4.22 SPEZIAL Biologie Medizin Hirnforschung

Spektrum der Wissenschaft



Die Evolution des Menschen

Unsere faszinierende Vergangenheit

ERNÄHRUNG Was Steinzeitmenschen wirklich aßen

HOMO ERECTUS Der erste Weltbürger

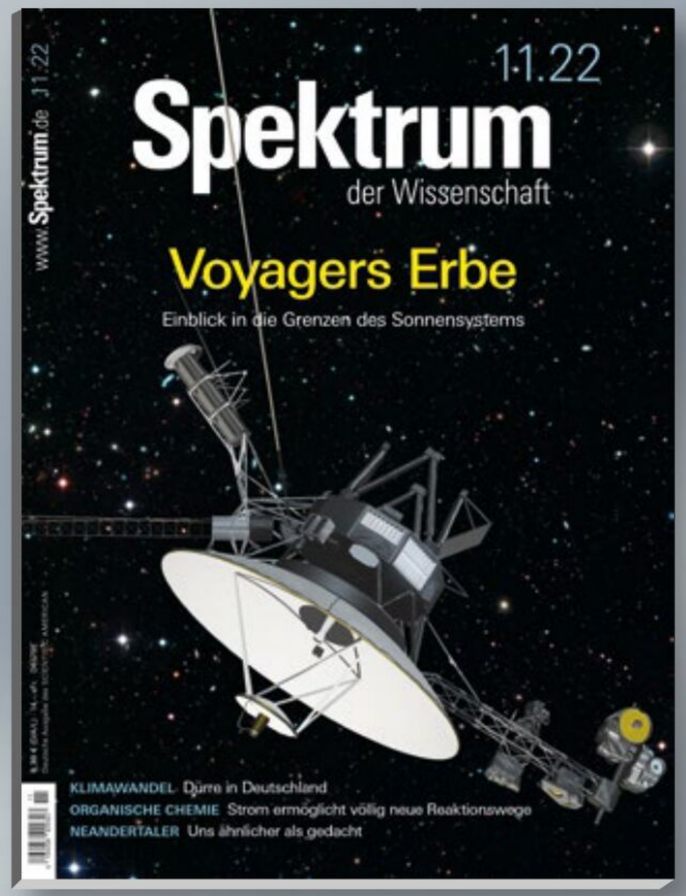
PALÄOGENETIK Das schlummernde Erbe der Neandertaler

Spektrum SPEZIAL Biologie Medizin Hirnforschung · 9,30 € (D) · € 9,70 (A) · 9,30 € (L) · sFr. 17,40 24524

4 192452 409305 04

Unsere Neuerscheinungen

Ob Naturwissenschaften, Raumfahrt oder Psychologie:
Mit unseren Magazinen behalten Sie stets den Überblick
über den aktuellen Stand der Forschung

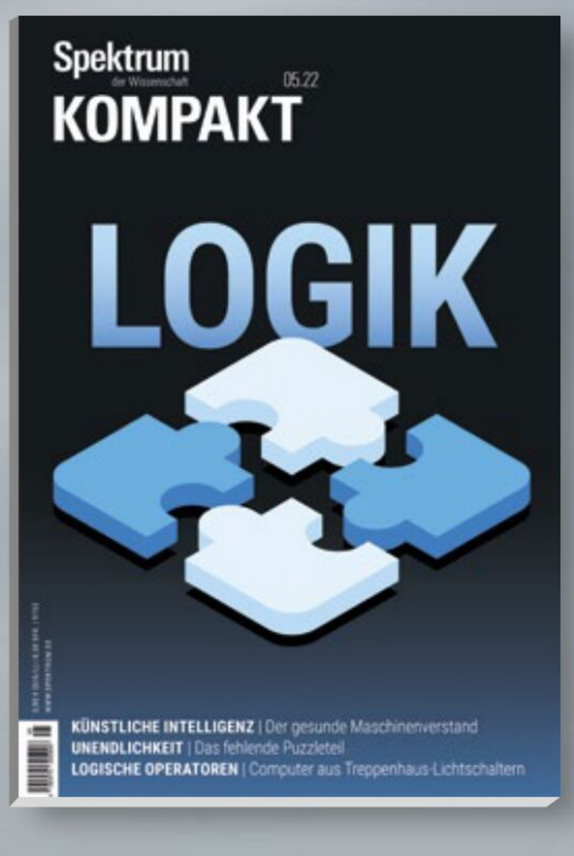












Informationen und eine Bestellmöglichkeit
zu diesen und weiteren Neuerscheinungen:
service@spektrum.de | Tel. 06221 9126-743

Spektrum.de/aktion/neuerscheinungen



EDITORIAL
EIGEN-ARTIG

Von Andreas Jahn, Redakteur dieses Hefts
jahn@spektrum.de

Was wäre, wenn es heute noch Neandertaler gäbe? Würden wir sie in einem Zoo begaffen oder müssten sie in den Slums der Vorstädte hausen? »Das wissen wir nicht«, entgegnete mir Svante Pääbo, der diese Vorstellung durchaus faszinierend findet, und ergänzt: »Vielleicht gäbe es einen noch schlimmeren Rassismus gegen Neandertaler als der, den wir heute gegen fremde Menschen erleben.« Der Leipziger Max-Planck-Forscher, der sich einst als junger Doktorand an die DNA ägyptischer Mumien heranwagte und damit das Fach der Paläogenetik begründete, gilt als *der* Experte für das Erbgut der Neandertaler. Im Interview ab S. 76 berichtet er unter anderem von einer Aufsehen erregende Entdeckung: Bestimmte Genvarianten, die wir vom Neandertaler geerbt haben, erhöhen das Risiko für eine schwer verlaufende Corona-Erkrankung.

Welche Durchbrüche moderne biochemische Techniken in der Archäologie ermöglichten, demonstriert das Beispiel des Denisovaners. Diese Menschenform kennt man praktisch nur aus DNA- und Proteinanalysen, wie Pääbos Kollege Jean-Jacques Hublin ab S. 68 erläutert. Wir wissen daher, dass sie sich vor mehr als 400 000 Jahren vom Neandertaler abspaltete, sich jedoch noch viele Jahrtausende lang mit ihm – sowie auch mit unserer eigenen Spezies – munter kreuzte.

Diese Erkenntnis erschüttert einen fundamentalen Begriff der Biologie: Eine Art stellt nach klassischer Definition eine Gruppe von Lebewesen dar, die fruchtbare Nachkommen erzeugen. Gehören damit Neandertaler, Denisovaner und anatomisch moderner Mensch, die sich alle offensichtlich untereinander vermischten, zur selben Art *Homo sapiens*? Oder handelt es sich um Unterarten? Wo verläuft die Grenze?

Völlig unübersichtlich sieht es beim Vorläufer dieser Menschengruppen aus, dem *Homo erectus*. Er firmiert auch unter anderen Namen wie *Homo ergaster*, *Homo georgicus* oder *Homo heidelbergensis* – der Artbegriff verschwimmt (S. 44). »Ich empfinde das als eine akademische, sterile Diskussion«, meint dazu Pääbo. »Ob irgendein Gelehrter das Art oder Unterart nennen möchte, ist mir eigentlich egal.«

Eine spezifisch erhellende Lektüre wünscht Ihnen Ihr



DAS KÖNNTE SIE AUCH INTERESSIEREN:



MAXIM CHUEV / STOCK.ADOBE.COM

Spektrum KOMPAKT
»Frühe Kunst – Was Höhlenmalereien und Felszeichnungen verraten«
Bereits vor Jahrtausenden haben Menschen Eindrücke ihrer realen und spirituellen Welt verewigt. Für heutige Fachleute stellen diese Kunstwerke ein spannendes Archiv der Vergangenheit dar.

Spektrum KOMPAKT – Themen auf den Punkt gebracht
Unsere Spektrum-KOMPAKT-Digitalpublikationen stellen Ihnen alle wichtigen Fakten zu ausgewählten Themen als PDF-Download zur Verfügung – schnell, verständlich und informativ!

www.spektrum.de/kompakt

INHALT

EVOLUTIONÄRE GRUNDLAGEN

6 MOBILITÄT
ZUM LAUFEN GEBOREN

Der Mensch muss sich bewegen, um gesund zu bleiben – im Gegensatz zu seinen nächsten Verwandten im Tierreich. Der Grund dafür liegt in unserer evolutionären Vergangenheit.
Von Herman Pontzer

14 ERNÄHRUNG
DIE WAHRE STEINZEITDIÄT

Mikroskopisch kleine Abnutzungsspuren auf fossilen Zähnen verraten, was Frühmenschen gegessen haben. Sie vermitteln damit gleichzeitig einen Eindruck davon, wie Klimaveränderungen unsere Entwicklung beeinflussten.
Von Peter S. Ungar

22 KOGNITION
DER URSPRUNG DES ZÄHLENS

Faszinierende Funde lassen vermuten: Schon die Neandertaler rechneten mit Zahlen und legten sich dafür »Merkzettel« in Form von Knochen an.
Von Colin Barras

28 ANATOMIE
UNTERSCHIEDLICH VERDRAHTET

Infografik: Wie das Gehirn des Menschen aufgebaut ist und worin es sich von denen seiner Verwandten unterscheidet.
Von Chet C. Sherwood

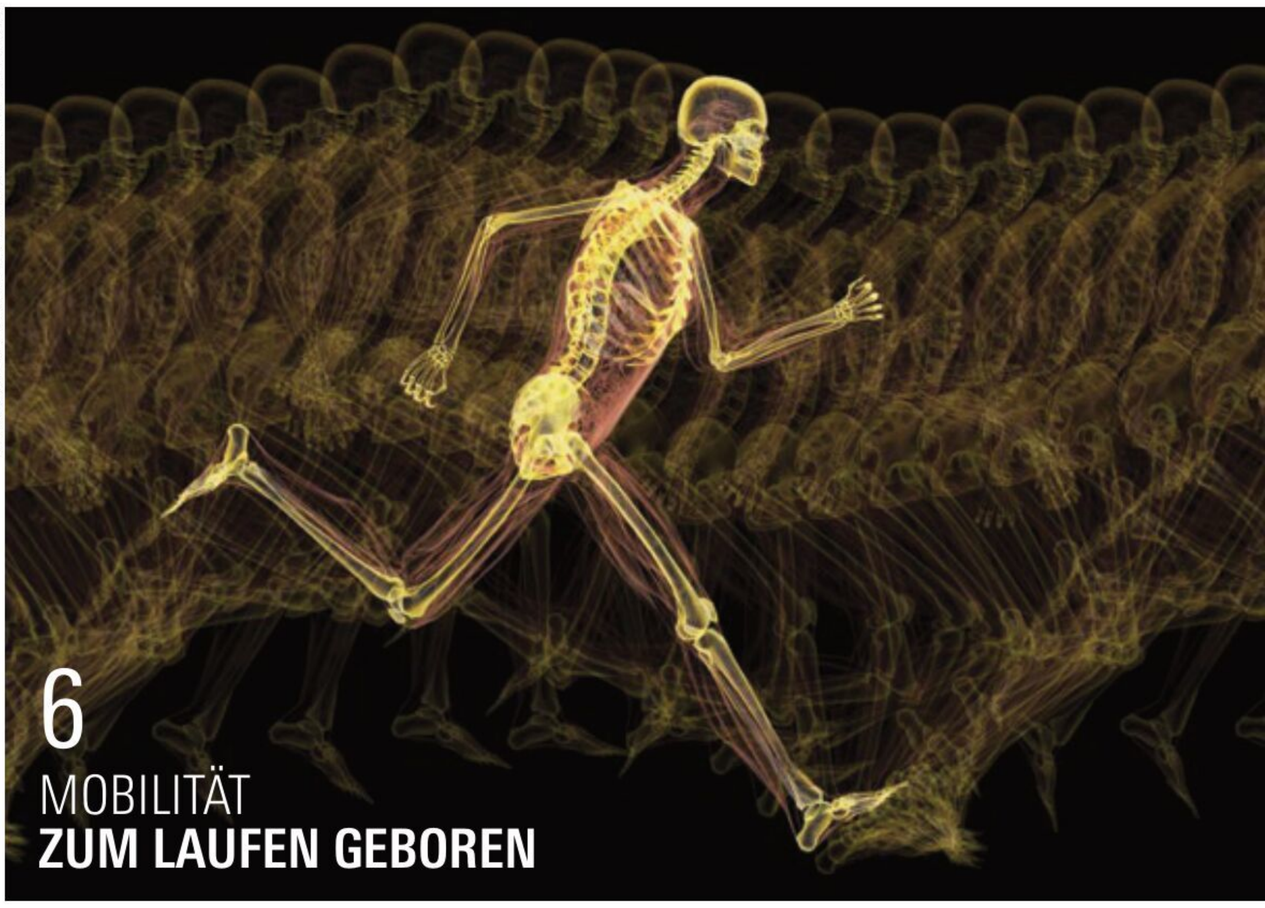
MENSCHLICHE VERWANDTSCHAFT

32 *DANUVIUS GUGGENMOSI*
ENTSTAND DER AUFRECHTE GANG IN EUROPA?

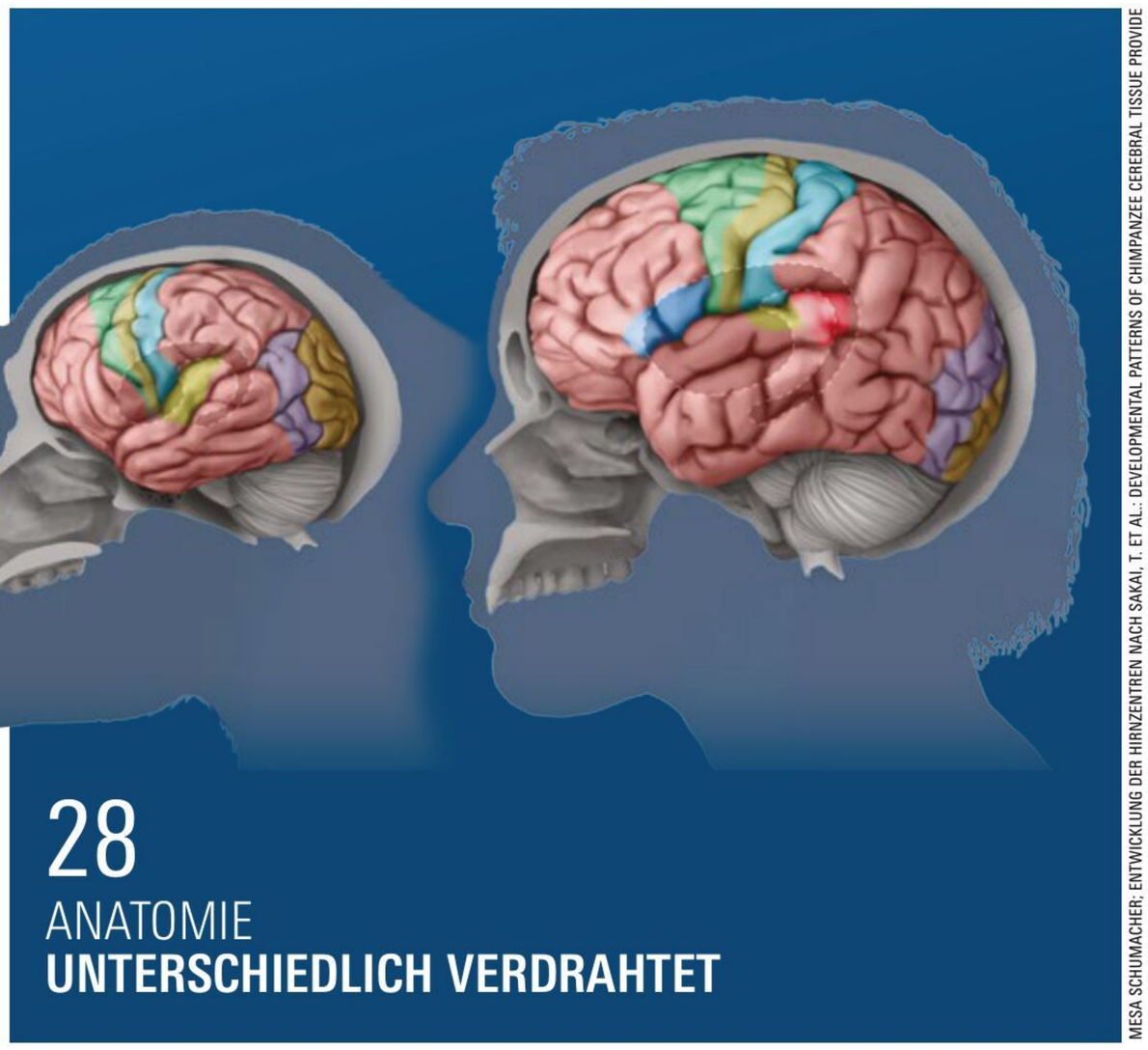
Eine Primatenart ging schon vor zwölf Millionen Jahren auf zwei Beinen.
Von Karin Schlott

36 *PARANTHROPUS BOISEI*
UNSER EXOTISCHER VETTER

Eine Million Jahre lang lebten unsere Vorfahren in Afrika Seite an Seite mit einem nahen, seltsamen Verwandten.
Von Bernard Wood und Alexis Williams



BRYAN CHRISTIE DESIGN / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2019

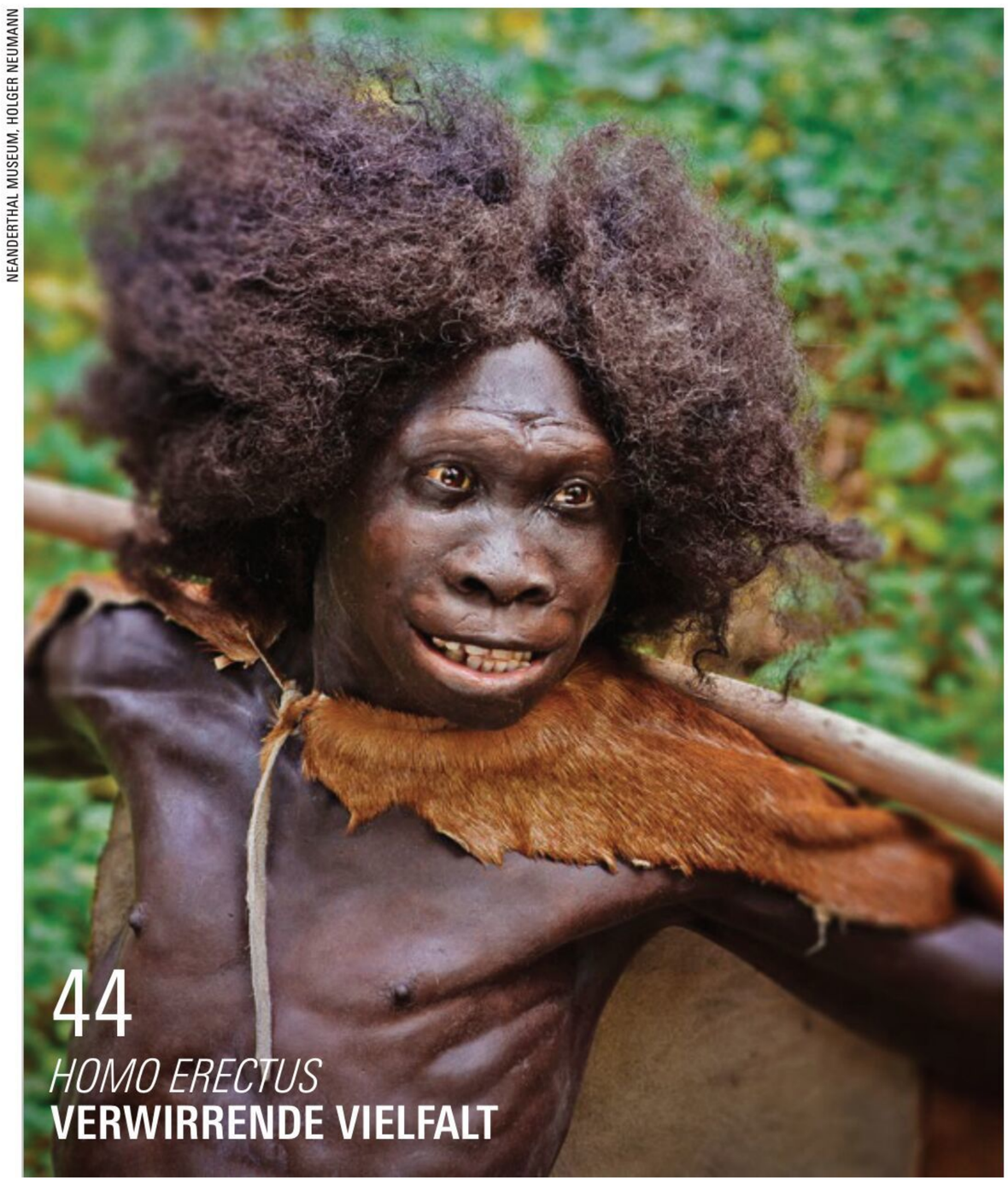


MESA SCHUMACHER; ENTWICKLUNG DER HIRNZENTREN NACH SAKAI, T. ET AL.: DEVELOPMENTAL PATTERNS OF CHIMPANZEE CEREBRAL TISSUE PROVIDE IMPORTANT CLUES FOR UNDERSTANDING THE REMARKABLE ENLARGEMENT OF THE HUMAN BRAIN. PROC. R. SOC. B 280, 20122398, 2013 / SCIENTIFIC AMERICAN SEPTEMBER 2018; AUSSCHNITT; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



ELISABETH DAYNES / SCIENCE PHOTO LIBRARY

Titelbild: sdbower / stock.adobe.com;
Bearbeitung: Spektrum der Wissenschaft


NEANDERTHAL MUSEUM, HOLGER NEUMANN

44
HOMO ERECTUS
VERWIRRENDE VIELFALT


KARSTEN MÖBIUS

76
INTERVIEW
»JEDER BESITZT ERBGUT VOM NEANDERTALER«

44 *HOMO ERECTUS*
VERWIRRENDE VIELFALT

Der Vorläufer von *Homo sapiens* verblüfft durch seine Uneinheitlichkeit.
Von Thorwald Ewe

52 *HOMO NALEDI*
DER FELSKLETTERER

Ein aufs Klettern spezialisierter Frühmensch lebte in einer Umwelt mit nur spärlichem Baumbewuchs. Offenbar hatte sich der Hominine einen besonderen Lebensraum erschlossen.
Von Jean-Luc Voisin

PALÄONTOLOGISCHE METHODEN

60 ZOOARCHÄOLOGIE
DIE NADEL IM KNOCHENHAUFEN

Knochen sind der Schlüssel, um das Leben unserer Urahnen zu erforschen. Aber was tut man, wenn es nur winzige Splitter gibt?
Von Thomas Higham und Katerina Douka

68 PALÄOGENETIK
ALLES BEGANN MIT EINEM FINGERKNÖCHELCHEN

Allein auf Grund von Genanalysen kennen wir die Denisovaner. Um deren Anatomie zu rekonstruieren, fehlen noch die passenden Fossilien.
Von Jean-Jacques Hublin

76 INTERVIEW
»JEDER BESITZT ERBGUT VOM NEANDERTALER«

Der Max-Planck-Forscher Svante Pääbo erklärt, warum Neandertalergene das Risiko für einen schweren Verlauf von Covid-19 erhöhen können.

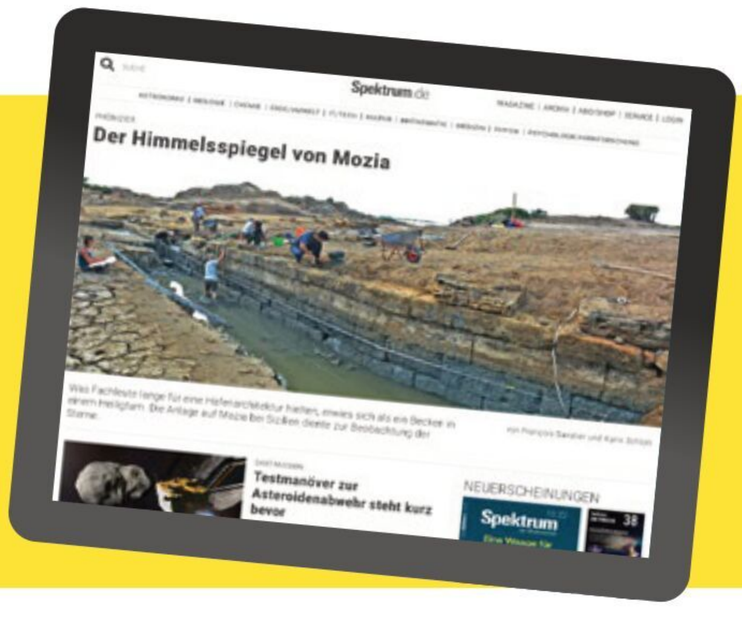
3 EDITORIAL

35 IMPRESSUM

82 VORSCHAU

Alle Artikel
auch digital auf
Spektrum.de

Auf **Spektrum.de** berichtet unsere Redaktion täglich aus der Wissenschaft: fundiert, aktuell, exklusiv.



MOBILITÄT
ZUM LAUFEN GEBOREN

Wir Menschen müssen uns viel bewegen, um gesund zu bleiben – im Gegensatz zu unseren nächsten Verwandten im Tierreich. Der Grund dafür liegt in unserer evolutionären Vergangenheit.



Herman Pontzer ist außerordentlicher Professor für evolutionäre Anthropologie an der Duke University (Durham, USA). Er erforscht, wie evolutionäre Vorgänge die Physiologie des Menschen geprägt haben.

spektrum.de/artikel/1686874

AUF EINEN BLICK
DAUERND AUF DEN BEINEN

1 Die eng mit uns verwandten Menschenaffen sind körperlich wenig aktiv, aber dennoch kaum von Übergewicht, Diabetes, Bluthochdruck oder Arteriosklerose betroffen.

2 Bei den heutigen Menschen hingegen kommt es infolge ihres bewegungsarmen Lebensstils zu einer Häufung von Zivilisationskrankheiten.

3 Studien zufolge ist das ein Erbe unserer Vorfahren, die sich offenbar an die exzessive körperliche Aktivität des Jagens und Sammelns angepasst hatten.

STETS MOBIL Laufen wir permanent deutlich weniger als 10000 Schritte pro Tag, steigt unser Risiko, schwer zu erkranken. Unter den Menschenaffen sind wir damit eine Ausnahme.

BRYAN CHRISTIE DESIGN / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2019

BRYAN CHRISTIE DESIGN / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2019

An einem diesigen Morgen vor etwa 20 Jahren in Uganda erblickte ich in den üppigen Baumkronen über mir plötzlich eine Gruppe schlafender Schimpansen. Unser Team – drei Forscher und zwei Feldassistenten – war schon seit einer Stunde auf den Beinen. Schlaftrunken, in Gummistiefeln, mit hastig geschnürten Rucksäcken und ausgerüstet mit Stirnlampen, hatten wir uns über schlammige Pfade gequält. Nun, am Ziel angekommen, schalteten wir unsere Lampen aus und bemühten uns, keinerlei Geräusch zu machen, damit die Menschenaffen über uns nicht aufwachten. Sie schnauften und wälzten sich in ihren Laubnestern in 30 Meter Höhe, während uns der dunkle Ozean aus Bäumen einhüllte.

Als junger Doktorand, der über die Evolution der Menschenaffen forschte, war ich in jenem Sommer im Kibale-Nationalpark unterwegs, um zu untersuchen, wie viel Schimpansen täglich klettern. Ich vermutete damals, dass die Energie, die die Tiere dafür aufzuwenden haben, ein wichtiges Selektionskriterium sein müsse und die Evolution sicherlich darauf hingewirkt habe, den Körperbau der Schimpansen in Richtung effizienteren Kletterns zu verändern. Das – so glaubte ich jedenfalls – würde den Kalorienumsatz senken, der für Körperbewegungen erforderlich ist, und somit mehr Ressourcen für die Fortpflanzung und andere lebenswichtige Aufgaben bereitstellen. An meinem Schreibtisch an der Harvard University hatte ich mir Affen vorgestellt, die permanent ums Überleben kämpfen und sich dabei täglich aufs Härteste abmühen.

In besagtem Sommer jedoch, als ich Schimpansen intensiv beobachtete und ihnen von früh bis spät folgte, kam ich zu einem anderen Schluss. Ich stellte fest, dass die Tiere jede Menge Zeit mit Faulenzen verbringen. Und es sollten noch einmal viele Jahre vergehen, bis mir klar wurde, was dies über die Evolution des Menschen aussagt.

Der Affe in uns

Wir sind von Menschenaffen fasziniert, weil wir in ihnen vieles wiederzufinden meinen, was wir von uns selbst kennen. Nicht nur, dass 97 Prozent unserer DNA mit der von Orang-Utans, Gorillas, Schimpansen und Bonobos übereinstimmen. Die Tiere sind auch schlau, wissen Werkzeuge einzusetzen, bekämpfen sich, schließen wieder Frieden miteinander und haben heimlich Sex. Einige töten ihre Nachbarn im Streit und jagen Vertreter anderer Spezies, um sie zu fressen. Die Kleinen lernen von den Müttern, ringen und spielen miteinander und zeigen Trotzanfälle.

Je weiter wir in der Entwicklungsgeschichte zurückgehen, umso mehr ähneln die Fossilien unserer Vorfahren denjenigen von Affen. Alle Arten sind in ständigem Wandel begriffen; dennoch verrät ein Blick auf die heute lebenden Menschenaffenspezies etwas darüber, woher wir kommen und welche unserer Merkmale im Lauf der Stammesgeschichte weitgehend unverändert geblieben sind.

Allerdings sind es nicht so sehr die Ähnlichkeiten, sondern vor allem die Unterschiede zwischen uns und den tierischen Verwandten, die unseren Organismus in einem neuen Licht erscheinen lassen. Fossilienanalysen ebenso wie Untersuchungen in Zoos und Forschungslaboren belegen immer deutlicher, wie radikal sich der menschliche

Körper während der zurückliegenden zwei Millionen Jahre gewandelt hat. Experten wissen seit Jahrzehnten, dass dieses jüngste Kapitel unserer Evolution von wichtigen anatomischen und ökologischen Veränderungen gekennzeichnet war. Hierzu zählen die rasante Größenzunahme des Gehirns, das zunehmend effektive Jagen und Sammeln von Nahrung, das Herstellen immer komplexerer Steinwerkzeuge und eine steigende Körpergröße. Die Forscher gingen jedoch im Allgemeinen davon aus, es habe sich hier um Modifikationen der Körperform und des Verhaltens gehandelt und nicht um grundlegende funktionelle Umgestaltungen auf zellulärer Ebene. Neuere Erkenntnisse belegen jedoch, dass sich unsere Vorfahren auch physiologisch verändert haben. Im Gegensatz zu unseren Menschenaffenverwandten hängen wir von körperlicher Aktivität ab: Wir müssen uns bewegen, um zu überleben.

Der typische Tagesablauf eines wilden Schimpansen ähnelt dem eines lethargischen Kreuzfahrtpassagiers, ist allerdings längst nicht so organisiert wie dieser. Er lässt sich wie folgt beschreiben: Wache bei Tagesanbruch auf und frühstücke Obst, bis du satt bist. Dann suche dir einen netten Platz für ein Nickerchen und eventuell für eine leichte Fellpflege. Nach einer Stunde oder so begib dich zu einem sonnenbeschienenen Feigenbaum und labe dich an den Früchten. Vielleicht triffst du anschließend ein paar Freunde, betreibst noch ein bisschen Fellpflege und machst ein weiteres Nickerchen. Gegen 5 Uhr nachmittags nimm ein Dinner zu dir mit noch mehr Früchten und nach Belieben einigen Blättern. Dann ist es Zeit, sich einen schönen Schlafplatz in einem Baum zu suchen. Baue dir dort ein Laubnest und lass es Nacht werden.

Schimpansen verbringen den Tag wie lethargische Kreuzfahrtpassagiere

Natürlich gibt es an einem solchen Tag auch die eine oder andere Aufregung. Zum Beispiel frenetisches Gejohle, wenn die Früchte wirklich köstlich sind, oder gelegentliches Raufen und Sich-gegenseitig-Jagen. Hin und wieder legt das Alphamännchen einen Auftritt hin, verdrischt ein paar Opfer oder stellt auf andere Art seine Macht zur Schau. Im Allgemeinen jedoch führen Schimpansen ein recht unbeschwertes Leben.

Das gilt ebenso für Orang-Utans, Gorillas und Bonobos. Alle Menschenaffen frönen dieser Art von Müßiggang. Die Tiere verbringen acht bis zehn Stunden am Tag mit Ruhen, Fellpflege und Essen, bevor sie sich am Abend für neun bis zehn Stunden zum Nachtschlaf niederlegen. Schimpansen und Bonobos laufen etwa drei Kilometer täglich, Gorillas und Orang-Utans nicht einmal das. Und was ist mit Klettern? Wie ich in jenem Sommer in Uganda festgestellte, legen Schimpansen pro Tag eine Strecke von rund 100 Metern klimmend zurück, was dem Kalorienumsatz von weiteren anderthalb Kilometern Laufstrecke entspricht. Orang-Utans verhalten sich ähnlich, und Gorillas dürften noch weniger an Bäumen emporsteigen, auch wenn dies bei ihnen bisher nicht gemessen worden ist.

Eine derart bescheidene körperliche Aktivität würde uns in kurzer Zeit ernste gesundheitliche Probleme bescheren. Wenn wir weniger als 10 000 Schritte pro Tag gehen, steigt unser Risiko für Herz-Kreislauf- und Stoffwechselerkrankungen. In den USA bringen es Erwachsene in der Regel auf zirka 5000 Schritte pro Tag – was zu den alarmierend hohen Raten an Diabetes Typ 2 beiträgt, von dem jeder zehnte US-Bürger betroffen ist, sowie zu den vielen Herzerkrankungen, die jeden vierten Todesfall in den Vereinigten Staaten verursachen. So gesehen, müsste es wilden Menschenaffen eigentlich ziemlich schlecht gehen. Wir können ihr Bewegungspensum in Schritte pro Tag umrechnen, um es direkt mit unserem zu vergleichen. Wenn wir das tun, stellen wir fest, dass sie kaum je über das Aktivitätsniveau bewegungsfauler Menschen hinauskommen – und niemals den für uns geltenden Richtwert von 10 000 Schritten pro Tag erreichen.

»Abhängen« vor dem Fernseher verschwendet nicht nur Lebenszeit, sondern verkürzt sie auch

Menschen, die viele Stunden am Schreibtisch oder vor dem Fernseher verbringen, werden eher krank und leben weniger lang, selbst wenn sie zu anderen Zeiten Sport treiben. Weltweit gilt körperliche Inaktivität als ebenso gesundheitsschädigend wie Rauchen: Schätzungsweise mehr als fünf Millionen Menschen sterben jährlich auf Grund bewegungsarmer Lebensweise. Untersuchungen zufolge nimmt bei Menschen, die mehrere Stunden pro Tag fernsehen, die Häufigkeit von Herzinfarkten und Schlaganfällen deutlich zu. Forscher um Michelle McDonnell von der University of South Australia beispielsweise stellten ein 1,4-mal so hohes Risiko für Schlaganfälle bei täglich mehr als vier Stunden TV-Konsum fest. Eine andere australische Studie ergab sogar, dass die Lebenserwartung mit jeder Stunde vor dem TV-Gerät um 22 Minuten sinkt. Falls das stimmt, würde es bedeuten, dass jeder, der die insgesamt 63,5 Stunden der Serie »Game of Thrones« anschaut, einen Tag auf diesem Planeten verliert.

Schimpansen und andere Menschenaffen dagegen sind trotz ihres geringen Bewegungspensums bemerkenswert gesund. Selbst in Gefangenschaft erkranken sie nur selten an Diabetes, und ihr Blutdruck nimmt mit dem Alter nicht zu. Obwohl ihre Cholesterinwerte von Natur aus hoch sind, leiden sie nicht unter Arteriosklerose. Folglich sind diese Tiere weder von Herzinfarkten noch von anderen Komplikationen betroffen, die von verschlossenen Herzkranzgefäßen herrühren. Und sie bleiben schlank. 2016 untersuchte ich gemeinsam mit Stephen Ross vom Lincoln Park Zoo und einem Mitarbeiterteam den Stoffwechselumsatz und die Zusammensetzung des Körpergewebes von Menschenaffen in US-amerikanischen Zoos. Die Ergebnisse waren verblüffend: Obwohl sie in Gefangenschaft lebten, wiesen die Gorillas und Orang-Utans nur 14 bis 23 Prozent Körperfett auf. Bei Schimpansen waren es sogar weniger als zehn Prozent – ähnlich wie bei olympischen Athleten.



LILLIANFIANE / GETTY IMAGES / ISTOCK

FAULENZEN IN RUANDA Eine Berggorillafamilie futtert entspannt im Grünen. Obwohl diese Menschenaffen nach unseren Maßstäben ziemlich faul sind, beeinträchtigt das ihre Gesundheit nicht.

Unter unseren Primatenverwandten sind wir Menschen also eindeutig die Ausnahme. Aus irgendwelchen Gründen benötigt unser Körper viel mehr körperliche Aktivität, um normal zu funktionieren. Stundenlang herumzusitzen, das Fell zu pflegen und alle fünfe gerade sein zu lassen, hat sich von einem Standardverhalten zu einem Gesundheitsrisiko gewandelt. Aber warum? Fossilien helfen uns, dieses Rätsel Stück für Stück zu lösen.

Vor etwa sechs oder sieben Millionen Jahren, am Ende des Miozäns, haben sich die Hominini (Gattungsgruppe Mensch) von der Linie der Schimpansen und Bonobos abgespalten. Bis vor rund 25 Jahren kannten Forscher nur wenige Fossilien aus dieser Gruppe, die in die Zeit kurz nach der Abspaltung datieren. Um die Wende vom 20. zum 21. Jahrhundert jedoch entdeckten Paläoanthropologen im Tschad, in Kenia und Äthiopien kurz hintereinander die Überreste dreier homininer Gattungen aus jener Periode: *Sahelanthropus*, *Orrorin* und *Ardipithecus*.

Jeder dieser frühen Homininen unterschied sich hinsichtlich anatomischer Details des Schädels, der Zähne und des Skeletts von heute lebenden Menschenaffen. Ihr Lebenswandel allerdings ähnelte offenbar demjenigen heutiger Arten, sieht man einmal von der Fortbewegung auf zwei Beinen ab. Ihre Mahlzähne glichen in Größe und Schärfe denjenigen von Schimpansen; ihr etwas dickerer Zahnschmelz lässt auf eine gemischte Diät aus Früchten und anderen Pflanzenteilen schließen.

Ardipithecus, gefunden in 4,4 Millionen Jahre alten Ablagerungen in Äthiopien und der bei Weitem am besten bekannte frühe Hominine, besaß lange Arme, lange gekrümmte Finger und Greiffüße. Demnach hielt er sich oft im Geäst auf. Neueren biomechanischen Analysen zufolge, die meine Mitarbeiterin Elaine Kozma an der City University of New York durchgeführt hat, war das Becken von *Ardipithecus* anatomisch so verändert, dass er sich voll aufrichten und mit geringem Energieaufwand laufen konnte – ohne freilich seine Kletterfähigkeit einzubüßen. Vermutlich war er, der unseren Vorfahren verwandtschaftlich zumindest nahestand, in zwei Welten zu Hause: auf dem Boden und in den Wipfeln der Bäume (siehe auch den Artikel ab S. 32).

In der Zeit von etwa vier bis zwei Millionen Jahren vor heute dominiert die Gattung *Australopithecus* den homininen Stammbaum. Forscher kennen mindestens fünf Arten, darunter die berühmte »Lucy« und ihre Verwandten. Anatomische Veränderungen der unteren Gliedmaßen deuten auf ein verbessertes Gehvermögen hin, weshalb diese Menschenaffen mehr Zeit am Boden verbracht haben dürften als frühere Arten. *Australopithecus* besaß keine Greiffüße mehr; die große Zehe stand in einer Linie mit den übrigen Zehen; die Beine waren verlängert und zeigten bereits dasselbe Verhältnis von Beinlänge zu Körpermasse wie beim modernen Menschen. Analysen der Hüfte durch Kozma sowie jüngere Untersuchungen fossiler Fußabdrücke aus Laetoli (Tansania) sprechen dafür, dass diese Homininen eine ziemlich moderne Gangart pflegten. Ihren langen Armen und Fingern zufolge kletterten sie allerdings immer noch regelmäßig in Bäume und schliefen dort möglicherweise auch. Abriebmuster an ihren Zähnen lassen vermuten, dass sich die *Australopithecus*-Spezies hauptsächlich pflanzlich ernährten. Auf Grund ihrer großen, mit dickem Zahnschmelz ummantelten Mahlzähne dürften sie oft harte und faserreiche Nahrung zerkaut haben.

Das Entstehen eines aufrecht schreitenden Gangs auf zwei Beinen ist bei diesen frühen Homininen von besonderer Bedeutung, denn er geht mit einer neuen Art der Orientierung im Raum einher. Weil sich damit größere Distanzen bei geringem Kalorienumsatz überwinden ließen, waren diese Arten in der Lage, ihren Aktionsradius zu erweitern und in diverse Habitate vorzudringen, die zuvor schwer erreichbar gewesen waren. Weitere wichtige Veränderun-

gen gesellten sich hinzu, etwa der Verlust der großen, scharfen Eckzähne bei den Männchen, dem offenbar Veränderungen im Sozialverhalten zu Grunde lagen. Doch die primär pflanzliche Ernährung und das Beibehalten der Kletterfähigkeit sprechen dafür, dass diese Spezies bezüglich der Nahrungssuche und des alltäglichen Lebenswandels affenähnlich blieben. Die Entfernungen, die sie täglich zurücklegten, waren wahrscheinlich immer noch relativ bescheiden und unterbrochen von vielen Ruhepausen zum Verdauen der faserigen Pflanzenkost.

Tiere jagen und mit Werkzeugen zerlegen: Seit mindestens zwei Millionen Jahren üblich

Für die Zeit vor etwa zwei Millionen Jahren häufen sich Indizien für die Existenz erfindungsreicher Homininen. Schon 3,3 Millionen Jahre alte Sedimente vom Westufer des Turkana-Sees (Kenia) enthalten große unhandliche Steinwerkzeuge, von denen einige rund 15 Kilogramm wiegen, wie Sonia Harmand von der Stony Brook University und ihr Team 2015 entdeckten. In 2,6 Millionen Jahre alten Ausgrabungsstätten in Äthiopien und Kenia fanden Forscher diverse Steinwerkzeuge zusammen mit versteinerten Tierknochen – wobei die Letzteren Rillen und Kratzer aufweisen, die zweifelsfrei von Schlachtungen herrühren. An Fundstätten von vor 1,8 Millionen Jahren sind Knochen mit Schnittspuren und Steinwerkzeuge bereits die Norm, und es waren offensichtlich nicht nur kranke und verletzte Individuen, die den damaligen Jägern zum Opfer fielen: Überreste von geschlachteten Tieren aus der Olduvai-Schlucht in Tansania belegen, dass zur Beute vor allem Huftiere im besten Alter gehörten. Ebenso bedeutsam ist die Erkenntnis, dass Homininen vor 1,8 Millionen Jahren erstmals von Afrika nach Eurasien wanderten und ihre Siedlungsgebiete dramatisch ausdehnten – bis zu den Ausläufern des Kaukasus und den Regenwäldern Indonesiens. Unsere Vorfahren hatten kontinentale Grenzen überwunden.

Der Gebrauch von Steinwerkzeugen, die Einführung einer Diät mit fleischlicher Kost und die Entwicklung von Jäger-und-Sammler-Gemeinschaften sorgten dafür, dass sich die Entwicklungslinie des Menschen von derjenigen der Affen abkoppelte, und zwar unumkehrbar. Diese gravierenden Veränderungen markieren den evolutionären Beginn der Gattung *Homo*, der wir angehören.

In der Ökologie und in der Evolution dreht sich fast alles um die Ernährung. Die Art der Nahrung bestimmt nicht nur über die Form der Zähne und über die Beschaffenheit des Verdauungsapparats, sondern über die gesamte Physiologie und Lebensweise. Spezies, die reichlich vorhandene und unbewegliche Kost verzehren, müssen weder umständlich danach suchen noch intelligente Strategien anwenden, um an ihr Futter zu kommen – Gras versteckt sich nicht und rennt nicht weg. Beute jedoch, die schwierig aufzuspüren oder zu fangen ist, erfordert ausgedehnte Streifzüge und oft auch eine größere kognitive Leistungsfähigkeit. Früchte fressende Klammeraffen in Mittel- und Südamerika etwa besitzen ein größeres Gehirn und legen täglich fünfmal weitere Strecken zurück als Blätter verzehrende Brüllaffen, mit denen sie sich die Wälder teilen. Raubtiere in der afrikanischen Savanne bewältigen durchschnittlich dreimal so große Entfernungen am Tag wie die Pflanzenfresser, auf die sie Jagd machen.

Der Übergang vom reinen Sammlerleben der frühen Homininen zur Jäger-und-Sammler-Strategie der neuen Gattung *Homo* hatte weit reichende Konsequenzen. Zum einen stärkte er den Zusammenhalt dieser sozialen Primaten. Sich von Beutetieren zu ernähren, macht es erforderlich, zu kooperieren und zu teilen – schon deshalb, weil es für einen einzelnen Menschen mit einer Steinzeitausrüstung fast unmöglich ist, etwa ein Zebra zu töten und zu verzehren. Fleisch zu erbeuten, ist schwierig und nicht immer von Erfolg gekrönt, daher bietet eine verlässliche Grundversorgung mit pflanzlicher Kost überhaupt erst die Voraussetzung dafür, regelmäßig auf Jagd gehen zu können. Heutige Jäger-und-Sammler-Gemeinschaften beziehen ungefähr die Hälfte ihrer Kalorienzufuhr aus Pflanzen. Neuere Analysen von fossilem Zahnstein haben gezeigt, dass selbst die meisterhaft jagenden, wuchtig gebauten und reichlich Fleisch verzehrenden Neandertaler eine gemischte Diät mit einem hohen pflanzlichen Anteil einschließlich Körnern zu sich nahmen.

Jagen und Sammeln förderte auch die Entwicklung von Intelligenz. Technische Innovationen und kreative Jagdtaktiken brachten mehr Beute ein, was bedeutete, mehr Kalorien für die Reproduktion zur Verfügung zu haben. Soziale Intelligenz dürfte von unschätzbarem Wert gewesen sein, als unsere Vorfahren damit begannen, Kommunikation und Koordination zu festen Bestandteilen ihrer Überlebensstrategie zu machen. Das bestätigen Funde, die Allison Brooks von der George Washington University und Richard Potts vom Smithsonian National Museum of Natural History gemacht haben. Im kenianischen Olorgesailie-Becken entdeckten sie Indizien dafür, dass die kognitiven Leistungen der Homininen vor 320 000 Jahren ein Niveau erlangt hatten, das an jenes der heutigen Menschen heranreichte. Dafür sprechen der Gebrauch von schwarzen und roten Pigmenten für bildhafte Darstellungen sowie die offensichtliche Existenz großräumiger Handelsnetze, um Rohstoffe für Steinwerkzeuge einzutauschen. Das Alter dieser Funde stimmt gut mit dem der bisher ältesten *Homo-sapiens*-Fossilien überein (rund 300 000 Jahre), die 2017 an der Höhlenfundstelle Djebel Irhoud in Marokko zu Tage traten.

Auf der Suche nach Fleisch

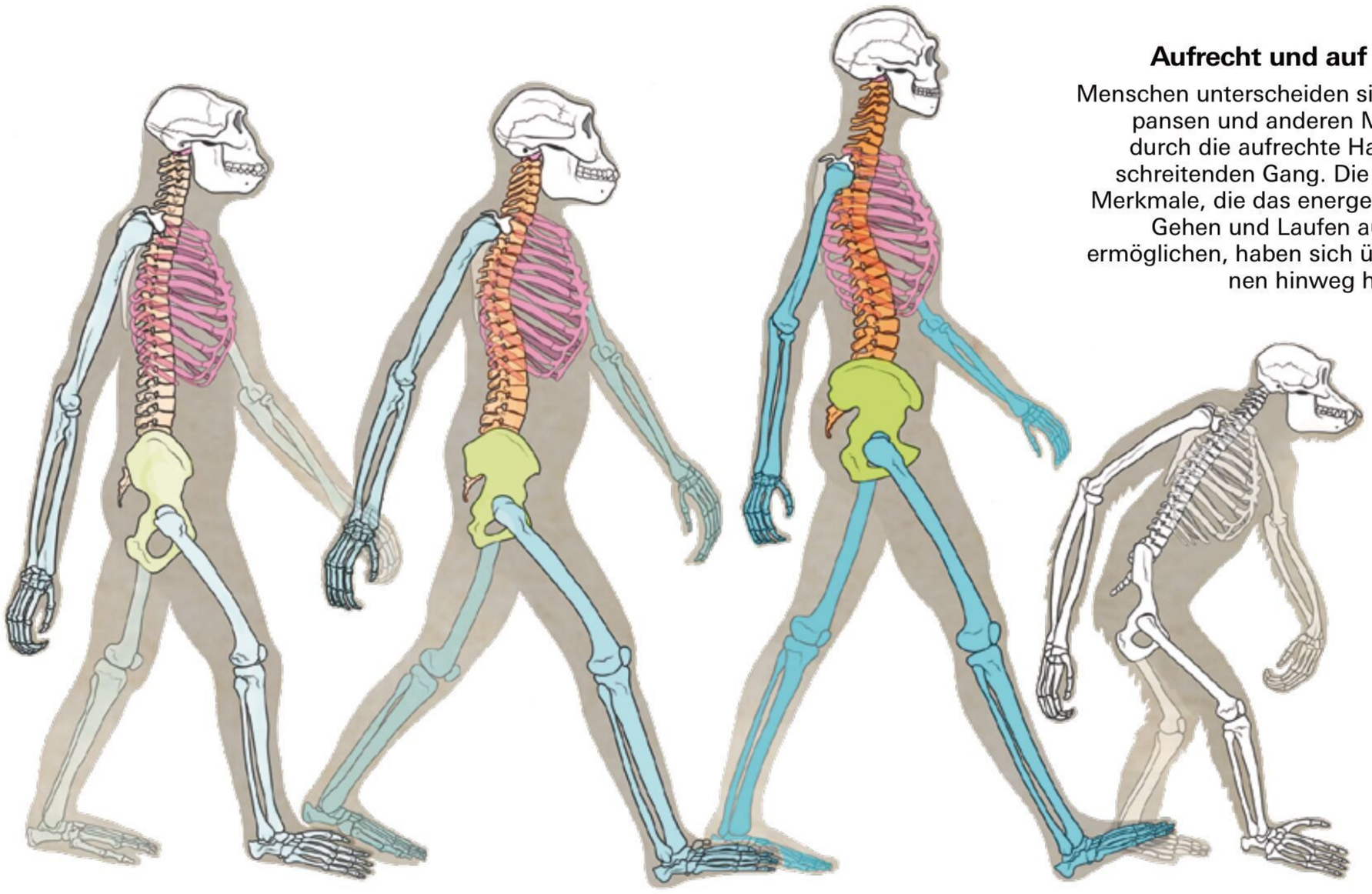
Als Wildbeuter mussten sich die Homininen für den Nahrungserwerb zudem mehr anstrengen. Je weiter man in der Nahrungskette nach oben steigt, umso seltener wird die Beute und umso größer der Aufwand, sie zu finden: In den meisten Habitaten überwiegen die pflanzlichen Kalorien die tierischen bei Weitem. Jäger und Sammler sind bemerkenswert aktiv und legen typischerweise 9 bis 14 Kilometer täglich zu Fuß zurück – das entspricht zirka 12 000 bis 18 000 Schritten. Studien, die David Raichlen von der University of Southern California und ich bei den Wildbeutern der Hadza in Nordtansania durchgeführt haben (siehe »Spektrum« November 2017, S. 20), zeigen dies eindrücklich. Ihre Männer und Frauen leisten an einem Tag körperlich mehr als typische US-Amerikaner in einer Woche und legen täglich drei- bis fünfmal so große Distanzen zurück

Ausdauer-Experten

Weil unsere Vorfahren anatomische Merkmale entwickelten, die den aufrechten Gang ermöglichten (Bildfolge), konnten sie größere Entfernungen bei geringerem Kalorienumsatz zurücklegen und somit in neue Lebensräume vorstoßen. Als sie dann noch anfingen, Tiere zu jagen, nahm ihre körperliche Aktivität weiter zu, einhergehend mit einem erhöhten Aktionsradius für die Nahrungssuche. Ihre Physiologie passte sich diesem bewegungsreichen Lebensstil an. Da wir ihr Erbgut in uns tragen, müssen wir unserer Gesundheit zuliebe Sport treiben.

