-Werkzeuge wurden durch einfaches Abschlagen von Steinscherben von meist etwa faustgroßen Kieselsteinen gewonnen; die „Leitfossilien“ des Acheuléen sind symmetrisch geformte, tropfenförmige Faustkeile, deren Herstellung mehrere Arbeitsgänge umfasste.

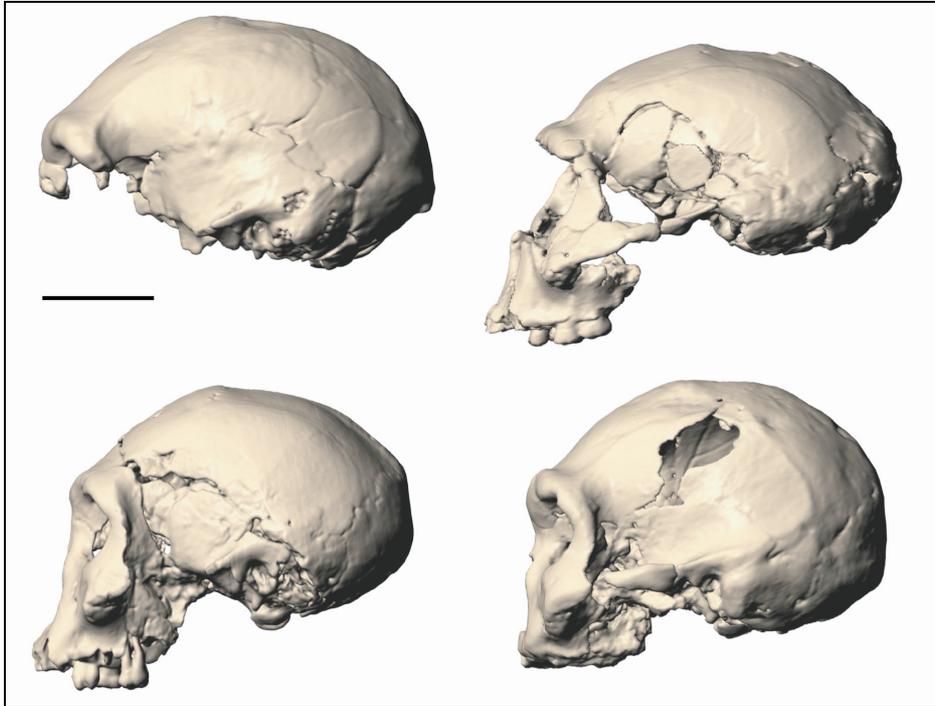


Abbildung 9

Die Dmanisi-Paläopopulation stellt die ersten bekannten Vertreter der Gattung *Homo* außerhalb Afrikas dar. Man beachte die starke interindividuelle Variation in der Schädelgröße sowie in der Ausprägung der knöchernen Superstrukturen (Überaugen- und Hinterhauptswülste). Der Maßstab entspricht 5 cm.

in Betracht ziehen müssen. Wir gehen davon aus, daß die Dmanisi-Hominiden eher durch einen Diffusionsprozeß von Afrika nach Europa gelangt sind. Ein solcher Prozeß würde bedeuten, daß sich Hominiden ohne spezielle Wanderungsabsichten innerhalb eines größeren ökologischen und biogeographischen Systems über längere Zeitspannen bewegen konnten, so daß ein morphologisch breites Spektrum von Individuen an verschiedensten Orten anzutreffen ist. Gemäß dieser Theorie erstaunt es auch wenig, daß in Dmanisi neben den Hominiden auch Strauße, Giraffen, Elefanten und andere Savannenbewohner anzutreffen sind.

Die gleichzeitige Anwesenheit von typischen Waldbewohnern wie Rotwild und Wolf zeigt uns aber auch, daß die Lebensbedingungen im plio-pleistozänen Dmanisi doch recht verschieden waren von denen in Zentral- und Ostafrika. Die höhere geographische Breite hatte sicher ausgeprägte Jahreszeiten zur Folge, so daß während der Winterperioden pflanzliche Nahrungsquellen nur beschränkt zur Verfügung standen.

