

Rechts die 3-D-Rekonstruktion eines Neandertaler-Schädels, basierend auf der computertomografischen Aufnahme des Original-Schädels aus dem Musée de l'Homme in Paris. Auch im Inneren des Schädels versteckte Details wie das Innenohr (violett) werden sichtbar. Links ein Gipsmodell desselben Neandertaler-Schädels, hergestellt mit einem 3-D-Drucker.

Geschichte, die in den Knochen steckt

LEIPZIGER ANTHROPOLOGEN ARBEITEN AN EINER VIRTUELLEN SAMMLUNG FRÜHMENSCHLICHER FOSSILIEN

Das wird die anthropologische Forschung vollkommen verändern.“ Jean-Jacques Hublin springt aus dem Sessel, auf dem er eben erst Platz genommen hatte, geht zum Fenster und weist in den Hof: „Sehen Sie den Container dort unten? Damit können wir einen der hochauflösendsten Computertomografen rund um die Welt transportieren und die einzigartigen Fundstücke vor Ort einscannen.“

Die Objekte müssen nicht zum Scanner gebracht werden, sondern der Scanner kommt zum Objekt.“

Wollen Paläoanthropologen die Anfänge des Menschen erforschen, sind sie auf Knochenfunde angewiesen. Allerdings gehören versteinerte Hominiden zu den seltensten Funden überhaupt. Und wenn ein Museum erst einmal einen solchen Schatz besitzt, wird der zu einem gut ge-

hüteten Geheimnis. Die besonders wichtigen Stücke, die alle Forscher gerne mal im Original vor sich hätten, gibt es bestenfalls als Gipsabdruck. „Aber Abgüsse sind nicht wirklich genau genug und manche Knochen auch viel zu brüchig, um davon einen Abguss herzustellen“, sagt Hublin. Aber das soll sich nun ändern. Die Vision des Forschers: eine virtuelle Sammlung anzulegen

und damit die einzigartigen frühmenschlichen Knochenfunde für alle verfügbar zu machen. Deshalb ist der Franzose 2004 nach Leipzig gekommen, an das Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie.

„Unser Forschungsfeld ist heute multidisziplinär“, erklärt der 54-Jährige. „Wir beschränken uns nicht mehr auf die Beschreibung der Knochenfunde, sondern wir versuchen mit bio-

chemischen Methoden, Sequenzanalysen und Computertechnik mehr aus den Knochen herauszulesen und so etwas über die Lebensweise, die Lebensbedingungen und den Lebensverlauf der Frühmenschen zu erfahren.“

Daher war es für den an der Universität Bordeaux lehrenden Anthropologen eine einzigartige Chance, als ihm die Max-Planck-Gesellschaft vor drei Jahren anbot, am Leipziger

Institut eine Abteilung für *Human Evolution* aufzubauen. Jean-Jacques Hublin hat viele Studienaufenthalte an den paläoanthropologischen Sammlungen der Welt absolviert und gehört zu den besten Kennern hominider Fossilien. Während er sich in seinem Büro wieder hinsetzt und ein Glas Wasser eingießt, schwärmt er von den neuen Möglichkeiten, vor allem der Computertomografie. ▶

FOTOS: L.V.: VOLKER STEIGER / RE.: MPI FÜR EVOLUTIONÄRE ANTHROPOLOGIE



In der Medizin zählt diese Technik zu den diagnostischen Standardwerkzeugen. Doch lässt sie sich prinzipiell auch zur Untersuchung fossiler Knochen einsetzen. Das Funktionsprinzip ist dasselbe: Eine rotierende Röntgenquelle durchleuchtet das Objekt schichtweise aus verschiedenen Richtungen, wobei der Röntgenstrahl – abhängig von der Dichte der Strukturen – unterschiedlich stark abgeschwächt wird. Die gegenüberliegenden Detektoren empfangen dieses abgeschwächte Signal, bereiten es elektronisch auf und leiten es an einen Computer zur Auswertung weiter. Von der jeweils selben Schicht entstehen auf diese Weise verschie-