Aufrecht und auf zwei Beinen

Menschen unterscheiden sich von Schimpansen und anderen Menschenaffen durch die aufrechte Haltung und den schreitenden Gang. Die anatomischen Merkmale, die das energetisch effiziente Gehen und Laufen auf zwei Beinen ermöglichen, haben sich über Jahrmillionen hinweg herausgebildet.

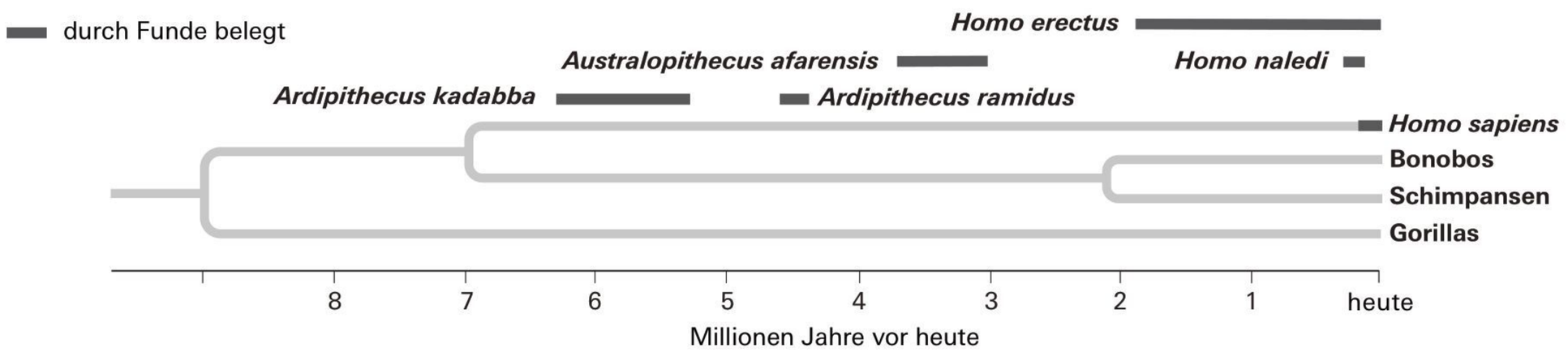


Ardipithecus | *Australopithecus afarensis* | *Homo erectus* | Schimpanse

vertikaler Torso und zentrales Loch an der Schädelbasis für Durchtritt des Rückenmarks		
Form der Wirbelsäule unbekannt	s-förmige Wirbelsäule	vergrößerte Lendenwirbel
muldenförmiges Becken	verkleinertes Sitzbein (Ischium)	robusteres Becken
kurze untere Gliedmaßen, lange obere Gliedmaßen	untere und obere Gliedmaßen verlängert	lange untere Gliedmaßen, obere Gliedmaßen und Finger dagegen kurz

Evolution in kleinen Schritten

Unsere frühen Vorfahren wie *Ardipithecus* und *Australopithecus* bewegten sich bereits auf zwei Beinen fort, wiesen aber noch viele Merkmale baumbewohnender Primaten auf. Genau wie die heutigen Menschenaffen ernährten sie sich überwiegend pflanzlich; ihr Verbreitungsgebiet beschränkte sich auf Afrika. Vor rund 1,8 Millionen Jahren hatte *Homo* die heutigen Körperproportionen entwickelt, schwenkte auf die pflanzlich-tierische Mischkost von Jägern und Sammlern um und breitete sich nach Eurasien aus.



MESA SCHUMACHER / SCIENTIFIC AMERICAN JANUAR 2019; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

wie irgendeiner von unseren Menschenaffenverwandten. Frühe Vertreter unserer Gattung, die noch nicht über technische Innovationen wie Pfeil und Bogen verfügten, dürften sogar noch aktiver gewesen sein. Dennis Bramble von der University of Utah und Daniel Lieberman von der Harvard University schrieben 2004 in einem viel beachteten Aufsatz, unsere Vorfahren seien dahingehend evolviert, ihre Beute bis zur völligen Erschöpfung zu hetzen. Zur Untermauerung führten die Autoren mehrere Skelettmerkmale bei *Homo erectus* an, die für ausdauerndes Laufvermögen sprechen.

Die stetige Größenzunahme des Gehirns und die wachsende technische Komplexität im Verlauf der vergangenen zwei Millionen Jahre scheinen sich auf den ersten Blick zwangsläufig und unaufhaltsam entwickelt zu haben, doch dieser Eindruck täuscht. Die Evolution folgt keinem Plan. 2015 stellten Lee Berger von der University of the Witwatersrand und sein Team ihre Entdeckung hunderter Fossilien von *Homo naledi* vor (siehe Artikel ab S. 52). Die Wissenschaftler hatten die Überreste dieser Menschenart aus tief gelegenen Ablagerungen eines Höhlensystems geborgen und auf ein Alter von 236 000 bis 335 000 Jahren datiert. Mit einem Gehirn, das nur zehn Prozent größer als jenes von *Australopithecus* war, und einer Körpergröße, wie man sie bei frühen Vertretern der Gattung *Homo* findet, repräsentiert dieser Hominine offenbar eine eigene Linie innerhalb unserer Gattung. Sie endete irgendwann im Pleistozän, nachdem *Homo naledi* sich mehr als eine Million Jahre lang ohne die Größenzunahme des Gehirns behauptet hatte, die für andere *Homo*-Arten typisch war. Er erinnert uns daran, dass die Evolution kein Ziel hat und demzufolge auch wir nicht ihr unvermeidliches Ergebnis waren.

Kein Körpermerkmal entsteht isoliert. Das Gehirn muss bequem im Schädel Platz finden, die Zähne müssen in die Kiefer passen, Muskeln, Nerven und Knochen müssen harmonisch aufeinander abgestimmt sein. Das gilt ebenso für Verhaltensmerkmale. Wenn eine Strategie wie das Jagen und Sammeln zur Norm wird, passt sich die Physiologie daran an und wird sogar davon abhängig.



SHARIFF CHE'LAH / STOCK.ADOBE.COM

Mehr Wissen auf
Spektrum.de

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter
spektrum.de/t/sportpsychologie

Ein Beispiel ist das Vitamin C. In frühen Säugetieren entwickelte sich ein mehrstufiger Stoffwechselprozess, bei dem sich dieses wichtige Vitamin selbst bildete. Die Kaskade, an der mehrere Gene mitwirken, ist bei Nagetieren, Fleischfressern und vielen anderen Säugern bis heute intakt. Als unsere Primatenvorfahren vor zehn Millionen Jahren Vitamin-C-reiche Früchte zu ihrer bevorzugten Kost machten, stoppte die Eigenproduktion dieses Stoffs jedoch, weil sie nicht mehr darauf angewiesen waren. Ihre Physiologie passte sich ihrem Verhalten an, indem jenes Gen mutierte, das für den letzten Schritt der Vitamin-C-Synthese zuständig war. Infolgedessen können die heutigen Primaten – darunter die Affen und Menschenaffen – den Stoff nicht mehr selbst bilden. Wird er uns nicht von außen zugeführt, etwa als Nahrungsbestandteil, erkranken wir an Skorbut und sterben.

Die Evolution einer speziellen Atemtechnik bei manchen Hai-, Makrelen- und Tunfischarten liefert ein etwas entfernteres, aber dennoch treffendes Beispiel. Diese Spezies haben eine hochaktive Form der Nahrungssuche entwickelt, indem sie Tag und Nacht pausenlos schwimmen. Ihre Anatomie und Physiologie hat sich mittels einer »Staudruck-Atmung« daran angepasst: Wegen der ständigen Vorwärtsbewegung strömt Wasser über das Maul ein und an den Kiemen vorbei. Die Tiere müssen es deshalb nicht aktiv zu den Kiemen pumpen, weshalb sie keine Kiemenmuskulatur mehr ausbilden. Das spart Energie, bringt diese Fische aber in Erstickungsgefahr: Wenn sie aufhören zu schwimmen, sterben sie.

Sieben Stunden Schlaf reichen uns – das ist vergleichsweise wenig

Wir wissen zwar schon seit Langem, dass uns körperliche Aktivität guttut. Doch auf welch vielfältige Weise sich unsere Physiologie an die bewegungsintensive Lebensweise des Jagens und Sammelns angepasst hat, beginnen wir gerade erst zu verstehen. Fast jedes Organ ist bis hinunter auf die zelluläre Ebene davon betroffen. Das gilt in besonders faszinierender Weise für das Gehirn. Es kann mit erstaunlich wenig Schlaf auskommen, selbst in Gemeinschaften, die kein künstliches Licht oder andere technische Ruhestörer nutzen. Rund um den Globus – egal ob bei den Hadza in der afrikanischen Savanne, bei den Tsimane im Amazonas-Regenwald oder bei den Stadtbewohnern von New York – brauchen Erwachsene rund sieben Stunden Schlaf pro Nacht und damit weitaus weniger als andere Menschenaffen.

Wie David Raichlen und seine Mitarbeiter belegen konnten, ist unser Gehirn so evolviert, dass es anhaltende körperliche Aktivität belohnt. Auf Dauerlauf beispielsweise reagiert es mit der Produktion von Endocannabinoiden, die den Läufer in eine Art Rausch versetzen. Raichlen und andere Forscher postulieren sogar, exzessive körperliche Aktivität habe zur massiven Größenzunahme unseres Gehirns beigetragen, und wir bräuchten viel Bewegung, damit sich unser Denkorgan normal entwickle. Sport führt zur Freisetzung neurotropher Substanzen, die das Nerven- und Gehirnwachstum ankurbeln; zudem verbessert er die Gedächtnisleistung und verzögert den altersbedingten kognitiven Abbau.

Unser Stoffwechsel hat sich ebenfalls an einen bewegungsintensiven Lebenswandel angepasst. Die maximale Sauerstoffaufnahme als obere Grenze der Ausdauerleistung ist beim Menschen mindestens viermal so hoch wie bei Schimpansen. Dafür zeichnen vor allem unsere Beinmuskeln verantwortlich: Sie sind um 50 Prozent größer und haben einen viel höheren Anteil an langsamen, ausdauernd arbeitenden Fasern als die Beinmuskeln der anderen Menschenaffen. Unser Blut enthält außerdem mehr Erythrozyten (rote Blutzellen), die Sauerstoff in den Körper transpor-

tieren. Doch die Anpassungen gehen noch weiter: Anscheinend ist auch der Kalorienumsatz unserer Zellen erhöht. Wie Stephen Ross, Raichlen, ich und weitere Wissenschaftler zeigten, haben Menschen einen beschleunigten Stoffwechsel entwickelt, der den Treibstoff für erhöhte körperliche Aktivität und andere energetisch aufwändige Merkmale liefert, einschließlich des größeren Gehirns.

All diese Erkenntnisse sollten uns dazu anregen, die Bedeutung körperlicher Aktivität neu zu überdenken. Regelmäßige Bewegung wird oft als Mittel zum Abnehmen angepriesen oder als gesundheitsfördernde Maßnahme für einen bewussten Lebensstil. Aber sie ist keine Option, sondern ein Muss. Und die Minderung des Körpergewichts dürfte zu jenen Nutzeffekten zählen, die Sport am wenigsten erbringt. Unser Organismus ist auf tägliche körperliche Aktivität ausgelegt; gewähren wir sie ihm, arbeitet er nicht *mehr*, sondern *besser*. Wie ich und andere herausgefunden haben, wirkt sich physische Aktivität kaum auf den täglichen Gesamtenergieaufwand aus: Die Jäger und Sammler des Hadza-Volks setzen etwa genauso viel Kalorien pro Tag um wie westliche Stubenhocker (siehe »Spektrum« November 2017, S. 12). Darum ist es so unglaublich schwierig, Körpergewicht mittels sportlicher Betätigung abzubauen. Sport lässt nicht unbedingt die Pfunde purzeln, doch er reguliert, wofür der Organismus Energie bereitstellt und wie er seine lebenswichtigen Funktionen koordiniert.

Sport lässt unseren Organismus nicht *mehr*, sondern *besser* arbeiten

Laut neuen Erkenntnissen der Stoffwechselforschung setzt Muskeltraining hunderte Signalsubstanzen im Körper frei. Was diese physiologisch alles bewirken, haben wir bislang nur in Ansätzen verstanden. Sicher ist, dass Ausdauertraining chronische Entzündungen dämpft, einen bedeutenden Risikofaktor für Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Es senkt zudem die Ruhespiegel der Steroidhormone Testosteron, Östrogen und Progesteron. Infolgedessen erkranken Erwachsene, die regelmäßig ausdauernd trainieren, seltener an hormonabhängigen Tumoren der Geschlechtsorgane und -drüsen.

Körperliche Aktivität kann auch dem morgendlichen Anstieg des Stresshormons Kortisol entgegenwirken. Zudem macht sie Körperzellen empfindlicher gegenüber Insulin, senkt damit das Risiko eines Diabetes Typ 2 und bringt den Organismus dazu, Glukose vermehrt in muskuläres Glykogen umzuwandeln statt in Fett. Bei regelmäßigem Bewegungstraining wehrt unser Immunsystem infektiöse Krankheitserreger effektiver ab, besonders im Alter. Selbst leichte Aktivität, etwa Stehen statt Sitzen, veranlasst die Muskeln zum Bilden von Enzymen, die Blutfette abbauen.

Es ist daher wenig verwunderlich, dass Herzkomplikationen, Diabetes und andere typische Zivilisationskrankheiten bei Jägern und Sammlern wie den Hadza praktisch unbekannt sind. Wir müssen aber nicht deren Lebensweise übernehmen oder Marathon laufen, um von ähnlichen Effekten zu profitieren. Die Lektion, die wir von den Hadza, Tsimane und anderen lernen: Es kommt vor allem auf die Menge an und weniger auf die Intensität. Diese Menschen sind von früh bis spät auf den Beinen und täglich etliche Stunden körperlich aktiv, überwiegend in Form von Laufen. Wir können uns dem annähern, indem wir gehen oder radeln, statt Auto zu fahren, Treppen steigen, statt den Fahrstuhl zu nehmen, und generell bei jeder sich bietenden Gelegenheit unseren Allerwertesten bewegen. Eine 2017 publizierte Studie von Forschern um William Tigbe von der University of Warwick hat gezeigt, wie das aussehen kann. Sie ergab, dass Glasgower Postangestellte umso gesünder sind, je mehr sie sich körperlich betätigen, etwa beim Austragen der Post: Jene, die täglich 15000 Schritte absolvierten oder sieben Stunden auf den Beinen waren (was dem Aktivitätsniveau der Hadza entspricht), wiesen die wenigsten Anzeichen für Herz-Kreislauf- und Stoffwechselerkrankungen auf.

Wenn wir schon dabei sind, sollten wir noch weitere Lehren aus dem Verhalten der Hadza und anderer Wildbeuter ziehen. Neben viel Bewegung und Vollwertkost ist der Alltag dieser Menschen von ausgiebigen Aufenthalten an der frischen Luft sowie von Freundschaften und familiärem Zusammensein geprägt. Es gibt keine ausgeprägten Hierarchien bei ihnen und auch keine großen Unterschiede in ihrem ökonomischen Status. Wir wissen zwar nicht genau, wie dies ihre Gesundheit beeinflusst, aber es ist bekannt, dass große sozioökonomische Unterschiede in den Industrieländern zu chronischem Stress beitragen, was wiederum Zivilisationskrankheiten fördert.

Freude an einer körperlich aktiveren Lebensweise zu finden, wäre einfacher, wenn wir nicht mit dem Gorilla in unserem Kopf ringen müssten: Wir hören zu viel auf den Menschenaffen in uns, was unsere Lebensgestaltung anbelangt. Wir schlagen uns den Bauch mit Schnellgerichten voll, sehen uns wandelnde Zombies an, statt selbst zu laufen, und pflegen Freundschaften im Sessel mit dem Smartphone in der Hand, statt unsere Bekannten zu besuchen. Wir sind fasziniert davon, uns in den großen Menschenaffen wiederzuerkennen, doch auf Grund unseres evolutionären Hintergrunds unterscheiden wir uns in Wirklichkeit ziemlich stark von ihnen. ◂

QUELLEN

Pontzer, H.: The crown joules: energetics, ecology, and evolution in humans and other primates. Evolutionary Anthropology 26, 2017

Pontzer, H.: Economy and endurance in human evolution. Current Biology 27, 2017

Raichlen, D.A. et al.: Differential associations of engagement in physical activity and estimated cardiorespiratory fitness with brain volume in middle-aged to older adults. Brain Imaging and Behavior, 2019

Tigbe, W. et al.: Time spent in sedentary posture is associated with waist circumference and cardiovascular risk. International Journal of Obesity 41, 2017



JON FOSTER / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2018

ERNÄHRUNG

DIE WAHRE STEINZEITDIÄT

Mikroskopisch kleine Abnutzungsspuren auf fossilen Zähnen verraten, was Frühmenschen gegessen haben. Sie vermitteln damit gleichzeitig einen Eindruck, wie Klimaveränderungen unsere Evolution beeinflussten.



Peter S. Ungar ist Anthropologe an der University of Arkansas in Fayetteville (USA). Sein Forschungsinteresse richtet sich auf die Ernährung derzeitiger und fossiler Primaten einschließlich der Vorfahren des Menschen.

spektrum.de/artikel/1679044

JON FOSTER / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2018

ALLESFRESSER
Homo erectus **ernährte sich vielseitig. Neben pflanzlicher Kost stand auch Fleisch auf seinem Speiseplan.**

AUF EINEN BLICK
URZEITLICHES MENÜ

1 Aus Größe und Form von Zähnen lässt sich die Ernährung ausgestorbener Tierarten bestimmen. Wichtiger als die Anatomie ist jedoch die Verfügbarkeit von Nahrung.

2 Analysen der mikroskopischen Abnutzungsmuster auf Zähnen zeigen genauer, was ein Individuum einst verspeist hat. Damit können Paläontologen auch den Speiseplan ausgestorbener Homininen rekonstruieren.

3 Erkenntnisse über die Ernährung sowie paläoökologische Befunde zeigen, wie Klimaveränderungen die Evolution des Menschen prägten.

An einem späten Abend des Jahres 1990 saß ich in meiner Hütte am Ufer des Flusses Alas in der Forschungsstation Ketambe des indonesischen Nationalparks Gunung Leuser. Im Schein einer Kerosinlampe schrieb ich meine Notizen ins Reine. Ich wollte hier für meine Doktorarbeit herausfinden, was und wie die Klein- und Menschenaffen der Region fressen. Dahinter steckte die Idee, dass solche Beobachtungen zu Größe, Form und Abnutzungsspuren der Zähne passen sollten: Javaneraffen besitzen ein Gebiss mit großen Schneide- und flachen Backenzähnen, das nach hergebrachter Ansicht zum Verzehr von Früchten gebaut ist. Doch die Affen, die ich die letzten vier Tagen gesehen hatte, fraßen anscheinend nur junge Blätter. Damals begriff ich, dass der Zusammenhang zwischen Form und Funktion der Zähne komplizierter ist, als es in den Lehrbüchern steht – die Zähne verraten nicht unbedingt, was ein Tier frisst. Das mag abstrus klingen, aber diese Erkenntnis wirkt sich maßgeblich auf unser Verständnis über die Evolution der Tiere einschließlich uns Menschen aus.

Als Paläontologe verdiene ich meinen Lebensunterhalt damit, das Verhalten ausgestorbener Arten anhand ihrer fossilen Überreste zu rekonstruieren. Insbesondere interessiert mich, wie sich Tiere früher ihre Nahrung beschafft haben und wie sich dabei Umweltveränderungen auswirkten. Das Jahr in Ketambe prägte mein Denken über Primaten und ihre Lebensgemeinschaften. Ich erkannte die Biosphäre unseres Planeten als reich gedeckten Tisch. Die Tiere stehen gewissermaßen mit dem Teller in der Hand am Büfett und wählen aus dem Angebot, das jeweils zur Verfügung steht. Die Wahl definiert, welchen Platz jede Spezies in der Natur einnimmt.

Das Angebot auf dem Biosphärenbüfett wandelt sich mit den Jahreszeiten

Zähne spielen für die Nahrungswahl eine Schlüsselrolle – schließlich braucht man das richtige Werkzeug. In Ketambe wurde mir allerdings klar, dass es noch etwas viel Wichtigeres gibt: Verfügbarkeit. Die Javaneraffen fraßen Blätter, weil ihnen die Natur zu jener Zeit und an jenem Ort nichts anderes auf dem Biosphärenbüfett serviert hat. Ihr Speiseplan wandelte sich mit den Jahreszeiten, wenn die Blätter sich entfalteten, die Blüten aufbrachen und die Früchte heranreiften. Ich malte mir aus, wie sich veränderte Nahrungsverfügbarkeit im Lauf von Jahrhunderten, Jahrtausenden oder noch längeren Zeiträumen darauf auswirkt, was eine Spezies frisst.

Die meisten Paläontologen sind es nicht gewohnt, so über das Leben der Vergangenheit nachzudenken. Traditionell leitet man in unserem Fachgebiet die Funktion aus der Form ab: Die Natur habe für jede Aufgabe, vor der ein Lebewesen steht, mittels Selektion die besten Hilfsmittel hervorgebracht. Wenn die Form jedoch immer der Funktion folgte, würden Javaneraffen keine Blätter verspeisen. Wie aber können wir an Fossilien ablesen, was ein Tier tatsächlich gefressen hat?

Um genau diese Frage zu beantworten, habe ich jahrzehntelang mikroskopisch kleine Abnutzungsmuster an fossilen Zähnen von zahlreichen Arten einschließlich mehrerer Vor- und Frühmenschenspezies analysiert. Andere Wissenschaftler suchten bei fossilen Zähnen nach chemischen Spuren der Nahrung. Zusammen mit Erkenntnissen über urzeitliche Umweltverhältnisse liefern uns solche Analysen ein viel stimmigeres Bild von der Vergangenheit als die Form eines Zahns allein. Damit nähern wir uns auch einer Antwort auf die Frage, warum unser Zweig des Menschenstammbaums überlebte, während die anderen untergingen.

Wissenschaftler haben zahlreiche Tierarten beobachtet, die nicht nur die Nahrung fressen, an die sie angepasst sind, sondern auch andere. Während ich in Ketambe war, erforschte Melissa Remis, heute an der Purdue University, die Gorillas von Bai Hokou im Regenwald des Dzanga-Nodoki-Nationalparks in der Zentralafrikanischen Republik. Seitdem die berühmte Gorillaforscherin Dian Fossey (1932–1985) in den hoch gelegenen Nebelwäldern der ostafrikanischen Virunga-Vulkane die Affen beobachtet hatte, galten sie als Nahrungsspezialisten, die Stängel, Blätter und Mark von krautigen Pflanzen wie wilden Sellerie verzehren. Das erschien auch plausibel. Gorillas besitzen einen hoch spezialisierten Verdauungsapparat: Ihre scharfkantigen Backenzähne eignen sich hervorragend zum Zermahlen von Pflanzen, und ihr großer Enddarm enthält Mikroorganismen, die beim Verdauen faserreicher Nahrung mithelfen. Außerdem gibt es in dieser Höhe kaum etwas anderes zu fressen.

Die Berggorillas der Virunga-Vulkane bildeten jedoch nur eine kleine, randständige Population aus wenigen hundert Individuen in einem extremen Lebensraum. Wie sah es bei den 200 000 Gorillas aus, die 1600 Kilometer weiter westlich in den tief gelegenen Regenwäldern des Kongobeckens lebten? Offenbar bevorzugten die Westlichen Flachlandgorillas von Bai Hokou weiche, süße Früchte. Remis sah sogar Gorillas, die fast einen Kilometer weit an genießbaren Blättern und Stängeln vorbei zu einem Baum mit Früchten liefen. Auf faserreiche Kost griffen sie wohl nur dann zurück, wenn ihre Lieblingsfrüchte nicht zur Verfügung standen. Allerdings waren die Tiere im Gegensatz zu ihren Verwandten der Virunga-Vulkane sehr scheu, so dass Remis nur wenige von ihnen verfolgen konnte. Einige Wissenschaftler bezweifeln angesichts der Zähne und des Darms, dass Gorillas tatsächlich Früchte bevorzugen.

»Womit füttert man einen 200 Kilogramm schweren Gorilla? – Mit allem, was er will!«, lautet ein alter Witz. Aber woher sollen wir wissen, was ein Gorilla will? Zurückgekehrt von Bai Hokou, ging Remis in den Zoo von San Francisco und fragte die Gorillas selbst: Sie bot den gefangenen Affen verschiedenes Futter an, von süßen Mangos bis zu bitteren Tamarinden, aber auch saure Zitronen und natürlich den zähen Sellerie. Die Gorillas im Zoo bevorzugten eindeutig süße, fleischige Früchte gegenüber der faserreichen Nahrung. Damit bestätigte sich, dass die Tiere zwar durch ihren Verdauungsapparat an mechanisch und chemisch anspruchsvollstes Futter angepasst sind – ihre Lieblingsspeise ist das allerdings nicht. Vielleicht fressen die Gorillas der Virunga-Vulkane also nicht deshalb rund ums Jahr zähe Kost, weil sie diese besonders mögen, sondern weil sie es können und – angesichts des begrenzten Menüs in solchen Höhen – müssen. Tatsächlich greifen Berggorillas in tieferen Lagen ebenfalls lieber zu Früchten, wenn sie zur Verfügung stehen.



ALAIN HOULE, HARVARD UNIVERSITY

SÜSSES OBST Grauwangenmangaben *(Lophocebus albigena)* greifen gern zu weichen Früchten. Ihre flachen Backenzähne mit dickem Zahnschmelz scheinen dagegen auf das Zermalmen harter Nahrung spezialisiert zu sein. Doch diese fressen die Tiere nur, wenn ihnen nichts anderes zur Verfügung steht.

Eine Vorliebe für Nahrung, an die eine Spezies eigentlich nicht angepasst ist, kommt im Tierreich so häufig vor, dass es dafür einen eigenen Begriff gibt: Liems Paradoxon. Der 2009 verstorbene Biologe Karl Liem von der Harvard University stieß in den 1980er Jahren im Norden Mexikos auf ein interessantes Phänomen: Der hier vorkommende Buntbarsch *Herichthys minckleyi* besitzt flache, kieselsteinartige Zähne, die sich hervorragend zum Aufknacken harter Schneckenhäuser eignen. Doch die Süßwasserfische schwimmen an den Schnecken vorüber, wenn es weichere Nahrung gibt. Warum entwickelten sich in der Evolution Zähne, die auf weniger bevorzugtes, selten verzehrtes Futter spezialisiert sind? Solange diese Spezialisierung den Verzehr weicher Nahrung nicht behindert, stehen damit bei Bedarf mehr Möglichkeiten offen. Das Paradoxon besteht also weniger darin, dass ein Tier die Nahrung meidet, an die es angepasst ist, sondern dass eine spezialisierte Anatomie mit einer generalisierten Ernährung einhergehen kann.

Beispiele für Liems Paradoxon liefern auch andere Tiere, darunter die Grauwangenmangaben im Kibale-Nationalpark in Uganda (siehe Foto links). Die Affen besitzen flache Backenzähne mit dickem Zahnschmelz, die anscheinend auf das Zermalmen harter, spröder Nahrung spezialisiert sind. Und dennoch beobachtete Joanna Lambert, die heute an der University of Colorado in Boulder arbeitet, Tag für Tag, Monat für Monat, ja sogar Jahr für Jahr, wie die Mangaben weiche, fleischige Früchte und junge Blätter fraßen – genauso wie die in der gleichen Gegend lebenden Rotschwanzmeerkatzen mit ihren dünnen Zähnen. Doch im Sommer 1997 änderte sich alles: Auf Grund eines El-Niño-Ereignisses litt der Wald unter einer besonders schweren Dürre. Die Früchte wurden knapp, die Blätter verwelkten – und die Affen hungerten. Die Mangaben fraßen nun mehr Rinde und harte Samen, die Meerkatzen aber nicht. Dank ihres spezialisierten Kauapparats konnten Erstere auf mechanisch anspruchsvolleres Futter zurückgreifen. Selbst wenn eine solche Anpassung in einer Generation nur ein- oder zweimal gebraucht wird, kann sie unter Umständen dafür sorgen, dass die Tiere magere Zeiten überstehen.

Verräterische Spuren auf den Zähnen

In anderen Fällen kann eine spezialisierte Anatomie aber durchaus mit Nahrungspräferenzen zusammenfallen. Die Rußmangaben im Taï-Wald der Elfenbeinküste zum Beispiel besitzen einen kräftigen Kiefer sowie dicken Zahnschmelz – und sie mögen tatsächlich harte Kost. Während der Nahrungssuche verwenden sie einen großen Teil ihrer Zeit darauf, am Waldboden nach den pfirsichkernartigen Samen der tropischen Baumgattung *Sacoglottis* zu suchen. Wie Scott McGraw von der Ohio State University vermutet, gehen die Affen damit der Nahrungskonkurrenz mit den zehn anderen Primatenarten aus dem Weg, die hier ebenfalls leben. Demnach setzen manche Mangabenarten ständig auf mechanisch anspruchsvolle Nahrung, andere dagegen eher selten.

Solche Beispiele demonstrieren, dass die Nahrungsauswahl von Primaten nicht nur von den Zähnen abhängt, sondern auch von Verfügbarkeit, Konkurrenzsituation und persönlichen Vorlieben. Die Zahnform kann etwas darüber aussagen, was das Tier in der Vergangenheit fressen konnte und welches die schwierigste Nahrung war, mit der seine Vorfahren zurechtkommen mussten. Aber um zu erfahren, welches Menü aus dem Biosphärenbüfett die Tiere tatsächlich wählten, müssen wir uns die Zähne genauer ansehen.

Je nach Nahrung bilden sich auf den Zahnoberflächen mikroskopisch kleine Kratzer und Rillen. Bei Arten, die ihr Futter zerschneiden oder zerteilen wie Gras fressende Antilopen oder Fleisch fressende Geparde, tauchen lange, parallel verlaufende Kratzer auf, weil die gegenüberstehenden Zähne aneinander entlanggleiten und schleifendes Material mitziehen. Bei anderen, die Hartes zermalmen wie die Nüsse fressenden Mangaben oder die Knochen brechenden Hyänen, sind die Zähne mit kraterförmigen Vertiefungen unterschiedlicher Form und Größe bedeckt.

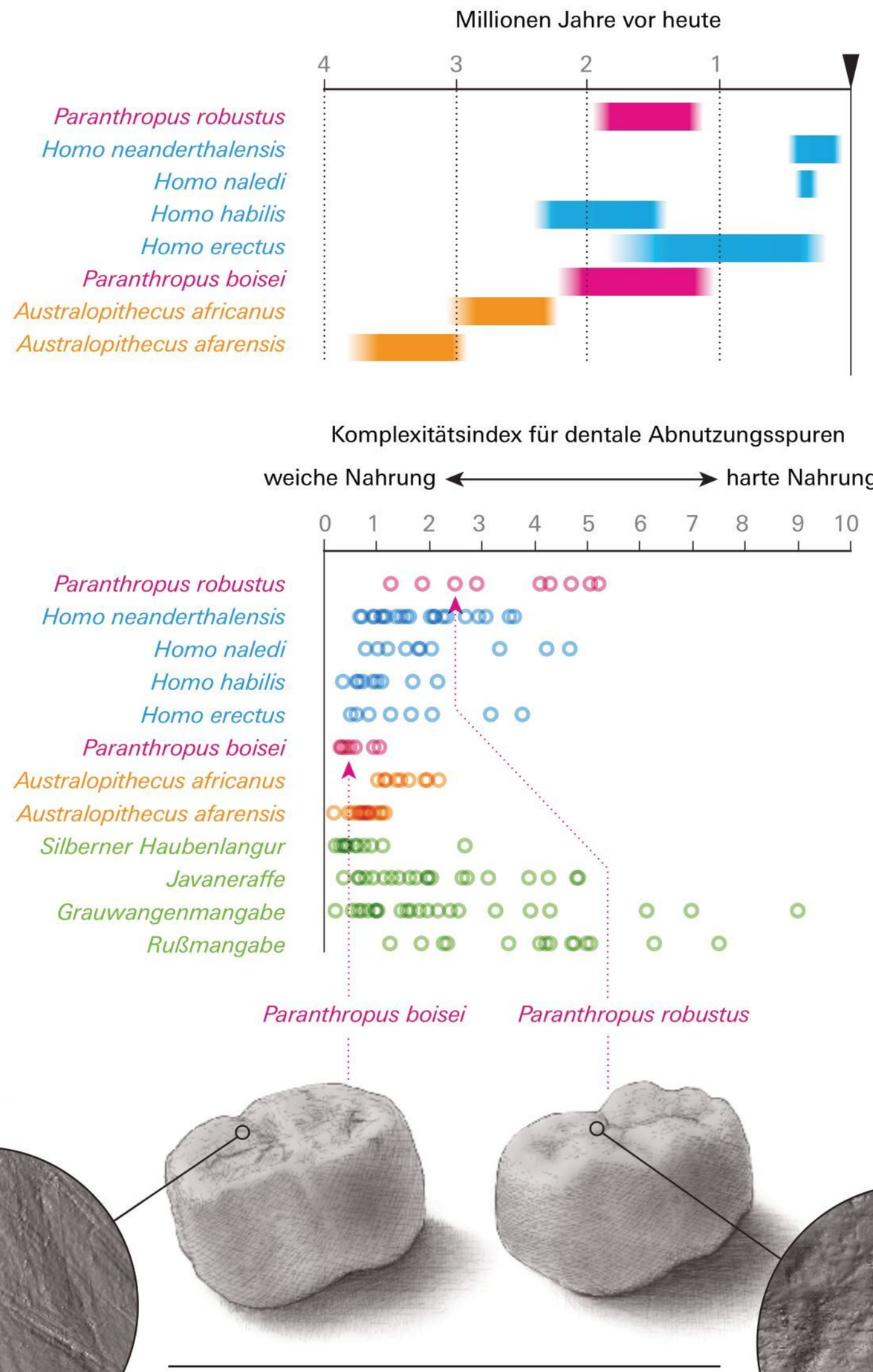
In der Regel werden solche »Foodprints«, wie ich sie nenne, binnen weniger Tage abgeschabt und von neuen überschrieben. Daher können wir etwas über die Vielfalt und vielleicht auch die Mengenverhältnisse der verzehrten Nahrung erfahren, wenn wir die Zähne von verschiedenen

Foodprints

Auf Zähnen bilden sich während des Gebrauchs mikroskopisch kleine Kratzer. Bei Tieren, die zähe Kost wie Gras verzehren, erscheinen solche Abnutzungsspuren als parallele Rillen. Zerkleinert ein Individuum dagegen Nüsse oder anderes hartes, sprödes Material, entstehen kraterförmige Vertiefungen. Die Abnutzungsmuster fossiler Zähne, etwa von *Paranthropus robustus* und *Paranthropus boisei*, erlauben Rückschlüsse auf die Ernährung ausgestorbener Menschenarten.

Grasfresser statt Nussknacker

Auf Grund früherer Untersuchungen der Zahnform galt *P. robustus* als Liebhaber zäher Pflanzenkost, während sich *P. boisei* auf das Knacken von Nüssen spezialisiert haben sollte. Die mikroskopischen Abnutzungsspuren eines Zahns von *P. robustus* zeigten jedoch ein kompliziertes Muster aus Rillen und Vertiefungen, was ihn als Ernährungsgeneralisten verrät (unten rechts). *P. boisei* dagegen trägt nicht die bei einem Nussknacker zu erwartenden Vertiefungen, sondern rillenförmige Kratzer (unten links). Wie spätere chemische Analysen der Zähne belegten, verzehrte diese Spezies vorwiegend Gras.



DATEN UND MIKROSKOP-AUFNAHMEN: PETER S. UNGAR; ZAHNILLUSTRATIONEN MITTE: PORTIA SLOAN ROLLINGS; DIAGRAMME: JEN CHRISTIANSEN / SCIENTIFIC AMERICAN JULI 2018

Individuen aus unterschiedlichen Zeiten und Orten vergleichen (siehe »Foodprints«). Die mikroskopischen Abnutzungsmuster der Grauwangenmangaben von Kibale ähneln mit ihren zarten Kratzern und kleinen Vertiefungen denen von Affen, die weiche Früchte fressen – bei einigen Exemplaren finden sich aber auch tiefere Gruben. Die Zahnoberfläche der Rußmangaben aus Taï dagegen lassen meist mehr Krater erkennen. Beide Arten besitzen ähnliche Zahnformen, doch erst ihre Foodprints passen zu der bekannten unterschiedlichen Ernährung.

Anhand der mikroskopischen Abnutzungsmuster bei lebenden Tieren, deren Ernährungsgewohnheiten wir unmittelbar beobachten können, lässt sich aus der Abnutzung fossiler Zähne auf den Speiseplan ausgestorbener Arten schließen. Deshalb steckten meine Kollegen und ich viel Arbeit in die Analyse der mikroskopischen Abnutzungsspuren menschlicher Fossilien – mit überraschenden Ergebnissen.

Der Stammbaum des Menschen hat viele Äste. *Homo sapiens* überlebte als einzige Menschenart bis heute; früher teilten sich viele Homininen unseren Planeten. Hierzu zählt etwa die Gattung *Paranthropus*, die im Pleistozän vor rund 1,2 bis 2,7 Millionen Jahren im östlichen und südlichen Afrika existierte. Wir selbst sind aus keiner Spezies dieser Gattung hervorgegangen; vielmehr handelt es sich um letztlich gescheiterte Experimente der Evolution, die neben unseren Vorfahren über die Erde wandelten. *Paranthropus* besaß große, flache Backenzähne mit dickem Zahnschmelz, einen massiven Kiefer sowie charakteristische Knochenleisten und Kerben, die auf eine mächtige Kaumuskulatur schließen lassen. Solche Merkmale deuten klar auf eine spezialisierte Ernährung, die starkes Kauen erfordert; die fraglichen Arten erweisen sich somit als ideale Kandidaten für eine Analyse der mikroskopischen Abnutzung. Wenn wir bei ihnen nicht herausfinden können, was sie einst verspeist haben, dürfte die Ernährung anderer

fossiler Homininen mit einem weniger charakteristischen Kauapparat erst recht unergründlich bleiben.

Bereits 1954 bemühte sich John Robinson (1923–2001) vom Transvaal Museum in Pretoria, die Ernährung von *Paranthropus* zu rekonstruieren. Der Paläoanthropologe glaubte, die südafrikanische Spezies *Paranthropus robustus* habe mit ihren großen, flachen Backenzähnen mit dickem Zahnschmelz zähe Pflanzenteile zermalmt. Die Abnutzungsspuren ließen seiner Ansicht nach darauf schließen, dass *P. robustus* vor allem grobe Wurzeln und Knollen verzehrte. Robinsons Kollege Phillip Tobias (1925–2012) war anderer Meinung: Er führte die Abplatzungen nicht auf zähe, sondern auf besonders harte Lebensmittel zurück. Tobias beschrieb in den 1960er Jahren die Art *Paranthropus boisei* (siehe Artikel ab S. 36) Als er dessen Schädel zum ersten Mal sah, soll er gesagt haben: »Ich habe noch nie einen derart bemerkenswerten Nussknacker gesehen.«

Ein vermeintlicher Spezialist für harte Kost erweist sich als Nahrungsgeneralist

Damit war die Idee vom Nussknacker-Menschen geboren. *Paranthropus* stand in krassem Gegensatz zu Fossilien des frühen *Homo* aus denselben Sedimenten mit seinen kleineren Zähnen, einem zierlicheren Kiefer, einem größeren Gehirn sowie mit Steinwerkzeugen zum Verarbeiten von Nahrung. Für die Unterschiede lieferten Wissenschaftler eine plausible Erklärung: die Savannenhypothese. Demnach gelangten unsere Vorfahren an einen evolutionären Scheideweg, als sich Graslandschaften über Afrika ausbreiteten. *Paranthropus* schlug die eine Richtung ein und fokussierte sich auf harte, trockene Pflanzenteile aus der Savanne wie Samen und Wurzeln. Der frühe *Homo* ging einen anderen Weg: Er wurde immer vielseitiger, und auf seinen Speiseplan setzte er nun auch Fleisch. Auf Grund dieser flexiblen Ernährung gibt es laut dieser Vorstellung uns noch, während *Paranthropus* verschwand. Die Theorie klang überzeugend. In den 1980er Jahren konnte der Anthropologe Frederick Grine von der Stony Brook University mit ersten mikroskopischen Untersuchungen zeigen, dass die Zähne von *P. robustus* tatsächlich mehr abnutzungsbedingte Vertiefungen aufweisen als die seines Vorfahren *Australopithecus*. Damit schien bestätigt, dass sich dieser Vetter des Menschen auf harte, spröde Nahrung spezialisiert hatte.

Im Jahr 2005 jedoch, als mein Postdoc Robert Scott und ich uns die mikroskopisch kleinen Abnutzungserscheinungen von *P. robustus* genauer anschauten, kristallisierte sich eine andere Geschichte heraus: Ja, der Abrieb mit mehr Vertiefungen wirkte bei *P. robustus* komplizierter, aber bei manchen Exemplaren tauchten auch weniger eingekerbte Zahnoberflächen auf. Die mikroskopischen Verschleißspuren erwiesen sich somit als sehr vielgestaltig – manche Individuen hatten demnach an den Tagen vor ihrem Tod harte Nahrung zu sich genommen, andere dagegen nicht. Anders gesagt: Die spezialisierte Anatomie von *P. robustus* bedeutete nicht zwangsläufig, dass die Art ein Nahrungsspezialist war. Diese Schlussfolgerung war nicht neu. Bereits ein Jahr zuvor hatten Bernard Wood von der George Washington University und David Strait, der heute an der Washington University in St. Louis arbeitet, auf Grund indirekter Indizien spekuliert, *Paranthropus* könne ein ökologischer Generalist mit flexibler Ernährungsweise gewesen sein. Unsere Arbeiten lieferten dann den unmittelbaren Beleg für Liems Paradoxon bei Homininen.

Eine noch größere Überraschung erlebten wir 2008, als wir uns die Abnutzungsspuren bei *Paranthropus boisei* ansahen – Tobias' Nussknacker, die Spezies mit den größten Zähnen, den massivsten Kieferknochen und dem dicksten Zahnschmelz aller Homininen. Ich hatte damit gerechnet, dass wir auf der Zahnoberfläche geradezu mondartige Kraterlandschaften fänden, so wie sie auch bei Rußmangaben auftauchten. Das erwies sich jedoch als falsch. Ein Zahn nach dem anderen offenbarte lediglich in alle Richtungen verlaufende zarte Kratzer. Diese Kreaturen waren somit keineswegs Spezialisten für harte Kost; es gab überhaupt keine Hinweise auf feste Nahrung. Die Nussknackerhypothese fiel in sich zusammen wie ein Kartenhaus. Was also verspeiste *P. boisei* mit seinen großen, flachen Zähnen? Diese Frage sollte erst mit einer anderen Form von Foodprints beantwortet werden: mit Kohlenstoffisotopen.

In den Zähnen bleiben charakteristische chemische Spuren der Nahrung erhalten, die das Rohmaterial zum Aufbau des Körpers liefert. Wie die mikroskopischen Abnutzungsspuren lassen sich diese chemischen Indizien lesen und entschlüsseln. So enthalten tropische Gräser im Vergleich zu Bäumen und Büschen einen höheren Anteil an Kohlenstoffatomen mit sieben statt der üblichen sechs Neutronen; und deshalb findet man in den Zähnen von Tieren, die tropische Gräser fressen, mehr von diesem »schweren« Kohlenstoff.

Das Verhältnis der Kohlenstoffisotope in den Zähnen von *P. robustus* deutet auf eine Ernährung hin, in der Produkte von Bäumen und Büschen die Hauptrolle spielten, wobei aber auch ein kräftiger Anteil von tropischen Gräsern hinzukam. Dieser Befund passt zu einer breit gefächerten Ernährung. *P. boisei* liefert dagegen ein anderes Bild: Hier lassen die Kohlenstoffisotope darauf schließen, dass die Art zu mindestens drei Viertel von Gräsern lebte.

Dieses Ergebnis schockierte viele Paläoanthropologen: ein Hominine, der Gras frisst? Ein Mitglied unseres Familienstammbaums ist doch keine Kuh! Mir erschien das jedoch plausibel. Die Spezies tauchte just zu jener Zeit auf, als sich Graslandschaften im östlichen und südlichen Afrika ausbreiteten, so dass das Biosphärenbüfett nun mit reichlich Wiesen gedeckt war. Wenn *P. boisei* mit seinen großen, flachen Zähnen und den kräftigen Kiefern statt harter, spröder Nahrung Gräser zermalmte, musste genau das Muster mikroskopischer Abnutzungsspuren zurückbleiben,

Mehr Wissen auf
Spektrum.de
Unser Online-Dossier zum Thema »Ernährung« finden Sie unter
spektrum.de/t/ernaehrung



FOTOLIA / TESGRO TESSIERI

das meine Kollegen und ich gefunden hatten. Eine solche Ernährung könnte ebenfalls erklären, warum die Backenzähne von *P. boisei* so schnell abgeschliffen wurden.

Das alles wüssten wir nicht, wenn wir lediglich die Form der riesigen, flachen Zähne berücksichtigten; erst die Foodprints offenbarten, dass die beiden Arten von *Paranthropus* ihre spezialisierte Anatomie auf ganz unterschiedliche und unerwartete Weise nutzten. Wie die Mangaben von Kibale scheint *P. robustus* ein Generalist gewesen zu sein, der auch harte Kost nicht verschmähte. Bei *P. boisei* dagegen zeigte sich ein Zusammenhang zwischen Zähnen und Ernährung, der sich von allem unterscheidet, was wir von heutigen Primaten kennen. Große, flache Zähne sind keineswegs ideal zum Zerkleinern von Gras, aber man muss mit dem zurechtkommen, was man hat. Solange ein flacher Mahlstein besser ist als alles, was die Homininen zuvor besaßen, hat die Selektion ihn selbst dann nicht aussortiert, wenn er sich für die fragliche Aufgabe nur suboptimal eignete.



JOHN R. FOSTER / SCIENCE PHOTO LIBRARY

Kurzfristige Umschwünge des Klimas ließen keinen Platz für wählerische Esser

Bei unseren unmittelbaren Vorfahren aus der Gattung *Homo* weisen die mikroskopischen Abnutzungserscheinungen auf eine andere Ernährungsstrategie hin. Wir beschäftigten uns mit zwei frühen Arten: dem »primitiveren« *Homo habilis*, der ein kleineres Gehirn besaß und einige Eigenschaften vom Leben auf Bäumen beibehalten hatte, sowie *Homo erectus*, einer Spezies mit größerem Gehirn, die sich ausschließlich am Boden aufhielt. Allerdings standen uns lediglich kleine Stichproben zur Verfügung, denn für die Analyse der Abriebspuren braucht man unberührte Zähne, von denen es nicht allzu viele gibt. Doch diese offenbarten interessante Zusammenhänge: Im Vergleich zu seinem mutmaßlichen Vorfahren *Australopithecus afarensis* und zur gleichzeitig existierenden Art *P. boisei* zeigte *H. habilis* ein größeres Spektrum an Abnutzungsformen, die von Oberflächen mit komplizierten Gruben bis zu einfachen Kratzern reichen. Demnach scheint das Menü von *H. habilis* abwechslungsreicher als das seiner Vorfahren und Zeitgenossen gewesen zu sein. Bei seinem Nachfolger *H. erectus* sind die Spuren sogar noch vielfältiger, was auf eine abermals breiter gefächerte Ernährungsweise hindeutet.

Solche Befunde passen sehr gut zur heutigen Vorstellung über die Einflüsse von Klimaveränderungen auf die Evolution des Menschen. Als der britische Geologe Nicholas Shackleton (1937–2006) Mitte der 1990er Jahre Klimadaten anhand von Tiefseebohrkernen analysierte, erwies sich die bisherige Savannenhypothese als zu simpel. Langfristig wurde das Klima kühler und trockener, es gab aber auch kurzfristige Umschwünge, die im Lauf der Menschenevolution immer heftiger ausfielen.

Ein derart instabiles Klima kann nach Ansicht des Paläoanthropologen Rick Potts von der Smithsonian Institution vielseitigere Arten begünstigen – eine Vorstellung, die als Hypothese der Variabilitätsselektion bekannt wurde. Afrika bot im Pleistozän keinen Platz für wählerische Esser. In Potts' Augen trieb weniger die Ausbreitung der Grassavannen als vielmehr die Notwendigkeit zur Flexibilität die Evolution des Menschen voran. Unter solchen Gesichtspunkten erscheinen das größere Gehirn von *Homo* sowie die Steinwerkzeuge, mit denen er verschiedenste Nahrungsmittel verarbeiten konnte, durchaus sinnvoll. Damit wären unsere Vorfahren in der Lage gewesen, immer heftigere Umschwünge der Umweltbedingungen zu überleben und auch dann noch zurechtzukommen, als die Natur das Angebot auf dem Biosphärenbüfett immer rascher austauschte. Die zunehmenden Variationen der mikroskopischen Abnutzungserscheinungen bei den Zähnen von *A. afarensis* über *H. habilis* bis zu *H. erectus* wären somit ein unmittelbarer Beleg für die Variabilitätsselektion.

Auf Potts' Idee, vor zwei Jahrzehnten zum ersten Mal formuliert, bauten andere Wissenschaftler auf, und heute wissen wir mehr darüber, wie sich wandelnde Landschaften der Erde auf die Evolution des Menschen auswirkten. So gehen Mark Maslin vom University College London und Martin Trauth von der Universität Potsdam davon aus, dass sich die im Ostafrikanischen Grabenbruch entstehenden Seen durch Klimaveränderungen auffüllten und wieder leerten, was das dortige Leben maßgeblich beeinträchtigte. Solche Fluktuationen dürften die Homininenpopulation immer wieder auseinandergerissen und damit die Evolution des Menschen gefördert haben. Die Fähigkeit, einen vielseitigen Speiseplan zu nutzen, hätte das Überleben in derart turbulenten Zeiten gesichert.

Anhand der verfügbaren Indizien können Wissenschaftler zwar ein stimmiges Bild davon zeichnen, wie sich die frühen Homininen an ihre veränderliche Umwelt angepasst haben, allerdings nur mit groben Pinselstrichen. Will man verstehen, wie ein Klimawandel die Evolution vorantreibt, gilt es, bestimmte Klimaereignisse mit den Fossilfunden in Einklang zu bringen.

Die lokale Umwelt reagiert auf globale oder auch regionale Klimaveränderungen sehr unterschiedlich, und unsere Fossilfunde sind einfach zu spärlich, um genau festzustellen, wo und wann bestimmte Arten auftauchten und wieder ver-



JOHN R. FOSTER / SCIENCE PHOTO LIBRARY

ZEITGENOSSEN Während sich *Paranthropus boisei* (links) trotz seines kräftigen Kiefers überraschenderweise als Grasfresser entpuppte, besaß *Homo habilis* (rechts) einen vielseitigeren Speiseplan. Die Flexibilität bei der Ernährung dürfte ein Schlüssel für den evolutionären Erfolg der Gattung *Homo* gewesen sein.

schwanden. Wir können dabei um 1000 Kilometer oder 100 000 Jahre danebenliegen. Zwar lässt sich mitunter das Aussterben einer Tiergruppe mit einem großen, katastrophalen Ereignis der Erdgeschichte verbinden, so wie mit dem Asteroideneinschlag auf der Halbinsel Yukatan, der vor 66 Millionen Jahren die Herrschaft der Dinosaurier beendete. Aber die während der Entwicklung des Menschen aufgetretenen Klimaereignisse sind damit nicht vergleichbar – hier wechselten sich Zyklen kühltrockener mit feuchtwarmen Bedingungen immer wieder ab. Um zu verstehen, wie die Homininen auf eine wechselnde Umwelt reagierten, müssen wir deshalb auf besonders gut untersuchte Stellen aus der jüngeren Vergangenheit zurückgreifen.