Tatsächlich weisen taphonomische Untersuchungen an den fossilen Tierknochen darauf hin, daß die Dmanisi-Hominiden Fleisch als Nahrungsquelle intensiv genutzt hatten. Hier könnte auch der Schlüssel zur Erklärung eines bisher bei fossilen Hominiden unbekanntem Musters liegen. Die Präparation des in Abbildung 4 bereits vorgestellten Dmanisi-Hominiden führte nämlich zu einer Überraschung. Das Individuum, von dem sowohl Schädel als auch Unterkiefer erhalten sind, hatte zum Zeitpunkt seines Todes nur noch einen einzigen Zahn. Im klinischen Vergleich mit heute lebenden zahnlosen Menschen wies der „alte Mann von Dmanisi“ eine stark fortgeschrittenen Resorption der Kieferknochen auf. Wir müssen deshalb davon ausgehen, daß er wohl einige Jahre ohne Zähne gelebt hatte. Wie konnte er unter diesen erschwerten Bedingungen überhaupt einen harten Winter ohne weiche Nahrung (vor allem Früchte) durchstehen? Hatte er sich selbst durch geschickten Werkzeuggebrauch weiche pflanzliche Nahrung zubereitet, oder durch Zerschlagen großer Knochen kalorienreiches Mark erschlossen? Oder waren es helfende Hände, die ihm das Überleben ermöglichten? Vielleicht müssen wir auch anders fragen: Welche Motivation hatte die Hominiden-Gruppe, das Überleben dieses alten Individuums zu sichern, das selbst nicht mehr zur biologischen Reproduktion der Gruppe beitrug? War es seine Erfahrung, die zählte? Handelt es sich hier um den ersten dokumentierten Fall einer Form von „Mitgefühl“ mit einem betagten Gruppenmitglied⁴? Diese Fragen werden wir wohl nie beantworten können, aber es bleibt festzustellen, daß ein zahnloses menschliches Individuum vor 1.7 Millionen Jahren bisher in keiner paläoanthropologischen Theorie vorgesehen war.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Dmanisi-Hominiden morphologisch und technologisch ursprünglicher waren, als man das von den ersten „Auswanderern“ aus Afrika bisher erwartet hatte. Wir müssen also von der Idee des wagemutigen Hominiden-Pioniers, der sein Faustkeil-Bündel schnürte und zu neuen Ufern aufbrach, Abschied nehmen. Wahrscheinlich verlief der Prozeß der Dispersion von Hominiden aus Afrika nicht viel anders als bei sonstigen Großsäuger-Arten, nämlich im Sinne einer Diffusion entlang ökologischer Gradienten. Gleichzeitig waren aber die Verhaltensmuster der eher kleinhirnigen Dmanisi-Hominiden komplexer als erwartet. Damit stellt sich eine Frage, die wir erst am Ende unserer Ausführungen wieder aufnehmen werden: wozu brauchen wir ein großes Gehirn?

Nun gehen wir nochmals einen großen Schritt zurück entlang der evolutionären Zeitachse, und zwar bis zur Abzweigung der Hominiden von den Menschenaffenvorfahren. Dort stellt sich folgende Schlüsselfrage: sind die zwei Hauptmerkmale der Hominiden – aufrechter Gang und großes Gehirn (siehe Abb. 1) – gleichzeitig miteinander entstanden, das heißt, besteht möglicherweise ein ursächlicher Zusammenhang zwischen ihnen, oder sind sie unabhängig voneinander und zu verschiedenen Zeiten entstanden? Bis vor kurzem waren diese Hypothesen nicht direkt überprüfbar.

⁴ Das tatsächliche Lebensalters dieses Individuums läßt sich nicht bestimmen. Vielleicht lag es bei nicht viel mehr als 30 Jahren.

Es ließ sich lediglich feststellen, daß die zum ersten Mal vor etwa 4 Millionen Jahren nachgewiesenen ost- und südafrikanischen Australopithecinen über größere Hirne als Menschenaffen verfügten, und ebenso über die Fähigkeit zu zweibeiniger (terrestrischer) Fortbewegung, sozusagen als evolutionäre Ergänzung zur vierbeinigen (arborealen) Fortbewegung, die noch von den Vorfahren stammte. Die gängige Lehrmeinung war, daß der Übergang zur Bipedie eng mit der evolutiven Vergrößerung des Gehirns zusammenhing und daß dieser Prozeß der Hominisation im Osten Afrikas seinen Anfang genommen haben mußte.