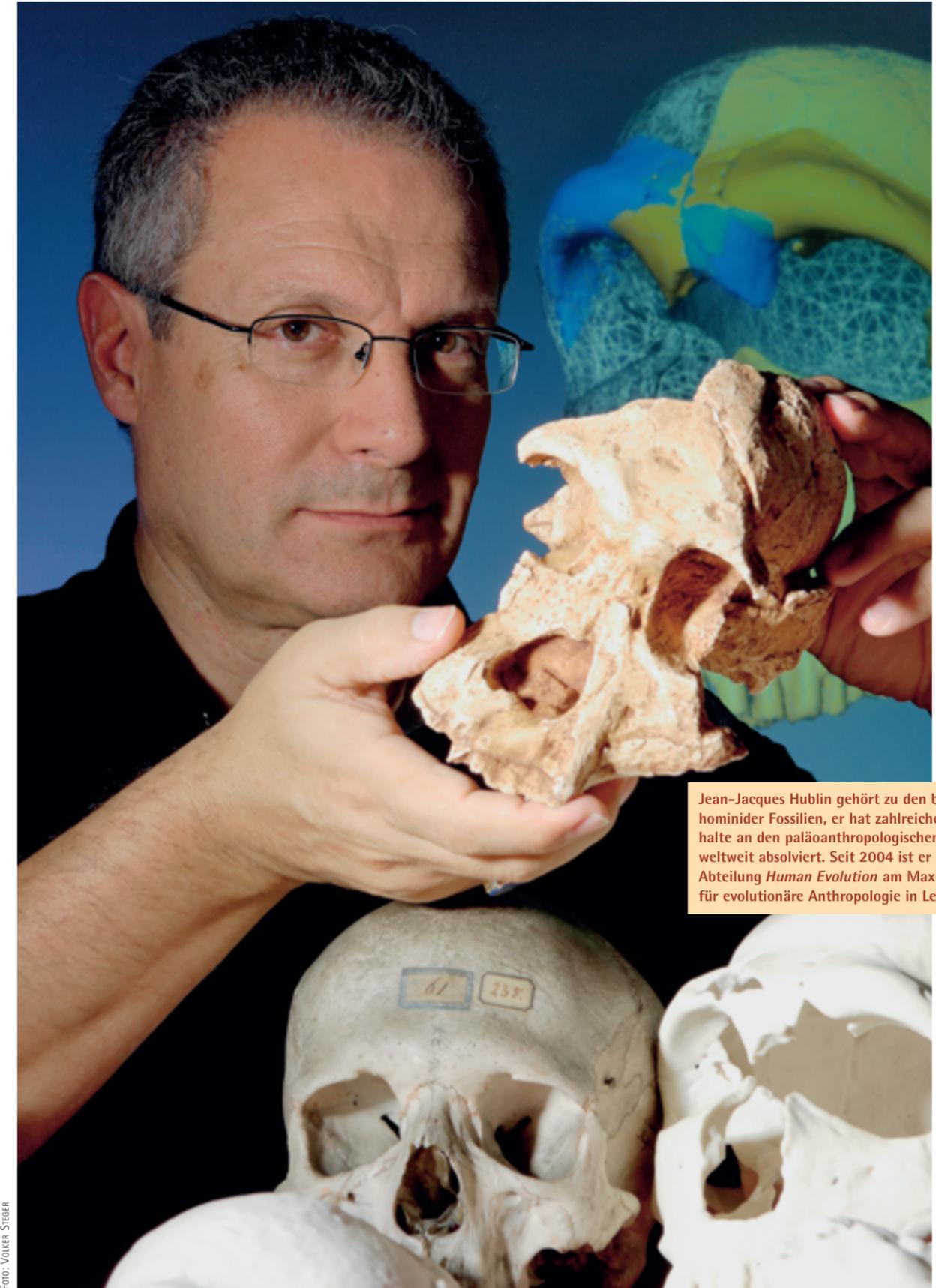
dene Ansichten (Projektionen), die der Computer schließlich zu einem Graustufenbild umrechnet.