Neandertaler mit flexiblem Speiseplan

Wie ein solcher Ansatz funktioniert, zeigen Studien an mikroskopischen Abnutzungsspuren bei Neandertalern, die Sireen El Zaatari von der Universität Tübingen sowie Kristin Krueger von der Loyola University Chicago analysierten. Neandertaler besaßen in Europa und Westasien von vor 400 000 bis vor rund 40 000 Jahren die Vorherrschaft. Dann verschwanden sie, und der anatomisch moderne Mensch breitete sich aus. Paläoanthropologen rätseln bis heute, was damals geschah.

Das häufig noch kolportierte Bild des brutalen Neandertalers, der sich unter eiszeitlichen Bedingungen in Tierfelle hüllte und gierig das Fleisch von Mammuts und Wollnashörnern verschlang, trügt. Vielmehr bewohnten Neandertaler verschiedenste Lebensräume, von kalten, trockenen Steppen bis zu wärmeren, feuchteren Waldlandschaften, unter je nach Ort und Zeit wechselnden Bedingungen. Die komplexen Abnutzungsmuster ihrer Backenzähne verraten uns, dass sie in eher bewaldeten Gegenden härtere, sprödere und stärker scheuernde vegetarische Kost zu sich nahmen. Dagegen besaßen Neandertaler, die in offenen Steppen lebten, weniger kompliziert abgenutzte Zähne, was nach Ansicht von El Zaatari und ihren Kollegen eine einseitigere Ernährung vorwiegend aus weichem Fleisch widerspiegelt. Krueger hingegen stieß bei Neandertalern auf unterschiedlich abgewetzte Schneidezähne – vermutlich weil die Steppenbewohner damit Tierfelle mit ihren eigenen Zähnen bearbeiteten, während ihre Artgenossen im Wald ein breiteres Spektrum verschiedener Nahrungsmittel verzehrten. Faszinierenderweise gelten diese Unterschiede sowohl für frühere wie für spätere Neandertaler. Demnach besaßen sie einen flexiblen Speiseplan und ernährten sich so, wie es ihrem Lebensraum und der dort verfügbaren Nahrung entsprach.

Ganz anders sieht das Muster beim anatomisch modernen Menschen aus, der während der letzten Eiszeit nach Europa vordrang. Hier gibt es kaum unterschiedliche Abnutzungsspuren der Backenzähne zwischen Bewohnern von offenen und von eher bewaldeten Lebensräumen – egal ob man Individuen aus früherer oder späterer Zeit betrachtet. Vielleicht war *Homo sapiens* besser als der Neandertaler in der Lage, sich die bevorzugte Nahrung zu verschaffen, wenn sich die Umweltbedingungen veränderten.

Aus den Studien über Frühmenschen lassen sich auch Tipps für eine heutige gesunde Ernährung herleiten – aber wohl nicht ganz so, wie das oft geschieht. Verfechter der »Steinzeitdiät« mahnen, wir sollten das essen, was sich bei unseren Vorfahren in der Evolution bewährt habe. Sie erklären chronische Volksleiden mit einem Missverhältnis zwischen unserer Ernährung und dem Bedarf, für den unser Organismus »konstruiert« worden ist.

Sicherlich schadet es nicht, wenn wir hin und wieder daran denken, dass unsere Vorfahren weder Würstchen mit Pommes noch Cola zu sich nahmen. Das heißt jedoch nicht, dass wir einer besonderen Steinzeitkost hinterherjagen sollten. Aus den Foodprints wissen wir, dass sich die frühen Homininen je nach Ort und Zeit sehr unterschiedlich ernährten und dass die ständigen Wandlungen von Klima, Lebensraum und verfügbaren Nahrungsmitteln uns zu flexiblen Essern machten. Mit anderen Worten: Es gab gar keine einheitliche Ernährung, der wir nacheifern könnten. Gerade wegen ihrer vielseitigen Kost konnten sich unsere Vorfahren über die ganze Erde ausbreiten und fanden auf den unzähligen Biosphärenbüfetts immer etwas zu essen. Das war der Schlüssel unseres Erfolgs. ◂

QUELLEN

El Zaatari, S. et al.: Neandertal versus modern human dietary responses to climatic fluctuations. PLoS One 11, e0153277, 2016

Krueger, K.L. et al.: Anterior dental microwear textures show habitat-driven variability in Neandertal behavior. Journal of Human Evolution 105, 2017

Ungar, P.S. et al.: Dental microwear and diet of the Plio-Pleistocene hominin *Paranthropus boisei*. PLoS One 3, e2044, 2008

Ungar, P.S., Sponheimer, M.: The diets of early hominins. Science 334, 2011

KOGNITION

DER URSPRUNG DES ZÄHLENS

Wenn Archäologen richtigliegen, hatte nicht nur *Homo sapiens* das Zeug zum Zählen. Womöglich rechneten schon die Neandertaler und legten sich dafür »Merkzettel« an.



MIT FRDL. GEN. VON FRANCESCO D'ERRICO; D'ERRICO, F. ET AL.: FROM NUMBER SENSE TO NUMBER SYMBOLS. AN ARCHAEOLOGICAL PERSPECTIVE. PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY B 373, 2018, FIG. 1; BARRAS, C.: HOW DID ANCIENT HUMANS LEARN TO COUNT? NATURE 594, 2021; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



Colin Barras ist Wissenschaftsjournalist in Ann Arbor (US-Bundesstaat Michigan).

spektrum.de/artikel/1974571

Vor etwa 60 000 Jahren nahm ein Neandertaler dort, wo heute Westfrankreich liegt, ein Stück Tierknochen und ein Steinwerkzeug in die Hand. Er ritzte neun ungefähr gleichartige, parallele Kerben in den Knochen – gerade so, als ob sie etwas bedeuten sollten.

Was genau, damit beschäftigt sich Francesco d'Errico von der Université de Bordeaux. Im Lauf seiner Forscherkarriere untersuchte der Archäologe zahlreiche vorgeschichtliche Artefakte. Seines Erachtens ist der Knochen einer Hyäne, der in den 1970er Jahren an der Fundstelle Les Pradelles in der Nähe von Angoulême auftauchte, auffällig ungewöhnlich.

Meist deuten Archäologen solche gekerbten Objekte als Kunst, d'Errico ist aber der Ansicht, dass der Knochen auch eine praktische Funktion gehabt haben könnte: Mit den Kerben wurden möglicherweise numerische Werte festgehalten. Sollte er richtigliegen, dann wären anatomisch moderne Menschen nicht die Einzigen gewesen, die Zahlzeichen entwickelten. Auch die Neandertaler könnten schon damit begonnen haben.

Als d'Errico und sein Team ihre Theorie 2018 veröffentlichten, wagten sie sich auf kaum erforschtes Terrain. »Der Ursprung der Zahlen ist immer noch eine unbesetzte Nische in der Wissenschaft«, sagt Russell Gray, Evolutionsbiologe am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig. Forscher sind sich bisweilen nicht einmal einig darüber, was Zahlen genau sind. In einer Studie aus dem



KNOCHEN EINER HYÄNE Eine Neandertalerin oder ein Neandertaler hat vor zirka 60 000 Jahren Kerben in diesen Knochen geritzt. Einige Forscher sind davon überzeugt, dass die Frühmenschen auf diese Weise zählten.

MIT FRDL. GEN. VON FRANCESCO D'ERRICO; D'ERRICO, F. ET AL.: FROM NUMBER SENSE TO NUMBER SYMBOLS. AN ARCHAEOLOGICAL PERSPECTIVE. PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY B 373, 2018, FIG. 1; BARRAS, C.: HOW DID ANCIENT HUMANS LEARN TO COUNT? NATURE 594, 2021; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Jahr 2017 definierte ein Experte sie als eigenständige Einheiten mit exakten Werten, die durch Symbole dargestellt sind.

Inzwischen sind Kognitionswissenschaftler, Anthropologen und Psychologen auf der Suche nach dem Ursprung der Zahlen. Dafür analysieren sie heutige Gesellschaften und deren Zahlensymbole, um so Unterschiede zwischen den jeweiligen Zahlensystemen zu identifizieren – und letztlich deren Wurzeln zu erhellen. Archäologen wiederum versuchen, Utensilien aufzuspüren, mit denen gerechnet oder auf denen Mengen, Summen und Ähnliches festgehalten wurden. Und zuletzt gibt es Evolutionsbiologen, die mit linguistischen Methoden der Entstehung von Zahlwörtern wie »eins«, »erstens« und »einmal« nachgehen.

Das Forschungsfeld wird vermutlich dank einer Förderung des Europäischen Forschungsrats noch wachsen. 2020 erhielt das Projekt »Evolution of Cognitive Tools for Quantification« (QUANTA) eine Unterstützung in Höhe von zehn Millionen Euro. Das Projektteam will aufklären, wie und wann Menschen die für das Zählen nötigen kognitiven Fähigkeiten entwickelt haben. Zudem soll bestimmt werden, mit welchen Werkzeugen sie Zahlensysteme schufen – mit sprachlichen oder schriftlichen Mitteln, mit Gegenständen oder körperlich, etwa mit den Fingern. QUANTA geht auch der Frage nach, ob nur anatomisch moderne Menschen ein Gespür für Zahlen haben oder ob dies bereits bei den Neandertalern aufgekeimt war.

Ganz zu Anfang gingen Forscher davon aus, dass *Homo sapiens* als einzige Spezies Gegenstände und Sachverhalte quantifizieren, also in messbaren und numerischen Werten ausdrücken kann. Doch seit Mitte des 20. Jahrhunderts belegen immer mehr Studien, dass auch viele Tiere über diese Fähigkeit verfügen. So können Fische, Bienen und Küken Mengen bis zur Größe von vier erkennen, und zwar ad hoc und ohne zählen zu müssen. Das ist unter der Bezeichnung Simultanerfassung bekannt. Einige Tiere können zudem zwischen zwei großen Mengen unterscheiden, wenn diese eindeutig genug ungleich sind. Das heißt, sie sind in der Lage, 10 und 20 Objekte auseinanderzuhalten, aber nicht 20 und 21. Säuglinge im Alter von sechs Monaten haben ein ähnliches Verständnis von Quantitäten, bevor sie ein gewisses Maß an Kultur oder Sprache mitbekommen haben.

Laut Andreas Nieder, einem Neurobiologen an der Universität Tübingen, deutet all das darauf hin, dass der Mensch ein angeborenes Verständnis für Zahlen hat. Entstanden sei es als Teil der Evolution, genauer gesagt durch natürliche Selektion. Die Fähigkeit zum Rechnen habe sich als Anpassungsvorteil erwiesen, meint Nieder. Anders deutet der Kognitionswissenschaftler Rafael Núñez von der University of California in San Diego die Belege. Nach Ansicht des QUANTA-Chefforschers verfügen zwar zahlreiche Tiere über ein angeborenes Mengenverständnis, doch die menschliche Auffassung von Zahlen sei so viel höher entwickelt, dass sie unmöglich nur durch natürliche Auslese entstanden sein könne. Dass es Wörter und Zeichen für Zahlen gibt, müsse auch einer kulturellen Evolution entstammen. Dabei eignen sich Individuen durch Nachahmung oder Unterricht eine neue Fähigkeit an, beispielsweise jene, wie man ein Werkzeug benutzt.

Mengenverständnis versus Zahlenverständnis

Obgleich auch viele Tiere Kulturen entwickeln, etwa den Gebrauch bestimmter Hilfsmittel, um effizienter auf Beutefang zu gehen, hat keine Spezies je Zahlen hervorgebracht. Diese sind etwas spezifisch Menschliches. So können zwar Schimpansen in Gefangenschaft lernen, abstrakte Symbole zur Darstellung von Mengen zu verwenden. Doch weder sie noch andere Tiere nutzen derartige Zeichensysteme in ihrer natürlichen Umgebung. Núñez schlägt daher vor, zwischen der angeborenen »quantitativen« Kognition bei Tieren und der erlernten »numerischen« Kognition bei Menschen zu unterscheiden.

Nieder widerspricht. Neurobiologischen Studien zufolge ähneln sich die Hirnaktivitäten bei Tieren, die Mengen bemessen, und bei Menschen, die Zahlen verarbeiten. Es sei daher irreführend, die beiden Verhaltensweisen streng trennen zu wollen. Trotzdem ist auch der Neurowissenschaftler der Ansicht, dass die Fähigkeiten des Menschen die aller Tiere übertreffen. »Kein Tier ist in der Lage, Zahlensymbole wirklich darzustellen«, erklärt Nieder.

Wie die frühesten Zahlensysteme das Licht der Welt erblickten, könnte d'Erricos Analyse des Knochens von Les Pradelles erhellen. Der Archäologe, der zur Projektleitung von QUANTA gehört, untersuchte die neun Kerben auf dem Hyänenknochen im Mikroskop. Seines Erachtens sind sie in Form und Schnitttiefe einander derart ähnlich, dass sie vermutlich alle mit demselben Steinwerkzeug und derselben Handhaltung produziert wurden. Demnach könnten sie von derselben Person stammen, die innerhalb weniger Minuten oder Stunden die Ritzungen vornahm. Acht weitere, flachere Kerben auf dem Knochen entstanden dagegen wahrscheinlich zu einem anderen Zeitpunkt.

Dass es sich um ein dekoratives Muster handelt, schließt d'Errico aus. Dafür seien die Kerben zu ungleichmäßig angeordnet. Zum Vergleich zieht er einen 40000 Jahre alten

AUF EINEN BLICK
EINS, ZWEI, DREI

1 Einige altsteinzeitliche Knochenstücke werten Archäologen als Hilfsmittel zum Zählen. Sollte sich die These erhärten, hätten bereits die Neandertaler die Fähigkeit des Zählens beherrscht.

2 Um den Ursprung der Zahlen zu erkunden, gehen Forscher unterschiedlich an das Thema heran. Linguisten suchen nach den Sprachwurzeln von Zahlwörtern, Archäologen spüren Rechenhilfsmitteln nach.

3 Laut einer These ging die Entwicklung von Zahlen mit der Menge an Besitz einher. Mehr Eigentum erforderte demnach höhere Zahlenbereiche.



MUSCHEL MIT RITZDEKOR
Ein *Homo erectus* sammelte einst auf Java diese Muschel und verspeiste wohl ihren Inhalt. Danach verzierte er die Schale mit einem Ritzmuster.

JOORDENS, J. ET AL.: HOMO ERECTUS AT TRINIL ON JAVA USED SHELLS FOR TOOL PRODUCTION AND ENGRAVING. NATURE 518, 2015, FIG. 2A; NUTZUNG GENEHMIGT VON SPRINGER NATURE / CCC

Knochen eines Raben von einem Lagerplatz der Neandertaler auf der Krim heran. Darauf befinden sich ebenfalls Kerben, sieben Stück. Wie eine statistische Analyse von d'Errico und seinem Team 2017 ergab, entstehen Kerben mit derselben Regelmäßigkeit auch dann, wenn Teilnehmer eines Experiments einen Knochen mit gleichmäßigen Kerben verzieren sollen. Diesem Muster würden die Markierungen auf dem Knochen von Les Pradelles aber nicht entsprechen, sie seien unregelmäßiger verteilt. Zusammen mit der Annahme, die Ritzungen seien in einem kleinen Zeitfenster entstanden, brachte das den Archäologen zu dem Schluss, dass sie vielleicht rein funktional und nicht ornamental waren. In dem Fall könnten die kurzen Striche numerische Informationen dokumentieren.

Der Knochen von Les Pradelles ist kein Einzelfund. So entdeckten Archäologen bei Grabungen in der südafrikanischen Border Cave einen etwa 42000 Jahre alten Pavianknochen, der ebenfalls Einkerbungen aufweist. Laut d'Errico haben wahrscheinlich anatomisch moderne Menschen darauf Zahlen vermerkt. Seine Mikroskopanalyse der 29 Kerben ergab, dass sie mit vier verschiedenen Werkzeugen und somit wohl zu vier verschiedenen Gelegenheiten eingeritzt wurden. Entdeckungen der vergangenen 20 Jahre stützen aus seiner Sicht die Vermutung, dass Frühmenschen bereits einige hunderttausend Jahre eher begannen, abstrakte Ritzungen anzufertigen, als bisher angenommen. Folglich hat sich auch eine höhere Stufe der Kognition womöglich sehr viel früher eingestellt.

Was aber war der Auslöser dafür, dass Frühmenschen Zahlensysteme schufen? D'Errico zufolge das Schnitzen und Kratzen an den Knochen selbst, also das Anfertigen der Artefakte. Seine Hypothese ist eine von bisher nur zwei bekannten Theorien zum Ursprung der Zahlen.

Der Archäologe stellt sich folgendes Szenario vor: Am Anfang war der Zufall. Als Frühmenschen wie *Homo erectus* beim Schlachten immer wieder unbeabsichtigt Schnittspuren auf den Tierknochen hinterließen, erkannten sie irgendwann, dass sie die Gebeine auch mit Mustern versehen könnten. Ein Beleg sei eine 430000 Jahre alte Muschel, die in Trinil auf der indonesischen Insel Java gefunden wurde. Auf diesen kognitiven Entwicklungssprung folgte ein weiterer: Die Frühmenschen fingen

irgendwann damit an, bestimmten Markierungen eine Bedeutung zuzusprechen – und vielleicht auch eine numerische. Der Hyänenknochen von Les Pradelles ist möglicherweise das früheste bekannte Beispiel dafür, meint d'Errico. Seiner Ansicht nach führten die Kerben schließlich zur Erfindung von Zahlzeichen wie 1, 2 und 3.

D'Errico ist sich bewusst, dass sein Szenario Lücken aufweist. Unklar ist nämlich, welches kulturelle oder soziale Umfeld die Frühmenschen überhaupt dazu veranlasste, Kerben in Knochen und andere Artefakte zu schneiden und damit irgendwann Zahlen zu verknüpfen.

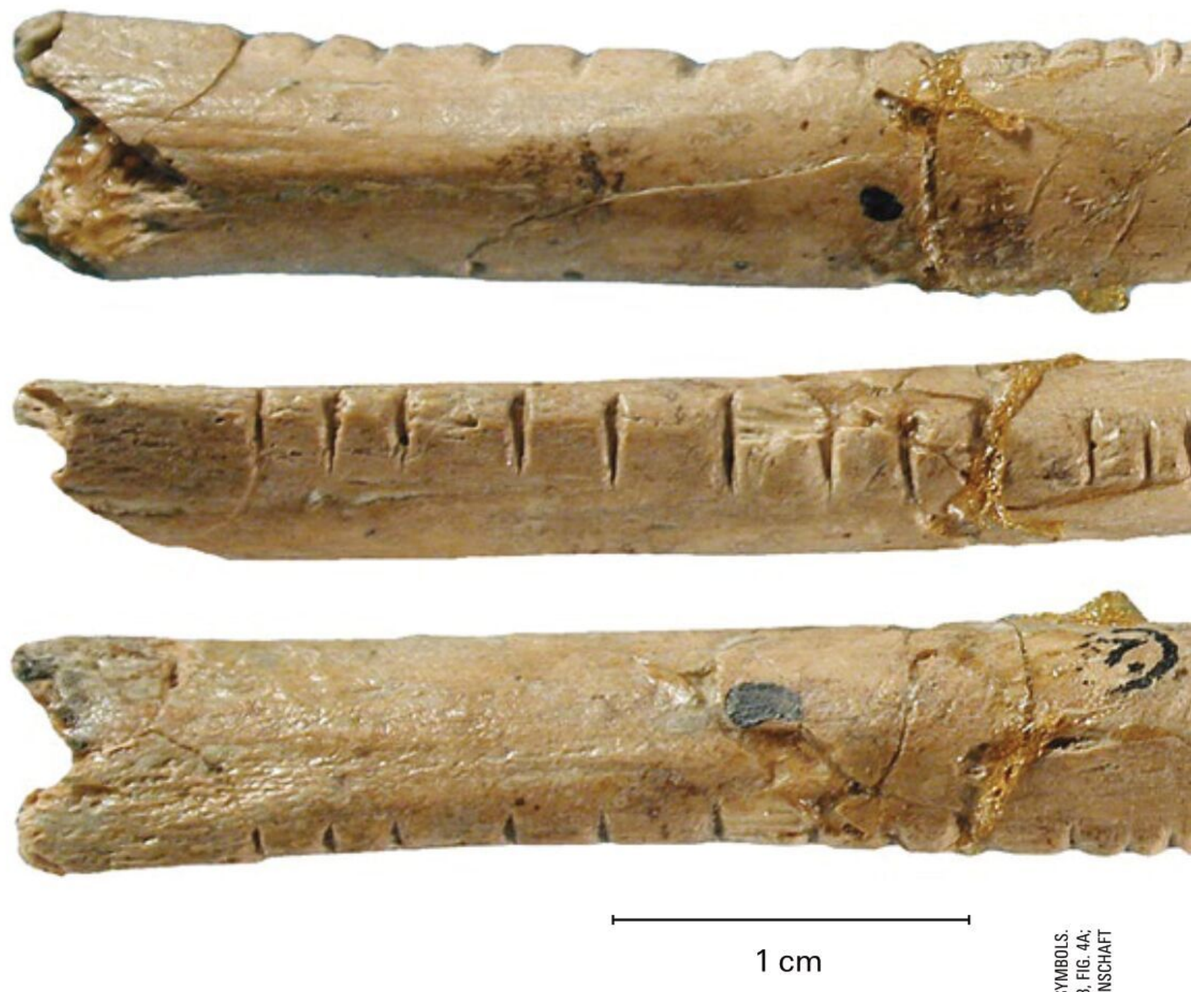
QUANTA-Kollege Núñez sowie einige Experten, die nicht an dem Projekt beteiligt sind, raten deshalb zur Vorsicht. Artefakte wie der Knochen von Les Pradelles seien schwierig zu interpretieren. Karenleigh Overmann von der University of Colorado verweist dazu auf die von australischen Aborigines verwendeten »message sticks« oder Botenstäbe. Diese bestehen meist aus einem flachen oder zylindrischen Stück Holz und sind mit Ritzlinien verziert. Die Kerben sehen so aus, als ob sie numerische Werte wiedergeben würden – bei vielen ist das aber nicht der Fall, erklärt die Kognitionsarchäologin.

Piers Kelly stimmt dem zu. Der an der australischen University of New England lehrende linguistische Anthropologe hat die »Botschaftshölzer« untersucht und festgestellt, dass einige Stäbe Kerbhölzern ähneln, tatsächlich aber keine Zählliste sind, sondern als visuelle Gedächtnisstütze dienten. Sie sollten dem Überbringer einer Nachricht helfen, sich an inhaltliche Details zu erinnern. Die Stöcke eignen sich zudem zur Übermittlung ganz unterschiedlicher Informationen, weiß der Aborigine-Bote Wunyungar, der zu den Gemeinschaften der Gooreng Gooreng und Wakka Wakka gehört. »Einige Hölzer werden für den Handel verwendet, für Lebensmittel, Werkzeuge oder Waffen«, sagt Wunyungar. »Andere können Friedensnachrichten nach einem Krieg überbringen.«

Manche Gemeinschaften zählen bis drei

Karenleigh Overmann hat ihre eigene Hypothese entwickelt, um die Entstehung von Zahlensystemen zu erklären. Sie konzentriert sich aufs Hier und Heute. Und für ihre Forschung sind die Ergebnisse anderer Experten interessant: So berichteten 2012 die Linguisten Claire Bowern und Jason Zentz von der Yale University, dass unter 139 Sprachen der australischen Ureinwohner manche Zahlwörter eine Obergrenze bei drei oder vier haben. In einigen dieser Sprachen gibt es für höhere Werte nur Sammelzahlwörter wie »mehrere« und »viele«. Die Pirahã im brasilianischen Amazonasgebiet sollen angeblich gar keine Zahlen gebrauchen.

Overmann und andere Forscher betonen, dass Gesellschaften, die relativ einfache Zahlensysteme verwenden, deshalb nicht weniger intelligent sind. Die Unterschiede könnten aber Hinweise auf die soziale Notwendigkeit liefern, die zu komplexeren Zahlensystemen führen. Im Jahr 2013 analysierte Overmann Daten aus 33 modernen Jäger-und-Sammler-Gesellschaften weltweit. Sie fand heraus, dass Menschen, die mit einfachen Zahlensystemen bis maximal vier auskommen, oft wenig materiellen



EIN RECHENBRETT? Der gekerbte 42 000 Jahre alte Pavianknochen (drei Ansichten) fand sich in der südafrikanischen Border Cave. Womöglich diente er als Zählhilfe.

MIT FRDL. GEN. VON FRANCESCO D'ERRICO UND LUCINDA BACKWELL; D'ERRICO, F. ET AL.: FROM NUMBER SENSE TO NUMBER SYMBOLS. AN ARCHAEOLOGICAL PERSPECTIVE. PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY B 373, 2018, FIG. 4A; BARRAS, C.: HOW DID ANCIENT HUMANS LEARN TO COUNT? NATURE 594, 2021; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Besitz haben. Anders verhält es sich bei Gemeinschaften, die weit über vier hinaus zählen – sie sammeln deutlich mehr Eigentum an. Daraus folgerte Overmann: Wenn eine Gesellschaft großen materiellen Reichtum angehäuft hat, entsteht ein Anlass, komplexere Zahlensysteme zu entwickeln. Solche Gruppen schufen interessanterweise entweder ein Quinär-, Dezimal- oder 20er-System. 5, 10, 20 – womöglich, so glaubt Overmann, sind diese Systeme aus dem Abzählen mit den Fingern hervorgegangen.

Wie Finger und Zahlen zusammenhängen, lässt sich laut der Forscherin mit der Theorie des »material engagement« (MET) erklären. Der Kognitionsarchäologe Lambros Malafouris von der University of Oxford hat 2013 in seinem Buch »How Things Shape the Mind« dargelegt, dass sich der Verstand über das Gehirn hinaus in Objekte fortsetzen kann, etwa in Form von Werkzeugen oder auch durch die Finger. Auf diese Weise lassen sich Vorstellungen physisch und real umsetzen. Zahlen scheinen dabei mit den Fingern anschaulicher zu werden und seien leichter zu addieren oder zu subtrahieren.

Gesellschaften gingen deshalb über das Fingerzählen hinaus, weil ihr Bedürfnis nach höheren Zahlen gewachsen sei: je mehr materielles Eigentum, desto größer der Wunsch, es zu zählen und den Überblick darüber zu behalten. Gemäß der MET ist auch ein Kerbholz eine Erweiterung des Verstands. Es fungiert zudem als Merkhilfe oder Notiz, um weiter und höher zählen zu können. Solche Hilfsmittel könnten Menschen also genutzt haben, um ihren Zahlenbereich zu erweitern. Als Erste sind wohl mesopotamische Stadtkulturen diesen Schritt gegangen, die Ressourcen und Menschen besser verwalten wollten. Bei Grabungen in Städten des Altertums wie Uruk oder Susa kamen bis zu 5500 Jahre alte Zählsteine ans Licht.



MIT FRDL. GEN. VON FRANCESCO D'ERRICO UND LUCINDA BACKWELL; D'ERRICO, F. ET AL.: FROM NUMBER SENSE TO NUMBER SYMBOLS. AN ARCHAEOLOGICAL PERSPECTIVE. PHILOSOPHICAL TRANSACTIONS OF THE ROYAL SOCIETY B 373, 2018, FIG. 4A; BARRAS, C.: HOW DID ANCIENT HUMANS LEARN TO COUNT? NATURE 594, 2021; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Solche Tonmarken wurden unterschiedlich geformt und gebrannt – es sind Kugeln, Zylinder, Kegel oder Scheiben. Die Formen entsprechen bestimmten Werten: Zehn kleine Kegel kommen einer Kugel gleich und sechs Kugeln einem großen Kegel. Mit großen Kegeln, die jeweils 60 kleinen Kegeln entsprechen, konnten die Menschen mit relativ wenigen Tonmarken bis in die Tausende zählen.

War Fingerzählen der erste Schritt zu hohen Zahlen?

Overmanns These stößt auf geteiltes Echo. Die Psychologin und Koleiterin des QUANTA-Projekts Andrea Bender von der norwegischen Universität Bergen plant mit ihrem Team, möglichst viele Daten über die Zahlensysteme der Welt zu sammeln und sie auszuwerten. Damit sollte sich ihres Erachtens auch Overmanns Theorie bestätigen oder widerlegen lassen. Bender will sich daher noch nicht festlegen, ob die Forschungskollegin nun Recht hat oder nicht. Andere Wissenschaftler wie der Philosoph Karim Zahidi von der Universität Antwerpen sind hingegen Feuer und Flamme. Zahidi meint, Overmanns These sei zwar noch lückenhaft, habe jedoch durchaus das Potenzial, die Entstehung der Zahlensysteme zu erklären.

Dass ihr Erklärungsmodell nicht vollständig ist, weiß die Kognitionsarchäologin. So kann sie noch nicht festlegen, wie weit der Ursprung der Zahlensysteme zurückreicht. Linguistische Analysen sollen aber Abhilfe schaffen. Und erste Erkenntnisse legen nahe, dass die Geschichte der Zahlwörter womöglich Zehntausende von Jahren alt ist.

Der Evolutionsbiologe Mark Pagel von der University of Reading und seine Kollegen verbringen bereits viele Jahre damit, die Herkunft von Wörtern in den heute existierenden Sprachfamilien zu erforschen. Dazu nutzen sie ein Computerprogramm, das sie ursprünglich zur Analyse biologischer Evolutionsprozesse entwickelt haben. Ihr Ansatz ist folgender: Wörter werden als Einheiten aufgefasst, die entweder stabil bleiben oder – wenn sich andere Sprachen ausbreiten – verdrängt und ersetzt werden. Ein Beispiel für Stabilität wären das englische »water« und das deutsche »Wasser«, sie sind eindeutig miteinander verwandt. Doch das deutsche »Hand« unterscheidet sich vom spanischen »mano« – diese Wörter gehen offenbar auf unterschiedliche Wurzeln zurück oder eines wurde irgendwann durch das andere ersetzt. Pagel und sein Team berechneten nun, wie häufig solche Veränderungen über lange Zeiträume hinweg aufgetreten sind, und leiteten daraus eine Wechselrate ab. Damit schätzten sie dann das Alter der Wörter.

Mit diesem Ansatz zeigen Mark Pagel und Andrew Meade, dass niedrige Zahlwörter von eins bis fünf zu den stabilsten Einheiten der gesprochenen Sprache gehören. Sie haben sich so wenig verändert – auch über Sprachfamilien wie dem Indogermanischen hinweg –, dass sie vermutlich seit 10000 bis 100000 Jahren stabil blieben.

Das beweist zwar nicht, dass die Zahlen von eins bis fünf von uralten Wörtern abstammen, die vor Zehntausenden von Jahren zum ersten Mal gesprochen wurden. Aber laut Pagel ist es zumindest denkbar, dass ein moderner und ein altsteinzeitlicher Eurasier einander verstehen würden, wenn es um solche Zahlwörter geht. Pagels Arbeit hat Befürworter gefunden, doch es gibt auch Widerspruch, etwa von Philologen wie Don Ringe von der University of Pennsylvania. Seines Erachtens lässt sich die Stabilität von Zahlwörtern nicht derart weit in die Vorgeschichte projizieren. Nur weil sie in den letzten Jahrtausenden stabil waren, heiße das nicht, dass es sich auch vor noch längerer Zeit so verhalten habe.

Der Ursprung der Zahlen ist längst nicht in allen Belangen erforscht. Darin sind sich die Wissenschaftler einig. Und die Möglichkeit besteht, dass Menschenformen schon früh zu zählen begannen, weil es nötig und wichtig wurde. Der Knochen aus der Border Cave ist jedenfalls so stark abgerieben, als ob jemand ihn über viele Jahre hinweg angefasst hat. »Es war eindeutig ein bedeutender Gegenstand für das Individuum, das ihn hergestellt hat«, sagt d'Errico. Nicht so das Exemplar aus Les Pradelles, dessen Oberfläche rauer ist. Und möglicherweise, so meint d'Errico, hat der Neandertaler, der den Tierknochen vor etwa 60000 Jahren bearbeitete, ihn nur kurz gebraucht und dann weggeworfen. Aber benutzt hat er ihn eben vielleicht zum Zählen. ◂

QUELLEN

D'Errico, F. et al.: From number sense to number symbols. An archaeological perspective, Philosophical Transactions of the Royal Society B 373, 2018

Nieder, A.: Number faculty is rooted in our biological heritage, Trends in Cognitive Sciences 21, 2017

Núñez, R.E.: Is there really an evolved capacity for number? Trends in Cognitive Sciences 21, 2017

Overmann, K.A.: Material scaffolds in numbers and time. Cambridge Archaeological Journal 23, 2013

nature

© Springer Nature Limited
www.nature.com
Nature 594, S. 22–25, 2021

ANATOMIE
UNTERSCHIEDLICH VERDRAHTET

Die Evolution bescherte dem Menschen ein außergewöhnliches Gehirn. Insbesondere seine für Kognition und Sprache zuständigen Areale sind massiv ausgeweitet.



Chet C. Sherwood ist Professor für Anthropologie an der George Washington University in Washington (USA). Er erforscht die Evolution des Primatengehirns.

spektrum.de/artikel/1626460

Unser Gehirn ist etwa dreimal so groß wie das der frühesten nachweisbaren Vorläufer bei den Homininen oder das von heute lebenden Menschenaffen. Mit ungefähr anderthalb Kilogramm entspricht seine Masse zwar nur zirka zwei Prozent des Körpergewichts; es beansprucht aber bei körperlicher Inaktivität mehr als 20 Prozent der gesamten benötigten Energie eines Erwachsenen.

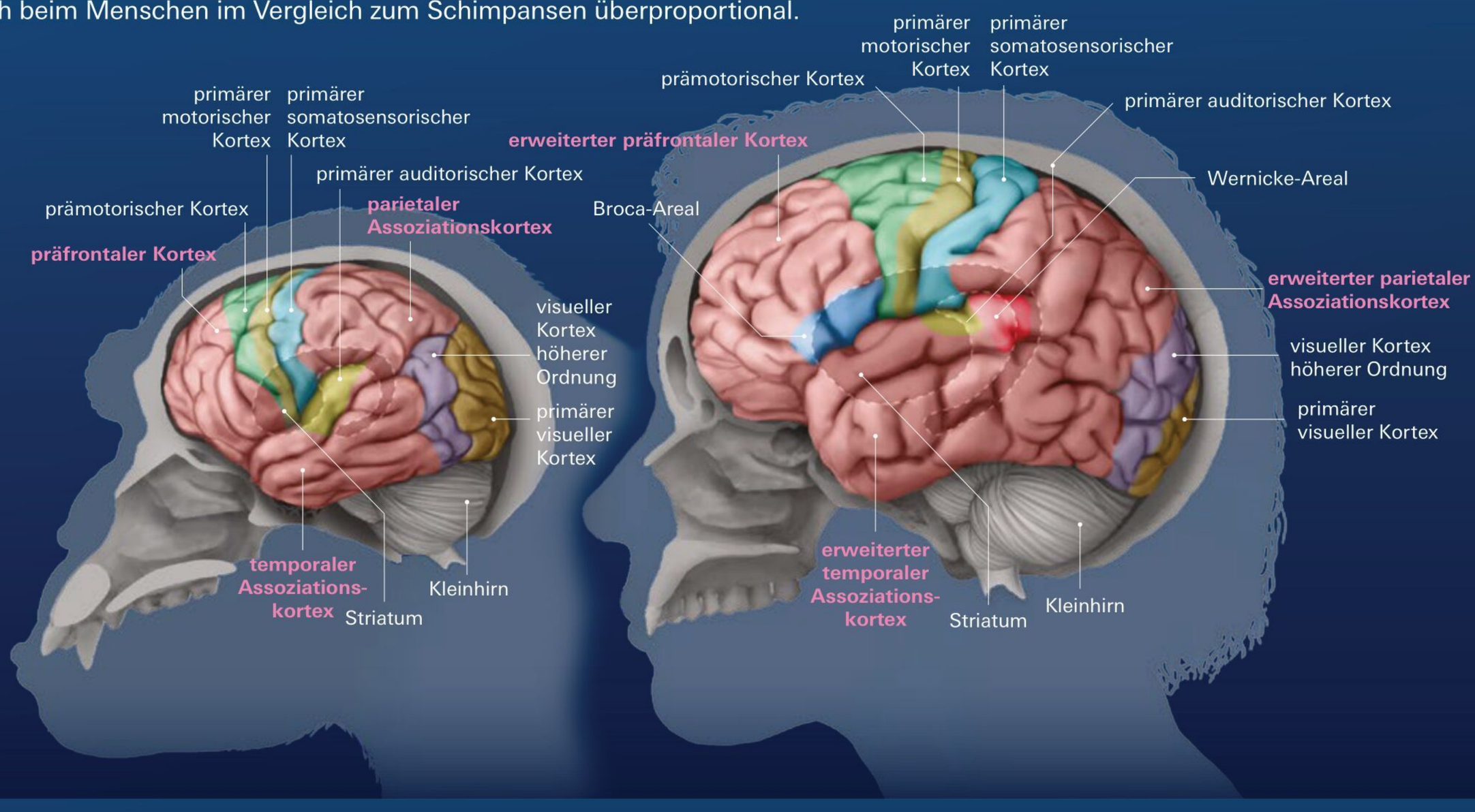
Insbesondere die Teile der Großhirnrinde (Kortex), die an höheren kognitiven Funktionen wie Kreativität oder abstraktem Denken beteiligt sind, haben sich beim Menschen massiv vergrößert. Im Vergleich zu anderen Primatengehirnen sprießen von diesen Assoziationszentren aus wesentlich mehr neuronale Verbindungsstränge zu anderen Großhirnarealen sowie auch zum Kleinhirn, das die Körperbewegungen kontrolliert. Die dadurch geknüpften neuronalen Netzwerke bilden die Grundlage für Sprache, Werkzeuggebrauch und Nachahmung. Auch die auf den Neurotransmitter Dopamin reagierenden subkortikalen – also unterhalb der Großhirnrinde liegenden – Belohnungssysteme wie das Striatum scheinen sich im Lauf der Evolution verändert zu haben. Auf Grund dieser Entwicklung reagiert der Mensch besser auf soziale Signale und lernt leichter sprechen.

Woher stammt unser großes Denkorgan? Fossilfunde deuten darauf hin, dass der Trend zu einem voluminöseren Schädelinhalt vor etwa sechs Millionen Jahren einsetzte. Zu dieser Zeit spaltete sich unsere Linie vom letzten Vorfahren ab, den wir mit heutigen Schimpansen und Bonobos gemeinsam haben. Wissenschaftler gehen davon aus, dass die biologischen Eigenschaften des *Homo sapiens* eng mit seinem großen Gehirn gekoppelt sind – darunter eine verlängerte Kindheit, eine größere Lebensspanne sowie eine Unterstützung der Mütter bei der Versorgung des Nachwuchses durch Väter und Großeltern. Nach der Geburt reift das Gehirn weiter. Dadurch prägen Lebensereignisse im sozialen Umfeld ebenfalls die kognitive Entwicklung.

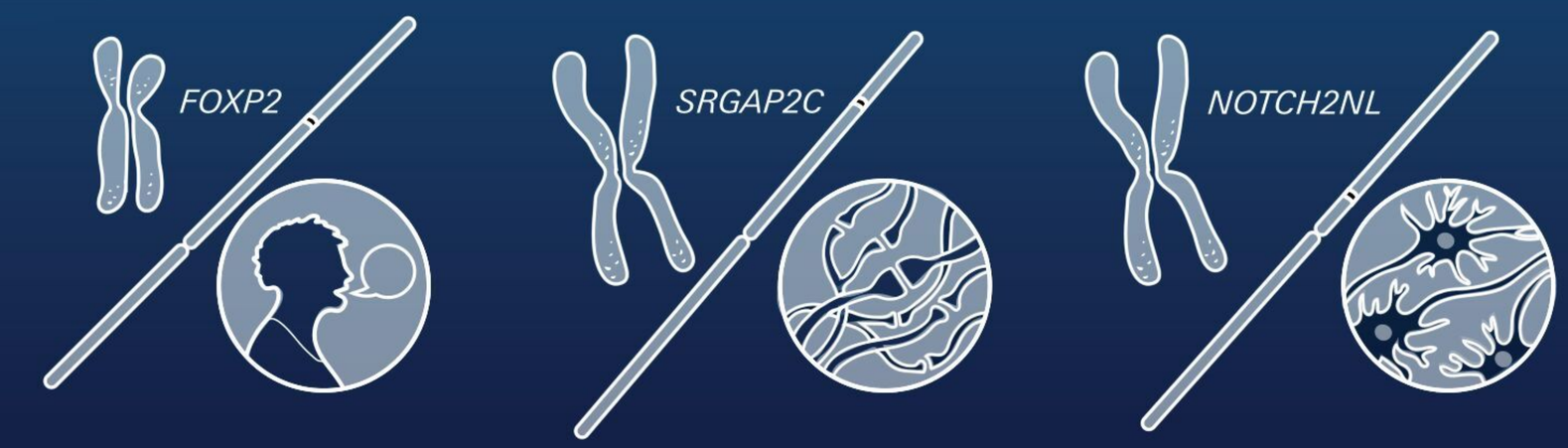
Genetiker und Molekularbiologen konnten weitere Unterschiede des Menschen zu Schimpansen und anderen intelligenten Arten ausmachen. Hier sind die wichtigsten Besonderheiten des menschlichen Gehirns dargestellt.

Entwicklung der Hirnzentren

Die für höhere kognitive Funktionen zuständigen Hirnareale – etwa Assoziationszentren im Stirnlappen (Präfrontalkortex), Schläfenlappen (Temporalkortex) und Scheitellappen (Parietalkortex) – vergrößerten sich beim Menschen im Vergleich zum Schimpansen überproportional.

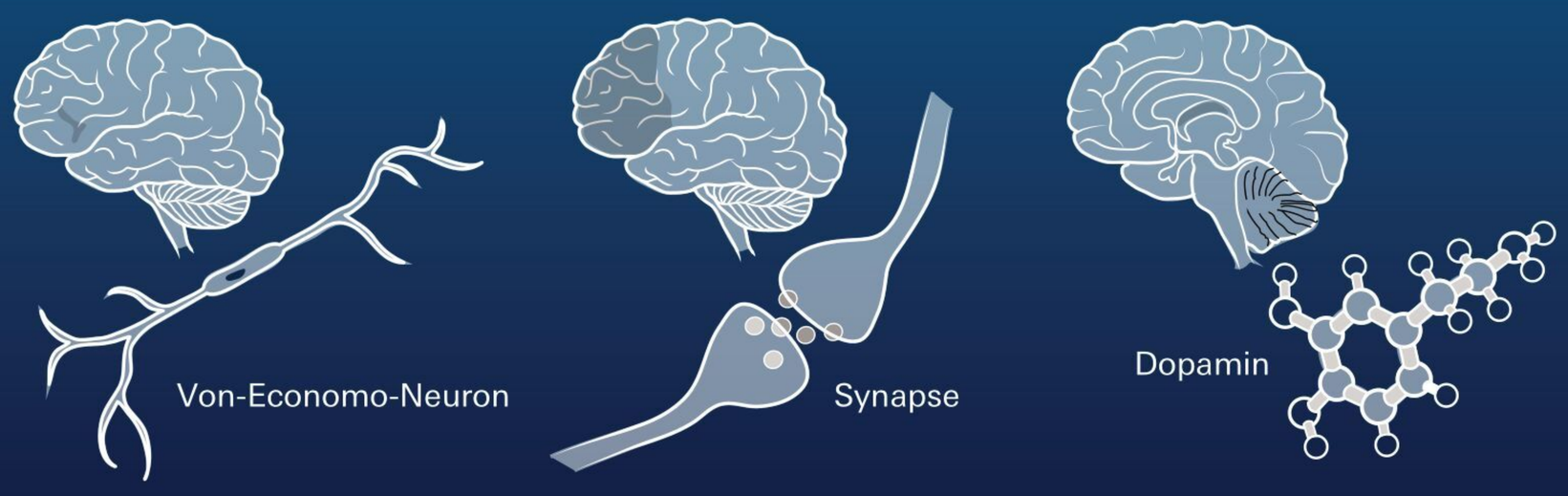


MESA SCHUMACHER; ENTWICKLUNG DER HIRNZENTREN NACH SAKAI, T. ET AL.: DEVELOPMENTAL PATTERNS OF CHIMPANZEE CEREBRAL TISSUE PROVIDE IMPORTANT CLUES FOR UNDERSTANDING THE REMARKABLE ENLARGEMENT OF THE HUMAN BRAIN. PROC. R. SOC. B 280, 20122398, 2013 / SCIENTIFIC AMERICAN SEPTEMBER 2018; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



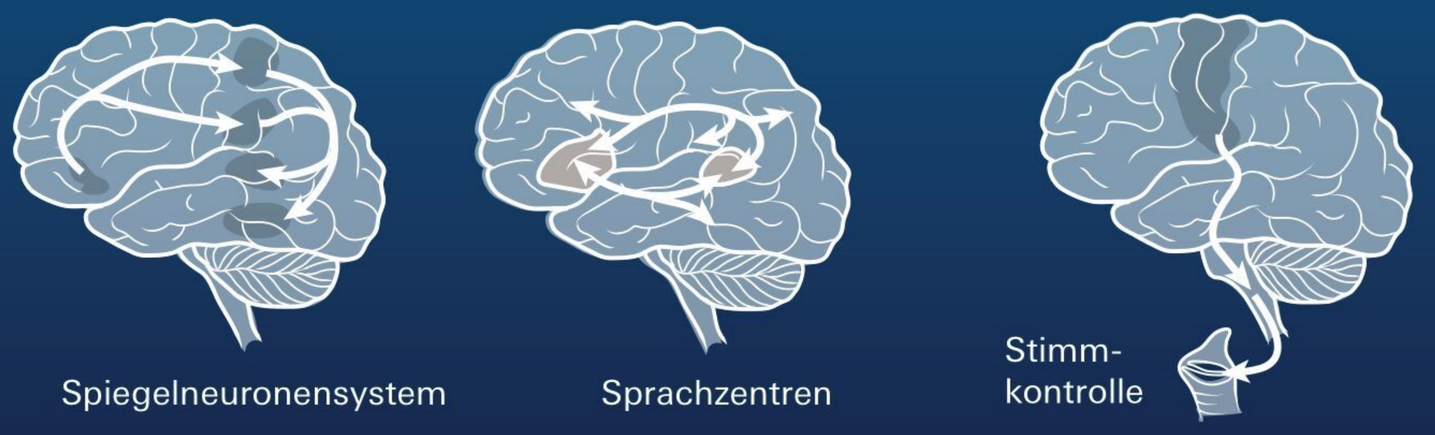
Gene

Beim Menschen auftretende Varianten des Gens *FOXP2* spielen für den Spracherwerb eine Rolle (links). Das menschliche Gen *SRGAP2C* ist als Duplikat von *SRGAP2* entstanden und erhöht die Zahl der neuronalen Verknüpfungen (Mitte). Eine dreifach vorhandene, *NOTCH2NL* genannte menschliche Version des Gens *NOTCH* fördert die Nervenzellproduktion (rechts).



Neurone

Die beim Sozialverhalten mitwirkenden Von-Economo-Neurone sind beim Menschen besonders ausgeprägt (links). In den Synapsen des menschlichen präfrontalen Kortex (Mitte, dunkler Bereich) findet sich im Vergleich zu anderen Primatengehirnen mehr Boten-RNA, die für die Proteinsynthese notwendig ist. Menschliche Hirnzellen des Striatums produzieren mehr Dopamin, das an etlichen kognitiven Funktionen beteiligt ist (rechts).

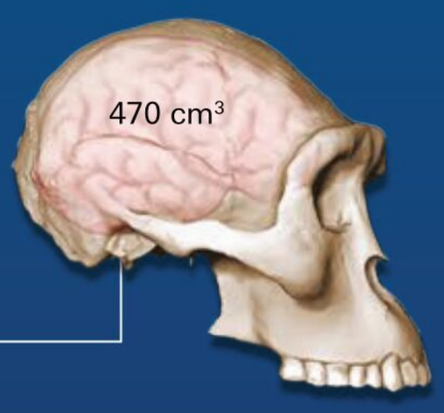


Verschaltungen

Spiegelneurone regen sich, wenn man bei anderen Bewegungen beobachtet. Beim Menschen sind sie komplex verschaltet (links). Verknüpfungen zwischen Broca- und Wernicke-Areal bilden die Grundlage der Sprachverarbeitung (Mitte). Eine Verbindung vom motorischen Kortex zum Hirnstamm, die bei Schimpansen und Makaken fehlt, koordiniert die Kehlkopfmuskulatur (rechts).

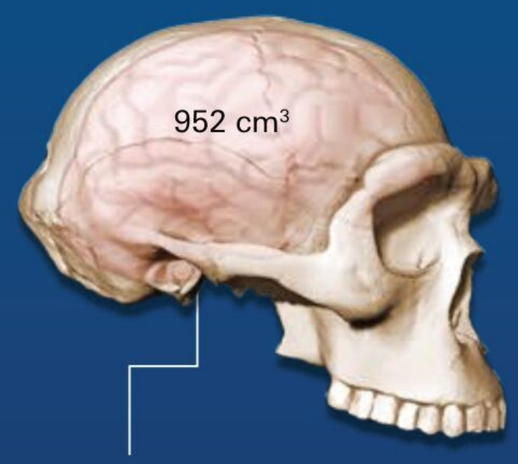
Die Vorläufer unseres großen Gehirns

Der letzte Vorfahre, den der Mensch mit Schimpansen und Bonobos gemeinsam hat, lebte vermutlich vor sechs bis acht Millionen Jahren. Nachdem sich die beiden Linien aufgespalten hatten, entstanden bei bestimmten Homininenarten eine Reihe evolutionärer Anpassungen, darunter aufrechter Gang, Herstellung von Steinwerkzeugen sowie insbesondere ein vergrößertes Gehirn.



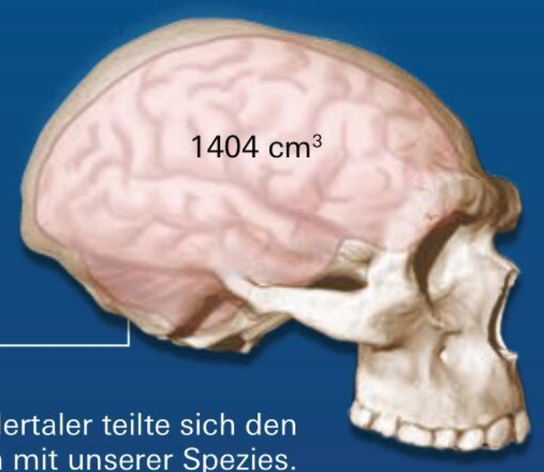
Australopithecus africanus war ein Hominine, bei dem menschliche und Affenmerkmale kombiniert auftraten. Mit 470 Kubikzentimetern (cm^3) entsprach sein Hirnvolumen etwa dem heutiger Schimpansen.

vor 3,3 bis 2,1 Millionen Jahren



Homo erectus profilierte sich als geschickter Werkzeugmacher, der seine afrikanische Heimat verließ.