Allerdings glaubten nicht alle Wissenschaftler an diese „East Side Story“ von der Wiege der Menschheit. Von vielen Kollegen während Jahren belächelt, suchte der französische Paläontologe Michel Brunet im Sahel, also im Westen Afrikas, und dazu noch in einer der unwirtlichsten Regionen unseres Planeten, nach Hominidenfossilien. Im Jahr 2001 fand sein Team mitten zwischen Sanddünen den praktisch vollständig erhaltenen Schädel eines mindestens 7 Millionen Jahre alten Hominiden, den wir bereits aus Abbildung 5 kennen. Mit dem Fund von *Sahelanthropus tchadensis* nahm die „West Side Story“ der Hominidenevolution ihren Anfang⁵. Natürlich waren vor 7 Millionen Jahren die ökologischen Verhältnisse im Sahel bedeutend angenehmer als heute. Der fossile Mega-Tschadsee dehnte sich über eine Fläche aus, die bis ins heutige Libyen reichte. Seine ständig sich verändernden Uferzonen waren mit Galeriewäldern bestanden, und das Hinterland bot einen Vielfalt kleinräumiger Ökosysteme, ähnlich dem heutigen Okavango-Delta, wo sich dichte Sumpfwälder mit savannenartigen Flecken abwechseln. In dieser vielfältigen und variablen Umwelt fand aller Wahrscheinlichkeit nach die Evolution der ersten Hominiden statt.

Als wir den Schädel von *Sahelanthropus tchadensis* anlässlich der computertomographischen Untersuchung zum ersten Mal in den Händen hielten, wurden wir uns seiner eigenartigen Morphologie erst richtig bewußt. Während der Hirnschädel dem eines Menschenaffen gleicht, ist der Gesichtsschädel verblüffend ähnlich zu dem von Australopithecinen-Individuen, die geologisch nur halb so alt sind. Hätte man diese beiden Schädelteile unabhängig voneinander gefunden, hätte wahrscheinlich kaum ein Paläoanthropologe geglaubt, daß ein so „modernes“ Gesicht an einen solch „archaischen“ Hirnschädel angehaftet war. Damit stellen sich folgende Fragen: Handelt es sich bei *Sahelanthropus* um einen fossilen Menschenaffen mit etwas spezieller Morphologie, oder handelt es sich tatsächlich um einen der ersten Hominiden?

Um diese Frage abzuklären, mußten wir den arg deformierten und fragmentierten Schädel zuerst virtuell rekonstruieren. Die digitale Erfassung von Volumendaten erfolgte mittels industrieller Computertomographie, da medizinische Computertomographen sich als zu schwach erwiesen, das stark mineralisierte Fossil zu durchstrahlen. Nach der in Abbildung 5 dargestellten virtuellen Entzerrung folgte das

⁵ Der unerwartete Fund veranlaßte einen Paläoanthropologen zur ironischen Bemerkung, daß halt bis anhin die Suche nach Hominidenfossilien eher nach dem Prinzip des Betrunkenen erfolgte, der den verlorenen Schlüssel unter der Straßenlaterne sucht ...

elektronische Zerlegen des Schädels in etwa hundert Einzelfragmente, die dann am Computerbildschirm in monatelanger Kleinarbeit in ihre korrekte anatomische Lage gebracht und zusammengefügt wurden (Abb. 10 A). Die virtuelle Rekonstruktion wurde von jedem von uns unabhängig voneinander ausgeführt und jeweils nach verschiedenen Rekonstruktionskriterien wiederholt, so daß wir am Schluß vier Rekonstruktionsvarianten des Schädels erhielten. Jetzt konnten wir die Schlüsselfrage stellen: Hominid oder Hominoid (Menschenaffenartiger)? Da das menschliche Auge beim Vergleich von dreidimensionalen Schädelformen überfordert ist, kamen wieder die Methoden der geometrisch-morphometrischen Analyse zur Anwendung, um diese Frage abzuklären. Wir bestimmten die dreidimensionalen Koordinaten von 75 anatomischen Landmarken auf dem Schädel von *Sahelanthropus* und ebenso auf den Schädeln von fossilen Hominiden, modernen Menschen und Menschenaffen. Dann werteten wir diese Daten im Gestaltraum aus. Die Resultate dieser Analysen sind in Abbildung 10 B dargestellt.

Auf den ersten Blick wird klar, daß *Sahelanthropus* zu den Hominiden gehört, von denen die Menschenaffen klar morphologisch getrennt sind. Um ganz sicher zu gehen, daß auf diesen Befund Verlaß ist, führten wir noch folgendes *experimentum crucis* aus: Wir versuchten, den Schädel von *Sahelanthropus* aus seinen Einzelteilen dergestalt zu rekonstruieren, daß seine Morphologie der nächstmöglichen Schädelform eines Menschenaffen entsprach. Dabei mußten wir feststellen, daß das physisch nicht möglich ist. Entweder überlappen sich Fossilfragmente, oder der anatomische Zusammenhang zwischen ihnen wird zerstört. Damit war klar, daß *Sahelanthropus* zu den Hominiden gehört.