Allerdings ist die Auflösung medizinischer CT-Geräte nicht sonderlich hoch. „Ein Arzt benötigt für die Diagnose keine räumlich hochaufgelösten Bilder, ein Millimeter ist für ihn vollkommen ausreichend“, sagt Jean-Jacques Hublin. Darüber hinaus sind medizinische Geräte für eine schnelle Datenaufzeichnung ausgelegt – der Patient soll der schädigenden Röntgenstrahlung nur möglichst kurz ausgesetzt werden. Für die Untersuchung frühmenschlicher Knochen benötigen die Wissenschaftler jedoch detailliertere CT-Aufnahmen. „Inzwischen gibt es CT-Geräte für die Autoindustrie, die eine Auflösung im Bereich von Mikrometern liefern“, erklärt der Anthropologe. Und die Verweildauer der fossilen Knochen im Tomografen ist auch nicht limitiert – schädliche Röntgenstrahlung müssen die Jahrtausende alten Hominiden nicht mehr fürchten.

AUFLÖSUNG UNTERHALB DER MIKROMETER-GRENZE

Zwei Computertomografen gibt es am Leipziger Institut: Der BIR ACTIS 225/300 erreicht eine Auflösung von einem Millimeter bis fünf Mikrometer, der Skyscan 1172 schafft sogar 0,8 Mikrometer. „Weltweit existieren nur vier CT-Scanner mit solch einer hohen Auflösung“, sagt Hublin nicht ohne Stolz. „Damit können wir auch kleinere Strukturen, wie zum Beispiel den Zahnschmelz, analysieren.“ Und daraus lassen sich dann Aussagen über die Wachstumsraten von Hominiden ableiten.

Der BIR ACTIS steht im vierten Stock in einem separaten Raum. Zehn Millimeter Blei in Wänden, Decke und Boden schützen die Umgebung vor den Röntgenstrahlen. Neun Tonnen bringt das Ganze auf die Waage. Im Bedienungsraum davor packen Heiko Temming und Andreas Winzer Kabel und Computer zusammen – Vorbereitung für die Reise nach Marokko, die der CT in den nächsten Tagen antreten soll. Das



Jean-Jacques Hublin gehört zu den besten Kennern hominider Fossilien, er hat zahlreiche Studienaufenthalte an den paläoanthropologischen Sammlungen weltweit absolviert. Seit 2004 ist er Direktor der Abteilung *Human Evolution* am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig.



Start in Leipzig: Ein Kran hievt den Container auf einen bereitstehenden Lastwagen. Im Innern des Containers befindet sich der Computertomograf. Fest verschraubt tritt er seine Reise nach Marokko an, wo er etwa eine Woche später ankommt. Hier bekommt er einen Platz direkt neben dem kleinen archäologischen Museum von Rabat.



FOTOS: ANDREAS WINZER



FOTO: VOLKER STEIGER



mannshohe Gerät besitzt Rollen, auf denen es sich relativ problemlos bewegen lässt. Winzer montiert den empfindlichen Messarm ab und verstaut ihn separat. Dann wird der CT mit vereinten Kräften ins Erdgeschoss gefahren und von dort in den Hof hinter dem Institutsgebäude, wo besagter Container bereitsteht.



Hinter den unscheinbaren grauen Stahlwänden verbirgt sich ebenfalls ein bleiummantelter Röntgenraum, in den der Super-Scanner exakt hineinpasst. Fest verschraubt tritt er zusammen mit der stoßfest in Kisten verpackten Computerausrüstung seine Reise an. Am frühen Morgen des 3. Oktober 2006 hievt ein Lastkran den Container auf einen Lkw. Dann geht es auf die 1387 Kilome-



Rabat ist die Hauptstadt Marokkos. Die Franzosen machten sie während ihres Protektorats Mitte des 20. Jahrhunderts zur Verwaltungshauptstadt und Generalresidenz. Der enge Zeitplan von Andreas Winzer und Heiko Temming (im Bild unten links und Mitte) erlaubt jedoch nur einen kurzen Abstecher in die alte Königsstadt.