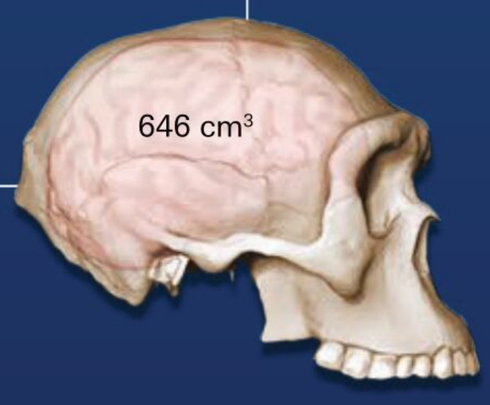
vor 1,9 Millionen bis 143 000 Jahren



Der Neandertaler teilte sich den Lebensraum mit unserer Spezies. Als versierter Jäger fertigte er Werkzeuge an, und er beherrschte das Feuer. Sein Schädel war etwa so groß wie unserer.

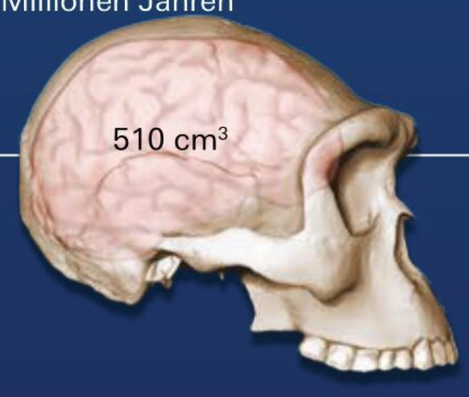
vor 400 000 bis 40 000 Jahren

vor 335 000 bis 236 000Jahren



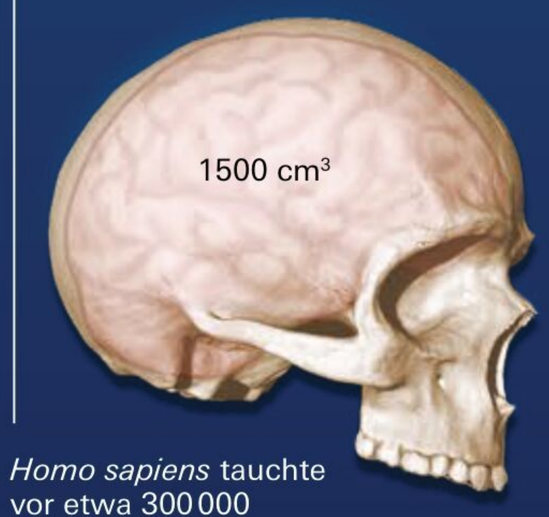
Homo habilis gilt als erste Art der Gattung *Homo*. Sein Gesicht war kleiner als das seiner Vorfahren; im Stirnhirn lagen vermutlich mit Sprache assoziierte Areale.

vor 2,1 bis 1,6 Millionen Jahren



Homo naledi, erst vor wenigen Jahren entdeckt, zeugt mit seinem vergleichsweise winzigen Gehirn von den mitunter verschlungenen Pfaden der Evolution des Menschen.

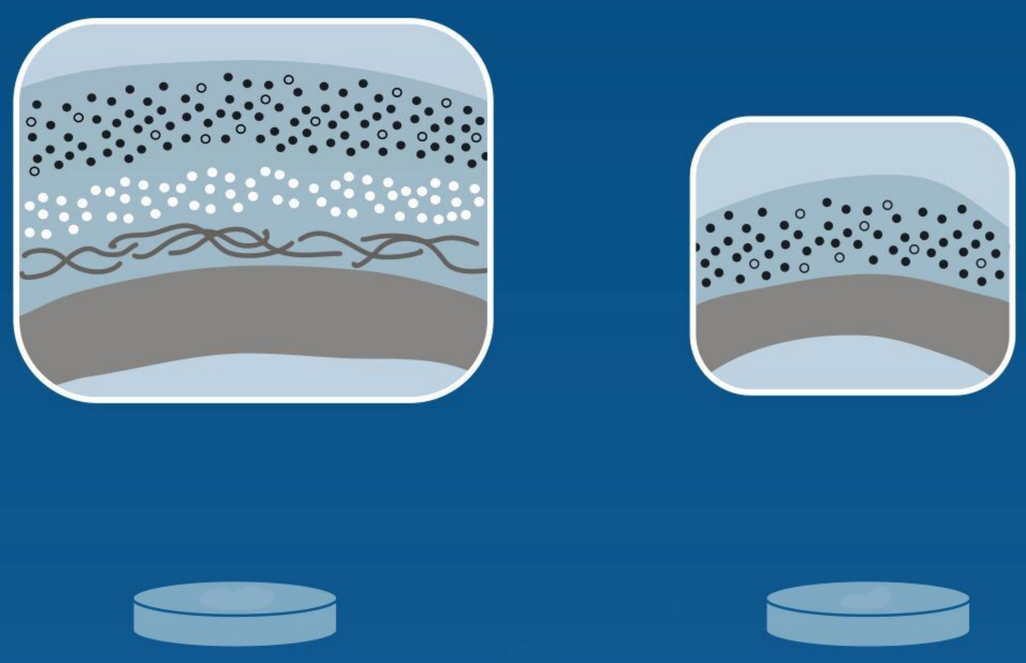
vor 300 000 Jahren bis heute



Homo sapiens tauchte vor etwa 300 000 Jahren auf. Typisch ist die kugelige Schädelform, die Raum für das voluminöse Groß- und Kleinhirn bietet.

Minibrains

Aus Stammzellen lassen sich im Labor Miniaturgehirne züchten. Diese so genannten zerebralen Organoide enthalten Hirnstrukturen, die dem Kortex von Mensch oder Affe ähneln (siehe Querschnittszeichnungen unten). Forscher können damit Genaktivitäten oder die Bildung neuronaler Schaltkreise bei verschiedenen Primatenarten vergleichen, um so herauszufinden, worin die Besonderheit des menschlichen Gehirns liegt.



Hirnwachstum

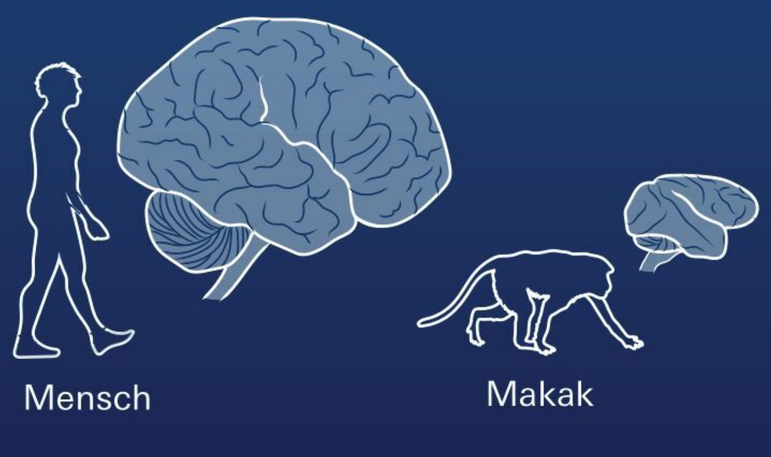
Verglichen mit anderen Primaten kommen menschliche Säuglinge mit einem unterentwickelten Gehirn zur Welt. Im ersten Lebensjahr wächst dieses aber wesentlich schneller und erreicht schließlich ein dreifach größeres Volumen als beim Schimpansen.

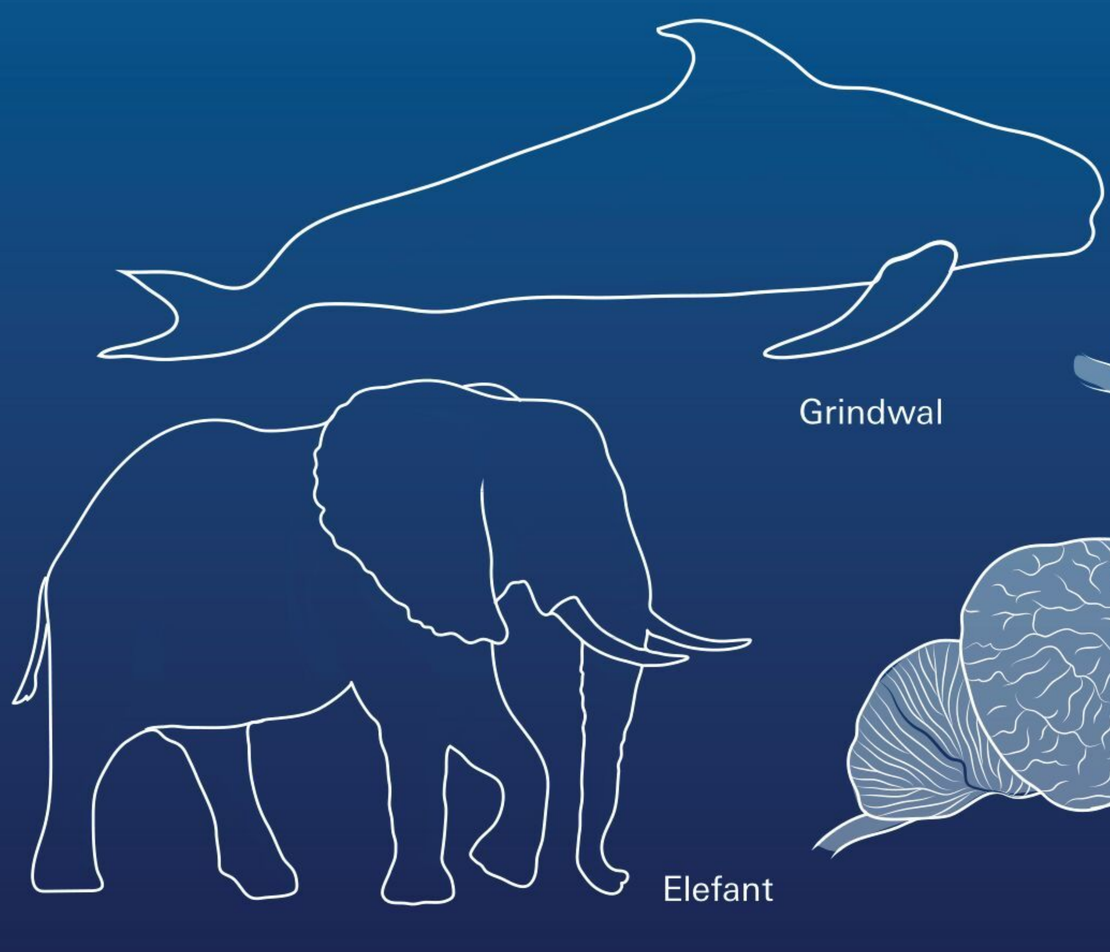
MESA SCHUMACHER; VORLÄUFER UNSERES GROSSEN GEHIRNS NACH BOYLE, E.K., WOOD, B.: HUMAN EVOLUTIONARY HISTORY.
KAAS, J.H. (HG.): EVOLUTION OF NERVOUS SYSTEMS, 2. AUFL., ACADEMIC PRESS 2017 UND SMITHSONIAN NATIONAL MUSEUM OF NATURAL HISTORY (HUMANORIGINS.SI.EDU) / SCIENTIFIC AMERICAN SEPTEMBER 2018; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Hirn- und Körpergrößen

Das menschliche Gehirn ist bis zu achtfach schwerer, als es bei einem Tier mit gleicher Körpermasse zu erwarten wäre – der so genannte Enzephalisationsquotient (EQ) liegt zwischen 7 und 8. Beim Grindwal beträgt der EQ 2 bis 3, beim Elefanten 1 bis 2, beim Makaken 2 und bei der Hauskatze als Bezugsspezies definitionsgemäß 1.

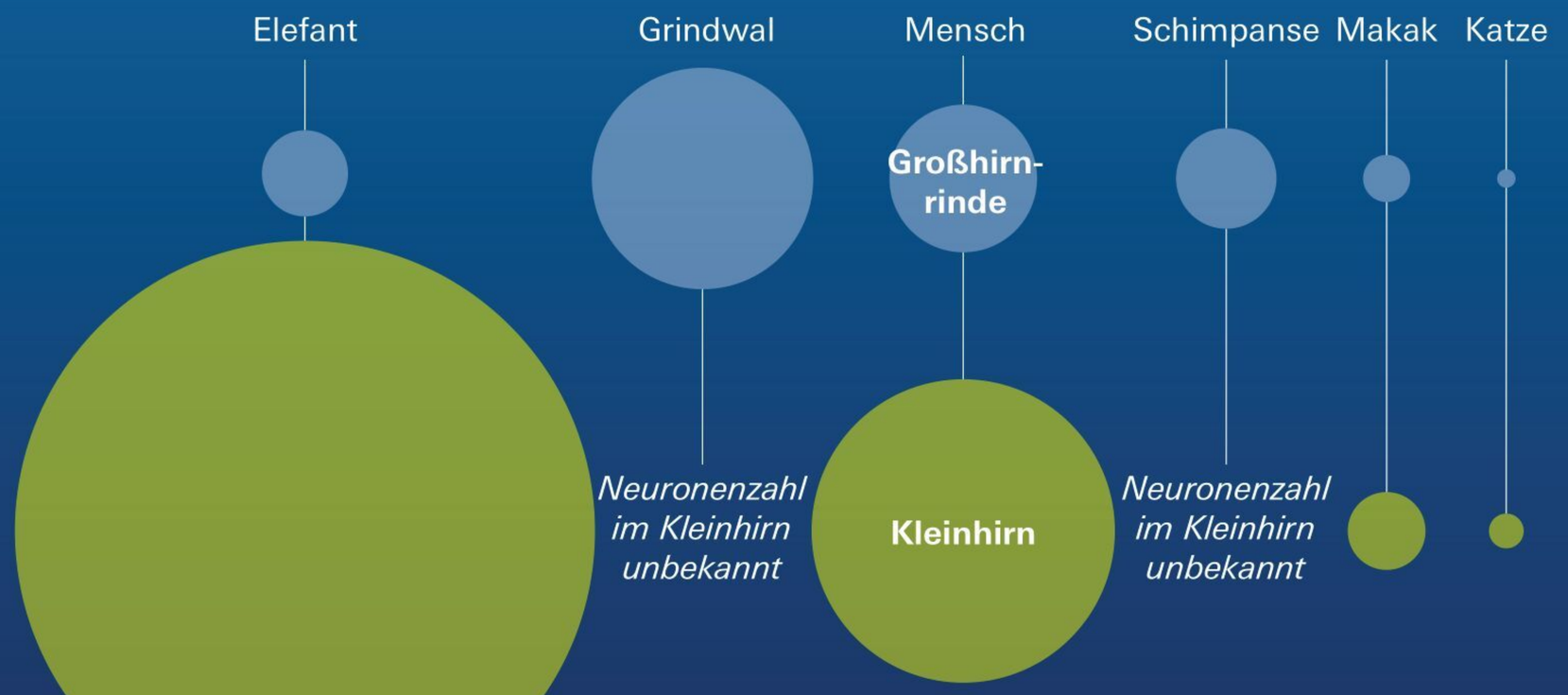




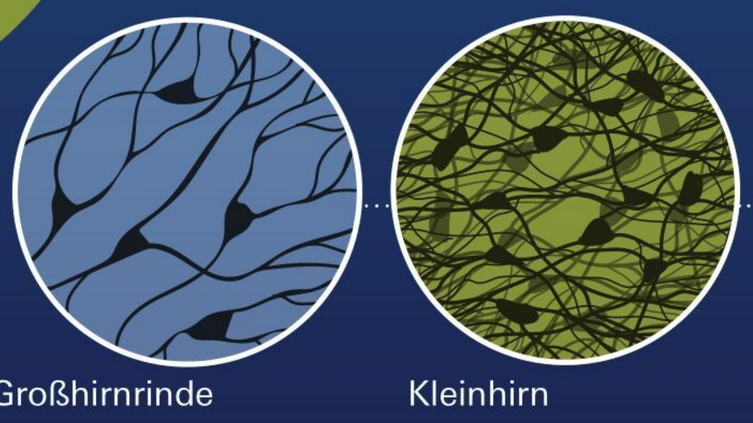


Zellzahl

Intelligenz hängt auch mit der Anzahl an Hirnzellen zusammen – und mit dem Ort, wo sie liegen. Mit geschätzt 16 Milliarden hat der Mensch in seiner Großhirnrinde mehr Neurone als fast alle anderen Säugetiere, mit Ausnahme des Grindwals.

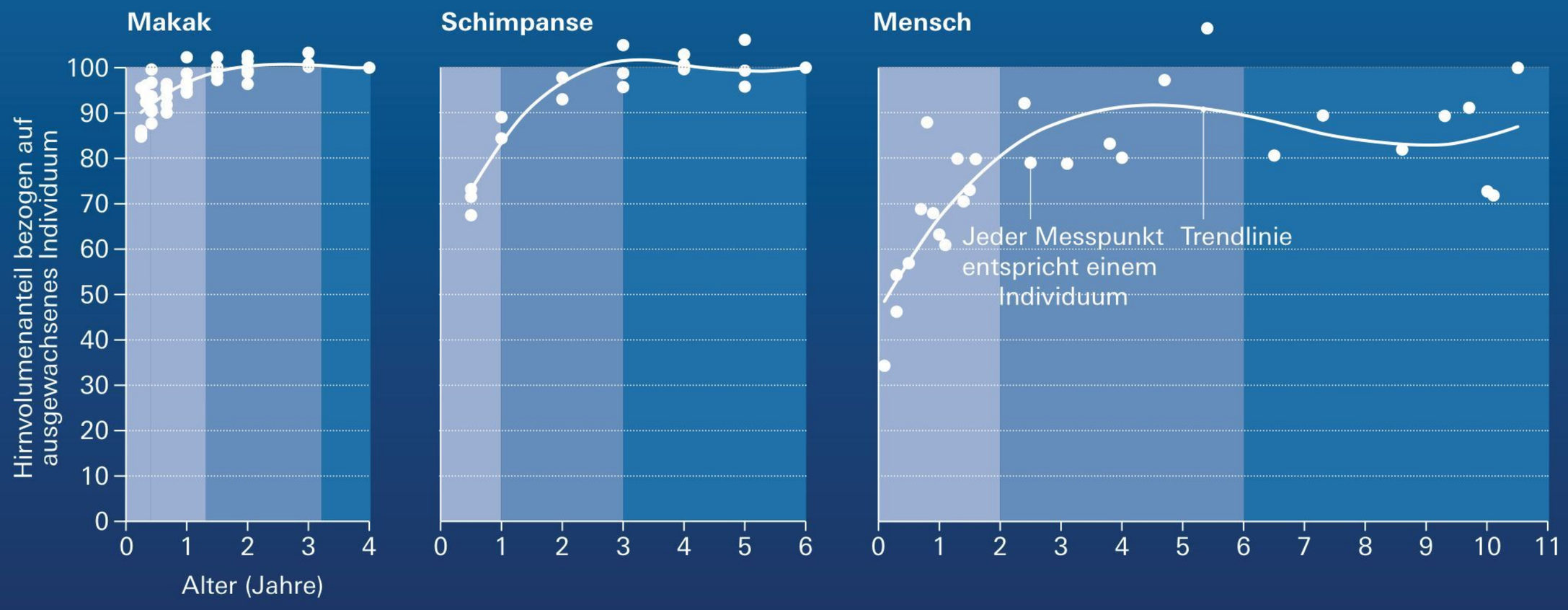






Zelldichte

Die menschliche Großhirnrinde macht 82 Prozent der gesamten Hirnmasse aus, enthält aber nur 19 Prozent aller Neurone. Im Kleinhirn liegen dagegen 80 Prozent der Hirnzellen, die jedoch lediglich einen Massenanteil von 10 Prozent haben.



MESA SCHUMACHER; ZELLZAHL GRINDWAL NACH MORTENSEN, H.S. ET AL.: QUANTITATIVE REALTIONSHIPS IN DELPHINID NEOCORTEX. FRONT. NEUROANAT. 8, 2014 (DOI.ORG/10.3389/FNANA.2014.00132) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE); ZELLZAHL MENSCH - MAKAK NACH HERCULANO-HOUZEL, S. ET AL.: MAMMALIAN BRAINS ARE MADE OF THESE: A DATASET OF THE NUMBERS AND DENSITIES OF NEURONAL AND NONNEURONAL CELLS IN THE BRAIN OF GLIRES. PRIMATES, AFROTHERIANS AND ARTIODACTYLS, AND THEIR RELATIONSHIP WITH BODY MASS. BRAIN BEHAV. EVOL. 86, 2015; ZELLZAHL SCHIMPANSE NACH COLLINS, C.E. ET AL.: CORTICAL CELL AND NEURON DENSITY ESTIMATES IN ONE CHIMPANZEE HEMISPHERE. PNAS 113, 2016; ZELLZAHL KATZE NACH JARDIM-MESSEDER, D. ET AL.: DOGS HAVE THE MOST NEURONS, THOUGH NOT THE LARGEST BRAIN: TRADE-OFF BETWEEN BODY MASS AND NUMBER OF NEURONS IN THE CEREBRAL CORTEX OF LARGE CARNIVORAN SPECIES. FRONT. NEUROANAT. 11, 2017 (DOI.ORG/10.3389/FNANA.2017.00118) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE) / SCIENTIFIC AMERICAN SEPTEMBER 2018; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

DANUVIUS GUGGENMOSI

ENTSTAND DER AUFRECHTE GANG IN EUROPA?

Paläoanthropologen haben in Süddeutschland eine neue Primatenart entdeckt, die offenbar schon vor zwölf Millionen Jahren aufrecht auf zwei Beinen ging.



Karin Schlott ist promovierte Archäologin und Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

spektrum.de/artikel/1693626

Bereits lange vor der Entstehung des anatomisch modernen Menschen *Homo sapiens* bewegten sich seine Vorfahren auf zwei Beinen fort. Wann und wo genau sich die ersten Zweibeiner herausgebildet hatten und aus welcher Art der Fortbewegung der aufrechte Gang entstand, ist aber noch nicht geklärt. Zwei Thesen bestimmen die Diskussion, die vor allem auf Analogien mit heute noch lebenden Menschenaffen basieren. Die eine lautet: Der Ursprung dieses zentralen Merkmals von uns Menschen liegt bei Vierfüßlern, die sich hangelnd von Baum zu Baum schwangen, ähnlich den Orang-Utans der Gattung *Pongo*. Die andere Vermutung geht davon aus, dass der aufrechte Gang aus dem vierbeinigen Knöchelgang entstand, der heute für Gorillas, Bonobos und Schimpansen typisch ist. Die afrikanischen Menschenaffen kraxeln auf Bäume zum Schlafen und Essen, laufen aber sonst auf allen vieren am Boden.

Was die Fossilien bezeugen

So überzeugend die beiden Thesen klingen, so wenig lassen sie sich aber mit den bekannten Fossilien in Einklang bringen, meint die Paläoanthropologin Tracy Kivell von der University of Kent in Canterbury. Da wäre zum Beispiel *Ardipithecus ramidus*, dessen fossile Knochen in Äthiopien ans Licht kamen. Das Alter liegt bei ungefähr 4,4 Millionen Jahren. Die anatomischen Merkmale von *Ardipithecus* haben jedoch wenig mit modernen Menschenaffen gemeinsam. »Ardi« ist der bislang früheste vermutete Hominine, also der älteste Aufrechtgeher und erste Vertreter einer Entwicklung, die in unsere Gattung *Homo* mündete. Sein Skelett lässt aber nicht erkennen, dass er aus einem auf den Knöchelgang spezialisierten Primaten hervorgegangen war. Gorillas, Schimpansen und Bonobos hatten offenbar einen anderen Entwicklungsweg zurückgelegt. Tracy Kivell gibt daher zu bedenken: »Jede noch lebende Art der Menschenaffen ist das Ergebnis ihrer eigenen langen Evolutionsgeschichte – und im Fall der afrikanischen Menschenaffen vergessen wir das oft, weil es so wenige fossile Zeugnisse von ihnen gibt.«

Noch weniger Halt finden die bisherigen Thesen vom aufrechten Gang, wenn man ältere Fossilien sichtet – solche aus dem mittleren und oberen Miozän, der Zeit von vor 13 bis vor 5,3 Millionen Jahren. In dieser Epoche der Erdgeschichte, genauer gesagt vor ungefähr sechs oder sieben Millionen Jahren, verorten Forscher auch den letzten gemeinsamen Vorfahren von Menschenaffen und Menschen in Afrika. Die Hominidenfossilien des Miozäns geben jedoch anatomisch gesehen Rätsel auf, findet Kivell. Die rund 30 bekannten Gattungen ausgestorbener Menschenaffen, die einst in Afrika, Asien und Europa existierten, so die Forscherin, seien mit heutigen Primaten kaum vergleichbar.

Seit November 2019 haben die bisherigen Thesen zum aufrechten Gang weiter an Standfestigkeit eingebüßt. Paläoanthropologen der Universität Tübingen und des dortigen Senckenberg Centre for Human Evolution and Palaeoenvironment haben in Süddeutschland Fossilien eines 11,62 Millionen Jahre alten Primaten entdeckt, der eine ganz andere Entwicklungsgeschichte nahelegt. Wie die Ausgräber um die Paläontologin Madelaine Böhme erklären, gehören die Knochen zu einer bislang unbekann-

Wie *Danuvius guggenmosi* zu seinem Namen kam

Madelaine Böhme hat die neue Primatengattung nach dem keltisch-römischen Flussgott Danuvius (lateinisch für Donau) benannt, da die Fundregion im Einzugsgebiet dieses Flusses liegt. Der Artname *guggenmosi* leitet sich von dem 2018 verstorbenen Amateurarchäologen Siegulf Guggenmos ab. Er hatte 1972 die ersten Fossilien in der Tongrube Hammerschmiede zu Tage gefördert, wo vor Millionen von Jahren ein wenige Meter breiter, geschwungener Bach verlief und Knochenmaterial angeschwemmt wurde. Böhme und ihre Kollegen haben dort seit 2011 rund 15 000 Fossilien frei gelegt, die sie 115 Wirbeltierarten zuordnen konnten – darunter Fische, Riesensalamander, Schildkröten, Elefanten, Mäuse sowie ein Panda.

HALB AFFE, HALB MENSCH
So könnte sich *Danuvius guggenmosi* fortbewegt haben: Er kletterte wie ein Affe und lief ähnlich einem Menschen.

VELIZAR SIMEONOVSKI / UNIVERSITÄT TÜBINGEN

ten Primatenart, die sie *Danuvius guggenmosi* getauft haben. Die gut erhaltenen Fossilien aus dem mittleren Miozän würden genügend Informationen liefern, so die Forscher, um die Bewegungsweise dieser Hominiden zu rekonstruieren. *Danuvius* habe sich sowohl zweibeinig auf Ästen fortbewegt als auch mit den Armen von Ast zu Ast gehangelt. Damit wäre der aufrechte Gang nicht nur anders entstanden als angenommen, sondern auch deutlich früher, als bisherige Funde nahelegen. Außerdem soll sich diese wichtige Entwicklungsstufe der Humanevolution nun nicht in Afrika, sondern auf Bäumen des europäischen Kontinents abgespielt haben. Für die Tübinger Forscher könnte *Danuvius guggenmosi* vielleicht sogar eine Primatenart gewesen sein, auf die Menschenaffen und Menschen letztlich zurückgehen.



CHRISTOPH JÄCKLE, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

ÜBERBLEIBSEL Vom Skelett des Männchens sind insgesamt 21 Knochen erhalten.

»Udo« lebte im Haremsverband

Die fossilen Knochen von *Danuvius guggenmosi* haben Madelaine Böhme und ihre Kollegen zwischen 2015 und 2018 in der Tongrube Hammerschmiede bei Pforzen im Ostallgäu entdeckt. Sie ordnen die 37 Fossilien vier verschiedenen Individuen zu, einem Männchen, zwei Weibchen und einem Jungtier. Die Hominiden waren nicht größer als einen Meter, das Männchen wog schätzungsweise 31 Kilogramm, die beiden Weibchen jeweils 17 bis 19 Kilogramm. Der deutliche Gewichtsunterschied zwischen Männchen und Weibchen lege eine polygyne Lebensweise nahe. »Das heißt, das Männchen lebte im Haremsverband«, wie Böhme auf einer Pressekonferenz in Tübingen erklärt. Der anatomische Aufbau dieser Hominiden, davon ist Böhme überzeugt, würde überdies mehr einem Menschen als einem Menschenaffen ähneln.

Danuvius guggenmosi besaß eine bislang unbekannte Anatomie unter den Vorfahren der Menschen und der afrikanischen Menschenaffen. Das sei vor allem an den 21 Knochenstücken des Männchens Udo zu erkennen, den Böhme nach dem Sänger Udo Lindenberg benannt hat. Der feierte just an dem Tag seinen 70. Geburtstag, als die Paläontologin 2016 ein Schlüsselstück von *Danuvius* aus der Tongrube gefördert hatte.

Was macht den Primaten aus der Hammergrube nun so menschenähnlich? Das zeigt sich an mehreren anatomischen Details der Wirbelsäule und der Beinknochen. Es sind zwei Wirbel von Udo erhalten, deren Fortsätze stark geneigt sind, anders als etwa bei einem Schimpansen. Daraus resultiert, dass die Wirbelsäule s-förmig angelegt gewesen sein muss. Dank der Biegung im Kreuz konnte *Danuvius* also seinen Rumpf aufrichten. Sein Brustkorb war flach und breit wie beim Menschen – zum Vergleich: Bei Schimpansen ist er tief und schmal.

Aus den fossilen Resten von Udo schließt Böhme, dass sein Lendenbereich länger war als der von modernen Menschenaffen. Er besaß vermutlich sechs oder sieben Lendenwirbel, ein oder zwei mehr als der Mensch, aber drei oder vier mehr als ein Schimpanse. Der braucht den kurzen Lendenbereich, um stabil kraxeln zu können. Der Primat aus dem Miozän hingegen war deutlich beweglicher im Kreuz. Damit konnte er seinen Körperschwerpunkt über den Knien verlagern – und aufrecht stehen. Das würden insbesondere auch die Beinknochen nahelegen. Bei *Danuvius guggenmosi* lag der Oberschenkelknochen auf einem flachen, oberen Ende des Schienbeins auf. »Unter Last, also unter normalen Bedingungen ist *Danuvius* bevorzugt mit gestreckten Knien gestanden«, fasst Böhme zusammen. Seine Beine müssen zudem eher der menschlichen X-Stellung gleichgekommen sein. Die Füße waren ebenfalls menschenähnlich flach geformt, hatten allerdings einen abgespreizten großen Zeh zum Greifen – und für einen sicheren Gang im Baumgeäst.

Die Arme von *Danuvius* glichen dagegen mehr den Extremitäten eines Menschenaffen, genauer eines Bonobos. Während sie beim Menschen kürzer sind als die Beine, verhält es sich bei Affen genau umgekehrt – so auch bei der neuen Menschenaffenart aus dem Allgäu. Daraus schließen die Forscher, dass die vorderen Gliedmaßen von *Danuvius* vor allem aufs Klettern, die hinteren Extremitäten auf einen zweibeinigen Gang spezialisiert waren. Diese Fortbewegungsweise bezeichnen die Tübinger Paläoanthropologen als »extended limb clambering«, was auf Deutsch so viel bedeutet wie »Klettern mit gestreckten Gliedmaßen«.

Der letzte gemeinsame Vorfahre

Allerdings zeichnet die Gattung *Homo* die Fähigkeit aus, nicht nur aufrecht zu schreiten, sondern auch auf zwei Beinen rasch zu laufen. Diese Eigenschaft habe sich erst vor zwei Millionen Jahren in Afrika herausgebildet, betont Madelaine Böhme. Dass es dort aber schon so früh wie in Europa aufrecht gehende Wesen gab, bezweifelt die Forscherin. Gerade aus der Zeit vor 13 bis 14 Millionen Jahren gäbe es aus Kenia einen guten Vergleich: Die Primatengattung *Nacholapithecus* sei mit einem kompletten Skelett belegt. »Ihre Körperform entsprach in etwa dem, was wir von einem Pavian kennen, ein quadrupeder (vierfüßiger), baumbewohnender Primat – er war aber nicht biped.«

Für die Tübinger Forscher war *Danuvius guggenmosi* vielleicht der letzte gemeinsame Vorfahre der Menschenaffen

und Menschen – oder sogar von Menschen und Schimpansen. Oder war er selbst eine Art früher Mensch? Auch das kann sich Böhme vorstellen, »denn der aufrechte Gang, die Bipedie, ist das wahrscheinlich einzige charakterisierende Merkmal der menschlichen Evolutionslinie.«

Offenbar ist der Aufrechtgeher *Danuvius guggenmosi* kein Ausreißer der Evolution. Erst im September 2019 veröffentlichten die Paläoanthropologen Carol Ward von der University of Missouri in Columbia und David Begun von der University of Toronto im »Journal of Human Evolution« ein Fossil mit ähnlicher Tragweite wie Udo. Es handelt sich um einen zehn Millionen Jahre alten Beckenknochen der Gattung *Rudapithecus* aus Ungarn. Von diesem Primaten hat Begun schon Kiefer, Zähne und Knochen der Gliedmaßen entdeckt, doch das Becken legt nun nahe, dass *Rudapithecus* ebenfalls einen recht flexiblen Lendenbereich besaß und auf zwei Beinen gehen konnte, also auch er wenig mit den heutigen Menschenaffen gemeinsam hatte.

Nach Ansicht von Ward regen solche Fossilien zu einem grundsätzlichen Richtungswechsel in der Paläoanthropologie an: »Wir sollten uns weniger fragen, warum die Vorfahren des Menschen von allen vieren aufgestanden sind, sondern eher, warum unsere Ahnen vielleicht nie auf alle viere runtergegangen sind.« Für Ward belegen solche Fossilien, dass der Ursprung der Zweibeinigkeit nicht in der Anatomie der modernen Menschenaffen zu finden ist, weil die Vorfahren des Menschen wohl schlicht anders aufgebaut gewesen waren.

Die direkten Nachweise für den aufrechten Gang – fossilisierte Fußabdrücke von zweibeinig laufenden Wesen – reichen nicht ganz so weit in die Vergangenheit wie *Rudapithecus* und *Danuvius* zurück. Die ältesten fanden sich 2017 in Trachilos an der kretischen Westküste. Dort dokumentierten Experten des Polnischen Forschungsinstituts in Warschau und der Universität Uppsala 5,7 Millionen Jahre alte Fußspuren. Am berühmten Fundort von Laetoli in Tansania waren vor 3,65 Millionen Jahren Vormenschen aufrecht über noch weiche Vulkanasche marschiert. Die Fußabdrücke härteten aus und überdauerten so die Jahrmillionen. Von *Homo erectus* stammen 1,5 Millionen Jahre alte Fußabdrücke aus Ileret in Kenia.

Zwar könnte sich die Bipedie Millionen Jahre später ein zweites Mal in Afrika entwickelt haben. Aber für Madelaine Böhme ist schon durch die Fossilien aus dem Allgäu klar: Der aufrechte Gang entstand vor zwölf Millionen Jahren bei Menschenaffen, die in Europa auf Bäumen lebten. ◂

QUELLEN

Böhme, M. et al.: A new Miocene ape and locomotion in the ancestor of great apes and humans. Nature 575, 2019

Gierliński, G. D. et al.: Possible hominin footprints from the late Miocene (c. 5.7 Ma) of Crete? Proceedings of the Geologists' Association 128, 2017

Kivell, T. L.: Fossil ape hints how bipedal walking evolved. Nature 575, 2019

Ward, C. V. et al.: A late Miocene hominid partial pelvis from Hungary. Journal of Human Evolution 136, 2019

Spektrum der Wissenschaft

Chefredakteur: Dr. Daniel Lingenhöhl (V.i.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser

Redaktion: Mike Zeitz (stellvertr. Redaktionsleiter), Manon Bischoff, Dr. Andreas Jahn, Dr. Karin Schlott, Dr. Frank Schubert, Verena Tang

E-Mail: redaktion@spektrum.de

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout dieses Hefts: Anke Heinzelmann

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistenz: Andrea Roth

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg, Hausanschrift: Tiergartenstraße 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Geschäftsleitung: Markus Bossle

Herstellung: Natalie Schäfer

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741

E-Mail: service@spektrum.de

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744

Übersetzer für dieses Heft: Thorwald Ewe, Dr. Ingrid Horn, Christine Kemmet, Verena Leusch, Dr. Sebastian Vogel

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de

Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn

Bezugspreise: Einzelheft »Spezial«: € 9,30 / sFr. 17,40 / Österreich € 9,70 / Luxemburg € 9,30,– zzgl. Versandkosten. Im Abonnement € 32,00 für 4 Hefte, für Studenten gegen Studiennachweis € 27,00. Bei Versand ins Ausland werden die Mehrkosten berechnet. Alle Preise verstehen sich inkl. Umsatzsteuer. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Postbank Stuttgart, IBAN DE52600100700022706708, BIC PBNKDEFF

Anzeigen: E-Mail: anzeigen@spektrum.de, Tel. 06221 9126-600

Druckunterlagen an: Natalie Schäfer, E-Mail: schaefer@spektrum.de

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 43 vom 19.1. 2022

Gesamtherstellung: L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2022 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Artikelnachweise: Zum Laufen geboren; Entstand der aufrechte Gang in Europa? SdW 1/2020 · Die wahre Steinzeitdiät SdW 12/2019 · Der Ursprung des Zählens SdW 3/2022 · Unterschiedlich verdrahtet SdW 4/2019 · Unser exotischer Vetter Paranthropus SdW 7/2021 · Verwirrende Vielfalt des Homo erectus SdW 3/2021 · Der Felskletterer SdW 4/2022 · Die Nadel im Knochenhaufen SdW 7/2019 · Alles begann mit einem Fingerknöchelchen SdW 5/2020 · »Jeder besitzt Erbgut vom Neandertaler« SdW 5/2021

Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

Auslassungen in Zitaten werden generell nicht kenntlich gemacht.

ISSN 2193-4452 / ISBN 978-3-95892-631-8

SCIENTIFIC AMERICAN
1 New York Plaza, Suite 4500, New York, NY 10004-1562,
Editor in Chief: Laura Helmuth, President: Kimberly Lau

PARANTHROPUS BOISEI
UNSER EXOTISCHER VETTER

Eine Million Jahre lang lebten unseren Vorfahren in Afrika Seite an Seite mit einem nahen Verwandten. Dieser »Nussknackermensch« erscheint so absonderlich, dass sich Wissenschaftler bis heute den Kopf über seine seltsamen Eigenschaften zerbrechen.





Bernard Wood ist britischer Anatom und Paläoanthropologe und hat eine Professur für die Ursprünge des Menschen an der George Washington University in Washington (USA) inne. Seine Forschungen konzentrieren sich auf die Systematik und Stammbaumrekonstruktion der Homininen. Seine Doktorandin **Alexis Williams** untersuchte durch Methoden der vergleichenden Anatomie, Paläoökologie und Biogeografie die Entwicklungsgeschichte von *Paranthropus boisei* in Ostafrika während des Pleistozäns.

spektrum.de/artikel/1875790

ELISABETH DAYNES / SCIENCE PHOTO LIBRARY

ELISABETH DAYNES / SCIENCE PHOTO LIBRARY

AUF EINEN BLICK
DER GRAS FRESSENDE NUSSKNACKER

1 *Paranthropus boisei* gehört in die taxonomische Gruppe der Hominini. Hier werden alle Spezies der Gattung *Homo* samt ausgestorbener Verwandten zusammengefasst. Schimpansen und Bonobos zählen nicht dazu.

2 Den Fossilfunden zufolge lebte *P. boisei* von vor 2,3 bis vor 1,3 Millionen Jahren in Ostafrika – und somit teilweise gleichzeitig und am selben Ort wie unsere direkten Vorfahren.

3 Der Vormensch besaß ein kleines Gehirn und ging wahrscheinlich aufrecht. Mit seinen enormen Backenzähnen verzehrte er vermutlich vorwiegend Gras.

PARANTHROPUS BOISEI

Die Vormenschenart *Paranthropus boisei* zählt nicht zu den unmittelbaren Vorfahren des *Homo sapiens*, ist aber mit der Gattung *Homo* verwandt. Sie tauchte vor 2,3 Millionen Jahren in Ostafrika auf und verschwand eine Million Jahre später wieder.

Verbergen sich in Ihrer Familiengeschichte ungewöhnliche Gestalten – vielleicht so etwas wie ein Zirkusartist, ein Schatzsucher oder gar ein Pirat? Übertragen auf die kollektive Evolutionsgeschichte des *Homo sapiens* lautet die Antwort eindeutig: »Ja!« Wir Jetztmenschen hatten einen wahrlich exotischen Verwandten: *Paranthropus boisei* vereinigte in sich aufrechten Gang mit geringer Körpergröße, sein Gehirn war nur ein Drittel so groß wie unseres, und sein Gebiss zeichnete sich durch außerordentlich mächtige Backenzähne aus. Die ersten fossilen Belege für diese Spezies sind rund 2,3 Millionen Jahre alt und stammen damit aus der gleichen Zeit wie die frühesten Steinwerkzeuge. Und vor 1,3 Millionen Jahren, kurz vor den ersten Anzeichen für die Beherrschung des Feuers, verschwand die Vormenschenart wieder.

Bei den ostafrikanischen Fundstätten von *P. boisei* tauchten ebenfalls Fossilien von anderen Homininen auf, darunter von frühen Stadien unserer eigenen Gattung *Homo* – die Vorfahren des anatomisch modernen Menschen teilten demnach mehr als eine Million Jahre lang die urzeitliche Umwelt mit *Paranthropus*. Diese ausgedehnte Phase der Koexistenz bietet Paläoanthropologen eine besondere Chance: Auf Grund der gesammelten Erkenntnisse über die Lebensweise von *P. boisei* können wir möglicherweise auch besser nachvollziehen, welchen ökologischen Bedingungen und welchem Selektionsdruck unsere direkten Ahnen ausgesetzt waren.

Die ersten fossilen Belege für *P. boisei* stammen aus der Olduvai-Schlucht im Norden des heutigen Tansania (siehe »Fundstätten«). In diesem Canyon haben sich Flüsse und Bäche aus der Serengeti-Hochebene tief eingeschnitten und damit geologische Schichten frei gelegt mit einem reichhaltigen Schatz an Fossilien und Steinwerkzeugen aus den letzten zwei Jahrmillionen. Ab den 1930er Jahren barg das britische Forscherehepaar Louis (1903–1972) und Mary Leakey (1913–1996) in den unteren Schichten der Schlucht Hunderte von Steinwerkzeugen; doch auch nach 20-jährigen Ausgrabungen fanden sie keinerlei Anhaltspunkte für die Werkzeugmacher selbst. Erst 1955 entdeckten sie schließlich einen Backen- sowie einen Eckzahn, die eindeutig von einem menschlichen Verwandten stammten. Aber diese Zähne passten nicht ganz zu dem üblichen Muster, das man von der Gattung *Homo* kannte: Der Backenzahn besaß im Vergleich zum Eckzahn eine außergewöhnlich große Krone.

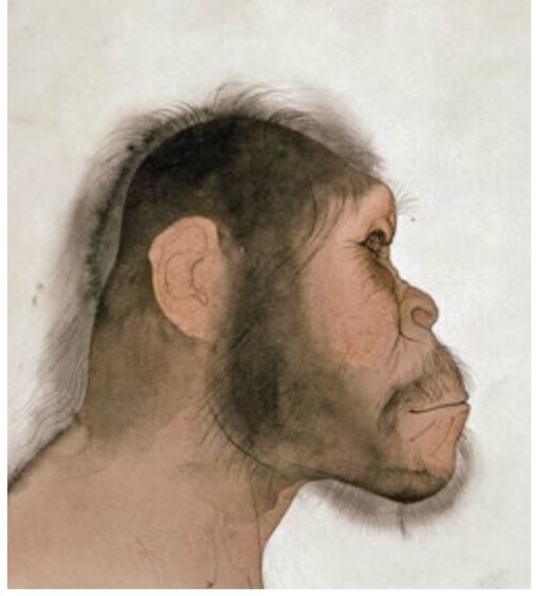
Der Träger der seltsamen Zähne blieb bis zum 17. Juli 1959 unbekannt, als Mary Leakey auf Fragmente eines fossilen Homininenschädels stieß, die durch die Erosion an einem Bergabhang frei gelegt worden waren. Nachdem sie die Bruchstücke mühsam zusammengeklaubt hatte, wurde klar, dass der Schädel einst einem jungen Erwachsenen gehört hatte. Mächtige Knochenleisten längs der Schädeloberseite ließen mit ziemlicher Sicherheit auf ein männliches Individuum schließen. Die Leakeys nannten das Wesen »Dear Boy«; offiziell läuft es unter der Katalognummer OH 5 (fünftes Homininenfossil der Olduvai-Schlucht). Sofort verfasste Louis Leakey einen kurzen Artikel für die Fachzeitschrift »Nature«, in dem er OH 5 als neue Gattung und Art beschrieb, da das Fossil keinem der bis dahin bekannten Homininen aus dem südlichen Afrika ähnelte. Als Namen schlug er *Zinjanthropus boisei* vor – »Zinj« nach der alten lokalen Bezeichnung für Ostafrika (der Gattungsname bedeutet demnach so viel wie Ostafrikamensch); und mit der Artbezeichnung ehrten die Leakeys ihren Mäzen, den wohlhabenden Geschäftsmann Charles Boise (1884–1964), der ihre Arbeiten finanziell gefördert hatte.

Wie der Schädel OH 5 offenbarte, besaß »Dear Boy« ein flaches, breites Gesicht mit großen Ansatzflächen am Scheitelkamm für eine kräftige Kaumuskulatur sowie ein mit 500 Kubikzentimetern recht kleines Gehirn, das dem eines Gorillas entsprach. Besonders fiel im Gebiss der starke Kontrast zwischen den kleinen Schneide- und Eckzähnen vorne und den riesigen Backenzähnen (Prämolaren und Molaren) hinten ins Auge. Nachdem der südafrikanische Paläoanthropologe Phillip Tobias (1925–2012) den Schädel 1967 eingehend untersucht hatte und die hinteren Zahnreihen mit den Kiefern eines Nussknackers verglich, kreierten Journalisten einen eingängigen Spitznamen für OH 5: »Nussknackermensch«.



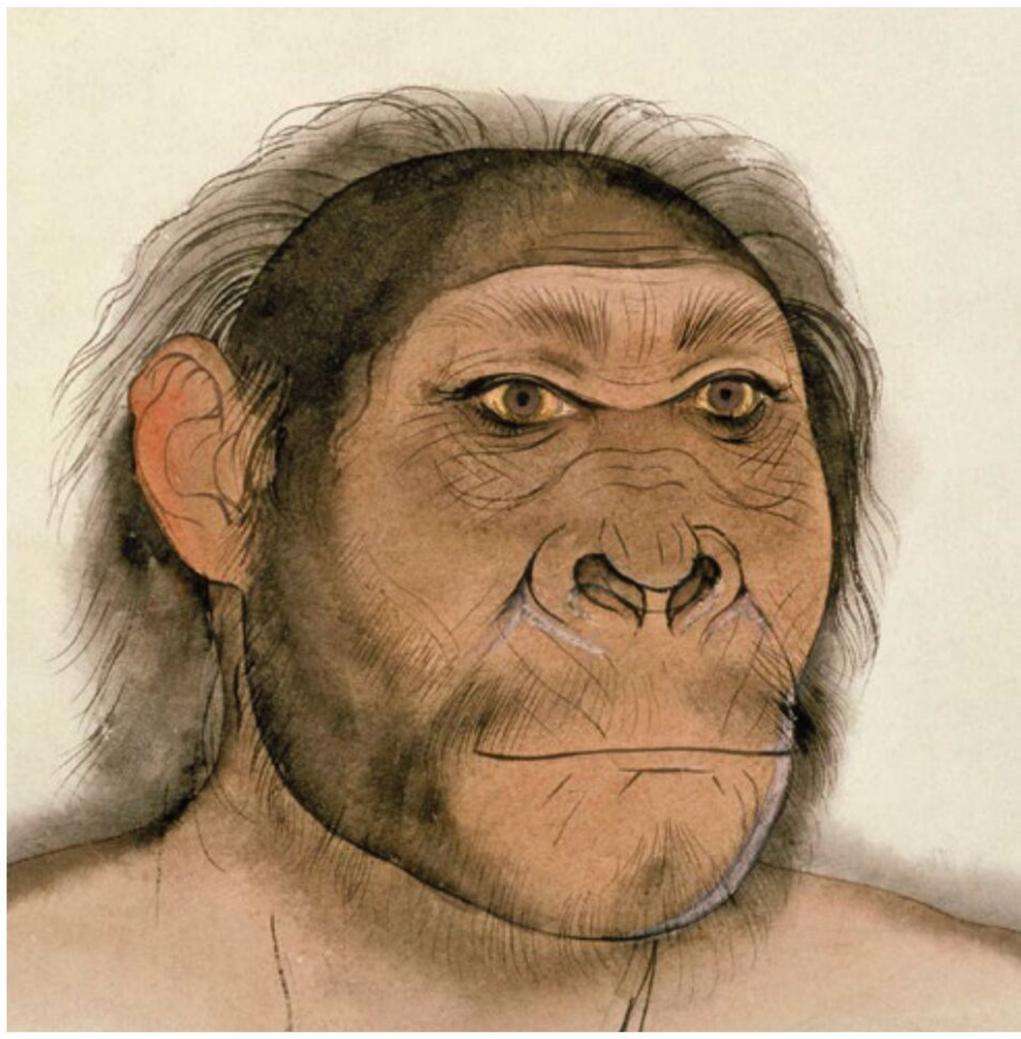
FUNDSTÄTTEN
Alle Fossilfunde von *Paranthropus boisei* stammen aus einer etwa 1000 Quadratkilometer großen Region im östlichen Afrika. Den Anfang machte 1959 der Schädel OH 5 aus der Olduvai-Schlucht im heutigen Tansania. 70 Kilometer nordöstlich hiervon kam 1964 bei Peninj ein Unterkiefer zum Vorschein; es folgten weitere Funde von Skelettfragmenten im Gebiet von Koobi Fura am Ostufer des Turkana-Sees.







NICOLLE RAGER FULLER, NATIONAL SCIENCE FOUNDATION / SCIENCE PHOTO LIBRARY



BEIDE ZEICHNUNGEN UND SCHÄDEL: NATURAL HISTORY MUSEUM LONDON / SCIENCE PHOTO LIBRARY

KÜNSTLERISCHE IMPRESSIONEN Auf Grundlage der spärlichen Fossilfunde von *Paranthropus boisei* schufen Künstler und wissenschaftliche Illustratoren verschiedene Bilder des einstigen Vormenschen, die jeweils unterschiedliche Aspekte betonen. In der Mitte unten ist ein Abguss des 1959 gefundenen Schädels gezeigt.

Wenngleich spätere Forschungsarbeiten nahelegten, dass *Z. boisei* nicht die vielen Steinwerkzeuge aus der Olduvai-Schlucht hergestellt hatte (das passte eher zum 1960 ganz in der Nähe ausgegrabenen *Homo habilis* mit seinem viel größeren Gehirn), erwies sich die Entdeckung von OH 5 aus zweierlei Gründen als Aufsehen erregend. Zum einen löste sie ein weltweites Medienecho aus, wodurch die Leakeys leichter an finanzielle Fördermittel der National Geographic Society gelangten und somit ihre Grabungen in der Olduvai-Schlucht fortsetzen konnten. In den 1950er und 1960er Jahren – vor dem Siegeszug des Fernsehens – erreichte »National Geographic« zahlreiche Haushalte als wichtigste Informationsquelle über die Natur, und das Magazin machte den Namen Leakey zum Synonym für die Suche nach den Ursprüngen der Menschheit.