Was bedeutet dies nun in evolutionsbiologischen Begriffen? Wenn wir den *Sahelanthropus*-Schädel und einen Schimpansenschädel in eine natürliche horizontale Lage bringen, fällt sofort auf, daß das Hinterhauptloch, durch welches das Rückenmark aus der Schädelbasis austritt und um das herum die Wirbelsäule ansetzt, beim Schimpansen gegen hinten, bei *Sahelanthropus* aber gegen unten gerichtet ist (Abb. 10 C). Mithin war also die Wirbelsäule bei *Sahelanthropus* bei normaler Kopfhaltung vertikal ausgerichtet, ein klares Indiz für den aufrechten Gang. Daraus können wir schließen, daß der zweibeinige Gang das evolutiv erste und damit entscheidende Hominiden-Merkmal war, während die Vergrößerung des Hirnvolumens eine spätere evolutionäre Errungenschaft zu sein scheint. Damit wird auch klar, daß Zweibeinigkeit kein großes Gehirn voraussetzt, aber es bedarf weiterer Forschungen, um herauszufinden, ob Zweibeinigkeit eine notwendige Voraussetzung für die Evolution eines großen Gehirns ist, oder ob es sich dabei um einen unabhängigen evolutionären Prozeß handelt.

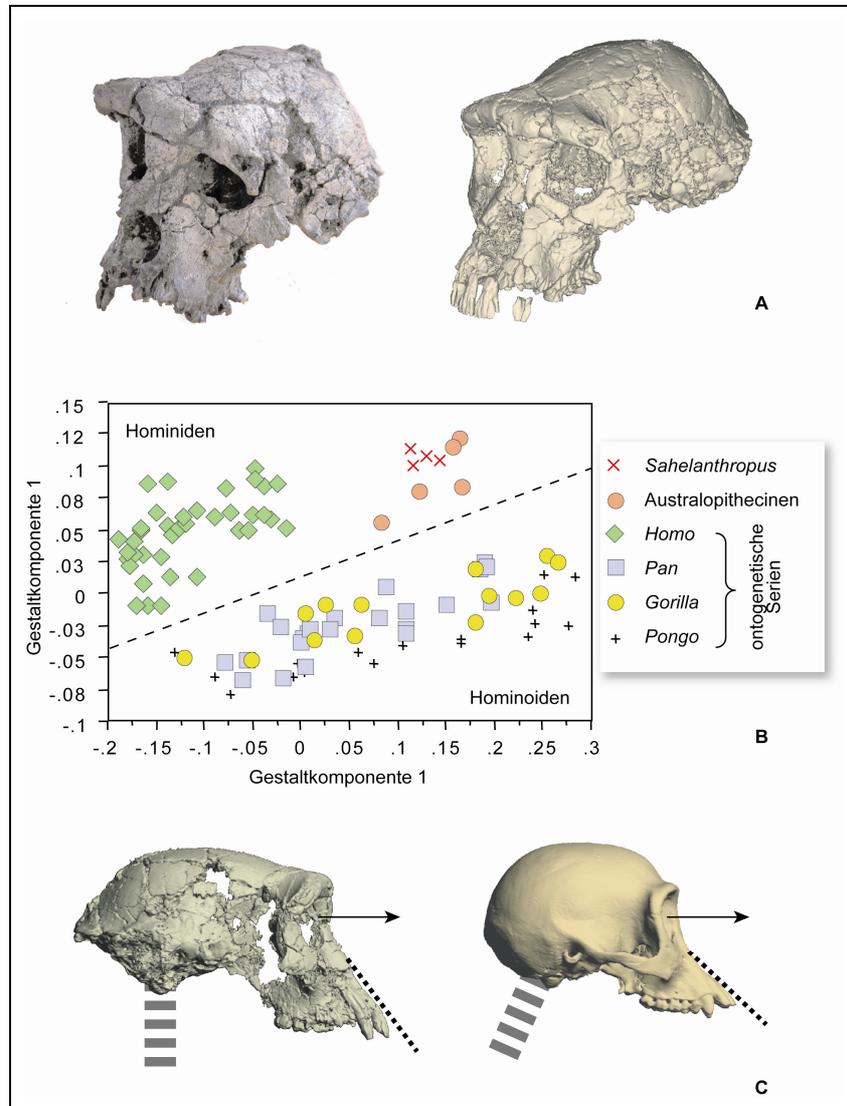


Abbildung 10

Sahelanthropus tchadensis. A: Originalzustand und virtuelle Rekonstruktion. B: Die Lage von *Sahelanthropus* (vier Rekonstruktionsvarianten), Hominiden und Menschenaffen im Gestalt-raum. Um eine möglichst große Gestaltvariabilität zu berücksichtigen, sind die modernen Arten durch ontogenetische Serien repräsentiert. Man beachte die klare Trennung zwischen Hominiden und Hominoiden. C: Lagebeziehungen zwischen Augenachsen (Pfeil), Hinterhauptsloch/Wirbelsäule (Balkenlinie) und Gesichtsstellung (gestrichelte Linie) bei *Sahelanthropus* und einem Schimpansen.

Epilog: Wohin gehen wir?

Natürlich ist diese Frage, evolutionsbiologisch gesehen, nicht zulässig, da wir ja immer wieder darauf hingewiesen haben, daß die Evolution zwar fortschreitet, aber kein Fortschritt, keine Richtung auszumachen ist. Gleichwohl ist es reizvoll, die Frage in abgewandelter Form als „Blick zurück in die Zukunft“ zu stellen. Vor wenigen Jahren wurden auf der indonesischen Insel Flores geologisch relativ junge (12.000 Jahre alte), aber archaisch anmutende Skelettreste von kleinwüchsigen Vertretern der Gattung *Homo* entdeckt. Bei den auf den Artnamen *Homo floresiensis* getauften Individuen handelt es sich wahrscheinlich um Nachkommen des asiatischen *Homo erectus*, der auf der Nachbarinsel Java mit etwa 1.5–0.5 Millionen Jahre alten Fossilfunden prominent vertreten ist.