FOTOS: ANDREAS WINZER



ter lange Strecke von Leipzig nach Marseille, drei Tage dauert die Fahrt bis nach Südfrankreich. Am Mittelmeer heißt es umladen: Die Fähre bringt die wertvolle Fracht in anderthalb Tagen an die nordwestafrikanische Küste, Ziel: Rabat, die Hauptstadt Marokkos.

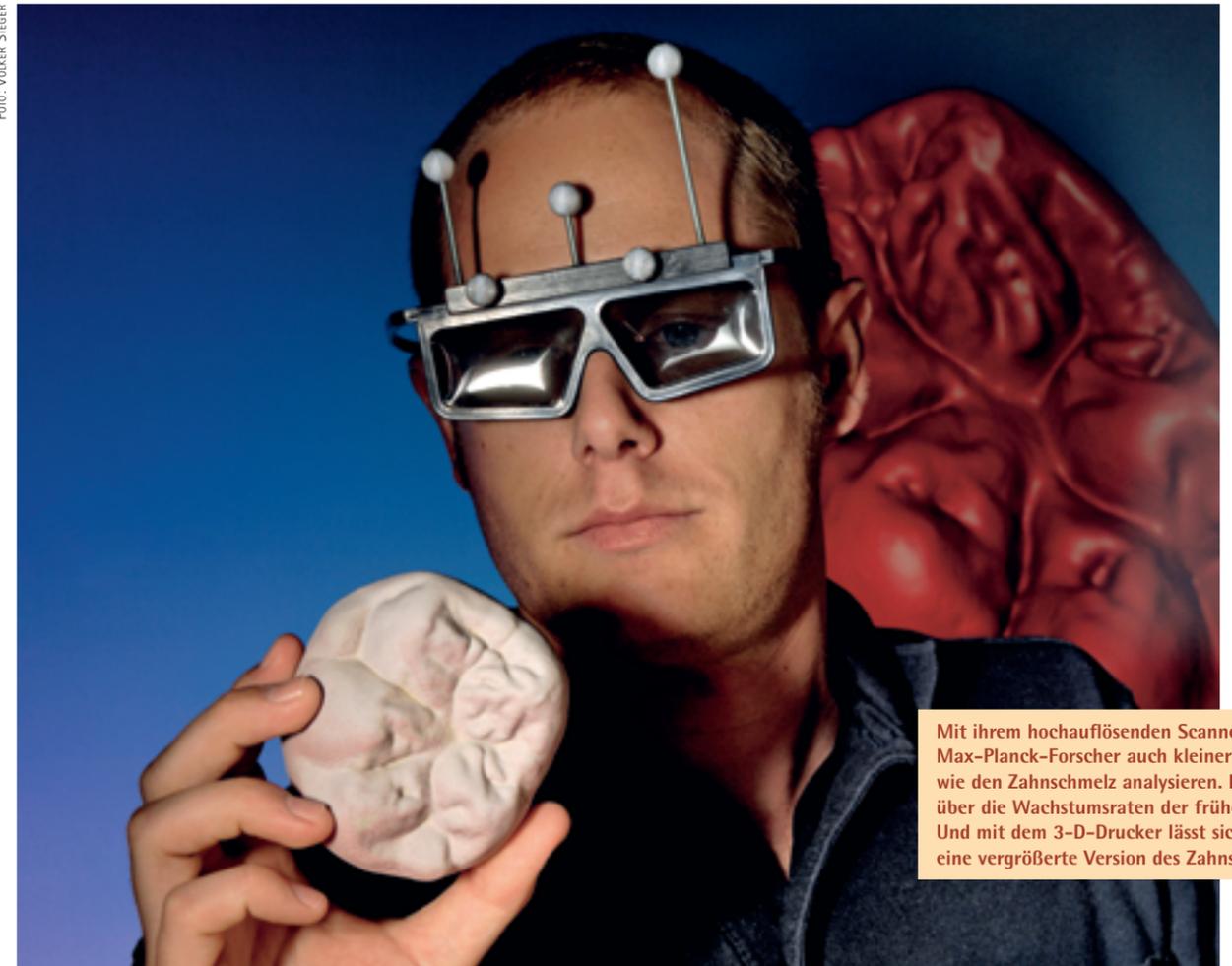
Inzwischen haben sich auch Heiko Temming und Andreas Winzer auf den Weg gemacht, allerdings mit dem Flugzeug von Leipzig nach Paris und dann weiter nach Casablanca. Hier werden sie mit dem Wagen abgeholt und nach Rabat gebracht. Der Lkw mit dem Schiffscontainer kommt erst am späten Abend an. Der Kran steht schon bereit, das Abladen dauert bis Mitternacht und lockt auch ein paar Schaulustige an. Der Container bekommt einen Platz direkt neben dem kleinen archäologischen Museum. Das Einzige, was die beiden Leipziger Techniker jetzt noch brauchen, ist ein Stromanschluss für die Klimaanlage. Ihr Hotel liegt direkt vis-à-vis, das sorgt für kurze Wege und spart Zeit.