Ein verblüffend hohes Alter von knapp zwei Millionen Jahren

Der zweite Grund für den Ruhm der Olduvai-Fossilien lag an zwei damals neu entwickelten Altersbestimmungen, die erstmals an OH 5 angewendet wurden: die Kalium-Argon-Analyse sowie die paläomagnetische Datierung. Kalium zerfällt in Vulkanasche mit bekannter Geschwindigkeit zu Argon, so dass sich aus den Mengenverhältnissen der beiden Elemente das Alter einer Probe errechnen lässt. Die paläomagnetische Datierung beruht auf der Tatsache, dass sich die Richtung des Erdmagnetfelds immer wieder ändert, was sich in manchen geologischen Schichten niederschlägt. Daher lässt sich einem Fossilfund ein objektives Alter zuordnen, indem man ihn mit der aus Tiefseebohrkernen bekannten langjährigen paläomagnetischen Abfolge vergleicht. Im Fall von OH 5 lieferten sowohl die Kalium-Argon-Methode als auch die paläomagnetische Datierung einen Wert von knapp zwei Millionen Jahren. Ein solch hohes Alter verblüffte die damalige Forschergemeinde.

1964 stieß man an der Fundstätte Peninj am Westufer des Natronsees unmittelbar nördlich der Olduvai-Schlucht auf einen weiteren Beleg für den Nussknackermenschen in Form eines großen Unterkiefers. Das Exemplar weist die gleiche auffällige Diskrepanz in den Zahngrößen wie der Oberkiefer von OH 5 auf: winzige Schneide- und Eckzähne neben gewaltigen Prämolaren und Molaren. Seither wurden Überreste von Schädeln und Kiefern, hauptsächlich Zähnen, an mehreren Stellen in Äthiopien und Kenia geborgen. Als Louis Leakey und seine Kollegen 1964 den Urmenschen *Homo habilis* beschrieben, äußerten sie auch den Verdacht, *Zinjanthropus boisei* müsse trotz seiner charakteristischen Eigenschaften nicht unbedingt einer eigenen Gattung zugeordnet werden – heute gilt er meist als Mitglied der Gattung *Paranthropus* (von griechisch para = neben; anthropos = Mensch). Darunter fallen Homininen aus dem südlichen Afrika, die sich vermutlich im Lauf der Evolution parallel zu den Vorfahren des anatomisch modernen Menschen entwickelten. Demnach gehören die Spezies von *Paranthropus* zwar zu unseren Vettern, aber nicht zu unseren unmittelbaren Ahnen.

Die meisten fossilen Belege für *Paranthropus boisei* stammen von der Fundstätte Koobi Fora am Ostufer des Turkana-Sees. Wie auch bei Überresten von der Westseite des Sees handelt es sich vorwiegend um Schädelfragmente sowie um zahlreiche Unterkiefer nebst einzelnen Zähnen. Neben Funden, die OH 5 ähneln, umfasst die Fossilsammlung von Koobi Fora zusätzlich Schädel mit kleinerem Gesicht, bei denen die charakteristischen Knochenleisten an der Oberseite fehlen. Anfangs hielt man diese Exemplare für eine andere Art, aber heute interpretieren die meisten Fachleute sie als weibliche Vertreter von *P. boisei*.



NATURAL HISTORY MUSEUM LONDON / SCIENCE PHOTO LIBRARY

ABGUSS VON OH 5 Das 1,8 Millionen Jahre alte Fossil OH 5 entdeckte die britische Archäologin Mary Leakey 1959 in der ostafrikanischen Olduvai-Schlucht. Es gilt heute als Belegexemplar für die Homininenspezies *Paranthropus boisei*.

Solche geschlechtsspezifischen Größen- und Formunterschiede kennt man auch von Menschenaffen, insbesondere von Gorillas und Orang-Utans. In diesem Geschlechtsdimorphismus spiegelt sich die soziale Dominanz der Geschlechter sowie die sexuelle Selektion wider. Bei Primaten korreliert in der Regel eine unterschiedliche Körpergröße mit verschieden ausgeprägten Eckzähnen: Die größeren Männchen setzen ihre mächtigen Exemplare fürs Imponiergehabe ein, um etwa Rivalen bei der Konkurrenz um Weibchen zu bedrohen. *P. boisei* stellt hier jedoch eine Ausnahme dar: Er zeigt zwar einen extremen Geschlechtsdimorphismus hinsichtlich der Körpergröße, doch die Männchen besitzen keineswegs größere Eckzähne als die Weibchen. Warum das so ist, bleibt rätselhaft. Vielleicht setzten *P.-boisei*-Männchen beim Buhlen um Weibchen auf geschlechtsspezifische Merkmale, die nicht fossil erhalten blieben, wie bunt gefärbte Körperpartien (ähnlich den heutigen Mandrillen und Pavianen) oder besondere Verhaltensweisen. Die Unterkiefer von *P. boisei* sind zwar je nach Geschlecht unterschiedlich groß, doch im Gegensatz zum Schädel weichen sie in der Form kaum voneinander ab.

P. boisei fällt unter den fossilen Homininen nicht nur wegen seiner einzigartigen Morphologie aus dem Rahmen, sondern auch wegen charakteristischer Merkmalskombinationen, die er zum Teil mit anderen Arten teilt. Das Spektrum reicht von offenkundigen Schädelcharakteristika wie der Gesichtsform bis hin zu subtileren Details wie einem außergewöhnlich dicken Zahnschmelz oder unteren Prämolaren, die wie Molaren aussehen. Auffallend erscheint ferner die Verbindung der Knochen an den Schädelseiten, die sich viel stärker überlappen als bei heutigen Menschen, Schimpansen oder Bonobos und die dem Kopf eine zusätzliche Festigkeit verlieh. Die Schädelunterseite wirkt für einen Homininen mit nur mäßig entwickeltem Denkorgan ebenfalls ungewöhnlich: Das große Hinterhauptsloch (Foramen magnum), welches das Gehirn mit dem Rückenmark verbindet, liegt fast ebenso weit vorn wie beim Jetztmenschen, woraus sich schließen lässt, dass *P. boisei* aufrecht ging. An derartigen Merkmalen sind Fossilien von *P. boisei* relativ leicht zu erkennen, selbst wenn es sich nur um Schädelfragmente oder Zahnschmelzsplitter handelt. Wenngleich sich solche Besonderheiten oftmals für heutige Systematiker als nützlich erweisen, bleibt häufig unklar, welchem Zweck sie für den Vormenschen einst dienten.

Ein mutmaßlicher Vorfahre

Diese charakteristischen Eigenschaften von *P. boisei* haben sich offensichtlich als komplettes Paket entwickelt und sich dann im Lauf von einer Million Jahre kaum verändert. An welche Nische der Vormensch auch adaptiert gewesen sein mag, sie muss ebenso wie die Anpassungen daran bemerkenswert stabil geblieben sein. Eine mögliche Ausnahme von dieser Stabilität spiegeln vielleicht Fossilien wider, die in Äthiopien sowie westlich des Turkana-Sees gefunden wurden und über 2,3 Millionen Jahre alt sind. Manche Experten ordnen auch jene frühen Exemplare als *P. boisei* ein; andere halten sie für eine eigene Art und mutmaßliche Vorfahren.

Den Namen dieser älteren Spezies, *Paranthropus aethiopicus*, gab man erstmals einem 2,6 Millionen Jahre alten Unterkiefer, der in Äthiopien entdeckt wurde. Als später an der Westseite des Turkana-Sees ein 2,5 Millionen Jahre alter Schädel mit Scheitelkamm, aber vorstehendem Gesicht auftauchte, lag es nahe, diesen Fund ebenfalls *P. aethiopicus* zuzuordnen. Leider fehlen bei beiden Fossilien Zahnkronen, doch auf Grund der Abstände zwischen den Zahnwurzeln lässt sich schließen, dass die Backenzähne ähnlich groß waren wie bei *P. boisei*. Demnach besaß *P. aethiopicus* wahrscheinlich einen stärker vorstehenden Unterkiefer, größere Schneidezähne, eine eher affenartige Schädelbasis sowie einfachere Prämolarenkronen und -wurzeln.

Die simple Aufzählung der charakteristischen Merkmale von *P. boisei* wird seiner herausragenden Morphologie kaum gerecht. Sie erscheint nicht nur im Vergleich zu uns heutigen Menschen als außergewöhnlich, sondern ähnelt auch keinem anderen rezenten Primaten. Der erst vor rund 1000 Jahren ausgestorbene Lemure *Hadropithecus* und der fossile Menschenaffe *Gigantopithecus* teilten einige seiner eigentümlichen Gesichts- und Zahnmorphologien, aber

nicht alle. Als noch bizarrer erweist sich die ökologische Rolle, die *P. boisei* einst in den eiszeitlichen Landschaften Ostafrikas gespielt haben mag: Laut den 2020 von der Paläontologin Larisa DeSantis von der Vanderbilt University in Nashville (USA) und ihren Kollegen veröffentlichten Analysen ähnelte der Vormensch zumindest im Hinblick auf seine Ernährung am ehesten – einem heutigen Tapir.

Der aufmerksame Leser wird sich jetzt vielleicht fragen, warum es bei Fossilfunden so oft um den Kopf geht, also um Schädel, Unterkiefer und Zähne. Das hat mehrere Gründe. Die meisten Organismen werden nie zu Fossilien, aber in den seltenen Fällen, in denen das doch geschieht, versteinern manche Körperteile mit höherer Wahrscheinlichkeit als andere. Das weiche Gewebe, das die Teile des Skeletts zusammenhält, zersetzt sich meist binnen weniger Monate, so dass die Knochen verstreut werden. Die einzelnen Partien des Schädels hingegen wachsen an Nähten zusammen, die sich schon in jungen Jahren schließen; und die Zähne passen insbesondere im Unterkiefer so gut, dass sie vielfach auch lange nach dem Tod an ihrem Platz verbleiben. Außerdem enthalten Unterkiefer und Schädel viel dichtes Knochenmaterial, wodurch sie oft besser konserviert bleiben als Skelettteile mit einer zerbrechlichen Struktur wie die Wirbel oder die Hand- und Fußknöchelchen. Darüber hinaus bestehen Zähne aus zwei der härtesten Substanzen im Körper: Zahnschmelz und Zahnbein (siehe »Spektrum« April 2021, S. 42). Beide versteinern leicht wegen ihres natürlichen Mineralgehalts. Unterm Strich heißt das: Sofern eine Leiche nicht absichtlich begraben wurde, stoßen Wissenschaftler mit viel größerer Wahrscheinlichkeit auf Kopffragmente als auf das übrige Skelett – so wie bei *P. boisei*.

Natürlich werden hin und wieder auch versteinerte Röhrenknochen und weitere Skelettteile entdeckt, aber selbst dann findet man sie nur selten mit anderen Extremitätenstücken oder mit Kopfüberresten verbunden. Durch glücklichen Zufall stieß man vor einigen Jahren auf zwei zusammenhängende Skelette von *P. boisei*, eines in der Olduvai-Schlucht, das andere in Koobi Fora. Ersteres beschrieb lediglich 2013 das Team um den spanischen Archäologen Manuel Domínguez-Rodrigo, damals an der Universidad de Complutense de Madrid, als OH 80. Es handelt sich um das Skelett eines ausgewachsenen Individuums mit für *P. boisei* typischen Zähnen sowie relativ gut erhaltenen Röhrenknochen der vorderen und hinteren Gliedmaßen. Der Fund aus Koobi Fora umfasst größere Bruchstücke von der rechten Schulter nebst Arm- und Handknochen. Zusammen mit weiteren Extremitätenknochen, die man vorläufig *P. boisei* zugeordnet hatte, lassen diese Fossilien darauf schließen, dass die Spezies über kräftige Vorderarme verfügte. Falls sie aufrecht ging – worauf die Lage des Foramen magnum ja hindeutet –, konnte sie vermutlich auch noch klettern. Leider kennen wir bis heute nicht das Verhältnis zwischen Arm- und Beinlänge, aus dem man zuverlässig herleiten könnte, ob ein Individuum seine Vorderextremitäten zum Klettern benutzt hat.

Den vielleicht rätselhaftesten Aspekt an *P. boisei* stellen die übergroßen Kronen seiner Backenzähne mitsamt dem dicken Zahnschmelz dar. Andere frühe Homininen wie *Paranthropus robustus* besaßen Schädel mit ähnlicher Morphologie und werden wegen ihrer großen Backenzähne als megadont bezeichnet. *P. boisei* ist demgegenüber hypermegadont: Seine Molaren sind etwa viermal größer als die eines modernen Menschen entsprechender Körpergröße (siehe »Kräftige Beißer«). Während beim *Homo sapiens* die Krone des ersten Backenzahns im Unterkiefer ungefähr so breit ist wie der Nagel des kleinen Fingers, übertraf sie bei *P. boisei* die Ausmaße unseres Daumennagels.

KRÄFTIGE BEISSER Die Backenzähne im Oberkiefer von *Paranthropus boisei* (oben) sind deutlich größer als beim Jetztmenschen (unten).



DES BARTLETT / SCIENCE PHOTO LIBRARY

Genetische Veränderungen mit großer Wirkung

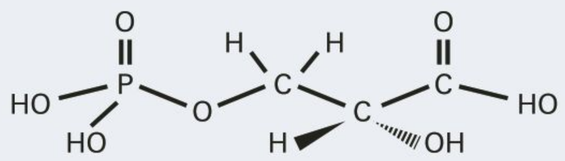
Die genetischen Ursachen dieses extremen Merkmals sind unbekannt, beruhen aber wahrscheinlich auf Mutationen der so genannten Homöobox-Gene, die im Frühstadium der Embryonalentwicklung Wachstum und Organbildung kontrollieren, sowie jener Erbfaktoren, welche die Aktivität der Zahnschmelz produzierenden Ameloblasten steuern. Hier macht sich bereits eine geringfügige Veränderung deutlich bemerkbar: Wenn die Ameloblasten jeden Tag nur ein wenig mehr Zahnschmelz bilden und über längere Zeit aktiv bleiben, führt dies zwangsläufig zu größeren Zahnkronen mit dickerem Schmelz. 2019 vermuteten die Anthropologen Ian Towle und Joel Irish von der Liverpool John Moores University, die beteiligten Gene könnten auch für

Chemische Spuren vorzeitlicher Nahrung

Die Fotosynthese, mit der Pflanzen aus Sonnenlicht, Kohlendioxid und Wasser ihre benötigten Nährstoffe produzieren, kann auf verschiedenen Stoffwechselwegen erfolgen. In gemäßigten Klimazonen mit ausreichend Niederschlag entsteht dabei ein Kohlenhydrat mit drei Kohlenstoffatomen je Molekül. Zu diesen C_3-Gewächsen gehört der größte Teil der höheren Pflanzen, darunter auch Weizen, Roggen sowie Hafer (links). Heißeres, trockenes Klima erfordert einen Stoffwechselweg, der Wasser effizienter nutzt: Hier bildet die Fotosynthese ein Kohlenhydrat mit vier Kohlenstoffatomen; unter solchen C_4-Pflanzen finden sich viele Gräser wie Mais, Hirse oder Rutenhirse (rechts).

Die Nahrung, die ein Tier zu Beginn seines Lebens aufnimmt, während sich die Zähne noch entwickeln, hinterlässt im Zahnschmelz chemische Spuren. Wissenschaftler können damit analysieren, was ein Lebewesen vor Jahrtausenden oder sogar Jahrmillionen zu sich genommen hat. Aus einem hohen Verhältnis von C_3 zu C_4 lässt sich schließen, dass sich das Individuum vorwiegend von C_3-Pflanzen (oder von Tieren, die solche Gewächse gefressen haben) und nur selten von C_4-Arten ernährt hat. Wenig C_3 im Verhältnis zu C_4 deutet hingegen darauf hin, dass die Ernährung vorwiegend auf C_4-Pflanzen beruhte. Die großen C_4-Mengen im Zahnschmelz von *Paranthropus boisei* bilden zusammen mit den mächtigen Backenzähnen ein Indiz, dass der Vormensch überwiegend Gräser verspeiste, die stark gekaut und zerkleinert werden mussten.

C_3-Pflanzen





WEIZEN: ISTOCK / W6

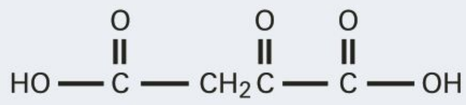


ROGGEN: MAGNUS / STOCK.ADOBE.COM



HAFER: GABORT / STOCK.ADOBE.COM

C_4-Pflanzen





MAIS: ACHIM BANCK / STOCK.ADOBE.COM



HIRSE: MURILO / STOCK.ADOBE.COM



PANICUM VIRGATUM: WINFRIED RUSCH / STOCK.ADOBE.COM

die kleinen Vertiefungen in der Zahnschmelzoberfläche verantwortlich sein, die man bei vielen Zähnen von *P. boisei* beobachtet. 2016 führte die Arbeitsgruppe von Jung-Wook Kim von der Staatlichen Universität Seoul diese Gruben im Zahnschmelz auf eine Mutation im Gen *LAMB3* (laminin subunit beta 3) zurück, das beim Jetztmenschen dafür sorgt, dass die Ameloblasten während der Zahnschmelzentstehung auf ganz bestimmte Weise aneinanderhaften.

Unabhängig von den exakten genetischen und biochemischen Mechanismen, die hinter der Entstehung solch mächtiger Kauwerkzeuge stecken, muss sich das Endergebnis für *P. boisei* in irgendeiner Weise gelohnt haben; sonst wäre das Merkmal nicht über Tausende von Generationen hinweg erhalten geblieben. Am plausibelsten erscheint die Erklärung, dass sich die riesigen Backenzähne zusammen mit dem großen Unterkiefer, den flachen Wangenknochen sowie dem Scheitelkamm im Rahmen einer vegetarischen Lebensweise entwickelten. Eine Vergrößerung von Oberfläche und Volumen der Zähne versetzt Pflanzenfresser in die Lage, auch zähe Kost wirksam zu zerkleinern.

Laut Isotopenanalysen vom Zahnschmelz bestand die Nahrung von *P. boisei* vorwiegend aus so genannten C_4-Pflanzen wie Gräsern, die in den Tropen meist nur einen begrenzten Nährwert besitzen (siehe »Chemische Spuren vorzeitlicher Nahrung« sowie den Artikel ab S. 14). Auch

wenn Gras tatsächlich das Grundnahrungsmittel des Nussknackermenschen gewesen sein dürfte, hätte es der gleiche Zahnaufbau durchaus ermöglicht, Nüsse und Samen mit harter Schale zu verzehren – entweder als Ergänzung zur normalen Nahrung oder als Ausweichmöglichkeit, falls das bevorzugte Gras knapp sein sollte. Die dicke Zahnschmelzkappe hätte die Backenzähne vor Schäden durch Phytolithe (mikroskopisch kleine Siliziumdioxidkristalle in Pflanzengewebe) oder anderes körniges Material bewahrt und mitgeholfen, die Kräfte beim Beißen auf harte Objekte besser zu verteilen. Damit könnte gerade die spezialisierte Morphologie paradoxerweise dazu beigetragen haben, *P. boisei* zu einem Nahrungsgeneralisten zu machen. Als einigermaßen sicher gilt, dass der Vormensch nahezu rein vegetarisch lebte. Um Fleisch in so kleine Stücke zu zerlegen, dass man sie hinunterschlucken kann, braucht man messerförmige Eckzähne und Prämolaren; und das Kauen erfordert Molaren mit spitzen Höckern – beides besaß *P. boisei* nicht.

Die Ernährung von *P. boisei* blieb den Befunden zufolge über mehr als eine Million Jahre unverändert. Bei der Gattung *Homo* dagegen ähnelte sie anfangs der von Schimpansen und verschob sich dann vor rund 1,7 Millionen Jahren hin zu C_4-Nahrungsmitteln. Nach Ansicht der Fachleute markiert dieser Wechsel den Zeitpunkt, als *Homo* anfing, Steinwerkzeuge herzustellen – eine neue Verhaltensweise, mit der er Fleisch beschaffen, verarbeiten und verzehren konnte. Von da an setzte er statt auf vegetarische Kost auf Tiere, die C_4-Pflanzen fraßen.

Eine taxonomische Gruppe mit zahlreichen Variationen eines Grundbauplans

In einer minimalistischen Stammbaumversion des Lebens enthält der Zweig, der die Homininen darstellt, sämtliche Arten, die den frühesten Vormenschen mit *Homo sapiens* verbinden. In jeder einzelnen Phase unserer Evolutionsgeschichte gäbe es dann nur eine Homininenspezies. Dass ein solch simples Szenario nicht stimmt, bewies die Entdeckung und Identifizierung von *P. boisei* in Verbindung mit dem späteren Fund von *H. habilis* in denselben Gesteinsschichten. Damit lieferte unser Verwandter, aber nicht direkte Vorfahre *Paranthropus* nicht nur den ersten überzeugenden Beleg für die taxonomische Vielfalt der Homininen, sondern er erinnert uns auch daran, dass diese Gruppe zahlreiche Variationen eines Grundbauplans hervorbrachte – sie lief keineswegs zwangsläufig auf die Herausbildung des modernen Menschen zu.

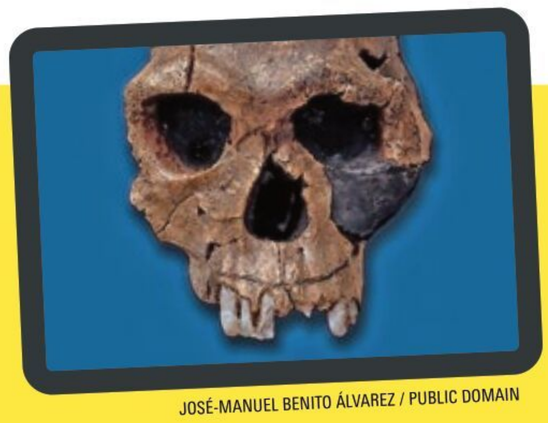
Jüngste Forschungsergebnisse schärfen das Bild: 2020 schlossen der Geologe Jonathan Wynn von der US-amerikanischen National Science Foundation und seine Kollegen aus Isotopenanalysen, dass sich die Ernährung von *Paranthropus* früher veränderte als seine Morphologie. Eine solche Reihenfolge war zu erwarten, da morphologische Veränderungen in der Regel dem Verhaltenswandel hinterherhinken.

Die unterschiedlichen Umweltbedingungen, denen die Homininen in Afrika ausgesetzt waren, führten zu einem breiten Spektrum von Anpassungsreaktionen; *P. boisei* erscheint dabei schlicht als exotischste Variante, die man bisher gefunden hat. Die Paläoanthropologie ist keine experimentelle Wissenschaft – wir können keine Modellorganismen erzeugen. Statt eigene Versuche durchzuführen, müssen wir uns darauf beschränken zu beobachten, wie die natürliche Selektion auf Produkte unserer Evolutionsvergangenheit einwirkte und verschiedene Homininenarten hervorbrachte, von denen wir als Einzige noch existieren. Paläoanthropologen stehen vor der Herausforderung, aus den zu Tage getretenen, bruchstückhaften Belegen die Versuchsbedingungen dieser natürlichen Experimente so gut wie möglich zu rekonstruieren.

Paranthropus boisei dürfte noch vor verhältnismäßig kurzer Zeit (vor 3 bis 2,5 Millionen Jahren) einen gemeinsamen Vorfahren mit der Gattung *Homo* besessen haben. Aber die ungewöhnliche Morphologie seiner Kauwerkzeuge sowie sein einzigartiger Geschlechtsdimorphismus erschweren die Rekonstruktion der Randbedingungen, die zu seinem Auftauchen und schließlich zu seinem Aussterben führten. Wie diese Bedingungen auch aussahen, es entwickelte sich ein Hominine, der relativ unverändert mehr als eine Million Jahre überlebte. Das Rätsel von *P. boisei* zu knacken, ist für ein generelles Verständnis zur Evolution der Homininen genauso wichtig wie die Aufklärung der Ursprünge unserer eigenen Gattung *Homo*, denn *P. boisei* kann uns viel darüber lehren, unter welchen Voraussetzungen und Einschränkungen sich unsere Vorfahren entwickelten. ◂

Mehr Wissen auf **Spektrum.de**

Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter **spektrum.de/t/menschwerdung**



JOSÉ-MANUEL BENITO ÁLVAREZ / PUBLIC DOMAIN

QUELLEN

Leakey, L.S.B.: A new fossil skull from Olduvai. Nature 184, 1959

Towle, I., Irish, J.D.: A probable genetic origin for pitting enamel hypoplasia on the molars of *Paranthropus robustus*. Journal of Human Evolution 129, 2019

Wood, B.A., Patterson, D.B.: *Paranthropus* through the looking glass. PNAS 117, 2020

Wynn, J.G. et al.: Isotopic evidence for the timing of the dietary shift toward C_4 foods in eastern African *Paranthropus*. PNAS 117, 2020

AMERICAN Scientist

© American Scientist
www.americanscientist.org

NEANDERTHAL MUSEUM, HOLGER NEUMANN

NEANDERTHAL MUSEUM, HOLGER NEUMANN

HOMO ERECTUS VERWIRRENDE VIELFALT

Der Vorläufer von *Homo sapiens* verblüfft durch seine Uneinheitlichkeit. Neue Fakten erweitern das Bild dieses Frühmenschen – und lassen den herkömmlichen Artbegriff verschwimmen.

Thorwald Ewe ist Wissenschaftsjournalist. Er schreibt vor allem über Themen aus Anthropologie und Archäologie.



spektrum.de/artikel/1823135

AUF EINEN BLICK
FLEXIBLER ERFOLGSTYP

1 Kein anderer unserer Vorfahren weist derart drastische Unterschiede von Individuum zu Individuum auf wie *Homo erectus* – sowohl in Körpergröße als auch bei den Schädelmerkmalen.

2 Jüngst entdeckte ein Forscherteam, dass er auch im Verhalten überraschend flexibel war: So nutzte er parallel urtümliches und fortschrittlicheres Werkzeug.

3 Genetiker fanden Spuren mehrerer Kreuzungen von moderneren Menschenformen mit einer älteren, »superarchaischen« Spezies – vermutlich *Homo erectus*.

FRÜHMENSCH Vor zirka 1,6 Millionen Jahren lebte ein *Homo-erectus*-Junge dort, wo heute Kenia liegt. Die Rekonstruktion des Jungen im Neanderthal Museum beruht auf einem Skelettfund.

Kein Zweifel: *Homo erectus* hat die unangefochtene Pionierrolle in unserer Ahnenreihe. Er war der erste Hominine, der in seinen Körpermaßen und Proportionen dem Menschen der Gegenwart ähnelte, und der erste, der in der Savanne vom Gejagten zum Jäger wurde. Und vermutlich als Erster nutzte er das Feuer.

Damit nicht genug. *Homo erectus* (von lateinisch erectus = aufgerichtet) ist laut Fundlage der früheste Hominine, der sich von Afrika aus nach Eurasien ausgebreitet hat. Out-of-Africa I nennen die Paläoanthropologen das Szenario dieser ersten Expansion aus der Menschheitswiege. Sie hat offenbar ziemlich rasch nach dem Auftritt des *Homo erectus* auf der Weltbühne stattgefunden: Zwei Millionen Jahre alt ist das bislang früheste Fossil, ein Kinderschädel mit der Katalognummer DNH 134. Der Paläoanthropologe Andy Herries hat es vor wenigen Jahren im Höhlensystem von Drimolen in Südafrika entdeckt. Und bereits vor 1,8 Millionen Jahren taucht die Menschenform in Eurasien auf, an einer Fundstelle im georgischen Dmanisi im Kaukasus (siehe »Die ersten Weltbürger«, S. 50). Von da an war sie in fast ganz Eurasien präsent, von Spanien bis nach China. Nach *Homo sapiens* ist *Homo erectus* die am weitesten verbreitete Menschenform aller Zeiten. Der vorläufige Endpunkt dieser Pionierkarriere wurde 2019 markiert: Bei einer Neudatierung der Fundstelle von Ngandong auf der indonesischen Insel Java bestimmten Forscher um Yan Rizal vom Bandung Institute of Technology das letzte Auftreten in die Zeit von 117000 bis 108000 Jahren vor heute.

Somit überspannt diese Art eine Ära von fast 1,9 Millionen Jahren. Das berechtigt zu einem weiteren Superlativ. *Homo erectus* ist mit Abstand die bislang erfolgreichste Spezies der Gattung *Homo*. Zum Vergleich: Den anatomisch modernen Menschen als einzige heute noch existierende Menschenform unseres Planeten gibt es seit gerade einmal 300000 Jahren. So alt sind die frühesten *Sapiens*-Funde aus Djebel Irhoud in Marokko. Dennoch wirft *Homo erectus* immer noch große Fragen bei den Paläoanthropologen auf. In Anlehnung an den Philosophie-Bestseller von Richard David Precht könnte das größte Rätsel so lauten: »Wer war *Homo erectus* – und wenn ja, wie viele?«

Eine Art – viele Namen?

Seit mehr als einem Jahrhundert sind Forscher an diversen Fundstellen der Alten Welt auf fossile Schädelreste gestoßen, die charakteristische Gemeinsamkeiten aufweisen: dickwandige Knochen, vorspringende Überaugenwülste, lang gezogene und niedrige Hirnschädel. Ab der Mitte des 20. Jahrhunderts begann sich die Sammelbezeichnung *Homo erectus* zu etablieren. Weil diese Schädel jedoch aus verschiedenen Zeiten und geografischen Zonen oft etwas unterschiedlich aussehen, erlagen einige Paläoanthropologen der Versuchung, separate Artnamen zu vergeben: *Homo ergaster*, *Homo georgicus*, *Homo rhodesiensis*, *Homo heidelbergensis*. Zwei wissenschaftliche Denkschulen lieferten sich bis heute heiße Gefechte. Die so genannten »Lumper«, zu Deutsch »Zusammenwerfer«, tendieren dazu,

Jäger und Koch

Homo erectus ist der erste Frühmensch mit Körpermaßen, die denen des anatomisch modernen Menschen entsprechen: deutlich längere Beine als Arme, lange Gliedmaßen im Vergleich zum Torso, zwischen etwa 1,4 und 1,8 Meter groß und 40 bis 65 Kilogramm schwer, mit Gehirnvolumina von knapp 600 Kubikzentimetern beim frühen und 1250 Kubikzentimetern beim späten *Erectus*-Menschen. Auch die frühesten Vertreter unserer Gattung – *Homo rudolfensis* (vor 2,8 bis 1,8 Millionen Jahren) und *Homo habilis* (vor 2,1 bis 1,5 Millionen Jahren) – gingen permanent aufrecht. Doch das Skelett von *Homo habilis* ähnelt weitgehend dem der vormenschlichen Australopithecinen, und *Homo rudolfensis* hatte ein noch relativ urtümliches Gebiss.

Der Vergleich zwischen der 2,9 Millionen Jahre alten »Lucy«, einem *Australopithecus afarensis*, und dem 1,6 Millionen Jahre alten, zum Zeitpunkt seines Todes etwa zwölfjährigen *Homo erectus* KNM-WT 15000 (»Nariokotome Boy« oder »Turkana Boy«) wäre noch weit drastischer ausgefallen: Während die äußerlich schimpansenähnliche Lucy mit höchstens 1,2 Meter Größe und überlangen Armen nur plattfüßig watscheln konnte, wäre der 1,7 Meter große, schlaksige Nariokotome Boy ihr mit federnden Sätzen vorausgespurtet. Zum Leben als Savannendauerläufer gehörte, dass *Homo erectus* höchstwahrscheinlich der erste Hominine ohne komplette Körperbehaarung und mit Schweißdrüsen war: Das Traben über große Distanzen erfordert die Fähigkeit zum Schwitzen, weil der Körper sich sonst überhitzt und ein Kreislaufzusammenbruch droht. Als Folge des Haarverlusts musste die Menschenform zum UV-Schutz dunkle Hautpigmente entwickeln.

Der Kühlungstrick verschaffte gewaltige Vorteile. Während die großen Raubtiere der Savanne in sengender Tageshitze im Schatten von Bäumen ruhen mussten und erst in der Dämmerung aktiv wurden, war *Homo erectus* der erste Hominine, der vom Gejagten – über die Zwischenstufe des Fleischdiebs an Raubtierrissen – schließlich zum tagaktiven Ausdauerjäger wurde. Er war vermutlich der Erste, der glimmende Holzstücke aus Blitzeinschlägen und Buschbränden nutzte, um ein Lagerfeuer zu unterhalten und rohe Nahrung durch Erhitzen besser kau- und verdaubar zu machen.



MICHAEL J. ROGERS, SOUTHERN CONNECTICUT STATE UNIVERSITY

KALOTTE Der 1,5 bis 1,6 Millionen Jahre alte, fragmentierte Schädel mit Namen DAN 5 fand sich in Gona (Äthiopien). Er gehörte zu einem grazilen *Homo erectus*, womöglich einem weiblichen Individuum.

ähnliche Überreste einer einzigen Gruppe zuzuordnen. Demgegenüber teilen die »Splitter« die Fossilfunde auf Grund anatomischer Merkmale in mehrere Arten auf. Genetisch lassen sich die Schädel- und Knochenreste nicht auswerten; jedenfalls noch nicht. Das Erbgut von *Homo erectus* ist unbekannt, weil nachweisbare Genabschnitte wegen des hohen Alters der Knochen oder einer zu warmen Fundumgebung nicht erhalten sind.

»Ich denke, es macht keinen Sinn, die unterschiedlichen Populationen des *Homo erectus* als eigene Arten zu führen«, bricht Friedemann Schrenk eine Lanze für die Lumper. »Sie haben einen gemeinsamen Ursprung und sind durch ihre weltweit verbreitete Kultur verbunden. Das war einfach eine ungeheuer vielfältige Art, mit der höchsten Variabilität innerhalb sämtlicher Homininen.« Schrenk ist Professor für Paläobiologie der Wirbeltiere an der Goethe-Universität und Leiter der Sektion Paläoanthropologie am Forschungsinstitut Senckenberg in Frankfurt am Main.

Das Staunen über die Uneinheitlichkeit des *Homo erectus* hat sich im Jahr 2020 durch eine neue Studie allerdings weiter verstärkt: Offenbar war nicht nur die Schädelform dieser Frühmenschen sehr variabel, sondern auch ihr Verhalten – abzulesen an ihrer Werkzeugkultur. Zu dem Schluss kommt eine Forschergruppe um Sileshi Semaw vom Centro Nacional de Investigación sobre la Evolución Humana (CENIEH) im spanischen Burgos und Michael Rogers, der an der Southern Connecticut State University tätig ist.

In der Region Gona im äthiopischen Afar-Dreieck, an den Fundstellen Busidima North und Dana Aoule North, stießen die Wissenschaftler auf je einen Schädelrest von *Homo erectus*: den 1,26 Millionen Jahre alten, stark fragmentierten Teil eines grobschlächtigen Schädeldachs, der nun die Fachbezeichnung BSN 12 trägt. Und einen eher grazilen, 1,5 bis 1,6 Millionen Jahre alten, fast vollständigen Hirnschädel. Die Anthropologen benannten ihn DAN 5. Nur selten entdecken Ausgräber an ein und derselben Fundstelle Fossilien und direkt damit vermengt Steinwerkzeuge. Hier hatten die Forscher gleich bei beiden *Erectus*-Funden dieses Glück: Sowohl Busidima North als auch Dana Aoule North lieferten eine reiche Ausbeute. Allerdings sind die Werkzeuge zwei unterschiedlichen Steintechnologien zuzuschreiben, dem Oldowan und dem Acheuléen. Das hätte nach der traditionellen Sichtweise nicht sein dürfen. »Eine Art – eine Technologie« lautete bisher ein Mantra der Paläoanthropologen.

Der unberechenbare Vorfahre

Bei den Oldowan- oder Mode-I-Werkzeugen handelt es sich um simple Geröllbrocken mit einer einzigen Schneidkante. Forscher ordneten sie bislang nur den frühesten Vertretern der Gattung *Homo* zu:

- *Homo rudolfensis* – er lebte von vor 2,8 bis vor 1,8 Millionen Jahren,
- *Homo habilis* – dieser Frühmensch lässt sich für die Zeit von vor 2,1 bis vor 1,5 Millionen Jahren nachweisen,
- dem frühesten afrikanischen *Homo erectus*. Er erschien vor 2 bis 1,7 Millionen Jahren auf der Weltbühne. Manche Wissenschaftler bezeichnen ihn mit dem separaten Artnamen *Homo ergaster*, dem »arbeitenden Menschen«.

Vor 1,7 Millionen Jahren, so die bisherige Vorstellung, entwickelte *Homo erectus* die fortschrittlichere Acheuléen-



COMPUTER-REKONSTRUKTION: M. PONCE DE LEÓN UND CH. ZOLLIKOFER, UNIVERSITÄT ZÜRICH

FRÜHE VIELFALT Die fünf Individuen von Dmanisi in Georgien repräsentieren vermutlich einen Querschnitt durch die *Erectus*-Population vor 1,8 Millionen Jahren. Sie divergieren stark in Aussehen und Hirnvolumen.

oder Mode-II-Kultur. Hierzu zählen steinerne Hackmesser und Faustkeile mit beidseitig scharfen Kanten. Wo solche Werkzeuge ans Licht kamen, deuteten Forscher sie als Hinterlassenschaft des weiterentwickelten *Homo erectus*. Stieß man hingegen auf Mode-I-Geräte, galt als gewiss, dass diese Fundstelle dem frühen *Homo* zuzuordnen war.

Aus der Gona-Region ist bisher nicht das winzigste Fossil von älteren Homininen als *Homo erectus* bekannt. Und nun das – Mode-I- und Mode-II-Werkzeuge in ein und denselben Fundschichten, mitsamt *Erectus*-Fossilien, die deutlich diesseits der 1,7-Millionen-Jahre-Zeitmarke liegen. »Die Mode-I-Technologie blieb offenbar die gesamte Altsteinzeit über in Gebrauch«, folgert Sileshi Semaw laut einer Pressemitteilung der Southern Connecticut State University. Michael Rogers betont: »Das widerspricht der einfachen Sichtweise, wonach einer Homininen-Spezies jeweils nur eine einzige Werkzeugtechnologie zuzuordnen ist. Die Evolutionsgeschichte des Menschen ist komplizierter.«

Homo naledi: Ein später *Erectus*

In einer evolutionären Sackgasse im Süden Afrikas haben Nachfahren des *Homo erectus* bis vor etwa 240000 Jahren überlebt. Davon ist der Frankfurter Paläobiologe Friedemann Schrenk überzeugt. In einem abgelegenen Winkel Südafrikas hätten sich die Frühmenschen zum *Homo naledi* (»Mensch aus der Sternhöhle«) entwickelt. Die Skelette aus dem Rising-Star-Höhlenkomplex zeigen eine verwirrende Mischung (siehe Artikel ab S. 52). Schrenk listet auf: Einerseits hatten die rund 1,5 Meter großen *Naledi*-Menschen primitive Merkmale wie kleine Gehirne und Hüften, gekrümmte Fingerknochen und hochgezogene Schultern – andererseits verfügten sie über moderne, nämlich kleine und einfache Zahnkronen und moderne Hand- und Fußfunktionen. Solche vermeintlichen Rückschritte zu archaischen Zügen sind bei dauerhaft isolierten Gruppen nichts Ungewöhnliches. Die Evolution hat nie eine vorgegebene Richtung – und schon gar nicht automatisch zu einer Höherentwicklung.

Homo erectus, der Unberechenbare, nutzte anscheinend beide Technologien parallel. Der Frühmensch reagierte damit wahrscheinlich flexibel auf seine aktuelle Situation – je nachdem, welche Rohmaterialien rund um seinen Wohnplatz verfügbar waren und wofür er das Werkzeug brauchte. Wer etwa die zähe Haut eines verendeten Elefanten aufschneiden will, tut sich mit einem »fortschrittlichen«, beidseitig scharfkantig zugehauenen Faustkeil leichter. Geht es indes nur darum, eine hartschalige Knolle aufzubrechen, genügt ein einfacher Abschlag von Geröll aus dem nahegelegenen Flussbett und ein unbearbeiteter Hammerstein, um das faserige Innere der Knolle zu Mus zu stampfen.

Vielfalt herrscht ebenfalls bei den beiden Schädelfossilien. DAN 5 ist hinreichend gut erhalten, um auf das Hirnvolumen schließen zu können: etwa 590 Kubikzentimeter. Damit ist dies der kleinste jemals in Afrika gefundene *Homo-erectus*-Schädel. BSN 12 hingegen ist viel größer und hat einen viel ausgeprägteren Überaugenwulst. »Wahrscheinlich war *Homo erectus* eine sexuell dimorphe Spezies«, nähren Semaw und Rogers einen schon von anderen Forschern gehegten Verdacht. Geschlechtsdimorphismus liegt vor, wenn männliche und weibliche Individuen derselben Art deutlich unterschiedlich aussehen. Damit sind Differenzen bezüglich Größe, Färbung oder Skelettbau gemeint. Bei Primaten ist dies sehr häufig der Fall. Allerdings: »Bis vor 15 Jahren dachten die Paläoanthropologen, *Homo erectus* sei der Erste in der Ahnenreihe des Menschen gewesen, bei dem der Sexualdimorphismus stark abgenommen hat«, sagen Semaw und Rogers. »Aber inzwischen liegen deutlich mehr Funde vor. Jetzt sieht es danach aus, dass die Geschlechter in ihrem Erscheinungsbild unterschiedlicher waren als früher vermutet.«

Die beiden Wissenschaftler erinnern an die weltberühmte Fundstelle von Dmanisi in Georgien. Dort kamen bei Grabungen seit 1991 fünf Schädel, rund 50 Skelett- und ein Hüftknochen ans Licht. Alle sind 1,8 Millionen Jahre alt und lagen auf engstem Raum beieinander. Die plausibelste Annahme dazu lautet: Diese Individuen gehörten derselben Spezies an. Umso frappierender ist daher, wie zusammen-

gewürfelt die Schädel aussehen, mit Gehirnvolumina zwischen 546 und 775 Kubikzentimetern. Im Schnitt entspricht das dem Anderthalbfachen eines heutigen Schimpansen. Die Röhrenknochen lassen auf eine Größe von 1,4 bis 1,6 Metern schließen.

Somit hatten die Dmanisi-Homininen Körpermaße am unteren Rand dessen, was man Erwachsenen der Spezies *Homo erectus* zubilligt. »Das ist entweder eine sehr frühe *Homo-erectus*-Population, die sich im Kaukasus regional weiterentwickelt hat«, sagt Paläobiologe Friedemann Schrenk, »oder *Homo rudolfensis* hat sich schon vor mehr als zwei Millionen Jahren dorthin ausgebreitet.« Diese Art hatte bereits vor dem *Homo erectus* existiert.

Egal wie viel Zeit verstreicht, ein Hominine ist immer ein möglicher Sexualpartner

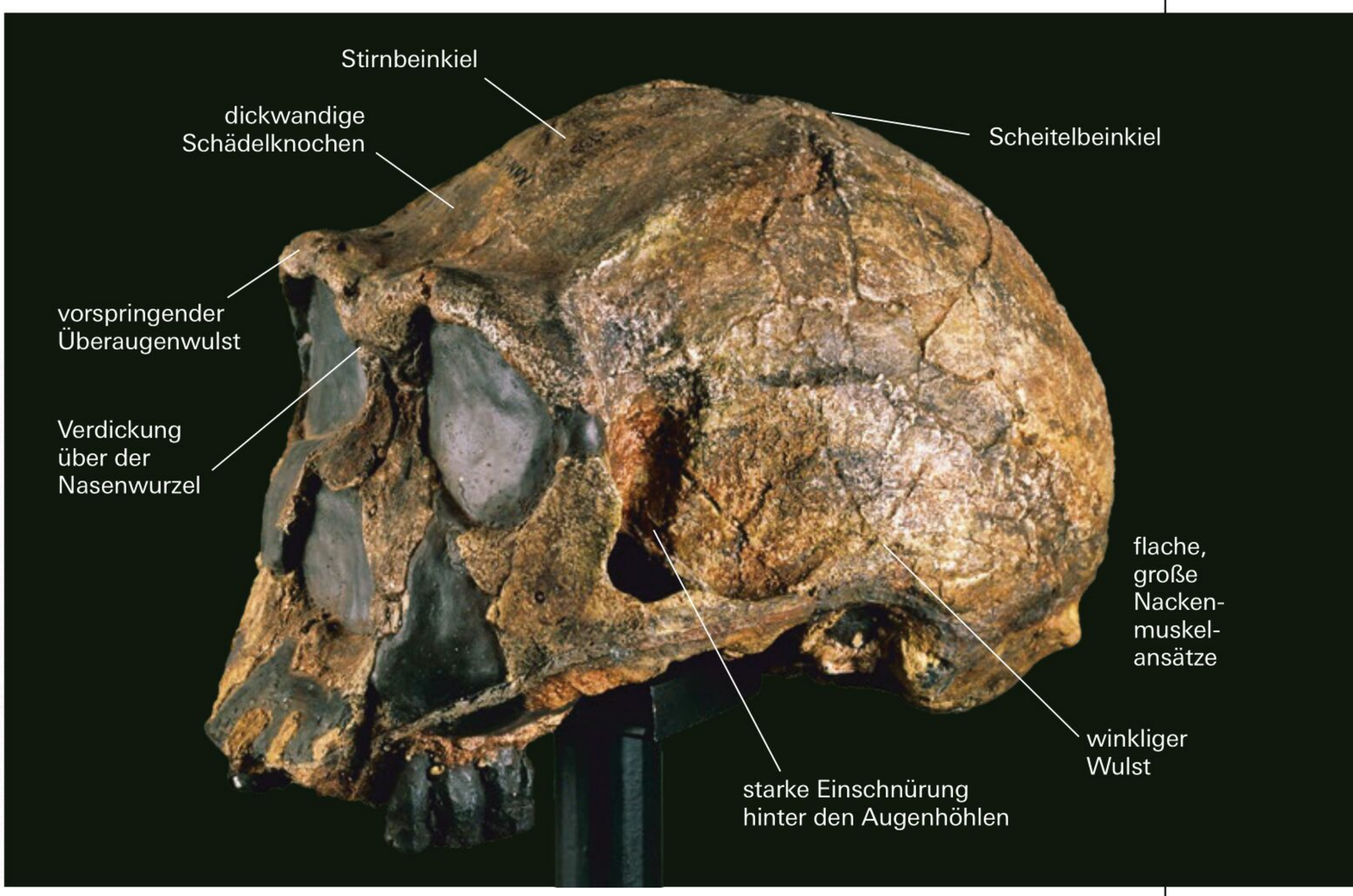
Viele Forscher halten die Dmanisi-Homininen für sehr frühe Individuen von *Homo erectus*. Dann würde die plausibelste Erklärung für deren enorme Größen- und Formunterschiede lauten: Die größeren waren männlich, die kleineren weiblich. Das dürfte auch im 6000 Kilometer südlich gelegenen heutigen Äthiopien so gewesen sein, argumentieren Sileshi Semaw und Michael Rogers: »Das ist derzeit die einfachste Erklärung.«

Gleichwohl räumen die beiden Forscher ein, dass dies nicht der einzige Grund für das unterschiedliche Aussehen von *Homo erectus* sein muss: »Die Gruppen waren weit verstreut, die Bevölkerungsdichte wahrscheinlich niedrig. Das begünstigte die Entwicklung regionaler anatomischer Varianten, als Folge von zeitweiser genetischer Isolation.« Wenn Gruppen immer wieder abgeschieden voneinander leben, sie sich also nicht vermischen und damit der Genaustausch unterbrochen wird, kann das mit der Zeit zu einer hochgradig vielgestaltigen Spezies führen. Genetiker sprechen dann vom »Gründereffekt«. Was ist damit gemeint? Gerade an den Rändern einer expandierenden Population erhalten sich oft primitivere Merkmale und seltenere Genvarianten. Im Stammland hingegen ist die Bevölkerung in aller Regel genetisch homogener und entwickelt Merkmale, die Anthropologen als moderner einstufen. Kommt es nach langer Isolation zu Kontakten zwischen den Gruppen, findet wieder Genfluss statt. »Selbst nach mehreren hunderttausend Jahren getrennter Entwicklung betrachten Homininen einander immer als mögliche Sexualpartner«, betonen Semaw und Rogers.

Zu solchen Kreuzungsereignissen ist es im Verlauf der Menschheitsgeschichte immer wieder gekommen. Genetiker haben im zurückliegenden Jahrzehnt Einsprengsel der Neandertaler und der Denisovaner im Erbgut heute lebender Menschen nachgewiesen, die von Vermischungen vor 45 000 bis 65 000 Jahren stammen. Etwa 400 000 Jahre zurückreichende Kreuzungsspuren anderer Art haben Genetiker um Kay Prüfer und Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig 2013 identifiziert. Es handelt sich um DNA-Bausteine von sehr archaischen Homininen, die sich vor mehr als einer Million Jahre von den gemeinsamen Vorfahren des modernen Menschen, des Neandertalers und des Denisovaners abgespalten hatten. Als wahrscheinlichster Kandidat dafür gilt eine der Populationen von *Homo erectus*. Denisovaner,

Wann ist ein *Homo erectus* ein *Homo erectus*?

Paläoanthropologen ordnen Fossilfunde meist anhand von anatomischen Merkmalen einer bestimmten Spezies zu. Am rund 1,6 Millionen Jahre alten Schädel KNM-ER 3733 aus der Fundregion Koobi Fora in Kenia sind charakteristische Merkmale von *Homo erectus* zu sehen. Allerdings gibt es vergleichbar alte fossile Schädel aus Afrika, die ähnlich aussehen, aber beispielsweise einen viel weiter vorspringenden Überaugenwulst aufweisen. Eine separate Frühmenschenart? Vermutlich handelt es sich um Geschlechtsdimorphismus: Der grazile Schädel KNM-ER 3733 gehörte wohl zu einem weiblichen Individuum.



BPK / DE AGOSTINI PICTURE LIBRARY / G. CIGOLINI; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Neandertaler und anatomisch moderne Menschen waren letztlich allesamt Nachfahren von *Homo erectus*.

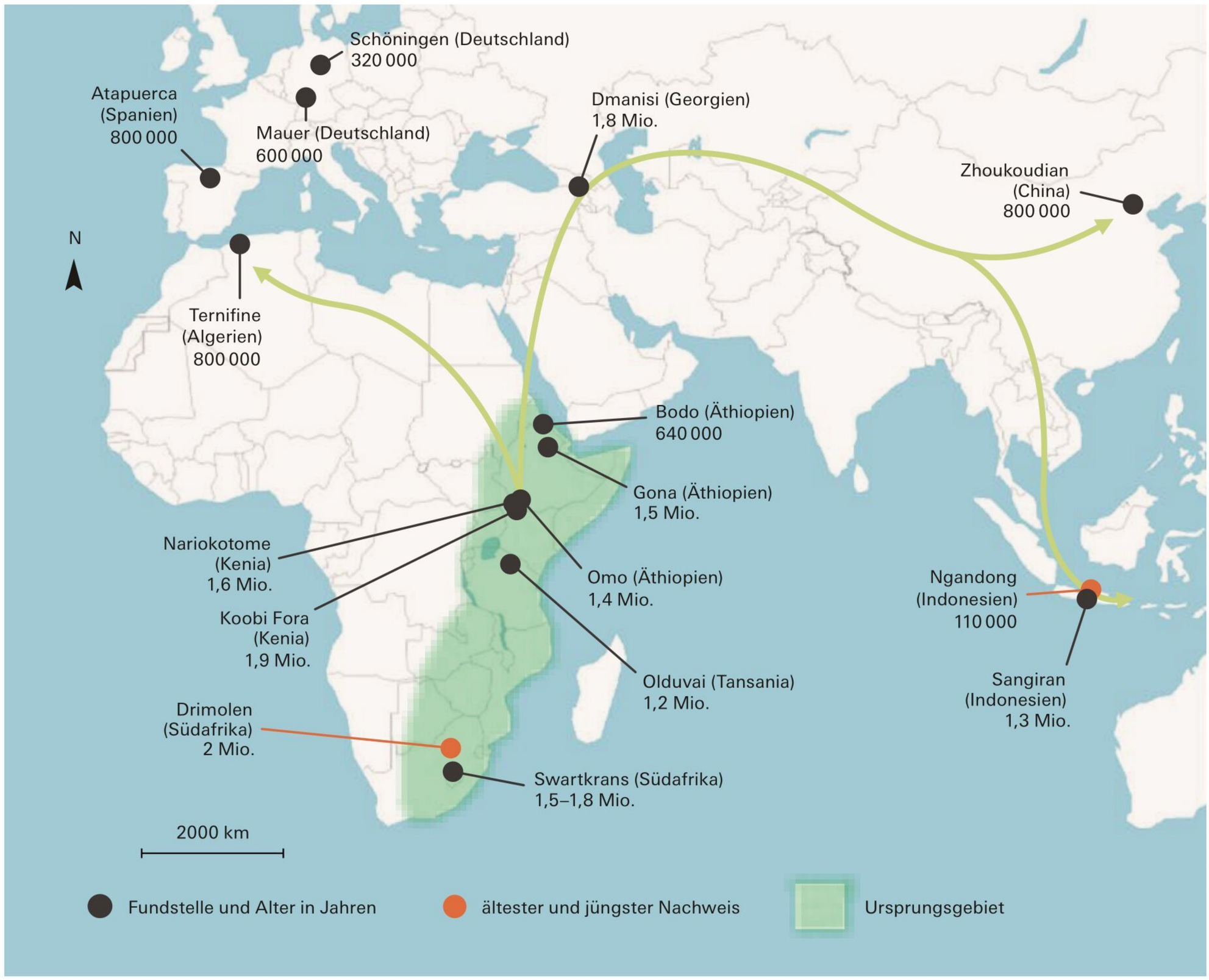
Weitere Hinweise verdichten das Bild einer Gattung *Homo*, die im Lauf ihrer Entwicklung immer wieder mit so genannten Superarchaics sexuelle Kontakte hatte. Diese sehr frühen »ghost populations« sind ausschließlich genetisch fassbar, das heißt, ihnen lassen sich noch keine Fossilien zuordnen. Im Februar 2020 veröffentlichte der Populationsgenetiker Alan Rogers von der University of Utah molekulargenetische Indizien, wonach die gemeinsamen Vorfahren von Neandertalern und Denisovanern sich vor etwa 700 000 Jahren mit einer superarchaischen Menschenform kreuzten – wahrscheinlich irgendwo in Eurasien. Er schätzt, dass sich die beiden Linien zu diesem Zeitpunkt bereits 1,2 Millionen Jahre lang getrennt voneinander entwickelt hatten. Die superarchaische Population stammte womöglich von den Erstankömmlingen in Eurasien ab.