Homo floresiensis ist ein weiteres Beispiel dafür, daß empirische Evidenz alle Lehrmeinungen auf den Kopf stellen kann. Mit einem Hirnvolumen von knapp 400 ccm und einer Körpergröße von einem Meter widerspricht diese Spezies der gängigen Vorstellung, daß die Gattung *Homo* dank ihrer kulturellen und kognitiven Fähigkeiten eine von der Umwelt ziemlich unabhängige evolutionäre Geschichte hatte. Aller Wahrscheinlichkeit nach handelt es sich beim Flores-Menschen nicht um eine pathologische Variante von *Homo sapiens*⁶, sondern um das menschliche Beispiel einer klassischen Inselform. Insel-Spezies sind von anderen Säugetiergruppen, zum Beispiel Elefantenartigen, bereits seit langem bekannt sind⁷. Sie zeichnen sich gegenüber ihren Vorfahrenarten durch eine drastische Reduktion von Hirn- und Körpergröße aus, womit sie sich an die sehr speziellen ökologischen Verhältnisse des Insellebens angepasst haben.

Dahin also mit allem Glanz und aller Herrlichkeit der menschlichen Evolution? Am Ende wieder ein Hirn so klein wie am Anfang? Tatsächlich spricht vieles dafür, daß unser großes Gehirn, auf das wir soviel geben, nicht zu den Grundcharakteristika der Hominiden gehört. Wenn wir uns die vielfältige und differenzierte Werkzeugkultur des Flores-Menschen anschauen, bleibt allerdings ein kleiner Trost: Es mag ein langer und steiniger Weg zur Evolution eines großen Gehirns gewesen sein – vielleicht war der evolutive Weg zu seiner effizienten Miniaturisierung fast ebenso lang und steinig. Damit hätte ein ähnlicher Prozeß stattgefunden, wie wir ihn von den Technologien kennen, die wir heute brauchen, um die menschliche Evolution zu erforschen. Der Laptop, auf dem dieses Manuskript geschrieben und auf dem die Abbildungen erzeugt wurden, ist ein Beispiel dafür.

⁶ Die „Pathologisierung“ von unerwarteten Fossilfunden hat eine lange Geschichte. Sie beginnt mit dem Original-Neandertalerfund, der von namhaften Anatomen als arthritischer Kosake angesehen wurde, der sich während der napoleonischen Kriege in die Neander-Höhle verirrt hatte.

⁷ *Homo floresiensis* jagte offensichtlich kleinwüchsige Formen der fossilen Elefantengattung *Stegodon*. – Zwergelefanten von der Größe eines mächtigen Bernhardinerhundes sind auch von den Mittelmeerinseln bekannt.