RARITÄTEN IM PAPPKARTON VERSTAUT

Die nächsten drei Tage verbringen Temming und Winzer mit dem Kalibrieren des hochempfindlichen Messgeräts. Erst dann kann die eigentliche Arbeit beginnen: das Einscannen der Knochen – sechs Schädel, sechs Unterkiefer sowie diverse Schädelfragmente, insgesamt 30 Fundstücke. Obwohl das kleine archäologische Museum von außen recht unscheinbar wirkt, birgt es doch in seinem Innern eine wertvolle Sammlung von Hominidenknochen. Es könnte sich um die Überbleibsel jener Urmenschen handeln, die Afrika vor etwa 200 000 Jahren verließen und die sogenannte Gründerpopulation auf dem europäischen Kontinent bildeten. Deshalb wecken diese Knochen das Interesse von Hublin und seinem Team.

Die Knochen befinden sich – ob schon Raritäten – nicht in einem Panzerschrank, sondern nur in einfachen Pappkartons. Ein Museums-

FOTO: VOLKER STEIGER



Mit ihrem hochauflösenden Scanner können die Max-Planck-Forscher auch kleinere Strukturen wie den Zahnschmelz analysieren. Er gibt Auskunft über die Wachstumsraten der frühen Hominiden. Und mit dem 3-D-Drucker lässt sich dann sogar eine vergrößerte Version des Zahns herstellen.

mitarbeiter trägt sie zum Container hinüber. Behutsam nimmt Andreas Winzer einen Schädel aus dem Karton und platziert ihn auf dem Messtisch. Sorgfältig justiert er den Scanner. Dann verlässt er den Röntgenraum und überprüft am Computer die Einstellungen. Der Marokkaner, der ihm den Pappkarton gebracht hat, lässt den Schädel hinter der Bleitür keine Sekunde aus den Augen. Und so haben Temming und Winzer ständig Gesellschaft in ihrem ohnehin schon beengten Container.

Die Verständigung ist mühsam, denn die Marokkaner sprechen kaum Englisch. Mit Französisch käme man da schon weiter, denn Französisch ist zweite Amts- und Verkehrssprache. Schließlich war Marokko von Anfang bis Mitte des 20. Jahrhunderts unter französischem Protektorat, ins-

gesamt 44 Jahre lang. Die Franzosen machten Rabat zur Verwaltungshauptstadt und Generalresidenz und bauten sie großzügig aus. Die Villenviertel und Verwaltungszentren aus dieser Zeit prägen noch heute das Stadtbild. Leider sprechen weder Temming noch Winzer mehr als ein paar Worte Französisch.