Ebenfalls im Februar 2020 berichteten die Genetiker Arun Durvasula und Sriram Sankararaman von der University of California in Los Angeles, sie seien bei einigen westafrikanischen Bevölkerungen – etwa den Yoruba in Nigeria und den Mende in Sierra Leone – auf extrem alte DNA-Varianten gestoßen. Diese gehen auf eine Vermischung mit einer sehr ursprünglichen Homininenform zurück, so die Vermutung der Forscher. Sie errechneten, dass jene Linie sich vor rund einer Million Jahren von den Vorfahren des modernen *Homo sapiens* abgespalten habe. Beide Male liegt es wieder nahe, auf Kreuzungen mit *Homo-erectus*-Populationen beziehungsweise Mischbevölkerungen zu schließen – im ersten Fall mit einer eurasischen Gruppe, im zweiten Fall mit einer afrikanischen.

Eine biologische Spezies ist eine geschlossene Fortpflanzungsgemeinschaft, deren Mitglieder miteinander fruchtbare Nachkommen zeugen können. Von anderen Arten ist

Die ersten Weltbürger

Homo erectus war vermutlich die erste Menschenform, die Afrika verließ und sich über weite Bereiche Europas und Asiens ausbreitete. Die Karte zeigt eine Auswahl wichtiger Fundstellen.



OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS (WWW.OPENSTREETMAP.ORG/COPYRIGHT); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



MICHAEL J. ROGERS, SOUTHERN CONNECTICUT STATE UNIVERSITY

OLDOWAN-WERKZEUGE Die beiden Steingeräte (a), die jeweils von zwei Seiten abgelichtet wurden, stammen vom Fundort Dana Aoule North in der Region Gona in Äthiopien. Sie sind nicht älter als 1,6 Millionen Jahre.

ACHEULÉEN-WERKZEUGE Auch diese Geräte (b) fanden sich am Fundplatz Dana Aoule North. Sie zählen zur Steintechnologie des Acheuléen und sind fortschrittlicher gestaltet als die Oldowan-Werkzeuge. Alle Artefakte sind aber ungefähr gleich alt.

diese Gemeinschaft durch eine Artengrenze getrennt. So lautet die traditionelle Definition für eine Spezies. Bei den Homininen konnte sich aber anscheinend selbst nach Äonen der geografischen Isolation jeder mit jedem kreuzen. Wie sinnvoll ist es da noch, Etiketten mit Namen à la *»Homo XY«* auf Knochen zu kleben?

Tatsächlich verschwimmt der herkömmliche Artbegriff mehr und mehr ins Nebulöse. Jean-Jacques Hublin, Direktor am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig, kennt dieses Dilemma zur Genüge. Schon 2014 schrieb er mit Blick auf *Homo erectus*: »Das ist die Herausforderung für die Paläoanthropologen. Sie versuchen, phänotypisch (anhand ihres äußeren Erscheinungsbilds) unterschiedlichen Populationen durch Zeit und Raum zu folgen, noch bevor sie schließlich zu separaten Arten werden.« Wie der biologische Artbegriff habe auch das Konzept der paläontologischen Art – die Definition zusammengehöriger Gruppen auf Grund von gemeinsamen morphologischen oder genetischen Merkmalen – offensichtlich Grenzen, räumt der Leipziger Wissenschaftler ein. »Aber ich sehe gegenwärtig keinen anderen Weg, mit den Fossilienfunden umzugehen. Wir sollten uns lediglich immer bewusst sein, dass wir nie mehr als einen kleinen Ausschnitt aus der einstigen Vielfalt des Lebens sehen«, unterstreicht Hublin.

Und er hat ein Trostwort für alle bereit, die sich auch künftig mit dem so vielgestaltigen *Homo erectus* herumschlagen wollen: »Die Natur hat es denen, die werdenden Spezies mitten in ihrer Entwicklung zusehen wollen, nun mal nicht leicht gemacht.« ◂

QUELLEN

Durvasula, A. et al.: Recovering signals of ghost archaic introgression in African populations. Science Advances 6, 2020

Herries, A.I.R. et al.: Contemporaneity of Australopihecus, Paranthropus and early *Homo erectus*. Science 368, 2020

Hublin, J.-J.: Paleoanthropology: *Homo erectus* and the limits of a paleontological species. Current Biology 24, 2014

Rizal, Y. et al.: Last appearance of *Homo erectus* at Ngandong, Java, 117,000–108,000 years ago. Nature 577, 2019

Rogers, A.R. et al.: Neanderthal-Denisovan ancestors interbred with a distantly related hominin. Science Advances 6, 2020

Semaw, S. et al.: Co-occurrence of Acheulian and Oldowan artifacts with *Homo erectus* cranial fossils from Gona, Afar, Ethiopia. Science Advances 6, 2020

HOMO NALEDI
DER FELSKLETTERER

Angesichts des spärlichen Baumbewuchses, der einst im südlichen Afrika herrschte, überrascht die Existenz eines Homininen, der offensichtlich ans Klettern angepasst war. Doch anscheinend konnte sich *Homo naledi* damit einen anderen, sonst nur schwer zugänglichen Lebensraum erschließen.



Jean-Luc Voisin ist habilitierter Paläoanthropologe an der Forschungseinheit ADES (Anthropologie bio-culturelle, droit, éthique et santé) der Aix-Marseille Université in Frankreich.

spektrum.de/artikel/1989094

Im Jahr 2015 durfte die staunende Paläoanthropologenzunft einen außergewöhnlichen Neuzugang in der menschlichen Familie begrüßen: *Homo naledi*. Dieser archaische Gnom, aufgespürt in den Tiefen einer Höhle, scheint die Kletterfähigkeiten der noch wesentlich älteren Australopithecinen beibehalten zu haben. Jedoch handelt es sich eindeutig um einen Menschen, also um einen Angehörigen der Gattung *Homo*, der vor etwa 300 000 Jahren im südlichen, nahezu waldlosen Afrika lebte.

Die Erforschung von *H. naledi*, an der ich als bislang einziger französischer Wissenschaftler teilnehmen durfte, steht noch ganz am Anfang. Es begann für mich Anfang 2014, als ich eine E-Mail von einer Doktorandin der Australien National University in Canberra erhielt: Elen Feuerriegel suchte meinen Rat, was später dazu führte, dass ich in die Prüfungskommission für ihre Doktorarbeit aufgenommen wurde. 2017 – inzwischen hatte sie eine Stelle an der University of Washington in Seattle (USA) angetreten – schlug sie mir dann vor, sie bei ihren Untersuchungen der oberen Gliedmaßen von *H. naledi* zu unterstützen. Die anatomische Analyse der Schulter dieser Spezies, gepaart mit meinen persönlichen Erfahrungen im Klettersport, verleiteten mich schließlich zu einer gewagten Hypothese: War *Homo naledi* ein Kletterspezialist?

Auf den ersten Blick erscheint die Idee wenig plausibel: Die letzten baumbewohnenden Mitglieder der Abstammungslinie des Menschen (Homininen) waren die Australopithecinen, die vor mehr als einer Million Jahre lebten – lan-

RÄTSELHAFTES MISCHWESEN
Die künstlerische Darstellung der Bildhauerin Élisabeth Daynès zeigt das Antlitz von *Homo naledi*. Diese menschliche Spezies ähnelte noch Vormenschen wie *Australopithecus*, gehörte aber eindeutig zur Gattung *Homo*.

S. ENTRESSANGLE / E. DAYNES / SCIENCE PHOTO LIBRARY

AUF EINEN BLICK
DOPPELTES TALENT

1 2015 wurde eine neue Menschenart namens *Homo naledi* beschrieben, die vor schätzungsweise 300 000 Jahren im südlichen Afrika lebte.

2 Die Fossilien weisen eine eigenartige Mischung anatomischer Merkmale auf. Manche deuten auf einen aufrechten Gang hin, andere passen eher zu einer kletternden Fortbewegung.

3 Im Lebensraum von *H. naledi* gab es vermutlich nur wenige Bäume. Möglicherweise nutzte die Spezies ihre Kletterkünste, um sich bei Bedarf auf Klippen oder in Höhlen zurückzuziehen.

S. ENTRESSANGLE / E. DAYNES / SCIENCE PHOTO LIBRARY

ge vor dem Auftreten des *H. naledi*. Aber alles an dieser Spezies, von den Umständen ihrer Entdeckung bis hin zu ihren anatomischen Merkmalen, überrascht und irritiert dermaßen, dass die Menschenart nahezu surreal wirkt. Dennoch existierte sie vor gar nicht allzu langer Zeit.

Die 2015 von Lee Berger von der südafrikanischen University of the Witwatersrand und seinem Team veröffentlichte Beschreibung des *H. naledi* machte weltweit Schlagzeilen; vor allem aber verwirrte sie zutiefst die Urzeitforscher (siehe »Spektrum« November 2015, S. 10). Man kannte bis dahin bereits sechs bis neun *Australopithecus*-Arten (über drei wird bis heute gestritten), drei Spezies der robusten Australopithecinen *(Paranthropus)* sowie mehr als zehn verschiedene *Homo*-Arten (auch hier ist man sich nicht ganz einig). In diesen hochkomplexen Rahmen reihte sich nun noch *H. naledi* ein und vergrößerte das allgemeine Chaos.

Das Wort »naledi« bedeutet »Stern« auf Sesotho, eine der elf offiziellen Sprachen in Südafrika. Berger wählte den Namen, weil die Knochenstücke von *H. naledi* 2013 im Karsthöhlensystem Rising Star (»Aufsteigender Stern«) der südafrikanischen Provinz Gauteng auftauchten. Der Komplex liegt keine drei Kilometer entfernt von Sterkfontein und knapp 800 Meter von Swartkrans, zwei der wichtigsten Australopithecinen-Fundstätten im südlichen Teil des Kontinents (siehe »Der Fundort Rising Star«).

Mehr als 1550 verschiedene Knochen, darunter 137 einzelne sowie 58 noch im Kiefer steckende Zähne, konnten aus der stockfinsteren Dinaledi-Kammer des Höhlensystems zu Tage gefördert werden. Untereinander unterscheiden sich diese Überbleibsel weniger als von Fossilien anderer menschlicher Spezies, was beweist, dass es sich hier tatsächlich um eine einzige Menschenform handelt. In der Lesedi-Kammer, wo 2013 auf einer kleinen Fläche gegraben wurde, stieß man auf insgesamt 118 Überreste, die zwei Erwachsenen und einem Kleinkind zugeordnet werden. 2021 kamen dann noch Fragmente eines Kinderschädels aus einer benachbarten Höhle hinzu. Die Knochen scheinen innerhalb eines sehr kurzen Zeitintervalls in die Kammern gelangt zu sein und stammen von insgesamt etwa zwei Dutzend verschiedenen Individuen, darunter Erwachsene, Jugendliche und Kinder. Auf einen Schlag tauchte somit die ganze Bandbreite einer Population auf – ein extrem seltener Glücksfall in der Erforschung des Paläolithikums.



DER FUNDORT RISING STAR Ungefähr 30 Kilometer nordwestlich von Johannesburg liegen zahlreiche Fundplätze, an denen Knochenreste von Frühmenschen ans Licht kamen. Die außergewöhnlich vielen Fossilien des *Homo naledi* fanden sich in der Rising-Star-Höhle.

Keine Spur von der »naledischen« Lebensweise

Für einen Paläoanthropologen nicht minder spektakulär erscheint die Tatsache, dass nahezu alle Skelettfragmente mehrfach vorlagen, oft sogar noch im Verbund. Eine rechte Hand umfasste zum Beispiel sämtliche Teile der Handwurzel (Carpus), der Mittelhand (Metacarpus) sowie der Finger (Phalangen) mit Ausnahme des Erbsenbeins (Os pisiforme), des kleinsten Handwurzelknochens. Dazu gesellten sich nicht weniger als 110 weitere Knochen der Hand.

Der Fund einer fossilen Population aus dem Paläolithikum ist an sich schon ein bemerkenswertes Ereignis. Allerdings lieferten bislang weder Steinwerkzeuge oder Aschereste noch Tierfossilien oder andere Spuren irgendeiner materiellen Kultur auch nur den kleinsten Hinweis auf die »naledische« Lebensweise.

Der extrem schwierige Zugang zur Dinaledi-Kammer erscheint besonderes rätselhaft: Zunächst einmal erfordert er eine Beleuchtung, also die Beherrschung des Feuers. Dann gilt es, den »Superman's Crawl« zu passieren, einen so engen Durchschlupf, dass sich nur kleine und schlanke Höhlenforscherinnen und -forscher hindurchquetschen können. So erreicht man eine der ersten Kammern, an deren Rückwand eine etwa 15 Meter hohe Steilwand, der »Drachenrücken« (Dragon's Back), erklimmt werden muss. Oben wartet das nächste Hindernis, ein äußerst schmaler und nahezu senkrecht verlaufender, zwölf Meter tiefer Schacht, durch den man schließlich in die Dinaledi-Kammer gelangt (siehe »Die Knochenkammer«).

Die im selben unterirdischen Netzwerk etwa 145 Meter entfernt liegende Lesedi-Kammer lässt sich etwas leichter erreichen – vorausgesetzt, man ist im Besitz einer geeigneten Lichtquelle, was in der Steinzeit nicht selbstverständlich war. Und alles spricht dafür, dass die Kammern vor 300 000 Jahren dieselben Zugänge besaßen wie heute.

Wie kamen die Toten hierher? Hierzu kursieren etliche Hypothesen: Haben Raubtiere sie hineingeschleppt? Die Knochen weisen allerdings keinerlei Bissspuren auf. Wurden sie durch eine Überschwemmung hineingespült? Dagegen spricht die Lage der Knochen. Berger ist davon überzeugt, dass Artgenossen die Körper absichtlich herbrachten, was einen Totenkult impliziert. Das klingt durchaus plausibel, wird doch die in der spanischen Sierra de Atapuerca gelegene Fundstelle Sima de los Huesos (»Knochengrube«) ebenfalls als Grabstätte interpretiert, wo Präneandertaler vor etwa 430 000 Jahren ihre Toten bestattet hatten.

Viele Paläoanthropologen weigern sich allerdings, an einen Totenkult des *H. naledi* zu glauben. Seine archaischen Züge erscheinen unvereinbar mit einer hoch entwickelten Kognition – eine zwingende Voraussetzung für kulturelle Handlungen, die dem Tod und Begräbnisriten einen Sinn geben. Vor allem der winzige Schädel, verbunden mit einem vorstehenden Oberkiefer (Prognathismus), spricht dagegen. Mit einem Schädelvolumen von 465 bis 560 Kubikzentimetern gleicht *H. naledi* eher einem Australopithecinen als anderen *Homo*-Arten. Bei einer Menschenspezies aus dem Mittelpleistozän (zwischen 781 000 bis 126 000 Jahren vor unserer Zeit) wäre mehr zu erwarten gewesen; erwiesen sich doch die Gehirne anderer Homininen dieser Periode – also vor allem die der ersten Neandertaler sowie der archaischen *Homo sapiens* – mit mehr als 1000 Kubikzentimetern als deutlich imposanter. Allerdings besaßen mindestens zwei weitere Menschenarten jener Zeit, *Homo floresiensis* und *Homo luzonensis*, ebenfalls kleine Gehirne. Aber in beiden Fällen handelte es sich um Inselbewohner, deren Hirnverkleinerung vermutlich mit ihrem Zwergenwuchs zusammenhängt, mit dem sie sich an die begrenzten Ressourcen ihres jeweiligen Lebensraums anpassten.

Die Morphologie von *H. naledi* wirkt ebenfalls seltsam. Der Großteil seines Oberkörpers gleicht eher dem eines Schimpansen; die untere Körperhälfte dagegen zeigt eine fortgeschrittene Anpassung an den aufrechten Gang, die dem anatomisch modernen Menschen wesentlich mehr entspricht als den Australopithecinen. Die generelle Schädelgestalt rückt die Spezies an *Homo erectus* heran, während der Unterkiefer dem von Australopithecinen oder ersten *Homo*-Vertretern ähnelt.

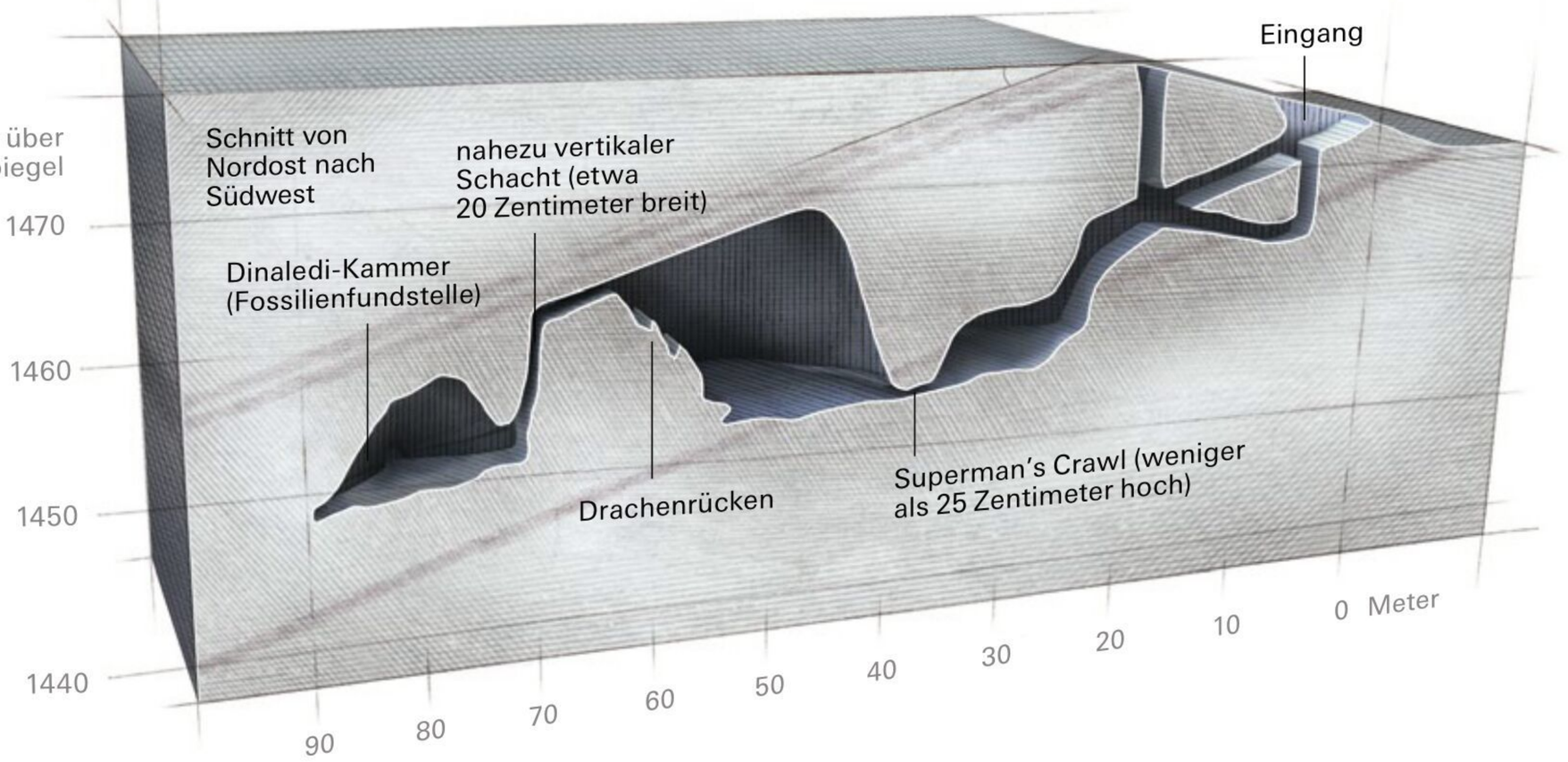
H. naledi besaß eine nur etwa ähnlich große Hand wie *Australopithecus sediba*; Handgelenk und Handfläche entsprachen aber eher denen eines Neandertalers oder Jetztmenschen. Die Finger waren hingegen noch stärker gekrümmt als bei einigen Australopithecinen. Das deutet auf einen vergleichsweise starren Handteller vor allem am Daumen hin, was wiederum beim Werkzeuggebrauch für eine bessere Verteilung der Kräfte gesorgt haben könnte. Im Gegenzug zeugt die Fingermorphologie von einer Fortbewegung, bei der das Klettern im Fokus stand. Zusätzlich zeigt die Hand eigene Charakteristika, deren funktionelle Bedeutung unbekannt bleibt. Wie dem auch sei: *H. naledi* war vermutlich ebenso in der Lage, Werkzeuge herzustellen wie zu klettern oder zu hangeln.

Konnte *H. naledi* sprechen?

Anders als bei den Australopithecinen entspricht die Gestalt des Fußes von *H. naledi* eher der unseren. So fehlte dem großen Zeh die Beweglichkeit des Daumens, und der Fuß besaß ein ausgeprägtes Gewölbe – wenn auch nicht so perfekt wie bei uns –, was ein relativ energiearmes und effizientes Laufen auf zwei Beinen ermöglichte (siehe »Fuß und Schlüsselbein«). Wie die Finger der Hand unterschieden sich die Zehenglieder allerdings sehr deutlich von denen des anatomisch modernen Menschen. Mit ihrer starken Krümmung erinnern sie an Menschenaffen oder Australopithecinen. Diese Mischung aus archaischen und abgeleiteten Merkmalen findet man auch beim Oberschenkel (Femur) sowie beim Schienbein (Tibia), deren Morphologie ebenfalls zum Teil der unseren, zum Teil der von Australopithecinen stark ähnelt.

Die Knochenkammer

Tief im Innern birgt die Rising-Star-Höhle die extrem schwierig zu erreichende Dinaledi-Kammer. Hier lagen die Überreste von mindestens 15 Individuen des *Homo naledi*. Eine weitere Kammer namens Lesedi (hier nicht abgebildet) enthielt zusätzliche Fossilien.



JOSÉ MIGUEL MAYO, NACH DIRKS, P.H.G.M. ET AL.: GEOLOGICAL AND TAPHONOMIC CONTEXT FOR THE NEW HOMININ SPECIES HOMO NALEDI FROM THE DINALEDI CHAMBER, SOUTH AFRICA. ELIFE 4, E09561, 2015, FIG. 2 / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2016; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Die Wirbel von *H. naledi* enthalten einen vergleichsweise breiten Wirbelkanal, durch den sich das Rückenmark zog. Da die Kanalgröße direkt mit der Anzahl der Nervenkontakte zur Brustkorb- und Zwerchfellmuskulatur zusammenhängt, deutet das darauf hin, dass *H. naledi* seine Atemmuskulatur präzise steuern konnte. Doch erfolgte diese Kontrolle so effektiv wie bei uns? Die Frage ist bedeutsam, da sie auf die sprachlichen Fähigkeiten der Spezies zielt. Sprache erfordert in der Tat eine komplexe Koordination der Atemmuskulatur, die nur mit einem ausreichend entwickelten Nervensystem möglich ist.

Wie die ältesten Homininen und heutige Menschenaffen verfügte *H. naledi* über einen glockenförmigen Brustkorb, wohingegen er bei uns auf ganzer Länge fast gleichmäßig breit, also tonnenförmig aussieht. Vom Becken sind lediglich Bruchstücke erhalten, die nur eingeschränkte Vergleiche erlauben. Die Darmbeinfragmente vom oberen Teil des Beckens weisen vor allem Merkmale der Australopithecinen auf. Somit besaß *H. naledi* wohl eher kurze, glockenförmige Darmbeinschaufeln entsprechend zur Form des Brustkorbs. Im Gegensatz dazu ähnelt der untere Teil des Beckens mit Sitz- und Schambein dem des anatomisch modernen Menschen, was wiederum mit der Ausprägung der unteren Gliedmaße übereinstimmt.

Die Knochen von *H. naledi* erscheinen also schlicht rätselhaft. Ja, man kann sogar von Glück sprechen, dass man sie überhaupt zusammen entdeckt hat. Hätte man bestimmte Teile der oberen und unteren Körperhälfte getrennt gefunden, wären sie sicher zwei verschiedenen Arten zugesprochen worden. Dieser Eindruck einer evolutionären Anomalie verstärkt sich noch durch die Versuche, *H. naledi* in den Stammbaum des Menschen einzureihen. Bisher kam keine phylogenetische Untersuchung zum selben Ergebnis. Alle Arbeiten führten lediglich zu einem gemeinsamen Resultat: Die rätselhafte Spezies gehört zur Gattung *Homo*.

Besonders seltsam wirkt die frappierende Ähnlichkeit zwischen den oberen Gliedmaßen des *H. naledi* und denen der ans Klettern in Bäumen angepassten Menschenaffen. Hier müssen wir etwas tiefer in die Anatomie der Schulter eintauchen, die manche Paläoanthropologen stiefmütterlich behandeln. Am Schultergürtel, bestehend aus Schlüsselbein (Clavicula) und Schulterblatt (Scapula), setzt der Oberarmknochen (Humerus) an – alle drei Knochen verbinden somit die oberen Gliedmaßen mit dem Rest des Körpers und stellen deren Beweglichkeit sicher. Die drei Schulterknochen der Primaten sind mit mehr als 20 Muskeln ausgestattet, wobei ihre genaue Anzahl je nach Spezies schwankt. Das Schulterblatt schwebt quasi in dieser Muskelmasse, da es lediglich mit dem Oberarmkopf und dem Schlüsselbein verbunden ist. Bei Letzteren handelt es sich wiederum um den einzigen Knochen, der den Arm mit dem Brustkorb verknüpft und so die Beweglichkeit der Gliedmaße in alle Richtungen – vor allem nach vorn und hinten – ermöglicht (siehe »Fuß und Schlüsselbein«). Dadurch wird die Schulter zum beweglichsten Gelenk des Menschen einschließlich seiner nächsten Verwandten, den Menschenaffen.

Was das Schlüsselbein über die Schulter verrät

Schlüsselbein und Schulterblatt von *H. naledi* offenbaren Merkmale, die spezifisch fürs Klettern sind. So weist die Gelenkpfanne des Schulterblatts (Cavitas glenoidalis) wie bei Menschenaffen nach oben; bei uns zeigt sie dagegen zur Seite (siehe »Schulterblatt«). Die Orientierung nach oben erleichtert den Affen das Anheben der vorderen Gliedmaße sowie all ihre Bewegungen über dem Kopf. Dadurch reduziert sich der Kraftaufwand; die Schultermuskeln wie der Musculus supraspinatus, der beim Jetztmenschen eher klein ausfällt, besitzen eine größere Ansatzfläche. Die bei uns seitlich ausgerichtete Gelenkpfanne erfordert zwar einen höheren Kraftaufwand, wenn wir den Arm über den Kopf heben, sie erleichtert aber die Manipulation von Objekten im Blickfeld, wie etwa bei der Werkzeugnutzung.

Das Schultergelenk von *H. naledi* ähnelt dem anderer Primaten; es sieht also klein und oval aus, was die Bewe-

HAWKS, J. ET AL.: NEW FOSSIL REMAINS OF HOMO NALEDI FROM THE LESEDI CHAMBER, SOUTH AFRICA. ELIFE 6, E24232, 2017, FIG. 5 (DOI.ORG/10.7554/ELIFE.24232.001) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



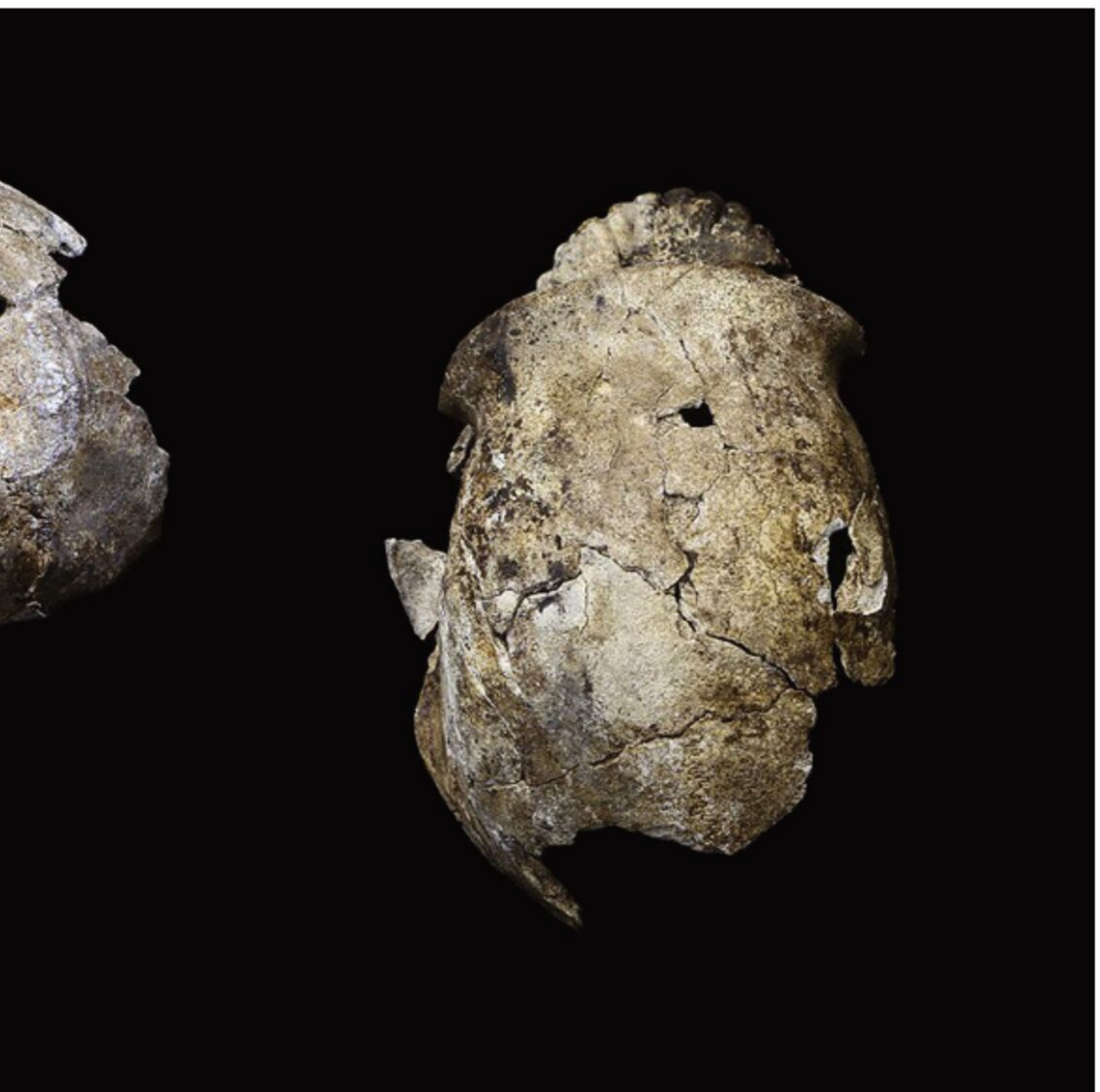


FUSS: BERGER, L.R. ET AL.: HOMO NALEDI, A NEW SPECIES OF THE GENUS HOMO FROM THE DINALEDI CHAMBER, SOUTH AFRICA. ELIFE 4, E09560, 2015, FIG. 9 (DOI.ORG/10.7554/ELIFE.09560.001) / CC BY 4.0; SCHLÜSSELBEIN: HAWKS, J. ET AL.: NEW FOSSIL REMAINS OF HOMO NALEDI FROM THE LESEDI CHAMBER, SOUTH AFRICA. ELIFE 6, E24232, 2017, FIG. 14 (DOI.ORG/10.7554/ELIFE.24232.001) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

FUSS UND SCHLÜSSELBEIN In der Dinaledi-Kammer tauchte ein nahezu vollständig erhaltener Fuß von *Homo naledi* auf (links). Das ausgeprägte Fußgewölbe deutet auf einen aufrechten Gang hin. Im Gegensatz zum anatomisch modernen Menschen sind die Zehen jedoch stärker gekrümmt, was wiederum für eine Fortbewegung durch Klettern spricht. Das rechte Schlüsselbein von *Homo naledi* aus der Lesedi-Kammer (rechts in unterschiedlichen Ansichten gezeigt) ähnelt seinem anatomischen Gegenstück beim *Homo habilis*.

HAWKS, J. ET AL.: NEW FOSSIL REMAINS OF HOMO NALEDI FROM THE LESEDI CHAMBER, SOUTH AFRICA. ELIFE 6, E24232, 2017, FIG. 5 (DOI.ORG/10.7554/ELIFE.24232.001) / CC BY 4.0 (CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/BY/4.0/LEGALCODE); BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

SCHÄDEL LES1 Das in der Lesedi-Kammer gefundene Fossil LES1 (Ansichten von links nach rechts: von schräg vorne, frontal, von links und von oben) offenbart den vorstehenden Kiefer.

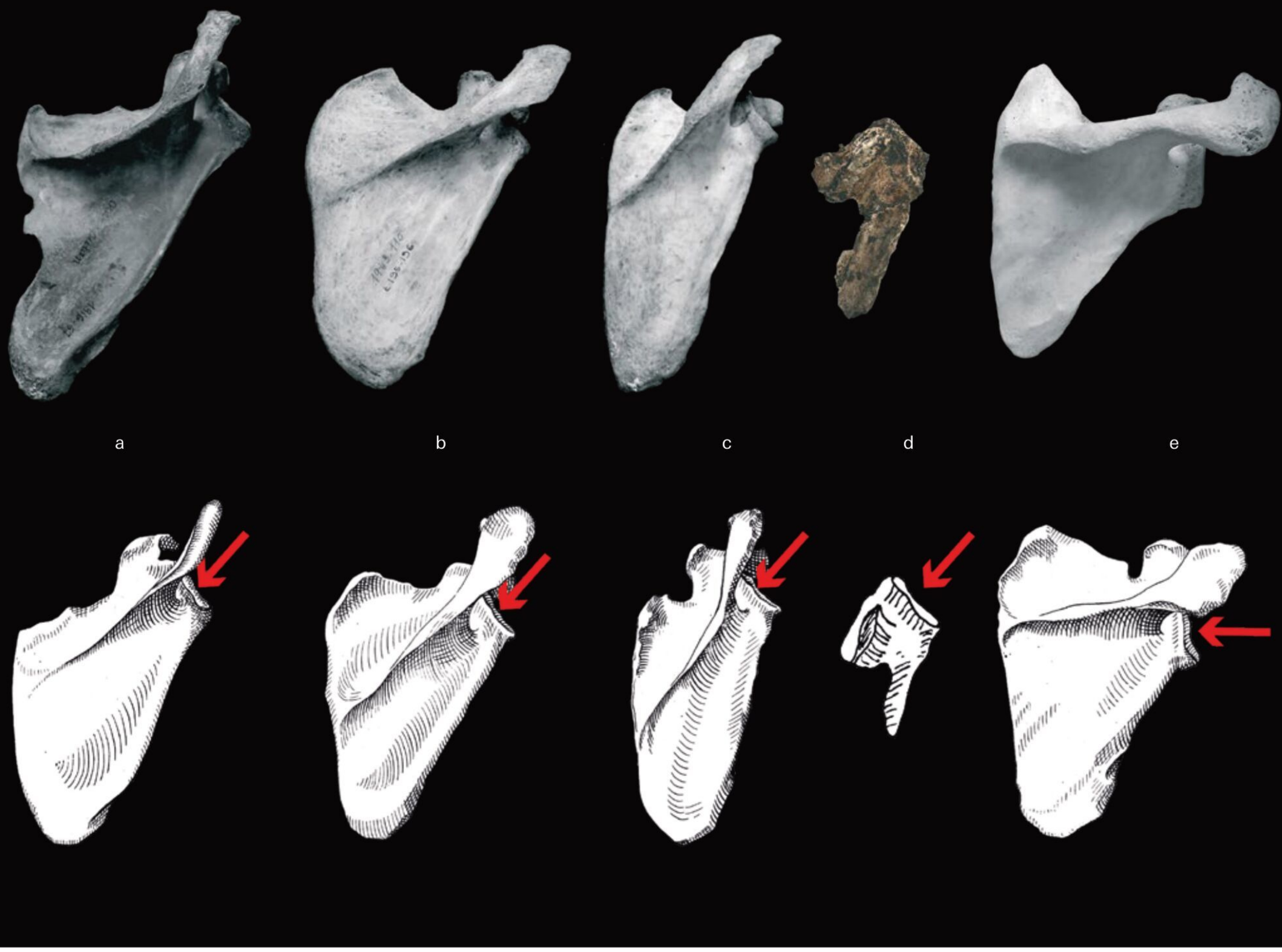


gungen des Oberarmkopfs erleichterte. Über die Schulterblätter lässt sich kaum etwas sagen, da sie nur bruchstückhaft erhalten sind. Von diesem sehr zerbrechlichen Knochen kennen wir generell nur wenige halbwegs vollständige Fossilien, selbst aus dem Jungpaläolithikum.

Vielen ist nicht klar, welche Besonderheit das Schlüsselbein darstellt: Zum einen existiert es nur bei einer Minderheit der Säugetiere, und zum anderen benötigt es die längste Zeit für die Bildung von Knochengewebe. Das Schlüsselbein ist der erste Knochen, der mit der Verknöcherung beginnt (beim menschlichen Embryo zwischen der fünften und sechsten Schwangerschaftswoche), und der letzte, bei dem sie endet (beim Menschen zwischen dem 21. und 25. Lebensjahr). Seine komplexe Krümmung erschwert die Untersuchung, so dass der Knochen lange ignoriert wurde. Zum Glück lassen sich seine Wölbungen in zwei unterschiedlichen Ebenen zerlegen, wodurch ich zeigen konnte, dass das Schlüsselbein die meisten Informationen über die Schulterarchitektur liefert und somit Funktionsanalysen des Schulterblatts vervollständigt.

H. naledi besaß ein eher kurzes und robustes Schlüsselbein mit einer doppelten Krümmung wie bei heutigen Menschenaffen. Somit wies die Schulter wie bei Menschenaffen ein im Verhältnis zum Brustkorb recht hohes Schulterblatt mit einer nach oben gerichteten Gelenkpfanne auf. Dennoch zeigt das Schlüsselbein auch typisch menschliche Merkmale, wie etwa den Durchlass für das Ligamentum costoclaviculare an der Unterseite.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Schulterbau von *H. naledi* dem der vorwiegend baumbewohnenden Menschenaffen ähnelt. Vor allem aber erinnert er an *Homo habilis*. Die Schulterüberreste dieses ersten Vertreters der Gattung *Homo*, der vor 2,5 bis 1,6 Millionen Jahren in Ostafrika lebte, beschränken sich auf einige Bruchstücke



von Schulterblatt und Schlüsselbein nebst einen sehr gut erhaltenen Schlüsselbeinknochen. Letzterer erscheint kurz und robust und weist ebenfalls eine doppelte Krümmung auf. Mit anderen Worten: Die Schlüsselbeine von *H. habilis* und *H. naledi* ähneln sich stark, obwohl Letzterer deutlich jünger ist – fast 1,5 Millionen Jahre liegen zwischen den beiden Arten. Diese Beobachtung ist bemerkenswert, da die hier beschriebenen Kriterien viele Forscher zu der Annahme führten, dass *H. habilis* sich meist kletternd fortbewegte.

Man hat daher versucht, *H. naledi* als einen weiterentwickelten *H. habilis* zu interpretieren, der im südlichen Afrika überlebt hätte. Doch ein solches Szenario erscheint wenig wahrscheinlich. Zum einen wurde in dieser Region noch nie ein *H. habilis* gefunden. Zum anderen unterscheiden sich die Morphologien von Schädel und Füßen der beiden Arten einfach zu stark voneinander. Eine Evolution vom *H. habilis* zum *H. naledi* klingt daher nicht plausibel.

Somit lebte vor 300 000 Jahren im südlichen Afrika eine Menschenart mit deutlichen Merkmalen eines Baumbewohners. Ihre Eigenschaften konnten sich nur im Pleistozän herausgebildet haben (etwa 2,6 Millionen bis 11 700 Jahre vor unserer Zeit) – ein langer Zeitraum, der nahezu mit dem Auftreten und der Evolution der Gattung *Homo* übereinstimmt. Die Epoche war geprägt von einer Folge zyklisch wiederkehrender Kaltzeiten – zunächst alle 40 000 Jahre, und dann, beginnend vor einer Million Jahre, mit einer deutlich größeren Frequenz von 100 000 Jahren. Wie die fossilen Belege sowohl aus dem südlichen als auch dem östlichen Afrika offenbaren, boten beide Regionen in dieser Zeit günstige Lebensbedingungen für die Gattung *Homo*. Wenn *H. naledi* tatsächlich Merkmale entwickelte, die ihm das Klettern ermöglichten, dann geschah das im Lauf der letzten Million Jahre im südlichen Afrika.

Welches Klima herrschte damals dort? Gegenwärtig haben wir es mit einer Warmzeit mit vorwiegend trockenen Bedingungen zu tun. Dieselben Gegebenheiten gab es schon während früherer Interglaziale. Wir können also davon ausgehen, dass *H. naledi* während seiner Entwicklung im südlichen Afrika eher mit Trockenheit konfrontiert wurde und in einer Umwelt mit nur spärlichem Baumbewuchs lebte.

Laut einer gängigen Theorie können archaische, funktionslos gewordene Merkmale erhalten bleiben, solange sie evolutionär neutral wirken, also weder Vor- noch Nachteile mit sich bringen. In vielen Fällen trifft das sicherlich zu; aber die deutlichen und zahlreichen Anpassungen an das Klettern sprechen bei *H. naledi* eine andere Sprache. Wie sollten solche Eigenschaften über eine Million Jahre lang stabil bleiben? Im Lauf der Zeit dürften nach und nach alle Merkmale verschwinden, die für das Überleben oder die Fortpflanzung irrelevant sind – und eine Million Jahre sollten dafür ausreichen. Daher bin ich davon überzeugt, dass es sich hier um eine echte Anpassung an das Klettern handelt.

JEAN-LUC VOISIN, ERWEITERTE VERSION VON VOISIN, J.-L. ET AL.: THE HUMAN ACROMION VIEWED FROM AN EVOLUTIONARY PERSPECTIVE. ORTHOPAEDICS & TRAUMATOLOGY: SURGERY & RESEARCH 100, SUPPLEMENT, 2014, FIG. 2; MIT FRDL. GEN. VON ELSEVIER MASSON SAS; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

SCHULTERBLATT Typischerweise weist bei Primaten die Gelenkpfanne des Schulterblatts eher nach oben (a: Orang-Utan, b: Gorilla, c: Schimpanse). Genauso verhält es sich beim *Homo naledi* (d). Beim *Homo sapiens* zeigt dagegen die Pfanne zur Seite (e).

Wie lässt sich nun die Existenz eines kleinen menschlichen Wesens mit offensichtlichen Merkmalen eines Baumbewohners in einer weitläufigen, vegetationsarmen Region erklären? Zunächst kann Klettern in einer Savanne mit vereinzelt stehenden Bäumen durchaus eine Anpassungsstrategie darstellen. So bleiben die großen Raubtiere, die bis heute im südlichen Afrika vorkommen, während der heißen Stunden des Tages meistens inaktiv. In dieser Zeit werden menschliche Aktivitäten wie die Jagd wesentlich ungefährlicher. Dennoch sind böse Überraschungen möglich – wer dann schnell in die Höhe zu flüchten vermag, wird länger überleben. Ein Schlafplatz in einem Baumwipfel erscheint ebenfalls als gute Wahl für einen kleinen, nur spärlich bewaffneten Jäger, der weit entfernt von seiner Gruppe übernachten muss. Aber man braucht kein ausgeprägter Kletterspezialist zu sein, wenn es lediglich darum geht, ab und zu einen Baum zu erklimmen. Es stellt sich somit die Frage nach dem üblichen Unterschlupf des *H. naledi*.

Eine Landschaft für gewiefte Kletterer

In der als »Wiege der Menschheit« bekannten Weltkulturerberegion liegen die Hauptfundstätten der südafrikanischen Australopithecinen wie die Rising-Star-Höhlen. Es handelt sich hierbei um ein trockenes Kalkplateau, in dem es jedoch während des heißen Südsommers zu relativ starken Regenfällen kommt. Das fördert durch die Auflösung von Gestein wie Kalk, Dolomit oder Gips die Entstehung zahlreicher Karsthöhlen. Solche Landschaften enthalten Hunderte von Höhlen, von denen einige als Dolinen, also schüsselförmige Senken in einem ansonsten flachen Gelände vorliegen. Hier können gewiefte Kletterer Zuflucht sowohl vor Raubtieren als auch vor Hitze finden. Außerdem gibt es Wasser, an dem es oben auf dem Karstplateau stets mangelt. Da es in unterirdischen Netzwerken zirkuliert, ist es frisch und sauber, was wiederum das Risiko für schwere Krankheiten samt Durchfall und Dehydrierung mindert.

Auf demselben Plateau wie die »Wiege der Menschheit« liegen etwa 20 Kilometer entfernt die Magaliesberge, ein 196 Kilometer langer und bis zu 1853 Meter hoher Gebirgszug. Die Bergkette wird überall von einigen dutzend Metern hohen Felswänden durchsetzt sowie von so genannten Kloofs – bis zu 100 Meter tiefen Felsklüften, in denen die erhöhte Luftfeuchtigkeit eine üppigere Vegetation hervorbringt. Hierhin dringt nur wenig Sonnenlicht vor, so dass es auch im Sommer eher kühl bleibt. Diese Region spielte offensichtlich eine wichtige Rolle in der Evolution der Homininen, befinden sich doch dort zahlreiche südafrikanische Australopithecinen-Fundstätten.

Es erscheint demnach vernünftig anzunehmen, dass sich *H. naledi* an ein Ökosystem angepasst hatte, das etliche Höhlen und steile Felswände bot und das an bestimmten Orten wie den Kloofs durchaus nicht baumlos war. Jener Lebensraum war auf Grund seiner Feuchtigkeit in einer oft trockenen Gegend für die vorwiegend baumbewohnenden Australopithecinen attraktiv, die zweifelsohne hervorragend auf Felsen oder in Höhlen klettern konnten. Aus denselben Gründen war er natürlich auch für Raubtiere geeignet, die dort jagten, aber nicht in der Lage waren, in die Höhlen mit ihren senkrechten, schlotförmigen Eingängen einzudringen.

So könnte also *H. naledi* zur Anpassung an diesen reichen, aber gefährlichen Lebensraum gute Kletterfähigkeiten entwickelt haben. In die Höhe zu flüchten erscheint als lohnende Strategie, genügen doch schon drei oder vier

Mehr Wissen auf
Spektrum.de
Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter
spektrum.de/t/anatomie



ORLA / GETTY IMAGES / ISTOCK

Meter, um sich vor Raubtieren zu retten und zusätzlich etwas Kühle zu gewinnen. *H. naledi* war demnach wohl ein »Gelegenheitsbaumbewohner«, aber vor allem ein Felskletterer. Sein Überleben hing von seiner Fähigkeit ab, schnell an Höhe zu gewinnen. Zur selben Zeit lebte *Homo sapiens* ebenfalls im südlichen Afrika. Diese Spezies setzte auf Grund ihrer deutlich höheren Statur eher auf Mobilität, um ein größeres Gebiet zu nutzen. Und sie entwickelte als erfolgreiche Abwehr gegen Raubtiere die Strategie bewaffneter Gruppen.

Viel zu lange hat man sich die Evolution des Menschen als lineare Abfolge vorgestellt – eine Kette von *Homo habilis* über *Homo erectus* und *Homo neanderthalensis* bis zum *Homo sapiens*. Inzwischen gehen wir jedoch von einem verzweigten »Stammbusch« aus, in dem sich die verschiedenen Spezies über kulturellen und genetischen Austausch aneinander anglichen, in dem aber auch im Gegensatz dazu isolierte Formen in einem besonderen Biotop, das eine spezialisierte Lebensweise erfordern, erhalten blieben. Zu diesen isolierten Spezialisten gehörten *Homo floresiensis*, *Homo luzonensis* und eben *Homo naledi*. ◂

QUELLEN

Berger, L. R. et al.: *Homo naledi*, a new species of the genus *Homo* from the Dinaledi Chamber, South Africa. eLife, 4, 2015

Dirks, P. H. G. M. et al.: Geological and taphonomic context for the new hominin species *Homo naledi* from the Dinaledi Chamber, South Africa. eLife 4, 2015

Feuerriegel, E. M. et al.: Upper limb fossils of *Homo naledi* from the Lesedi Chamber, Rising Star System, South Africa. PaleoAnthropology 2019

Hawks, J. et al.: New fossil remains of *Homo naledi* from the Lesedi Chamber, South Africa. eLife 6, 2017



CHRISTOFFER RUDQUIST

ZOOARCHÄOLOGIE

DIE NADEL IM KNOCHENHAUFEN

In Knochensplittern liegen oft erstaunliche Informationen über die frühe Menschheitsgeschichte verborgen. Doch die winzigen Fragmente verraten für sich betrachtet kaum etwas über ihre Herkunft. Hier helfen Untersuchungen von Proteinen weiter, die sich in den fossilen Überresten erhalten haben.



CHRISTOFFER RUDQUIST

ÜBERRESTE
Unter kleinsten fossilen Knochensplittern aller möglichen Tierarten können sich wertvolle menschliche Überreste verstecken.





Thomas Higham ist Professor für Archäologie an der University of Oxford und leitet dort das Labor für Radiokarbondatierung. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Datierung mittel- und jungpaläolithischer Knochen aus Eurasien. **Katerina Douka** ist promovierte Archäologin am Max-Planck-Institut für Geoanthropologie in Jena. Mit ihrer Forschergruppe durchsucht sie nicht identifizierte Knochenfragmente aus verschiedenen Fundorten Asiens nach fossilen Überresten von Neandertalern und Denisova-Menschen.

spektrum.de/artikel/1647838

AUF EINEN BLICK
WER DEN SPLITTER NICHT EHRT …

1 Während des Mittel- und Jungpaläolithikums teilten sich *Homo sapiens*, Neandertaler und Denisova-Menschen eine Zeit lang ihren Lebensraum.

2 Fossilien aus dieser Epoche sind selten und oft zu klein, um genauer bestimmt zu werden. Art und Ausmaß der Interaktionen zwischen den verschiedenen Menschengruppen bleiben daher oft rätselhaft.

3 Forscher ziehen nun aber auch aus winzigsten Knochenfragmenten erstaunliche Erkenntnisse über diese menschliche Frühzeit – anhand charakteristischer Kollagensignaturen.

SPLITTER Mit ZooMS (Zooarchäologie durch Massenspektrometrie) konnte dieses fossile Knochenfragment aus der Denisova-Höhle als Teil eines Hominiden – eines Mitglieds der Gruppe der Menschenaffen einschließlich des Menschen – identifiziert werden.



CHRISTOFFER RUDQUIST

Elf Stunden dauert die Fahrt von Nowosibirsk zu einem der wohl aufregendsten archäologischen Fundorte der letzten Jahre. Der Weg führt über holprige Straßen Richtung Südosten durch die weite Ebene der südsibirischen Steppe, bis sich schließlich die Ausläufer des Altai-Gebirges vor uns erheben. Schluchten, reißende Gebirgsbäche und idyllische Holzhäuser prägen die Landschaft; Adler schweben über uns hinweg. Hoch über dem Fluss Anui, hinter der Kurve eines Feldwegs, taucht sie plötzlich auf: die Denisova-Höhle – und alle Gedanken an die lange, strapaziöse Reise verfliegen. Genau dort entdeckten Archäologen vor über zehn Jahren die Überreste einer bis dahin unbekannten Menschenart und veränderten damit grundlegend unsere Vorstellung von der menschlichen Frühzeit.

Nachdem unsere Spezies, der *Homo sapiens*, vor Hunderttausenden von Jahren in Afrika auftauchte, breitete sie sich allmählich nach Europa und Asien aus. Dort begegnete sie anderen Menschenformen wie den Neandertalern, mit denen sie sich jahrtausendelang ihren Lebensraum teilte, bevor diese schließlich verschwanden. Inzwischen wissen wir, dass die verschiedenen Menschengruppen nicht nur nebeneinander hergelebt hatten. Sie zeugten sogar Nachwuchs miteinander. Noch heute tragen wir Menschen die DNA unserer ausgestorbenen Verwandten in uns.

Wann und wo genau sich unsere Vorfahren getroffen haben, wie oft sie sich vermischt haben und wie sie sich gegenseitig kulturell beeinflussten, ist allerdings immer noch ein Rätsel. Leider kennen wir bisher noch zu wenige Fundplätze aus jener Zeit, und oft bargen diese lediglich Steinwerkzeuge und andere Artefakte. Menschliche Fossilien, die vollständig genug wären, um sie sicher einer bestimmten Menschenart zuordnen zu können, fehlen hingegen fast immer. Und so lässt sich nur selten feststellen, welche Spezies die Geräte hergestellt hat, die man aus jener Übergangszeit kennt, und wie diese genau zu datieren sind.

Der Zoo im Massenspektrometer

Eine viel versprechende neue Technik könnte diese Fragen endlich beantworten. Mit Zooarchäologie durch Massenspektrometrie (ZooMS), auch Kollagen-Peptidmassen-Fingerprinting genannt, lässt sich bestimmen, von welcher Art Lebewesen ein unbekanntes Knochenfragment stammt (siehe »Zu wem gehört der Knochen?«). Das Protein Kollagen ist am Aufbau von Knochen, Haaren und Nägeln beteiligt, und seine charakteristische Zusammensetzung liefert nach enzymatischer Spaltung in kleinere Peptide einen eindeutigen molekularen Fingerabdruck (englisch: fingerprint). Selbst kleine Knochenfragmente, die optisch keine typischen Kennzeichen ihrer Gattung oder Art erkennen lassen, können auf diese Weise klassifiziert werden.

Durch die Analyse des Kollagens können wir also aus einem Berg gleich aussehender kleiner Knochenfragmente jene herausfinden, die von einem Vertreter der so genannten Hominiden, also der Menschenaffen einschließlich der Menschen stammen. Einmal als Überrest eines Primaten identifiziert, lässt sich nun gezielt nach DNA suchen, um zu klären, ob der fragliche Knochen zu einem Neandertaler, einem anatomisch modernen Menschen oder einer anderen menschlichen Spezies gehörte. Einen solchen Knochen

können wir außerdem direkt datieren. Für die Altersbestimmung muss jedoch ein Teil des Knochens zerstört werden. Museumskuratoren geben daher meist nur ungern vollständige Skelettteile aus ihren Sammlungen für eine solche Analyse her. Weniger Bedenken haben sie bei ohnehin schon stark fragmentierten Stücken. Durch sie lassen sich jene Fundorte genauer untersuchen, an denen einst verschiedene Menschenarten gleichzeitig lebten – vor allem, wenn neben den Knochen dort auch Artefakte zu Tage gekommen sind.

Etliche Forscher interpretieren insbesondere symbolische Objekte oder frühe Kunstwerke als Ausdruck der einzigartigen kognitiven Fähigkeiten des anatomisch modernen Menschen. Andere wiederum trauen den Neandertalern durchaus zu, ebenfalls derartige Gegenstände hergestellt zu haben – vielleicht sogar nach ihren eigenen Traditionen. Einige ihrer Kenntnisse könnten diese Urmenschen möglicherweise auch an *Homo sapiens* weitergegeben haben. Fossile Fragmente, die gemeinsam mit solchen kunstvollen Artefakten gefunden wurden, taxonomisch zu bestimmen und zu datieren, könnte in dieser Debatte für mehr Klarheit sorgen.

Bereits seit den 1980er Jahren graben russische Archäologen in der Denisova-Höhle. Doch erst 2010 erlangte die Fundstelle weltweite Berühmtheit. In diesem Jahr veröffentlichten Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig die Ergebnisse von Genanalysen, die sie an einem Fingerknochenfragment durchgeführt hatten, das zwei Jahre zuvor in der Höhle gefunden worden war. Der kleine Knochen wirkte zunächst unscheinbar; umso spektakulärer war, was in ihm steckte: der genetische Nachweis einer bisher völlig unbekannten Menschenform – die genauso eng mit dem Neandertaler verwandt war wie wir. Der Knochen gehörte zu einem jungen Mädchen, das die Paläoanthropologen zunächst »X-Woman« tauften und das einer Population angehörte, die man heute unter dem Namen Denisova-Menschen kennt. Seither tauchten noch etwa eine Hand voll weiterer Urmenschenknochen und -zähne in der Höhle auf, sowohl von Neandertalern als auch von Denisovanern.

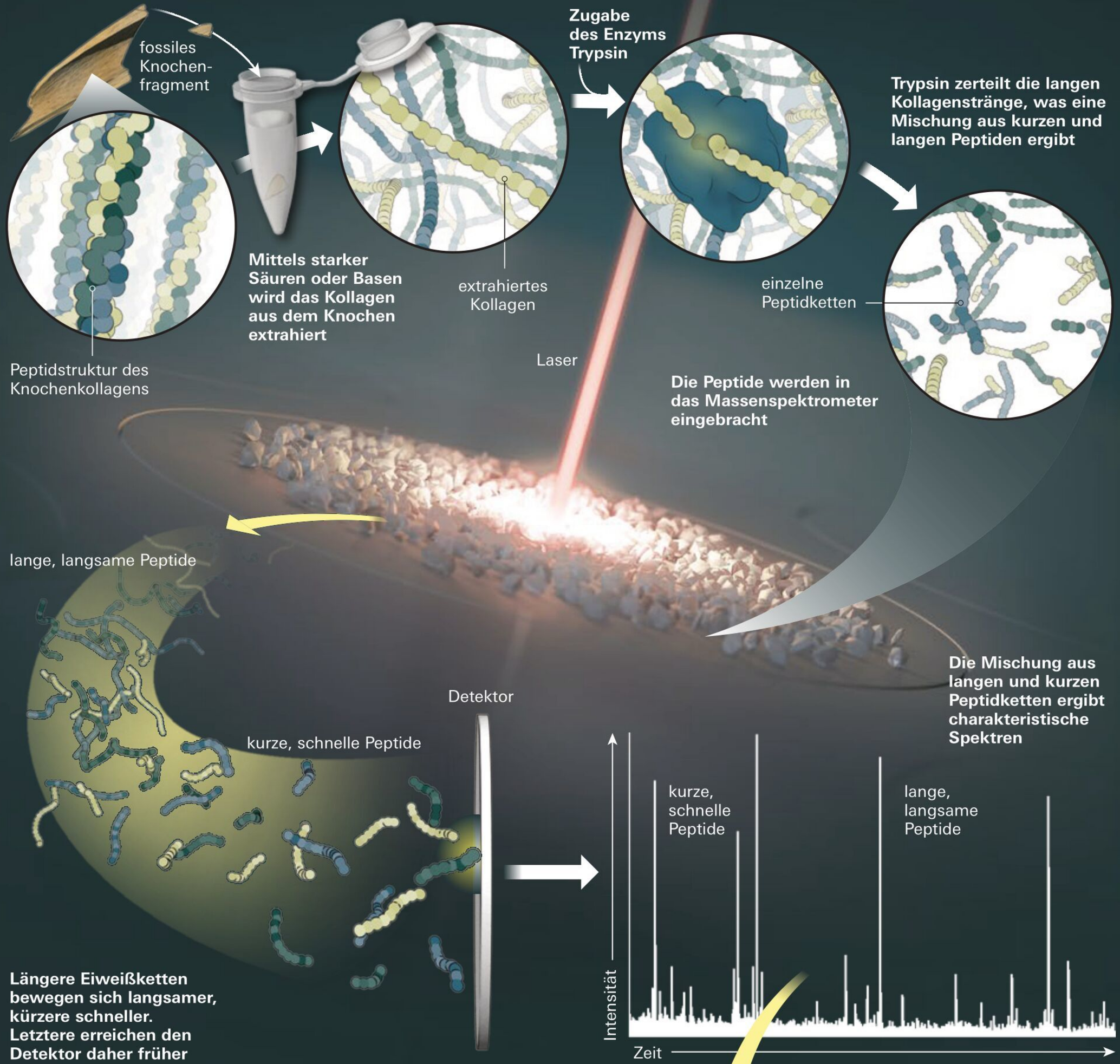
Solche ungeahnten Einblicke in die Frühzeit der Menschheitsgeschichte verdanken Urgeschichtler modernen genetischen Methoden. Die Entschlüsselung alter DNA lieferte dabei nicht nur den Nachweis bis dahin unbekannter Menschenformen, sondern zusätzlich darüber, wie diese mit den anatomisch modernen Menschen interagierten. So

VOR ORT Michail Schunkow (vorne links), Maxim Koslikin (vorne rechts) und Vladimir Vanejew (hinten rechts) von der Russischen Akademie der Wissenschaften untersuchen gemeinsam mit den Autoren Katerina Douka (hinten links) und Thomas Higham (hinten Mitte) die archäologischen Schichten in der Denisova-Höhle in Südsibirien, bevor sie Proben für die ZooMS-Analyse und die Radiokarbondatierung auswählen.

SERGEY ZELINSKI, RUSSISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

Zu wem gehört der Knochen?

Mit ZooMS, auch bekannt als Kollagen-Peptidmassen-Fingerprinting, können Forscher sonst nicht identifizierbare Knochenfragmente taxonomisch bestimmen. Dazu werden die im Knochen konservierten Kollagenproteine in einem Massenspektrometer analysiert. Zunächst zerschneidet das Enzym Trypsin das Kollagen in kleinere Peptidketten. Ein Laser ionisiert diese Bausteine, so dass sie durch die elektromagnetischen Felder des Massenspektrometers zum Detektor beschleunigt werden. Je kürzer und damit leichter die geladenen Peptidketten sind, desto schneller erreichen sie den Detektor. Die verschieden langen Moleküle werden nacheinander gemessen und ergeben ein charakteristisches Spektrum (»fingerprint«). Anhand einer Bibliothek von Peptidsignaturen bekannter Tierarten lassen sich die Messergebnisse einer bestimmten Tiergruppe zuzuordnen.



FALCONIERI VISUALS / SCIENTIFIC AMERICAN DEZEMBER 2018

wissen wir mittlerweile, dass sich Neandertaler und *Homo sapiens* in den letzten 10000 Jahren mindestens dreimal gekreuzt haben. Und auch die Denisovaner zeugten Nachwuchs mit diesen zwei Menschenformen, mit denen sie sich den Lebensraum teilten. Die lange vertretene Meinung, der anatomisch moderne Mensch hätte bei seinem Auszug aus Afrika die archaischen Populationen Eurasiens einfach ausgelöscht und rasch ersetzt, muss folglich einem komplexeren Szenario von Vermischung und Genfluss weichen.

Die meisten Fossilien aus der Denisova-Höhle sind aber so unvollständig, dass wir menschliche Überreste mit bloßem Auge nicht erkennen können. Außerdem ist der Fundplatz bis heute überaus schwierig zu datieren. Seit fast zehn Jahren wirken wir am Denisova-Projekt als Experten für Radiokarbondatierung mit. Physikalische Altersbestimmungen sind vor allem für Material aus dem Mittel- und Jungpaläolithikum (von vor rund 250000 bis vor 40000 beziehungsweise vor 40000 bis 10000 Jahren) wichtig, denn die Geräte, etwa Faustkeile, aus diesen Epochen zeigen keine charakteristischen Formen, die Archäologen mit bestimmten Zeiträumen verbinden könnten. Mit der C14-Methode versuchen wir, für die jüngere Zeitspanne eine belastbare Chronologie der Denisova-Höhle und weiterer paläolithischer Orte in Eurasien zu erstellen.

Seit 2008 wurden an dem sibirischen Fundplatz mehr als 13000 Knochen ausgegraben. 95 Prozent können taxonomisch nicht bestimmt werden, weil sie zu stark fragmentiert sind. Und auch alle identifizierten Urmenschenreste aus der Höhle sind winzig – in der Regel kürzer als zwei Zentimeter. Der Fingerknochen von »X-Woman« beispielsweise hatte nur die Größe einer Linse und wog weniger als 40 Milligramm. Auch die meisten anderen Knochen waren zerbrochen, vermutlich weil Raubtiere wie Hyänen im Lauf der Zeit ebenfalls in der Höhle Schutz gesucht hatten, wo sie ihre Jungen mit Knochen gefüttert haben.

Wie könnten wir also in diesen tausenden Knochenfragmenten mehr menschliche Überreste finden? Welche weiteren genetischen und chronologischen Informationen liegen darin wohl noch verborgen? Vielleicht schlummert hier sogar eine weitere unentdeckte Urmenschenart? Uns wurde klar, dass die ZooMS für ein solches Screening die Methode der Wahl ist. Denn Biomoleküle bleiben auf Grund der stabilen und sehr niedrigen Durchschnittstemperatur in der sibirischen Höhle von zirka sechs Grad Celsius erstaunlich gut erhalten – selbst alte DNA. So stammen die beiden vollständigsten Genome unserer Vorfahren, die bisher sequenziert wurden, von Fossilien aus der Denisova-Höhle.

ZooMS wurde ursprünglich von Michael Buckley, heute an der University of Manchester, und Matthew Collins von der University of York entwickelt. Mit der Methode identifizieren Forscher seit mehr als einem Jahrzehnt Tierknochen aus archäologischen Fundstätten. Sie ist mit umgerechnet etwa 5 bis 10 Euro für eine Analyse relativ preiswert, und man benötigt nur 10 bis 20 Milligramm Probenmaterial. Pro Woche kann ein einziger Wissenschaftler Hunderte von Knochen auf diese Weise untersuchen.

So witterten wir eine große Chance: Wenn unter den Fragmenten aus der Denisova-Höhle weitere Reste von Urmenschen verborgen lagen, sollten wir sie finden können. Soweit wir wissen, hat bisher noch niemand ZooMS verwendet, um nach menschlichen Knochen zu suchen. Zwar lässt sich mit dieser Methode wohl nicht zwischen Menschen und Menschenaffen unterscheiden, weil sich deren Peptidsignaturen zu stark ähneln. Wir können allerdings ausschließen, dass etwa Schimpansen oder Orang-Utans während des Paläolithikums dort lebten. Wenn es uns also gelingen sollte, ein Knochenstück einem Hominiden zuzuordnen, sollte dieser menschlich sein. Die genetische Analyse kann die genaue Artbestimmung klären.

Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig und seine Arbeitsgruppe hatten 2010 das Genom von »X-Woman« veröffentlicht, und wir waren gespannt, was der Experte für alte DNA von unserer Idee hielt. Er war sofort begeistert und sicherte uns seine Unterstützung zu. Auch Anatoli Derewjanko von der Russischen Akademie der Wissenschaften, der die Arbeit in der Denisova-Höhle koordiniert, und Michail Schunkow, den Leiter der Ausgrabungen, konnten wir überzeugen. Und so begannen wir einige Monate später, Proben von rund 3000 Fragmenten vermeintlich »wertloser« Knochen zu nehmen.

Versteckt zwischen Mammuts und Wollnashörnern

Theoretisch, so dachten wir, sollte die Arbeit schnell erledigt sein. In Wirklichkeit standen wir aber vor einer riesigen Aufgabe: Aus jedem Fragment mussten wir ein winziges Knochenstück zur Analyse entfernen und dabei penibel darauf achten, diese potenziell wertvollen Proben nicht zu verunreinigen. Eine unserer Studentinnen, Samantha Brown, verbrachte damit unzählige Stunden im Labor der University of Oxford.

Die Analyseergebnisse der ersten 700 bis 800 Knochenproben waren zwar interessant: Wir hatten Mammuts, Hyänen, Pferde, Rentiere, Wollnashörner – die gesamte Palette eiszeitlicher Tiere, aber leider keine Spur menschlicher Existenz. Trotz der Enttäuschung suchten wir weiter. Und tatsächlich erhielten wir eines Abends im Sommer 2015 eine E-Mail von Michael Buckley, dem ZooMS-Erfinder, der ebenfalls mit uns zusammenarbeitet. Eine unserer Proben, DC1227, zeigte die charakteristischen Peptidmarker eines Hominiden. Wir hatten also die sprichwörtliche Nadel im Heuhaufen gefunden!

Am nächsten Tag sahen wir uns im Oxforder Labor den Knochen an. Ernüchtert mussten wir feststellen, dass das Fragment nur 25 Millimeter lang und damit selbst für Denisova-Verhältnisse winzig war. Viele Möglichkeiten für weitere Analysen blieben uns nicht. Aber angesichts der außergewöhnlichen Erhaltungsbedingungen hofften wir, dass die Menge ausreichen würde, um mit unseren Methoden noch einiges über den Knochen herauszufinden. Wir machten hoch aufgelöste Fotos, schickten den Knochen durch einen CT-Scanner und entnahmen zusätzliche Proben für die Datierung und Isotopenanalyse. Danach sandte Brown den Rest nach Leipzig zur DNA-Analyse in Pääbos Labor.

Einige Wochen später erhielten wir die Ergebnisse der Radiokarbondatierung. Das Fehlen von radioaktivem Kohlenstoff in der Probe bedeutete, dass unser kleiner Knochen



CHRISTOFFER RUDQUIST

PROBENNAHME Um fossile Knochen mit ZooMS zu analysieren, schleifen die Forscher eine etwa 20 Milligramm schwere Probe ab.



CHRISTOFFER RUDQUIST

DATIERUNG Auch für die Radiokarbondatierung muss ein Teil des Knochens zerstört werden. Von den häufig kleinen Splittern bleibt nach ihrer Untersuchung oft nur wenig übrig.

mehr als 50000 Jahre alt war. Auch die Ergebnisse der DNA-Analyse ließen nicht lange auf sich warten: Die mitochondriale DNA – jener Teil des Erbguts, der nur über die mütterliche Linie weitergegeben wird – ließ darauf schließen, dass die Mutter des Individuums, von dem der Knochen stammte, eine Neandertalerin war. Damit war es uns gelungen, einen Urmenschenknochen aufzuspüren, der sich zwischen unzähligen Überresten anderer Spezies versteckt hatte. Nach den ersten Erbgutanalysen wollte Pääbos Team nun versuchen, die viel informativere Kern-DNA aus dem Knochen zu extrahieren, der jetzt die Bezeichnung »Denisova 11« erhielt. In der Zwischenzeit entschieden wir, unsere Methode an weiterem Material zu testen.

Die Vindija-Höhle in Kroatien gilt als einer der wichtigsten Fundorte, um das Leben der späten Neandertaler und ihr Miteinander mit anatomisch modernen Menschen in Europa zu verstehen. Hier wollten wir ZooMS einsetzen, um einen besseren Überblick über die bislang nicht identifizierten Knochen des Fundplatzes zu erhalten.

Bisherige taxonomische Untersuchungen zeigten, dass etwa 95 Prozent der besser erhaltenen Knochen aus der Höhle von Höhlenbären stammen. Als unsere Studentin Cara Kubiak mit ihren Analysen begann, erwarteten wir daher kaum, eine ebenso vielfältige Fauna vorzufinden, wie wir sie in der Denisova-Höhle entdeckt hatten. Umso erstaunlicher war es, als sich schon in der 28. Probe von insgesamt 350 die Peptidsequenz eines Hominiden nachweisen ließ. Der etwa sieben Zentimeter lange Knochen zeigte zudem auffällige Schnittspuren und weitere Anzeichen menschlicher Bearbeitung, wie man sie bereits von anderen Neandertalerknochen kennt. Vermutlich stammen sie vom absichtlichen Zerteilen der Leiche; sie könnten sogar Spuren von Kannibalismus sein. Bald darauf bestätigte Pääbos Team, dass es sich tatsächlich um einen Neandertaler gehandelt hatte.

Das Exemplar mit der Analysennummer Vi-*28 sollte sich als wichtiger Fund bei der chronologischen Neubewertung der Höhle und der Geschichte der Neandertaler herausstellen. Bis dahin legten Radiokarbondaten nahe, dass die Frühmenschen bis vor zirka 30000 Jahren dort lebten und sich somit eine unerwartet lange Zeit ihren Lebensraum mit anatomisch modernen Menschen teilten. Diese wanderten spätestens vor 42000 bis 45000 Jahren in die Region ein. Vindija galt daher als Refugium einer der letzten Neandertaler-Gruppen, die in der Höhle Zuflucht fanden und dort noch erstaunlich lange überleben konnten, während ihre Artgenossen fast überall im restlichen Europa längst Geschichte waren.

Diese Datierungen der menschlichen Überreste aus Vindija sind allerdings umstritten. Archäologen und Präparatoren hatten die Knochen in der Vergangenheit mit Konservierungsmitteln behandelt, die unter anderem Kohlenstoff enthielten, der in die Knochen eindrang und so die Isotopenverhältnisse für eine Radiokarbondatierung verfälschte. Glücklicherweise hatte man Vi-*28 irrtümlich für einen Tierknochen gehalten und daher nicht konserviert.

Wir konnten sein Alter darum noch sehr genau bestimmen: Der Neandertaler, zu dem dieser Knochen gehörte, lebte vor etwa 47 000 Jahren und damit über 15 000 Jahre früher an diesem Fundplatz, als man ursprünglich angenommen hatte.

Wir entschieden uns daher, auch die bereits datierten Neandertalerknochen aus der Vindija-Höhle erneut zu untersuchen. Das Ergebnis bestätigte, dass die haltbar gemachten Knochen falsche Ergebnisse geliefert hatten: Sie sind unseren Messungen zufolge ebenfalls mehr als 40 000 Jahre alt, so wie auch alle weiteren Proben der Frühmenschen von diesem Fundort, die bis jetzt datiert werden konnten. Die Neandertaler scheinen wohl doch weit früher als vermutet aus Vindija verschwunden zu sein – vielleicht sogar noch, bevor die ersten anatomisch modernen Menschen dort ankamen.

Sonderbare Mischung:
Mutter Neandertalerin – Vater Denisovaner

Mittlerweile haben auch andere Forschergruppen mit der Technik große Erfolge erzielt. 2016 berichteten Frido Welker, heute an der dänischen Universität Kopenhagen, und seine Kollegen, dass sie mit der Methode von bis dahin nicht identifizierten Knochenfragmenten aus der Grotte du Renne in Burgund 28 als menschlich einordnen konnten. Vor Jahrzehnten fanden Forscher dort Neandertalerknochen zusammen mit einer Reihe überraschend komplexer Artefakte, darunter Knochenwerkzeuge, Anhänger und anderen Körperschmuck – Elemente der so genannten Châtelperronien-Kultur am Übergang zwischen Mittel- und Jungpaläolithikum.

Diese Entdeckung stand im krassen Widerspruch zu der bis dahin vertretenen Vorstellung, *Homo sapiens* allein sei zu einem solchen technischen und künstlerischen Einfallsreichtum fähig. Und so begann eine bis heute andauernde Debatte darüber, ob wirklich Neandertaler mit den fortschrittlichen Artefakten in Verbindung gebracht werden können.

Gegner dieser Theorie erwiderten, dass vermutlich die archäologischen Schichten am Fundplatz gestört worden waren. Ältere Neandertalerknochen seien dabei mit jüngeren Artefakten des *Homo sapiens* vermischt worden. Die 28 Knochenfragmente, die Welker und seine Kollegen mit ZooMS als menschlich identifizierten, hatten aber eindeutig in derselben Schicht gelegen wie die fortschrittlichen Werkzeuge und Schmuckgegenstände. Ebenso eindeutig waren die DNA-Ergebnisse: Die Knochen stammen von Neandertalern. Das spricht klar dafür, dass die Urmenschen Châtelperronien- sowie andere komplexe Techniken beherrschten und sich künstlerisch betätigten. Sie waren offenbar intelligenter, als man es ihnen bisher zugetraut hatte.

Während unserer Arbeit an den Vindija-Knochen gingen die Untersuchungen an den Proben aus der Denisova-Höhle weiter. Wir hofften darauf, noch mehr menschliche Fossilien zu finden. Und wir hatten Glück: Es kamen die Reste zweier weiterer Urmenschen ans Licht: DC3573, ein über 50 000 Jahre altes Fragment eines Neandertalers, und DC3758, ein etwa 46 000 Jahre alter Knochen, der keine DNA mehr enthielt. Es ist uns gelungen, unter mehr als 5000 Knochenfragmenten insgesamt fünf menschliche Knochen zu finden, die ohne ZooMS wohl für immer in Vergessenheit geraten wären.

Die aufregendste Entdeckung stand uns jedoch noch bevor. Im Mai 2017 trafen wir uns mit Matthias Meyer und Janet Kelso von Pääbos Labor in Leipzig. Wir wollten von ihnen wissen, ob sie es geschafft hatten, die Kern-DNA der Probe Denisova 11 zu sequenzieren. Es kommt nicht oft vor, dass man in der Wissenschaft völlig unerwartete Nachrichten erhält. Aber Meyer und Kelso lieferten genau das. Die Kern-DNA, sagten sie, sei eigenartig gespalten. Eine Hälfte passe zu einem Neandertaler, die andere schien von einem Denisova-Menschen zu stammen. Um wirklich sicherzugehen, wollten sie die Proben noch einmal analysieren. Nach einigen Monaten hatten wir Gewissheit: Ihr Ergebnis war korrekt. Die mitochondriale DNA hatte uns nur die Hälfte des Bildes gezeigt. Was wir gefunden hatten, war kein Neandertaler, sondern ein Nachkomme einer Neandertaler-Mutter und eines Denisovaner-Vaters – eine Hybride der ersten Generation, wie Genetiker sagen (siehe Artikel ab S. 68).

Durch die Genanalyse wissen wir auch, dass Denisova 11 eine Frau war, die vor ungefähr 90 000 bis 100 000 Jahren lebte. Ein CT-Scan ermöglichte es, die Knochendichte zu bestimmen. Daran konnte der Anthropologe Bence Viola von der University of Toronto erkennen, dass sie mindestens 13 Jahre alt war, als sie starb. In ihrem Erbgut zeigte sich außerdem, dass ihr Denisovaner-Vater vermutlich ebenfalls einen Neandertaler als entfernten Verwandten hatte – mehrere hundert Generationen zurück.

Wir werden wohl nie erfahren, wie solche Vermischungen in der Vorgeschichte zu Stande kamen. Wir wissen nur, dass sie passierten. Ebenso wenig können wir feststellen, woran Denisova 11 gestorben ist. Möglicherweise hat ein Raubtier, vielleicht eine Hyäne, ihre Überreste in die Höhle geschleppt und sich daran gütlich getan. Ob das Mädchen zuvor von seinen Angehörigen feierlich bestattet wurde oder ob es dem wilden Tier zum Opfer fiel, bleibt aber ungewiss.

Seit fast 100 000 Jahren lag dieses winzige Stückchen ihres Körpers ungestört in der Höhle und hätte noch viele Jahre dort verborgen bleiben können. Doch dank moderner wissenschaftlicher Methoden konnten wir dem Knochen wieder Leben einhauchen und ihm einen spannenden Teil seiner Geschichte entlocken. ◂

QUELLEN

Brown, S. et al.: Identification of a new hominin bone from Denisova Cave, Siberia using collagen fingerprinting and mitochondrial DNA analysis. Scientific Reports 6, 2016

Devièse, T. et al.: Direct dating of neanderthal remains from the site of Vindija Cave and implications for the middle to upper paleolithic transition. PNAS 114, 2017

Slon, V. et al.: The genome of the offspring of a neanderthal mother and a denisovan father. Nature 561, 2018

Welker, F. et al.: Palaeoproteomic evidence identifies archaic hominins associated with the Châtelperronian at the Grotte du Renne. PNAS 113, 2016

MAAYAN HAREL (MAAYANILLUSTRATION.COM)

PALÄOGENETIK

ALLES BEGANN MIT EINEM FINGERKNÖCHELCHEN

Allein durch die Analyse uralter DNA haben Paläogenetiker vor zehn Jahren eine ausgestorbene Menschenform entdeckt: den Denisovaner. Wie dieser einst aussah, war jedoch auf Grund der spärlichen Fossilienreste völlig unklar. Inzwischen haben Forscher mehrere Fährten aufgenommen, die sie bis aufs Dach der Welt und in unser Erbgut führen.

Jean-Jacques Hublin leitet die Abteilung Humanevolution am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig. Er ist außerdem seit 2006 Honorarprofessor für Anthropologie an der Universität Leipzig und seit 2014 Gastprofessor am Collège de France in Paris.



MPI FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

spektrum.de/artikel/1714800



MAAYAN HAREL (MAAYANILLUSTRATION.COM)

BENNETT, E.A. ET AL.: MORPHOLOGY OF THE DENISOVAN PHALANX CLOSER TO MODERN HUMANS THAN TO NEANDERTHALS. SCIENCE ADVANCES 5, EAAW3950, 2019, FIG. 3A (DOI.ORG/10.1126/SCIADV.AAW3950); GENEHMIGT VON SCIENCE / AAAS

RÄTSELHAFTES MÄDCHEN
Aus einem winzigen Stück Fingerglied (oben blau und grün gefärbt) haben Paläogenetiker 2010 das Erbgut eines Denisova-Mädchens entziffert. Dann konnten Forscher das 52000 bis 76000 Jahre alte Fossil mit einem weiteren Fragment aus der Denisova-Höhle ergänzen. Aus der extrahierten Erbinformation des Fingerknöchelchens haben Bioinformatiker 2019 die anatomischen Merkmale des Mädchens rekonstruiert. Auf den Ergebnissen beruht das Bildnis links.

Immer wenn die Bekanntgabe einer bedeutenden Entdeckung bevorsteht, macht sich das in der Cafeteria des Leipziger Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie als Erstes bemerkbar. Die Luft schwirrt dann dort regelrecht vor Gerüchten. Solche Momente gab es in der Vergangenheit häufiger. Denn seit der Gründung des Instituts 1997 jagte eine Entdeckung die nächste. Besonders hat sich aber das Jahr 2010 ins kollektive Gedächtnis der Leipziger Forscher gebrannt – da herrschte in der Cafeteria außergewöhnlich viel Aufregung. In jenem Jahr hatten meine Kollegen nicht nur das Erbgut des Neandertalers entziffert, sondern auch eine bisher unbekannte, ausgestorbene Menschenform entdeckt – und das auf eine nie da gewesene Art und Weise: nur durch die Sequenzierung von DNA aus einem winzigen fossilen Knochenstück.

Schon seit vielen Jahren hat die Paläogenetik im Leipziger Max-Planck-Institut einen gewaltigen Aufschwung erlebt. Die treibende Kraft dahinter war mein Kollege Svante Pääbo. Zusammen mit seinem Team entzifferte er 2006 ein kurzes Stück aus der Erbsubstanz des Neandertalers – dessen mitochondriale DNA (mtDNA). Sie stammt aus den Mitochondrien, kleinen Organellen, welche die Zelle mit Energie versorgen. Der überwiegende Teil des Erbguts liegt dagegen in Chromosomen verpackt im Zellkern. Für Paläogenetiker ist die mtDNA der leichtere Fang: Von ihr ist stets



KARTE: PETERHERMESFURIAN / GETTY IMAGES / ISTOCK; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

FUNDORTE VON DENISOVANERN Wo genau Neandertaler, Denisovaner und anatomisch moderne Menschen in Asien lebten, ist noch nicht endgültig geklärt.

sehr viel mehr in einem Fossil erhalten als von der Zellkern-DNA. Allerdings verrät sie auch nur zum Teil die genetische Identität eines Individuums, weil sie ausschließlich von der Mutter auf die Nachkommen vererbt wird. Doch einer Arbeitsgruppe um Richard Green, David Reich und Svante Pääbo gelang es schließlich, auch die Kern-DNA des *Homo neanderthalensis* zu sequenzieren. Im Mai 2010 veröffentlichten sie ihre Ergebnisse in einem bahnbrechenden Artikel in der Fachzeitschrift »Science«.

DNA aus jahrzehntausendealten Fossilien zu extrahieren, war lange Zeit undenkbar. Schlicht deshalb, weil das Trägermaterial unserer Gene nicht besonders stabil ist. Stirbt ein Organismus, zerfallen die DNA-Ketten in viele kleine Bruchstücke, die sich sehr rasch mit Milliarden weiterer DNA-Fragmente aus jenen Bakterien und Pilzen vermischen, die den Leichnam verzehrt haben. In jahrelanger Forschungsarbeit fanden die Paläogenetiker schließlich Wege, die gesuchte aDNA (»a« steht für das englische Wort »ancient«, alt) aus diesem Gemisch herauszufischen und wieder zusammenzusetzen (siehe »So funktioniert die Paläogenetik«, S. 74). Doch in einem Fossil bleibt aDNA nur dann erhalten, wenn es in einer genügend kalten Umgebung lagerte. In wärmeren Gefilden zersetzt sich die Erbsubstanz schon nach wenigen Jahrtausenden.

Die bislang älteste aDNA hat 2013 ein dänisches Team um Ludovic Orlando rekonstruiert, der damals am Naturhistorischen Museum in Kopenhagen tätig war. Das Erbgut stammte aus den gefrorenen Resten eines 700 000 Jahre alten Wildpferds, das im Nordwesten Kanadas ans Licht kam. Bald stellte sich heraus, dass auch in Sibirien uralte Genome erhalten sind. Mit Kollegen vom Leipziger Institut konnte ich 2007 an Proben aus einer Höhle im Altai-Gebirge nachweisen, dass sich dort vor mehr als 40 000 Jahren Neandertaler aufgehalten hatten. Ihr bis dahin bekanntes Ausbreitungsgebiet hatte sich damit schlagartig um mehr als 2000 Kilometer nach Osten ausgedehnt.

Russische Archäologen schickten uns danach weitere Fossilproben aus Sibirien, die in die Zeit vor 52 000 bis 76 000 Jahren datieren. Dazu gehörte auch das Stück eines menschlichen Fingerknochens mit der Fundnummer Denisova 3. Das winzige Fragment stammte von einer anderen Fundstelle im Altai, die Archäologen schon seit vielen Jahren frei legten: die Denisova-Höhle.

In der Denisova-Höhle ist es kalt: 5 bis 10 Grad Celsius im Sommer und minus 10 bis minus 15 Grad Celsius im Winter. Das sind optimale Bedingungen, damit sich aDNA erhalten kann. In der Tat konnten die Leipziger Paläogenetiker dem wenige Millimeter großen Fingerknochenstück eine intakte und noch dazu sehr außergewöhnliche DNA entlocken. Wie sich herausstellte, gehörte die mtDNA weder zu einem *Homo sapiens* noch zu einem Neandertaler, sondern zu einer ausgestorbenen Menschenform, deren Linie sich nach diesen Informationen schon vor ungefähr einer Million Jahre von der unsrigen abgespalten haben soll.

Das Ergebnis war sensationell, doch zugleich war Vorsicht geboten. Wie wir wissen, verrät die mitochondriale DNA nur einen Teil der genetischen Information, die noch dazu trügerisch sein kann, da die mtDNA normalerweise nur von der Mutter an die Nachkommen vererbt wird. Bei der Zeugung vermischt sich das Genmaterial aus den Mitochondrien nicht mit dem väterlichen Erbgut. Über die Linie der Väter erfahren wir also nichts. Zudem: Pflanzen sich weibliche Lebewesen einer bestimmten mtDNA-Linie nicht mehr fort, stirbt ihre spezifische Gensequenz aus und stellt für Paläogenetiker eine Unbekannte dar.

Gigantische Backenzähne und grazile Fingerknochen

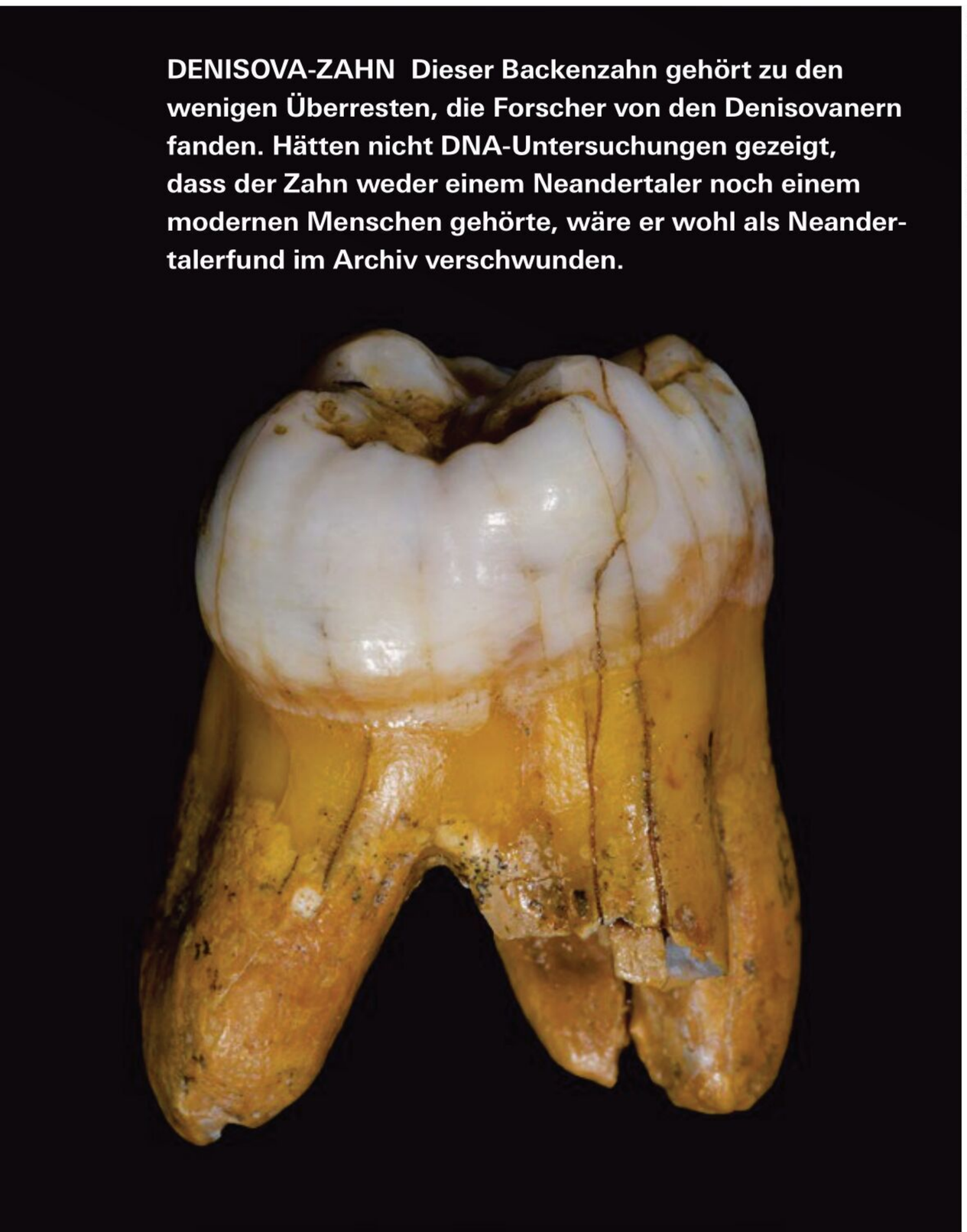
Glücklicherweise wartete im Fall des sibirischen Fingerknochens die eigentliche Sensation noch auf uns. So kam gegen Ende des ereignisreichen Jahres 2010 eine weitere Studie heraus. Pääbo und sein Team hatten es geschafft, die vollständige Zellkern-DNA dieses geheimnisvollen Menschen zu entziffern – der umso rätselhafter war, weil außer dem winzigen Knochenfragment nichts über seine Anatomie bekannt war. Dafür lieferte die Zellkern-DNA des Fossils Denisova 3 eine Fülle an Informationen. Zunächst: Dieser Denisovaner war eine Denisovanerin gewesen, ein Mädchen, das angesichts der Größe des Knochenfragments noch nicht erwachsen war. Zudem ergab der Vergleich ihres Erbguts mit den Genomen von Neandertalern und heutigen Menschen, dass sie nah verwandt mit beiden Menschenformen war. Einer genetischen Berechnung zufolge hatten sich die Linien der Denisovaner und der Neandertaler irgendwann vor zirka 450 000 oder 430 000 Jahren getrennt. Außerdem: Unsere Vorfahren und die Vorläufer

der Denisovaner und Neandertaler hatten sich wahrscheinlich nicht wie zuvor auf Grund der mtDNA angenommen vor einer Million Jahren, sondern vor ungefähr 650 000 Jahren auseinanderentwickelt (siehe »Enge Verwandtschaft«).

Paläogenetiker weltweit waren begeistert – Paläoanthropologen hingegen ziemlich konsterniert. Ein winziges Fragment vom Endglied eines kleinen Fingers gab wahrlich nicht genug her, was sich anatomisch erforschen ließ. Doch noch 2010 keimte Hoffnung. Der US-Genetiker Richard Green und seine Kollegen präsentierten ein weiteres Fossil, das zehn Jahre zuvor in der Denisova-Höhle ausgegraben, aber danach nicht weiter beachtet worden war.

Es war ein menschlicher, außergewöhnlich großer Backenzahn (Molar). Die Analyse der mtDNA besagte, dass es sich um das Relikt eines Denisova-Menschen handelte. Bence Viola, ein junger Kollege aus meiner Abteilung, befasste sich akribisch mit der Anatomie dieses Riesenzahns. Die Form war zweifellos merkwürdig, indes: Es ist der dritte Molar aus einem Oberkiefer, gehört also zu den Weisheitszähnen – und die entwickeln oft eine außergewöhnliche Form, die sich von den anderen Backenzähnen unterscheidet.

Wenig später förderten die Ausgräber der Denisova-Höhle, Anatoli Derewjanko und Michail Schunkow von der Russischen Akademie der Wissenschaften in Nowosibirsk, weitere fossile Knochenfragmente des Denisova-Menschen zu Tage. Sie fanden die Krone eines stark abgenutzten Milchzahns und einen weiteren Molaren aus einem Oberkiefer, ebenfalls sehr groß. Seiner Form nach passte der Backenzahn weder zu den Zähnen des Neandertalers noch zu solchen des *Homo sapiens*.



MPI FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

DENISOVA-ZAHN **Dieser Backenzahn gehört zu den wenigen Überresten, die Forscher von den Denisovanern fanden. Hätten nicht DNA-Untersuchungen gezeigt, dass der Zahn weder einem Neandertaler noch einem modernen Menschen gehörte, wäre er wohl als Neandertalerfund im Archiv verschwunden.**

AUF EINEN BLICK
EIN NEUES FAMILIENMITGLIED

1 2010 ergab die genetische Analyse eines Fingerknochenfragments aus einer Höhle im Altai-Gebirge: In Eurasien hatte während der Altsteinzeit neben *Homo sapiens* und Neandertaler eine dritte Menschenform gelebt, der Denisova-Mensch.

2 Durch neue genetische Daten und Fossilien, die Forscher bisher übersehen hatten, nehmen die Denisovaner allmählich Gestalt an.

3 Außerdem stellte sich heraus: Die Denisovaner hatten sich nicht nur mit dem Neandertaler vermischt, sondern offenbar auch mit dem *Homo sapiens*.

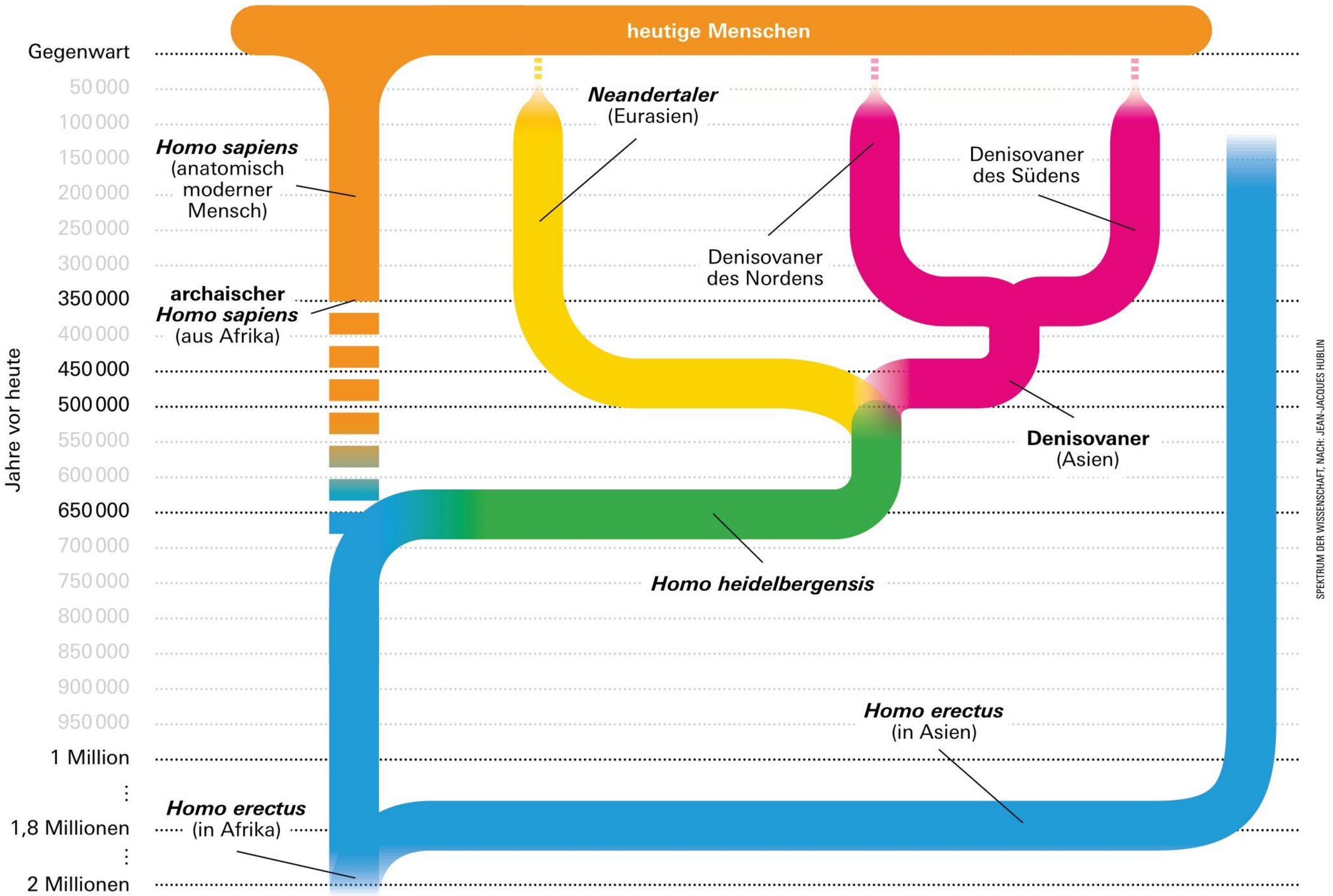
Bence Viola, der inzwischen an der University of Toronto forscht, hat 2019 ein weiteres Fossil aus der Denisova-Höhle vorgestellt: ein Stück eines auffallend kräftigen Schläfenknochens. Ebenfalls 2019 hat Isabelle Crevecoeur von der Université de Bordeaux das fossile Fingerglied Denisova 3 durch ein Fragment ergänzt. Am vervollständigten Knochenstück ließ sich erkennen, dass es weniger breit geformt war als bei einem Neandertaler und eher den Fingerknochen von *Homo sapiens* glich.

Alle diese Ergebnisse mündeten in einer weiteren Erkenntnis: Die Denisovaner hatten die Höhle über einen sehr langen Zeitraum aufgesucht. Zwar waren viele Fundschichten durch die Jahrtausende gestört oder durchmischt worden, dennoch ließen sie sich grob datieren und mit den genetischen Daten abgleichen. Das Fazit: Die Denisova-Menschen haben – wenn auch mit Unterbrechungen – mindestens 100 000 Jahre lang in der sibirischen Höhle gelebt, in einem Zeitraum von vor 250 000 bis vor 45 000 Jahren.

Der Denisovaner in uns

Die Menschenform der Denisovaner ist ausgestorben – so viel ist sicher –, doch Spuren ihres Erbguts haben die Zeiten überdauert. Sequenzen ihrer Zellkern-DNA fanden sich im Genom verschiedener heutiger Bevölkerungsgruppen. In Afrika und Europa allerdings überhaupt nicht, bei den Menschen des asiatischen Festlands nur sehr wenig – etwa 0,2 Prozent. Aber bei einigen Populationen Melanesiens und Australiens hat sich ein Anteil von drei bis fünf Prozent Denisova-DNA erhalten. Die Vorfahren der heutigen Papuas und der australischen Aborigines, die vor mehr als 50 000 Jahren aus Afrika eingewandert waren, müssen auf ihrem Weg auf Denisovaner getroffen sein und sich mit ihnen vermischt haben. Der wahrscheinlichste Zeitpunkt dieser Vermengung war wohl vor 50 000 bis 100 000 Jahren – und der Ort irgendwo in Süd- oder Südostasien.

Die Denisova-Menschen müssen demnach sehr weit verbreitet gelebt haben – und die Denisova-Höhle im Altai lag nicht im Zentrum, sondern am nördlichen Rand ihres Le-



bensraums. Diese These wird durch weitere Funde gestützt. Die russischen Ausgräber sind in den Höhlensedimenten auch auf Überreste von Neandertalern gestoßen. Während der letzten Zwischeneiszeit, vor 130 000 bis vor 80 000 Jahren, wurde das Klima in Zentralasien feuchter, das Kaspische Meer schrumpfte, und im Winter herrschten mildere Temperaturen. Dank dieser Warmphase konnten die Neandertaler aus ihrem westasiatischen Verbreitungsgebiet weit nach Osten vordringen und schließlich den Altai erreichen. Dort verdrängten sie sogar zeitweise die Denisovaner, vermischten sich aber auch mit ihnen.