REKONSTRUKTION SPRENGT DATENSPEICHER

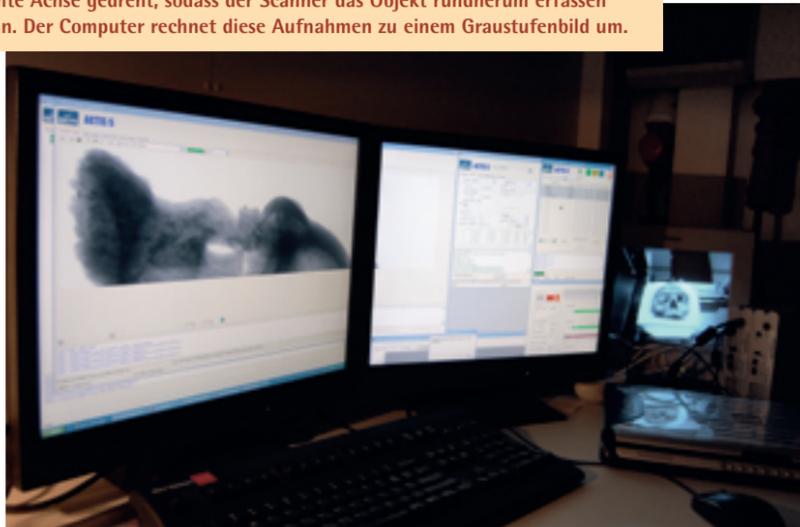
„Um einen kompletten Schädel einzuscannen, benötigt das CT-Gerät vier bis sechs Stunden“, erklärt Heiko Temming. Dabei wird der Messtisch mit dem Schädel um seine senkrechte Achse gedreht, sodass der Scanner das Objekt rundherum erfassen kann. Pro Rotation entstehen etwa 7000 Einzelbilder, insgesamt mehr als 70000. „Das sind riesige Datenmengen“, sagt Temming. „Bei

einem kompletten Schädel umfasst der Datensatz etwa 70 bis 80 Gigabyte, bei einem hochauflösenden Zahnscan ist es mit 150 Gigabyte sogar das Doppelte.“ Da reicht auch die Speicherkapazität von einem Terabyte nicht mehr aus. Und so müssen die Techniker ihr Bandlaufwerk zwischendurch nach Leipzig schicken, um die Daten auf den Server überspielen zu lassen.

Das Arbeitspensum von Temming und Winzer ist randvoll – ein kurzer Abstecher in die alte Königsstadt Rabat, viel mehr ist in diesen sechs Wochen nicht drin. Dann wird alles wieder verstaut und festgezurrert und der Container macht sich auf die Heimreise. Am 12. November kommt er in Leipzig an. Heiko Temming und Andreas Winzer kehren per Flugzeug zurück – mit unfreiwilligem Zwischenstopp in Paris, weil



Um einen kompletten Schädel einzuscannen, benötigt das CT-Gerät vier bis sechs Stunden. Dabei wird der Messtisch mit dem Schädel um seine senkrechte Achse gedreht, sodass der Scanner das Objekt rundherum erfassen kann. Der Computer rechnet diese Aufnahmen zu einem Graustufenbild um.



FOTOS: ANDREAS WINZER

sie ihren Anschlussflug nach Leipzig verpasst haben.

In Leipzig haben die Forscher derweil mit der Rekonstruktion der Rohdaten begonnen. Denn die tomografischen Schnittbilder sind noch wenig anschaulich. Um die darin enthaltenen Informationen für die Auswertung aufzubereiten, muss man die gewaltigen Datenmengen mit leistungsfähigen Grafikprogrammen bearbeiten und in räumliche Ansichten umsetzen. Ein einzelner Rechner benötigt dafür etwa sechs bis acht Wochen. Um den Prozess zu beschleunigen, lassen die Leipziger Wissenschaftler zehn Computer parallel arbeiten. Dann dauert es nur

noch eine Woche, bis die 70000 Schichtbilder zu einem 3-D-Objekt zusammengesetzt sind, das jetzt so gut ist wie das Original.

„Der große Vorteil besteht darin, dass wir einen Blick in das sonst unzugängliche Innere der Fossilien werfen und zum Beispiel die Strukturen des Innenohrs analysieren können“, sagt Philipp Gunz. Der Österreicher arbeitet seit zwei Jahren als Postdoc im Rahmen eines EU-Projekts in der Abteilung von Jean-Jacques Hublin. „Beim Neandertaler gibt es kleine, aber charakteristische Unterschiede im Vergleich zur Morphologie des Innenohrs von *Homo sapiens*. Das erst hat die eindeutige

Zuordnung bestimmter bruchstückhafter Fossilienfunde ermöglicht.“

Darüber hinaus lassen sich menschliche Fossilien nun auch am Computer rekonstruieren. Denn nur selten haben Paläoanthropologen das Glück, bei ihren Ausgrabungen auf ein intaktes Skelett oder einen vollständigen Schädel zu stoßen. In den meisten Fällen müssen sie sich mit Bruchstücken zufriedengeben – einer Elle oder Speiche, einem Unterkiefer, Fragmenten der Schädeldecke. Denn durch geologische Prozesse wie Gesteinsverschiebungen, Sandablagerungen, Auswaschungen und Verwitterung, manchmal auch durch Raubtiere, sind die Knochen meist auseinandergerissen und weit verstreut.

VIRTUELLE REALITÄTEN – FOSSILIEN IN 3-D

Das Zusammensetzen eines Fossils ist eine heikle Angelegenheit: „Früher wurden die Bruchstücke zusammengeklebt und dann wieder auseinandergerissen, wenn sich Anhaltspunkte für eine andere Anordnung ergaben“, erklärt Philipp Gunz. „Darunter haben die Fundstücke natürlich ganz erheblich gelitten.“ Am Bildschirm kann der Paläoanthropologe die virtuellen Fragmente dagegen drehen, kippen, von jedem Winkel aus betrachten und immer wieder neu ineinanderpassen – ohne dabei auch nur irgendetwas zu beschädigen oder zu zerstören.

Gunz fährt den Computer im *Virtual Reality Laboratory* der Abteilung Hublin hoch, dem modernsten seiner Art. Er klickt eine Datei an und schon erscheint der Schädel eines Frühmenschen auf dem Bildschirm. Zwei Beamer projizieren eine Stereoansicht des Objekts auf einen Schirm. Betrachtet man den Schädel durch eine 3-D-Brille, scheint es, als ließe er sich tatsächlich greifen. Und wie bei einer virtuellen Hausbesichtigung in der Cyberwelt kann man quasi in das Innere des Schädels eintreten. „Als Erstes müssen wir Deformationen korrigieren, die im Zuge der Versteinerung entstanden sind“, er-

klärt Gunz. Dazu werden Hunderte Messpunkte, von den Forschern *landmarks* genannt, auf dem Schädel festgelegt und deren Abweichungen von der Symmetrieachse erfasst. Mittels Rechenalgorithmen werden diese Messpunkte dann neu ausgerichtet und die Verzerrung damit korrigiert.