Den Beweis dafür legte 2019 die Arbeitsgruppe von Svante Pääbo vor. Sie hatte das Bruchstück eines Röhrenknochens aus der Denisova-Höhle genetisch analysiert (Denisova 11). Der Fund ist etwa 90 000 Jahre alt. Pääbo und sein Team fanden heraus, dass der nur zwei Zentimeter große Knochensplitter von einer jungen Frau stammte. Ihre Mutter war eine Neandertalerin gewesen, ihr Vater ein Denisovaner – der selbst alte Spuren von Neandertalervorfahren in seinem Genom trug.

Das hatte es so in der Paläoanthropologie noch nicht gegeben. Die Forschungsdisziplin, die mit dem Fund eines Neandertalerskeletts 1856 im namengebenden Neandertal begründet wurde und auf der Formanalyse von Fossilien basiert, fand sich in einer paradoxen Lage wieder. Genetiker hatten zahlreiche Erbgutdaten vom Denisova-Menschen gesammelt, aber anatomisch auswertbare Skelettteile und

ENGE VERWANDTSCHAFT Die Denisovaner gingen wie die Neandertaler aus dem *Homo heidelbergensis* hervor und spalteten sich in zwei Populationen auf.

damit Hinweise auf das Aussehen dieser archaischen Menschenform fehlten fast völlig. Diese bizarre Diskrepanz ließ die Paläoanthropologen rätseln: Lagen womöglich längst Denisovaner-Relikte in Sammlungen, ohne dass sie als solche identifiziert wurden? In der Tat gibt es in China zahlreiche menschliche Fossilien, die in Frage kämen. Sie stammen aus dem Zeitraum von vor ungefähr 400 000 bis 45 000 Jahren und würden von der Aufspaltung der Linien der Denisovaner und der Neandertaler bis zu dem Zeitpunkt reichen, als die ersten anatomisch modernen Menschen nach Nordasien vordrangen. Nach Südostasien war *Homo sapiens* wohl schon vor etwa 70 000 Jahren gelangt, nach Australien vor zirka 50 000 Jahren.

Einige meist chinesische Wissenschaftler vertraten schon lange die Ansicht, dass die Völker des Fernen Ostens auch regionale Wurzeln haben. Die Befürworter dieser These interpretierten die chinesischen Fossilien als Mischformen zwischen dem *Homo erectus* – er war vor etwa zwei Millionen Jahren aus Afrika in Eurasien eingewandert – und einem regionalen *Homo sapiens*.

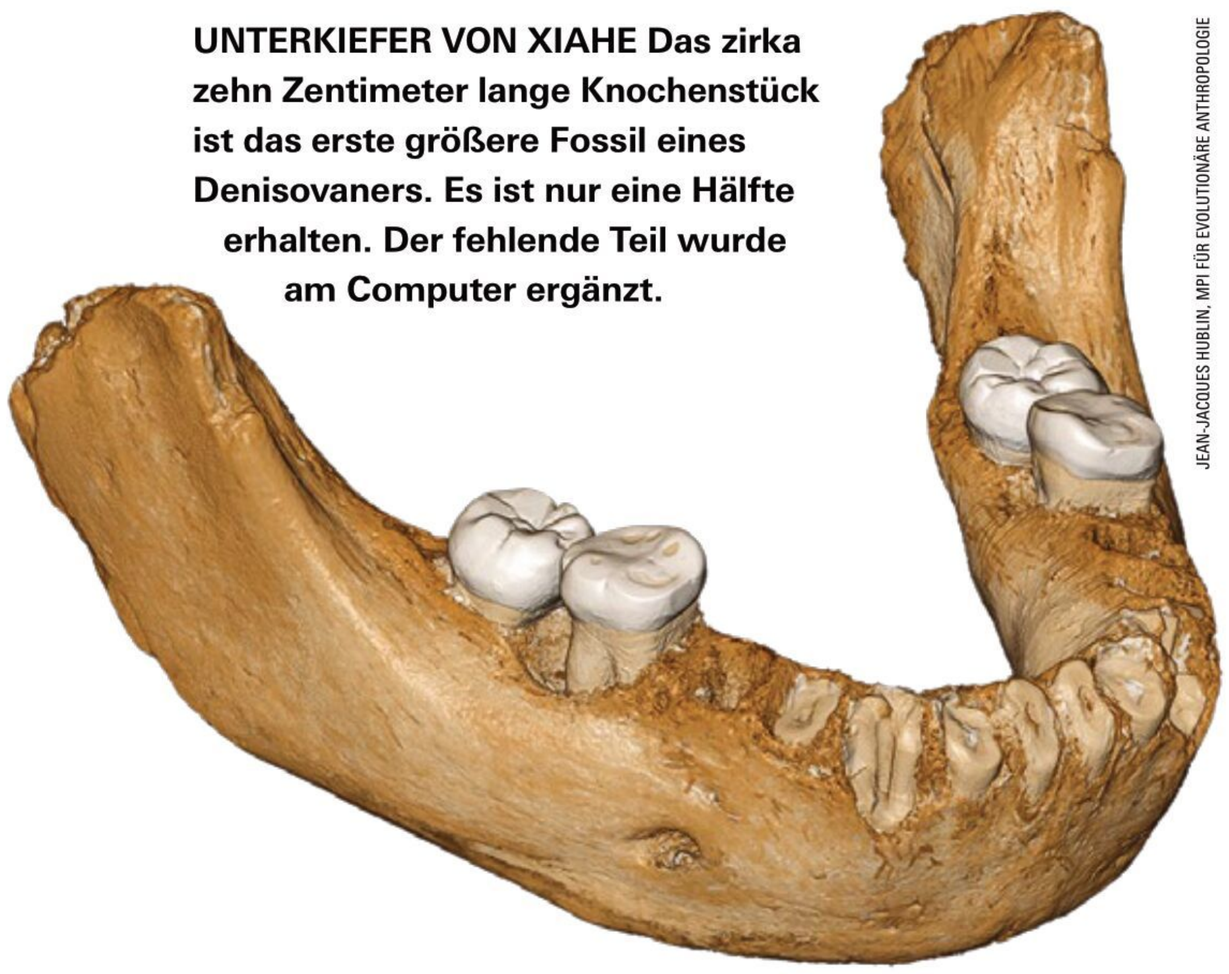
Doch zuletzt sprachen sich immer mehr Forscher für den afrikanischen Ursprung unserer Spezies aus. Folglich fand

die These von der »regionalen Kontinuität« immer weniger Befürworter. So wussten die Paläoanthropologen aber auch immer weniger mit den chinesischen Fossilien anzufangen. Schon 2010, als die ersten Studien über den Denisova-Menschen erschienen, haben Chris Stringer vom Natural History Museum in London und ich vorgeschlagen, dass es sich bei den teils sehr gut erhaltenen chinesischen Fossilien um Überreste von Denisovanern handeln könnte. Es fehlte aber ein genetischer Nachweis für unsere These. Daher blieb es nur eine plausible Vermutung.

Das änderte sich im Juli 2016. Ich hatte per E-Mail mehrere Fotos erhalten und anbei die Nachricht einer chinesischen Kollegin, Dongju Zhang von der Universität Lanzhou. Die Bilder zeigten ein Fossil von der Tibetischen Hochebene – es war die Hälfte eines Unterkiefers. Das Stück wirkte sehr robust, und in der Zahnreihe steckten zwei enorm große Backenzähne. Es war kein Kinn zu erkennen. Damit war klar: Das konnte kein *Homo sapiens* sein! Die überraschende E-Mail aus China war der Beginn einer wunderbaren Zusammenarbeit mit Dongju Zhang und ihrem Kollegen Fahu Chen.

Hätte der Cartoonist Hergé den fragmentierten Unterkiefer gekannt, er hätte ihm einen gebührenden Platz in seinem Comicalbum »Tim in Tibet« eingeräumt. Die Fundgeschichte des Fossils hat jedenfalls das Zeug für eine fantastische Erzählung. In den frühen 1980er Jahren war ein buddhistischer Mönch zum Meditieren in das Höhlenheiligtum von Baishiya im Bezirk Xiahe aufgestiegen. In der Karsthöhle fand er dann das Fossil und brachte es zum »Sechsten lebenden Gung-Thang-Buddha«. Der Unterkiefer sollte zu einem Puder für medizinische Zwecke zerstoßen werden. So war man jedenfalls mit sämtlichen fossilen Knochen verfahren, die bis dahin in der Höhle ans Licht gekommen waren. Doch der religiöse Würdenträger bewahrte das Stück auf. Irgendwann überließ er es einem chinesischen Geologen aus seinem Bekanntenkreis. Schließlich landete das Fossil an der Universität Lanzhou. Wo genau es der Mönch in der Höhle aufgelesen hatte, wusste niemand mehr, aber zumindest das Alter des Unterkiefers ließ sich bestimmen. An dem Fossil haftete eine Kruste aus Kalzitgestein, der die chinesischen Kollegen mittels der Uran-Thorium-Methode eine Datierung entlockten: 160 000 Jahre. Alle Indizien – das Alter, die Fundregion und die morphologischen Merkmale – sprachen dafür, dass der Unterkiefer von einem Denisova-Menschen stammte.

Nicht nur das Fossil war bemerkenswert, sondern auch sein Fundort. Die Karsthöhle von Baishiya liegt auf fast 3300 Meter über dem Meeresspiegel. Bis dahin existierte kein einziges Fossil einer archaischen Menschenform, das in hochalpinen Lagen zu Tage kam. Zuvor gingen Paläoanthropologen davon aus, dass *Homo sapiens* vor weniger als 40 000 Jahren die Tibetische Hochebene als Erster erklommen hatte.



JEAN-JACQUES HUBLIN, MPI FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

UNTERKIEFER VON XIAHE Das zirka zehn Zentimeter lange Knochenstück ist das erste größere Fossil eines Denisovaners. Es ist nur eine Hälfte erhalten. Der fehlende Teil wurde am Computer ergänzt.

Woher das Gen gegen dünne Luft kommt

Qiaomei Fu vom Institut für Wirbeltierpaläontologie und Paläoanthropologie der Chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking versuchte, aus dem Unterkiefer von Xiahe aDNA zu extrahieren – leider erfolglos. Also probierten wir es mit einer anderen Methode: der Paläoproteomik. Sie beruht auf dem Bindegewebseiweiß Kollagen im Knochen (siehe Artikel ab S. 60). Die Untersuchung des Proteins hat im Vergleich zur aDNA zwei entscheidende Vorteile: Die Aminosäureketten, aus denen Proteine bestehen, sind sehr viel stabiler als die Nukleinsäure einer DNA und überdauern daher sehr viel länger. Und zweitens: Die Abfolge der Aminosäuren entspricht der DNA-Sequenz, die das Eiweiß codiert – denn die Gene enthalten die Bauanleitung für ein Eiweiß. Hierüber ist es möglich, einen fossilen Knochen einem *Homo sapiens*, Neandertaler oder Denisovaner zuzuordnen.

Mit Hilfe der Paläoproteomik gelang es uns tatsächlich, Eiweißfragmente aus dem Unterkiefer zu extrahieren. Frido Welker aus meiner Arbeitsgruppe verglich nun die Proteinbausteine mit der DNA der Denisovaner. Im Mai 2019 machte er eine passende Sequenz ausfindig. Erstmals hatten wir einen Denisovaner außerhalb der Denisova-Höhle entdeckt – 2000 Kilometer entfernt in Tibet!

Das Kieferstück von Xiahe löste noch ein weiteres Rätsel. Viele Tibeter tragen in ihrem Erbgut eine besondere Spielart des Gens *EPAS1*. Das von ihm codierte Protein erleichtert den Sauerstofftransport im Körper. Dank dieser Genvariante sind die Tibeter sehr gut an das Leben in der sauerstoffarmen Luft des Hochlands angepasst. Wie Paläogenetiker 2014 herausgefunden hatten, gehört *EPAS1* zu einer Hand voll von Genen, die asiatische Bevölkerungsgruppen von den Denisovanern geerbt hatten. Das erschien jedoch zunächst widersinnig, liegt die Denisova-Höhle doch lediglich auf einer Höhe von rund 700 Metern. Menschen, die dort lebten, brauchten keine Gene zur Höhenanpassung. Das Xiahe-Fossil führte endlich die losen Enden zusammen: Die genetische Selektion für dieses Merkmal hatte bei den Denisova-Menschen viel weiter südlich stattgefunden, am Rand des Himalajas.

Der Unterkiefer lüftete auch das Geheimnis um die Morphologie der Denisovaner – zumindest teilweise. Wir verglichen das denisovanische Knochenstück von Xiahe mit anderen in China gefundenen Fossilien. In vielen Merkmalen stimmte es mit einem weiteren halben Unterkiefer überein,

der in Penghu vom Grund des Chinesischen Meeres gefischt wurde, in der Meerenge zwischen Taiwan und dem Festland. Beide Fossilien sind ungefähr gleich groß und haben – im Unterschied zum Oberkiefer – keinen dritten Backenzahn, anders als wir es von der großen Mehrheit der archaischen Menschenformen kennen. Der Penghu-Unterkiefer hatte also sehr wahrscheinlich zu einem Denisova-Menschen gehört.

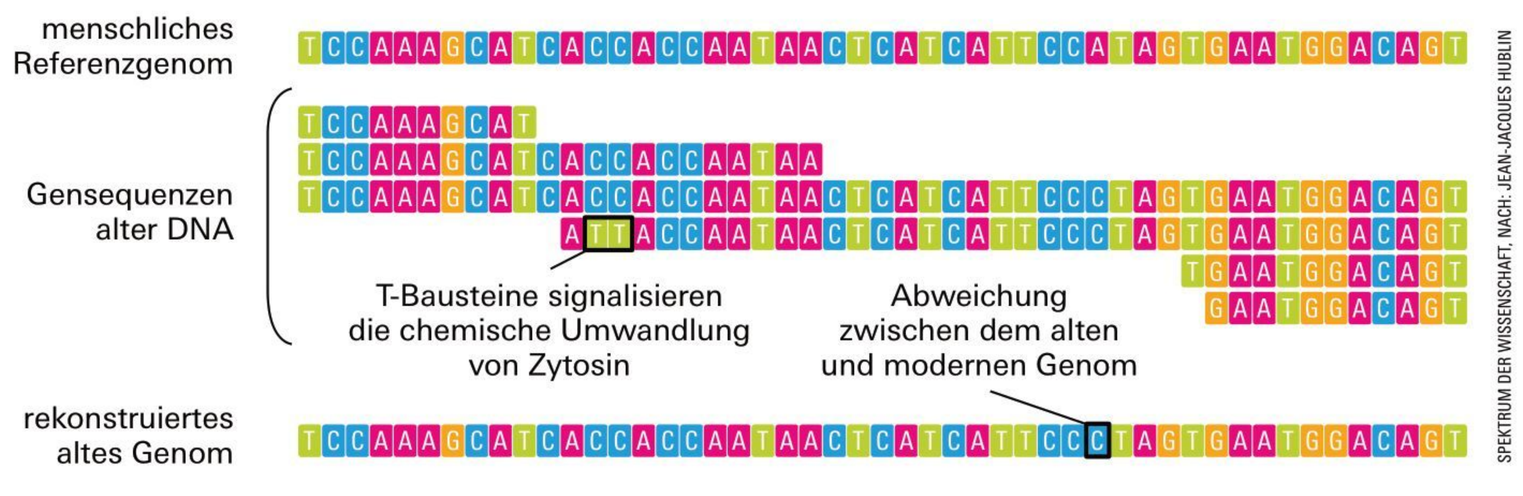
Bei den Backenzähnen sticht zudem ein besonderes Merkmal hervor: Der zweite Molar hat drei statt zwei Zahnwurzeln. Im heutigen Europa und Afrika ist dieser Sonderfall kaum verbreitet, aber bei zirka 40 Prozent der Chinesen und amerikanischen Ureinwohner – die ja aus Nordasien abgewandert waren – steckt ein zweiter Molar mit drei Wurzeln im Unterkiefer. Gut möglich, dass die Denisova-Menschen dieses Merkmal ebenfalls vererbt haben.

Wir entdeckten im Reich der Mitte noch weitere Riesenzähne: an der Fundstätte Xujiayao westlich von Peking. Das Alter dieser Zähne ist stark umstritten, die Datierung rangiert zwischen 260 000 und 370 000 Jahren. Es existieren zudem gut erhaltene Schädelfossilien, die ebenfalls Ähnlichkeiten mit dem Unterkiefer von Xiahe aufweisen. Was diese Fossilien gemeinsam haben, sind eine sehr große Schädelhöhle und Knochenmerkmale, die an den Neandertaler erinnern, sich aber auch deutlich von ihm unterscheiden. Dazu gehören die Schädelfragmente aus Lingjing in der Region Xuchang (Provinz Henan). Paläoanthropologen stellten die Fossilien 2017 der Öffentlichkeit vor und datierten sie auf 105 000 und 125 000 Jahre vor heute. Als Denisovaner kommt auch ein Schädel mit der Bezeichnung Maba 1 in Frage, der 1958 nahe der Stadt Shaoguan (Provinz Guangdong) entdeckt wurde. Das Alter: 130 000 bis

So funktioniert die Paläogenetik

1. Die Vorbereitung einer Knochenprobe

Die Paläogenetiker pulverisieren zunächst mit einem Bohrer einen kleinen Teil des Inneren eines fossilen Knochens. Das so gewonnene Bohrmehl enthält eine Mischung aus alter und junger, verunreinigender DNA. Der weitaus größte Teil stammt von Pilzen, Bakterien und anderen im Boden lebenden Mikroorganismen, die den Leichnam besiedelt und das weiche Gewebe zersetzt haben. Aber auch DNA von heutigen Menschen kann trotz aller Vorsicht am Fundort und im Umgang mit dem Fossil in die Probe geraten sein.



2. Die Extraktion der DNA

Das Bohrmehl gibt man nun in eine enzymhaltige Lösung, um das Knochenmaterial vollständig aufzulösen. Dann kommt das Gemisch in eine Zentrifuge, damit unlösliche Knochenreste von der DNA-haltigen Lösung getrennt werden. Danach mischen Genetiker ein Salz und einen Alkohol hinzu. Beides hilft, selbst die kleinsten DNA-Bruchstücke zu gewinnen. Das ist ein wichtiger Schritt, da im Lauf der Jahrtausende die alte DNA sehr stark fragmentiert wurde. Die Lösung wird anschließend durch eine Silikamembran gefiltert, in der die DNA hängen bleibt. Nun kommt die gereinigte DNA erneut in eine Lösung.

3. Die Aufbereitung der DNA-Fragmente

Die Paläogenetiker fügen der Lösung mit den DNA-Fragmenten »Adapter« hinzu. Diese hängen sich als Markierungen jeweils an den Anfang und das Ende eines DNA-Fragments. Die Adapter bestehen aus Oligonukleotiden, also kurzkettigen DNA-Bausteinen, die das Sequenziergerät später zweifelsfrei erkennt. Anschließend vervielfältigen die Genetiker die markierten DNA-Fragmente mit Hilfe eines Enzyms, das eine Vielzahl identischer Kopien herstellt. Der Prozess wird als »Polymerase-Kettenreaktion« oder »Polymerase Chain Reaction«, kurz PCR, bezeichnet. Nur wenn es gelingt, eine hinreichend große Anzahl von Kopien zu produzieren, ist das folgende Sequenzieren erfolgreich.

4. Das Sequenzieren

Die DNA-Fragmente werden nun in ein Sequenziergerät gegeben, das bei jedem Erbsubstanzschnipsel die Abfolge der DNA-Bausteine (Nukleotide) registriert. Eine Software gibt sie als Ketten aus den vier Buchstaben A, T, G und C wieder, die stellvertretend für die vier in den Nukleotiden enthaltenen Basen Adenin, Thymin, Guanin und Zytosin stehen.

5. Die Rekonstruktion der DNA

Leistungsstarke Computer vergleichen als Nächstes die erhaltenen kurzen DNA-Sequenzen mit ein oder zwei

240000 Jahre. Das Gleiche gilt für einen Schädel, der 1933 in den Sedimenten des Songhua-Flusses nahe der Stadt Harbin ans Licht kam. All diese Fossilien weisen dieselben Merkmale auf: ein großes Schädelvolumen und neandertalerähnliche Züge. Meines Erachtens sind sie alle Schädelreste von Denisova-Menschen.

Immer mehr Paläoanthropologen schließen sich unserer These an, dass ein großer Teil der chinesischen Menschenfossilien tatsächlich von Denisovanern stammen – allerdings von ihrer nördlichen Gruppe. Denn Paläogenetiker haben vor zwei Jahren hunderte Genome moderner Menschen nach den Einsprengseln von Denisovanern untersucht. Ihr Ergebnis: Nicht alle Asiaten tragen die gleichen Genvarianten der Denisovaner in ihrem Erbgut. Im Genom der heutigen Südostasiaten stecken beispielsweise keine Spuren der denisovanischen aDNA aus der namengebenden Höhle.

bekannten menschlichen Genomen, dem so genannten Referenzgenom (siehe Grafik links). Dabei rekonstruiert die Software auch Teile der alten DNA, da sich selbst bei unterschiedlichen Menschenformen die DNA-Sequenzen sehr stark ähneln. Um Verunreinigungen ausfindig zu machen, suchen die Computeralgorithmen in der alten DNA gezielt nach Fehlerstellen. Deren Ursache ist ein natürliches Phänomen: Die Nukleinbase Zytosin kann sich nämlich nach vielen Jahrtausenden in Uracil umwandeln. Das Sequenziergerät registriert das Uracil aber als vermeintliches Thymin. Wirft das Gerät nun an sehr vielen Stellen Thymin aus, an denen das Referenzgenom aber Zytosin aufführt, signalisiert das dem Forscher: Diese DNA ist tatsächlich sehr alt.

6. Die Identifikation einer Spezies

Eine weitere Software vergleicht schließlich das rekonstruierte Genom mit vielen anderen Erbgutsätzen. Gezielt suchen die Genetiker nach punktuellen Abweichungen – nach so genannten Single Nucleotide Polymorphisms, kurz SNPs (gesprochen: Snips). Je mehr solcher SNPs vorhanden sind, desto größer ist die Chance, dass die verglichenen Genome zu unterschiedlichen Menschenformen gehören.

Generell gibt es nur wenige SNPs bei Individuen, die ein und derselben Spezies angehören – innerhalb von *Homo sapiens* ist das nur bei etwa jedem 1000. DNA-Baustein der Fall. Die Genome von Mensch und Schimpanse hingegen unterscheiden sich ungefähr an jeder 100. Stelle. Vergleicht man die DNA des anatomisch modernen Menschen mit der eines Neandertalers oder Denisovaners, zeigt sich etwa an jeder 700. Stelle ein Unterschied. Auch die Genome von Neandertaler und Denisovaner sind verschieden genug, um sie tatsächlich als getrennte Menschenformen zu identifizieren. Und Gleiches gilt für die Nord- und die Südgruppe der Denisova-Menschen.

Aus den Genanalysen geht hervor, dass mindestens zwei geografisch voneinander getrennte Gruppen von Denisovanern existiert haben müssen, die sich schon vor rund 350000 Jahren voneinander getrennt hatten – also bereits relativ bald nach der Abspaltung der Denisova-Menschen von der Linie der Neandertaler, was nach aktuellem Wissensstand vor zirka 450000 Jahren geschehen war. Die nördliche Gruppe umfasste die Individuen aus der sibirischen Denisova-Höhle und einen großen Teil der Denisovaner auf dem Gebiet des heutigen China. Von der südlichen Gruppe hingegen sind Fossilien extrem spärlich gesät. Aus Südostasien kennen wir abgesehen von ein paar vermutlich menschlichen Zähnen praktisch keine Überreste, die sich den südlichen Denisovanern zuweisen ließen. Ihre Gruppe verrät sich allein durch die Einsprengsel in den Genomen heutiger Melanesier und australischer Ureinwohner. Diese weisen durchschnittlich vier Prozent Süd-Denisovaner-DNA auf. Die eingekreuzten Genvarianten sind unter den Menschen in Asien sonst unterschiedlich verteilt. Bei den heutigen Japanern und Chinesen etwa finden sich Spuren von beiden Denisova-Gruppen, die jeweils 0,1 Prozent beisteuerten.

Die Jagd nach Fossilien

Auch wenn das Aussehen der südlichen Denisovaner noch völlig im Dunklen liegt, so lässt sich zumindest eine plausible Überlegung dazu anstellen. Wenn beide Gruppen sich bereits von 350000 Jahren gebildet hatten, dann haben sie sich über einen sehr langen Zeitraum getrennt voneinander entwickelt. Eine Folge war möglicherweise, dass sich die Denisovaner des Nordens und des Südens äußerlich so sehr voneinander unterschieden wie beide ihrerseits von den Neandertalern.

Zurzeit konzentrieren wir unsere Forschungen vor allem auf die Fossilien und Fundstätten in China. Wir versuchen, die Denisovaner mit Hilfe der Paläoproteomik aufzuspüren, und prüfen, ob sich in den Knochen aDNA erhalten hat. Eine weitere, relativ neue Methode, die Kollegen vom Max-Planck-Institut in Leipzig entwickelt haben, kommt uns dabei zupass: der Nachweis von aDNA in Bodenproben. Denn DNA bleibt nicht nur in fossilen Knochen erhalten, sondern auch in Sedimenten. Selbst wenn ein Toter vollständig zerfallen ist oder ein altsteinzeitlicher Mensch in einer Höhle bloß seine Exkremente hinterließ, blieb seine DNA anschließend an bestimmten Bodenbestandteilen haften. Diese Spuren lassen sich nachweisen und einer Urmenschenform zuweisen. Paläoanthropologen arbeiten nun fieberhaft daran, in Süd- und Südostasien endlich auf Relikte der südlichen Denisovaner zu stoßen. Deren Aussehen ist ja weiterhin völlig unbekannt. Wir haben in Asien also noch etliche Geheimnisse zu lüften. ◂

QUELLEN

Bailey, S. E. et al.: Rare dental trait provides morphological evidence of archaic introgression in Asian fossil record, PNAS 116, 2019

Chen, F. et al.: A late Middle Pleistocene Denisovan mandible from the Tibetan Plateau. Nature 569, 2019

Jacobs, G. S. et al.: Multiple deeply divergent Denisovan ancestries in Papuans. Cell 177, 2019

INTERVIEW

»JEDER BESITZT ERBGUT VOM NEANDERTALER«



Seitdem Svante Pääbo, Paläogenetiker vom Leipziger Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie, das Erbgut des Neandertalers entziffert hat, wissen wir, dass immer noch Gene dieses Frühmenschen in uns schlummern. 2020 stieß seine Arbeitsgruppe auf einen überraschenden Zusammenhang: Bestimmte Genvarianten des Neandertalers sollen das Risiko für eine schwer verlaufende Corona-Erkrankung erhöhen. Was steckt dahinter?

spektrum.de/artikel/ 1848313

Herr Professor Pääbo, 1997 gelang es Ihnen, mitochondriale DNA eines Neandertalers zu entziffern. 2010 erfolgte die große Überraschung, als Sie im Erbgut der heutigen Menschen Spuren von Neandertalern nachgewiesen haben. Wie viele Genome von Neandertalern sind denn inzwischen bekannt?
Das hängt davon ab, wie man zählt: Wir haben drei Genome sequenziert, deren Qualität die von jetzt lebenden Menschen erreicht. Dann gibt es noch mindestens fünf andere Genome in niedrigerer Qualität sowie eine größere Menge, bei denen uns nur bruchstückhafte Informationen vorliegen. Aber mit den drei erstgenannten kann man wirklich gute Vergleiche anstellen so wie beim Erbgut von heutigen Menschen.

In der Zeitschrift »Nature« berichten Sie, eine Genvariante, die vom Neandertaler stamme, erhöhe das Risiko für einen schweren Verlauf von Covid-19. Wie kann ein altes genetisches Erbe den Krankheitsverlauf bei einer Infektion mit einem neuartigen Erreger beeinflussen?

Die Neandertaler lebten über eine halbe Million Jahre lang getrennt von den afrikanischen Vorfahren des anatomisch modernen Menschen. Dabei haben sie sich an Krankheitserreger genetisch angepasst, also an Viren und Bakterien, die in diesen Hunderttausenden von Jahren in Asien und Europa vorkamen. Wenn solche genetischen Neandertalervarianten bei jetzt lebenden Menschen auftauchen, beeinflussen sie manchmal immer noch die Antwort auf Pathogene. Und in der aktuellen Pandemie tragen nun einige von uns auf Chromosom 3 tragischerweise eine Neandertalervariante, die das Risiko stark erhöht, schwer zu erkranken, wenn man sich mit Sars-CoV-2 ansteckt. Wer eine Kopie dieser Variante entweder von der Mutter oder vom Vater geerbt hat, besitzt ein ungefähr doppelt so hohes Risiko, nach einer Infektion auf der Intensivstation zu landen. Bei zwei Kopien, also je einer von beiden Elternteilen, steigt das Risiko wahrscheinlich noch einmal an.

Wie sind Sie zu dem Ergebnis gekommen?
Wir arbeiten mit einem großen internationalen Konsortium zusammen, das genetische Risikofaktoren für Covid-19 untersucht. Dabei vergleichen wir Individuen, die schwer

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

PRÄZISIONSARBEIT
Max-Planck-Forscher Matthias Meyer isoliert im Reinlabor Erbgut vom Neandertaler.

erkrankten, mit solchen, bei denen nach einer Infektion nur sehr wenige Symptome auftraten. Die ersten Ergebnisse wurden im Juni 2020 veröffentlicht. Und da zeigte sich auf Chromosom 3 eine hohe Auffälligkeit in Bezug auf das Krankheitsrisiko. Wir haben die Region dann mit Neandertalererbgut verglichen und stellten dabei fest, dass Personen mit einem größeren Risiko dort ungefähr 50 000 Basenpaare tragen, die fast identisch sind zu denen von Neandertalern. Danach konnten wir zeigen, dass diese Variante tatsächlich von Neandertalern stammt und nicht von den gemeinsamen Vorfahren, die wir mit ihnen teilen. Weil das DNA-Stück so lang ist, muss es vor erst 50 000 bis 70 000 Jahren in unserem Erbgut aufgetaucht sein.

Wenn sich diese Genversion so lange gehalten hat, sollte sie für den Neandertaler einen Vorteil gehabt haben. Was könnte das sein?
Erst einmal möchte ich behaupten: Nicht alles muss einen Vorteil haben – es darf sich nur nicht zu negativ auswirken. Was die Genversion beim Neandertaler tat, wissen wir nicht. Beim modernen Menschen gab es sicherlich in der Vergangenheit Auswirkungen, weil die weltweite Verteilung äußerst ungewöhnlich ist: In Europa tragen ungefähr 16 Prozent der Bevölkerung eine oder zwei Kopien der Variante, in Südasien sind es 50 bis 60 Prozent. Da kommt sie demnach sehr häufig vor. Das deutet darauf hin, dass sie dort von Vorteil war und daher in der Häufigkeit stark zunahm. Vielleicht hatte das mit irgendeiner anderen ansteckenden Krankheit zu tun. In Ostasien, also in China oder Japan, fehlt diese Genversion völlig. Dort wurde sie wohl herausselektioniert. Wie sie sich genau auswirkt, versuchen wir und andere Wissenschaftler jetzt herauszufinden.

»Einige von uns tragen auf Chromosom 3 tragischerweise eine Neandertalervariante, die das Risiko stark erhöht, an Covid-19 schwer zu erkranken«

Sie haben die weltweite Verteilung der Genvariante angesprochen. Inwieweit deckt sich das mit der Verbreitung von schweren Covid-19-Verläufen?
Die Variante kann beeinflussen, wie viele Menschen an Covid-19 schwer erkranken. Es handelt sich hierbei jedoch nicht um den einzigen Faktor – noch nicht einmal um den wichtigsten. Das männliche Geschlecht ist ein weiterer Risikofaktor, aber das höchste Risiko für einen schweren Covid-19-Verlauf liegt im Alter. Allerdings wird es durch die Neandertalerversion erheblich gesteigert: Wenn ich eine Kopie geerbt habe, ist das Risiko so stark erhöht, wie wenn ich 10 bis 20 Jahre älter wäre. In Afrika gibt es im Vergleich zu anderen Teilen der Welt weniger schwere Verläufe. Da ist die Bevölkerung zwar einerseits viel jünger, aber darüber hinaus kommt diese Genvariante in Afrika, wo es ja keine Neandertaler gab, fast nicht vor.

Wenn die risikoreiche Variante in Afrika praktisch fehlt, wieso sind in den USA vor allem Afroamerikaner von schweren Verläufen betroffen?
Wie gesagt gibt es hier noch andere Einflüsse; die Variante trägt lediglich zum Risiko bei. Sozioökonomische Faktoren wie etwa der Zugang zur Krankenversorgung sind sicherlich viel wichtiger.

Welche weiteren Genversionen vom Neandertaler schlummern in unserem Erbgut?
Sehr viele. Jeder Mensch, dessen genetische Wurzeln außerhalb Afrikas liegen, besitzt Erbgut vom Neandertaler, aber individuell sehr unterschiedliche Teile. Schaut man sich die Sequenzen von einigen tausend Personen an, findet man insgesamt ungefähr die Hälfte des Neandertalergenoms; bei jedem einzelnen Individuum sind es jedoch nur ein oder zwei Prozent. So stießen wir 2020 auf eine Neandertalervariante, die das Schmerzempfinden beeinflusst, weil es einen Ionenkanal der entsprechenden Nervenzellen verändert. Wer diese Version trägt, reagiert empfindlicher auf Schmerz. Aber sie kommt nur sehr selten vor. Eine weitere Neandertalervariante, die wir ebenfalls 2020 entdeckten, wirkt sich auf den Rezeptor für das Hormon Progesteron aus. Sie schützt damit vor Fehlgeburten. Statistisch lässt sich sogar nachweisen, dass Personen mit dieser Genversion mehr Kinder haben. Es gibt also Neandertalervarianten, die sich positiv auswirken, während andere eher ungünstig sind. Etliche Versionen beeinflussen zudem unsere Immunabwehr.

Haben bestimmte Neandertalerversionen die geistige Entwicklung des jetzigen Menschen beeinflusst?
Vielleicht werden wir so etwa in Zukunft finden, aber bislang wissen wir nichts darüber.

Gibt es einen übergreifenden Zusammenhang zwischen den Genvarianten, die wir vom Neandertaler geerbt haben?
Nein, das würde ich nicht sagen. Ich glaube, das sind eher zufällige Bruchstücke, die jeder von uns mit Wurzeln außerhalb Afrikas trägt. Es gibt sieben große Bereiche im Genom, bei denen wir statistisch gesehen Beiträge vom Neandertaler erwarten würden, aber nichts finden. Vielleicht sind sie besonders wichtig für den modernen Menschen. Aber warum das so ist, wissen wir nicht.

Was hat umgekehrt der Neandertaler vom jetzigen Menschen übernommen?
Auch das wissen wir nicht genau. Es hat ja nur der moderne Mensch überlebt. Wir können also lediglich in unserem Genom nach Beiträgen des Neandertalers suchen. Die Neandertaler haben sich erst sehr spät in ihrer Geschichte mit modernen Menschen gemischt. Um herauszufinden, welche Anteile in die andere Richtung gingen, bräuchten wir die Überreste eines Neandertalers, der so spät gelebt



KARSTEN MÖBIUS

Prof. Dr. Svante Pääbo (rechts)

gilt als Begründer der Paläogenetik. Der gebürtige Schwede studierte Ägyptologie, Russisch, Wissenschaftsgeschichte und Medizin an der Universität Uppsala und wurde hier 1986 mit einer Arbeit über molekulare Immunologie promoviert. Bereits als Doktorand untersuchte er DNA von ägyptischen Mumien, die unter anderem aus dem Pergamon-Museum in Ostberlin stammten. Nach seiner Habilitation 1990 folgte er einem Ruf als Professor für Allgemeine Biologie an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Seit 1997 leitet er als Direktor die Abteilung für Evolutionäre Genetik des neu gegründeten Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig; 1999 folgte die Ernennung zum Honorarprofessor für Genetik und Evolutionsbiologie der Universität Leipzig.

hat, dass seine Vorfahren moderne Menschen treffen konnte. In den wenigen solch späten Neandertalern, die wir bis jetzt untersucht haben, sind wir nicht auf einen genetischen Beitrag von modernen Menschen gestoßen. Es gibt zwar Hinweise, dass es vor etwa 200 000 Jahren geringe genetische Beiträge des modernen Menschen zum Neandertaler gab. Aber wir haben keine Ahnung, wie sich diese funktionell auswirkten.

Haben sich Neandertaler und moderner Mensch denn mehrmals vermischt?
Ein großer Teil dieser Vermischungen muss früh passiert sein, als der moderne Mensch Afrika verlassen hat, weil alle Menschen außerhalb Afrikas Neandertalererbgut tragen. Bei einem 40 000 Jahre alten Fossil eines anatomisch modernen Menschen, das man in Rumänien gefunden hat, konnten wir aber einen Neandertalervorfahren vor vier bis sechs Generationen nachweisen. Vermischungen haben also auch lokal stattgefunden. Inzwischen sind noch andere, zum Teil unveröffentlichte Daten hinzugekommen, die zeigen, dass das öfters passierte.

»Würden Neandertaler heute in einem Zoo leben oder in unseren Vorstädten? Das wissen wir nicht«

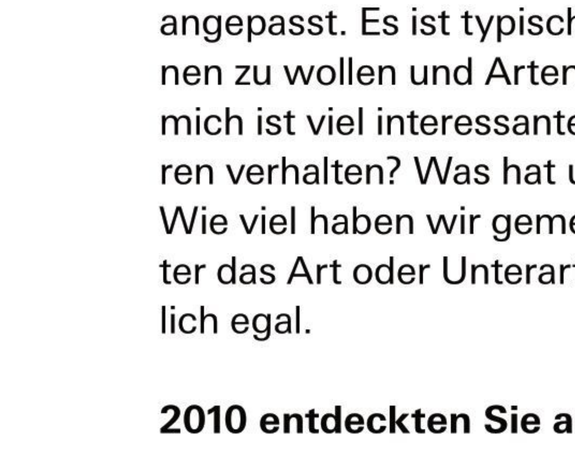
Warum ist Ihrer Meinung nach der Neandertaler ausgestorben?
Das ist noch völlig unklar. Allerdings ist es natürlich bemerkenswert zu beobachten, wie sich verschiedene Genomabschnitte in einer Pandemie wie der jetzigen auswirken. So liegt zum Beispiel auf Chromosom 12 ein Bereich, den wir vom Neandertaler geerbt haben, der uns vor einem schweren Covid-19-Verlauf schützt. Aber der Effekt ist bescheiden, er verringert das Risiko lediglich um ungefähr 20 Prozent. Im Gegensatz dazu steigt das Risiko bei der vorhin erwähnten Neandertalervariante auf Chromosom 3 um 100 Prozent, es verdoppelt sich also. Ende 2020 haben wir außerdem noch auf Chromosom 2 einen Neandertalerbeitrag gefunden, der das Risiko ebenfalls zu vergrößern scheint. Insofern könnte man spekulieren: Ein Neandertaler, der zwei Kopien des Risikogens auf Chromosom 3 und auch andere Risikovarianten besaß, hätte wahrscheinlich ein hohes Risiko, schwer an Covid-19 zu erkranken. Das zeigt zumindest, dass Infektionskrankheiten eine Rolle gespielt haben könnten. So war es auch in Amerika, dessen ursprüngliche Bevölkerung 30 000 Jahre lang isoliert gelebt hatte und sich an die dort existierenden Krankheitserreger einigermaßen angepasst hatte. Als dann die Europäer kamen, brachten sie neue Keime mit, was sich verheerend auf die dortigen Menschen auswirkte. So etwas Ähnliches könnte passiert sein, als Neandertaler und moderner Mensch aufeinanderstießen.

Wenn wir uns in einem Gedankenexperiment vorstellen, es gäbe heute noch Neandertaler: Welche gesellschaftliche Rolle würden sie spielen?
Es ist tatsächlich interessant, darüber zu spekulieren. Es ist ja nicht so lange her, dass es Neandertaler gab, vielleicht 1200 Generationen. Würden sie heute in einem Zoo leben oder in unseren Vorstädten? Das wissen wir nicht. Vielleicht gäbe es einen noch schlimmeren Rassismus gegen Nean-

dertaler als der, den wir heute gegen fremde Menschen erleben, weil sie sich ja wirklich von uns in mancherlei Hinsicht unterschieden. Andererseits könnte eine andere Menschenform, mit der wir etliche Dinge wie etwa Kultur teilen, dazu führen, die absolute Trennung zwischen Tier und Mensch aufzuweichen. Die meisten von uns empfinden einen ganz klaren Unterschied zwischen uns und den Tieren. Wäre der Mensch diverser, wäre das vielleicht anders. Ich finde es manchmal faszinierend, darüber nachzudenken.

Der anatomisch moderne Mensch und der Neandertaler galten lange als zwei verschiedene Arten namens *Homo sapiens* und *Homo neanderthalensis*. Wenn sie aber fruchtbare Nachkommen erzeugen konnten, widerspricht das dem biologischen Artkonzept. Kann man dennoch von der Spezies Neandertaler sprechen?
Ehrlich gesagt vermeide ich lieber diese Frage. Ich empfinde das als eine akademische, sterile Diskussion. Es gibt keine Artdefinition, die für alle Gruppen von Tieren oder Hominiden zutrifft. Eine häufige Definition ist der von Ihnen erwähnte biologische Artbegriff, nach dem es sich um eine Art handelt, wenn zwei Gruppen fruchtbare Nachkommen erzeugen. Demnach wären Neandertaler und moderner Mensch ganz klar dieselbe Art. Aber man kann einwenden: Wie sieht es bei Braunbären und Eisbären aus? Sie können fruchtbare Nachkommen haben, wenn sie sich treffen. Gehören sie deshalb zur selben Art? Das wäre doch etwas seltsam. Schließlich sehen sie anders aus, sie verhalten sich anders, und sie sind an unterschiedliche Umweltfaktoren angepasst. Es ist typisch menschlich, alles in Fächer einordnen zu wollen und Arten von Unterarten zu trennen. Für mich ist viel interessanter: Wie haben sich unsere Vorfahren verhalten? Was hat uns voneinander unterschieden? Wie viel haben wir gemeinsam? Ob dann irgendein Gelehrter das Art oder Unterart nennen möchte, ist mir eigentlich egal.

2010 entdeckten Sie anhand genetischer Spuren eine weitere Form des Menschen: den Denisovaner. Bislang gibt es hierzu noch keine Artbeschreibung. Lässt sich eine biologische Spezies allein auf Grund genetischer Daten begründen?
Anhand der bisher bekannten genetischen Funde können wir abschätzen, dass sich die Denisovaner vor schätzungsweise 400 000 Jahren von den Neandertalern getrennt haben. Handelt es sich dann um eine andere Art? Ich nenne



FLASHMOVIE / STOCK.ADOBE.COM

Mehr Wissen auf Spektrum.de
Unser Online-Dossier zum Thema finden Sie unter
spektrum.de/t/die-genome-der-arten



BENCE VIOLA, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

HEIMAT DER DENISOVANER
In der südsibirischen Denisova-Höhle stießen Forscher auf menschliche Überreste, die zu einer ausgestorbenen Menschenform gehören.

sie lieber wie Sie eine andere Form oder Gruppe des Menschen.

Jetzt möchten wir natürlich gerne wissen, wie der Denisovaner ausgesehen hat? Hierzu gibt es bereits Rekonstruktionsversuche am Computer. Was halten Sie von solchen Ansätzen?
Nicht viel. Wenn Sie zum Beispiel versuchen, mein Äußeres aus meinem Genom zu rekonstruieren, wird das Ergebnis ziemlich danebenliegen. Das wird natürlich noch schwieriger, wenn Sie die Auswirkungen von Variationen innerhalb der Gruppe nicht kennen. Schaut man sich beim jetzt lebenden Menschen die DNA-Beiträge von Neandertalern an, die die Hautfarbe beeinflussen, gibt es Varianten, die sowohl zu dunkler als auch zu heller Haut führen. Das deutet darauf hin, dass der Neandertaler wahrscheinlich genauso wie wir unterschiedliche Hautfarben hatte. Deswegen halte ich wenig von solchen Rekonstruktionen. Wir müssen eher hoffen, dass Paläontologen irgendwann einige gut erhaltene Skelette finden.

Wie viele menschliche Formen gab es noch außer den Denisovanern und den Neandertalern, als der anatomisch moderne Mensch Afrika verließ?
Von Skeletten von der indonesischen Insel Flores wissen wir, dass hier eine kleinwüchsige Gruppe lebte, die manchmal als »Hobbits« bezeichnet werden. Und in Afrika existierten mehrere, unterschiedliche Menschenformen



BENCE VIOLA, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE

wie zum Beispiel die Funde aus der südafrikanischen Höhle Rising Star. Wir kennen also mindestens vier oder fünf andere Gruppen, vielleicht gab es mehr.

Nach der so genannten Out-of-Africa-Hypothese stammt die gesamte heutige Menschheit von Auswanderern des *Homo sapiens* aus Afrika ab. Wenn sich menschliche Formen in Europa und Asien erfolgreich vermischten, ist die Out-of-Africa-Hypothese dann noch haltbar?
Absolut gesehen stimmt die Out-of-Africa-Hypothese nicht mehr. 98 Prozent meines Genoms kommt aus Afrika, aber zwei Prozent habe ich von früheren Formen aus Europa übernommen. Doch im Großen und Ganzen gilt natürlich immer noch, dass der moderne Mensch aus Afrika stammt.

Sie arbeiten als Biologe, haben jedoch auch Ägyptologie studiert. Sie kennen also beide Seiten: Naturwissenschaft und klassische Archäologie. Welche Probleme treten bei der Zusammenarbeit dieser Disziplinen auf?
Insgesamt stellt die Zusammenarbeit eine große Bereicherung dar. Wenn man wie wir die genetische Geschichte und die DNA von alten Überresten untersucht, ist man auf die Funde der Archäologen und Paläontologen angewiesen, die uns ja erst unsere Untersuchungen ermöglichen. Wir können dann die genetische Seite der Geschichte erhellen, die sich anhand von Fossilien und Artefakten nicht klären lässt. Dabei handelt es sich natürlich nur um einen Aspekt der Geschichte der Menschheit – und der ist vielleicht gar nicht der wichtigste. Wenn ich zum Beispiel nach Griechenland fahre, berührt es mich sehr, den Ursprung meiner Kultur und der Demokratie zu sehen, obwohl meine genetischen Vorfahren sicherlich keine Griechen waren. Das zeigt doch,

»Absolut gesehen stimmt die Out-of-Africa-Hypothese nicht mehr«

dass die kulturelle Geschichte für mich als Individuum eigentlich viel wichtiger ist als die genetische. Die Genetik trägt also dazu bei, einige Aspekte unserer Vergangenheit zu verstehen. Insofern ist das eine äußerst fruchtbare Zusammenarbeit zwischen Genetikern und Archäologen. Auf der anderen Seite können sich manche Kollegen bedroht fühlen, wenn eine neue Methode auftaucht, statt sie als Bereicherung zu sehen. Das kommt immer wieder vor. Das war auch so, als die Kohlenstoffdatierung kam. Einige Wissenschaftler hat es da sehr gestört, dass sich ihre Lieblingstheorien als falsch entpuppten.

Zu Beginn Ihrer Karriere haben Sie Erbgut aus ägyptischen Mumien isoliert. Gibt es neue genetische Erkenntnisse über Mumien seit Ihrem damaligen Durchbruch?
Das kommt jetzt langsam wieder in Fahrt. Es ist meist ziemlich schwierig, DNA aus ägyptischen Mumien zu gewinnen, weil das Klima so heiß ist. Johannes Krause, Direktor am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie hier in Leipzig, hat inzwischen einige Mumien untersucht und wird dazu mehrere Daten veröffentlichen. Das wird sicherlich interessante Erkenntnisse zum Beispiel dazu liefern, welche Gruppen die ägyptische Kultur begründet haben.

Woran arbeiten Sie jetzt?
Wir haben uns intensiv mit den coronarelevanten Varianten von Neandertalern beschäftigt. Nun versuchen wir, sie auch funktionell zu verstehen: Was unterscheidet die Neandertalervariante auf Chromosom 3 von der schützenden Version? Wie werden dort die Gene exprimiert? Die Sequenzierung alter Genome überlasse ich inzwischen mehr und mehr meinen Kollegen. Ich habe noch sieben Jahre bis zu meiner Emeritierung, und die Zeit will ich nutzen, um mich verstärkt auf solche funktionellen Fragen zu konzentrieren. ◂

Das Gespräch führte »Spektrum«-Redakteur **Andreas Jahn**.

QUELLEN

Zeberg, H., Pääbo, S.: The major genetic risk factor for severe COVID-19 is inherited from Neanderthals. Nature 587, 2020

Zeberg, H., Pääbo, S.: A genomic region associated with protection against severe COVID-19 is inherited from Neandertals. PNAS 118, 2021

Die nächste Ausgabe dieser Reihe ist ab 20. 1. 2023 im Handel.

DR. TECHNIK

Schon immer setzten Medizinerinnen und Mediziner technische Hilfsmittel ein, um ihren Patienten zu helfen. So dürfte in kaum einer Orthopädiepraxis eine Röntgenröhre fehlen, deren physikalische Grundlage bereits im 19. Jahrhundert zufällig entdeckt wurde. Seit dem schritt die Technik rapide voran. Chirurgen verlassen sich auf Kollege Roboter, Dentisten kreieren künstliche Zähne, und der Siegeszug der RNA-Impfstoffe während der Corona-Pandemie demonstriert eindrücklich, wie sich mittels moderner Biotechnologie die ärztliche Kunst unterstützen lässt.



SIMONKR / GETTY IMAGES / ISTOCK (SYMBOLBILD MIT FOTOMODELL)

THEMEN SIND UNTER ANDEREM:

KÜNSTLICHES GEBISS

Durch Nachahmung der Natur versuchen Forscher, geeigneten Zahnersatz zu entwickeln – etwa aus Hydroxylapatit mit der gleichen 3-D-Struktur und den gleichen mechanischen Eigenschaften wie bei natürlichen Zähnen.

AUFSTIEG DER RNA-IMPFSTOFFE

In der Covid-19-Pandemie sind erstmals RNA-Vakzine in großem Stil entwickelt worden. Neu sind sie aber nicht: Ihre Erforschung begann vor rund 35 Jahren. Der Weg zum Durchbruch war lang und steinig.

BIOLOGIE MIT DURCHBLICK

Im Labor lassen sich Organe durchsichtig machen, indem man Lipide und andere Stoffe aus dem Gewebe entfernt und das Wasser durch eine Lösung mit definiertem Brechungsindex ersetzt. Das erlaubt es, die zelluläre Struktur ganzer Körperteile abzubilden.

NEWSLETTER

Möchten Sie über Themen und Autoren jedes neuen Hefts informiert sein?
Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

spektrum.de/newsletter

Jetzt **Spektrum** SPEZIAL **BMH** abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!



Schon jetzt an Weihnachten denken und ein **ABO VERSCHENKEN**

Sie haben die freie Wahl

Ob Print, digital oder beides in Kombination: 4 Ausgaben im Jahresabo – für Sie selbst oder als Geschenk. Mit einem Abo profitieren Sie zudem von den exklusiven Vorteilen und Angeboten von **Spektrum** PLUS – wie kostenlosen Downloads, Vergünstigungen und Redaktionsbesuchen.

Jetzt bestellen:
Telefon: 06221 9126-743
E-Mail: service@spektrum.de
Spektrum.de/aktion/bmhabo

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

DAS WÖCHENTLICHE DIGITALE WISSENSCHAFTSMAGAZIN

App und PDF als Kombipaket im Abo.



Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung.
Im monatlich kündbaren Abonnement € 0,92 je Ausgabe; ermäßigt sogar nur € 0,69.
Jetzt abonnieren und keine Ausgabe mehr verpassen!

Spektrum.de/aktion/wocheabo

UNSPLASH / RAMIN KHATIBI (UNSPLASH.COM/PHOTOS/HHASMKXL89C)