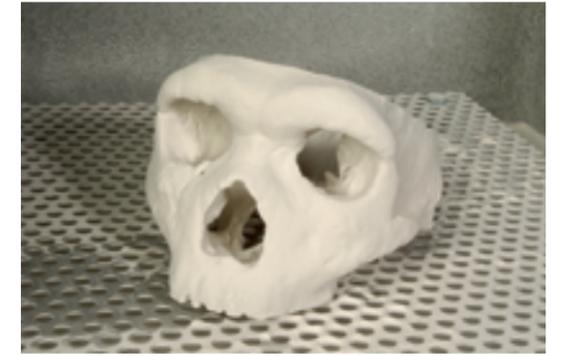
Fehlende Teile, etwa auf der rechten Seite des Schädels, lassen sich durch spiegelbildliche Kopien der vorhandenen Teile auf der linken Seite ergänzen. Auch hier zeigen sich die unschätzbaren Vorteile der modernen elektronischen Bildverarbeitung: Musste man früher ein räumliches Spiegelbild noch mühsam in wochenlangender Handarbeit anfertigen, so lässt es sich heute per Computer innerhalb von Sekunden auf den Bildschirm zaubern. Eine andere Möglichkeit besteht darin, Teile anderer Schädel zu kopieren und dann perfekt einzupassen. Auch das ist für den Computer kein Problem. „Trotzdem ist das Ganze ein äußerst kniffliges 3-D-Puzzle“, betont Gunz.

Deshalb halten die Anthropologen auch – ungeachtet all dieser Möglichkeiten – nach wie vor gern ein reales 3-D-Objekt in Händen, um die räumlichen Beziehungen der Strukturen besser nachvollziehen zu können. Ein solches physikalisches Objekt transportiert eine *touch-and-feel*-Information, es lässt sich unter weitaus realistischeren Bedingungen anfassen, untersuchen und zusammensetzen als virtuelle Objekte am Bildschirm. Um die fertige Computerrekonstruktion des virtuellen Schädels in die physische Realität zu überführen, nutzen die Wissenschaftler am Leipziger Max-Planck-Institut eine aus dem Maschinenbau bekannte Methode: das *rapid prototyping*.

EIN SCHÄDEL ZUM ANFASSEN

Der 3-D-Drucker im Labor arbeitet im Prinzip wie ein gewöhnlicher Tintenstrahldrucker – nur eben in drei statt in zwei Dimensionen. Über einen Schlitten kann sich der Druckkopf beliebig über eine Fläche bewegen, auf die zunächst eine dünne Schicht Mo-

delliergipspulver aufgetragen wird. Dann bringt der Druckkopf entsprechend der Form des am Computer rekonstruierten Objekts an den entsprechenden Stellen ein durchsichtiges Bindemittel auf, das den Gips lokal schnell zusammenkleben lässt. Danach wird eine neue Schicht Gipspulver aufgetragen und der Vorgang wiederholt. So entsteht Schicht für Schicht ein dreidimensionaler Schädel oder aber – sogar in vergrößerter Form – ein Zahn. Das Ganze dauert nicht viel länger als eine halbe Stunde: Der ZCorp Spectrum Z510 ist der zurzeit schnellste 3-D-Drucker weltweit.



FOTOS: VOLKER STEIER



Mithilfe eines 3-D-Druckers wird die Computerrekonstruktion in ein Gipsmodell überführt. Der Drucker arbeitet wie ein gewöhnlicher Tintenstrahldrucker – nur eben in drei statt in zwei Dimensionen. Anschließend wird der Schädel aus dem Gipsbett herausgenommen und mit einem Pinsel gesäubert.

In spätestens 15 Jahren, so schätzt Jean-Jacques Hublin, wird sich sein Forschungsfeld komplett geändert haben, dann werden Wissenschaftler nicht mehr länger die einzelnen Knochenfunde untersuchen, sondern nur noch deren virtuelles Abbild. Die entsprechenden Daten zu erfassen, eine virtuelle Sammlung aufzubauen und schließlich Vorreiter bei der Analyse zu sein – das ist das Ziel des Max-Planck-Direktors. Dazu benötigt er natürlich internationale Kooperationspartner, insbesondere die Museen. In Kroatien, wo sich die weltweit größte Sammlung von Neandertaler-Knochen befindet, waren seine beiden Techniker Heiko Temming und Andreas Winzer schon. Ihr nächstes Ziel ist – wie sollte es auch anders sein – Ostafrika, denn hier stand schließlich die Wiege der Menschheit.

CHRISTINA BECK

