

Ottmar Kullmer  
Friedemann Schrenk  
Timothy G. Bromage

# Human paleobiomics

Der Versuch einer integrativen  
Paläoanthropologie



# Human Paleobiomics – Der Versuch einer integrativen Paläoanthropologie

„Wenn wir bei jedem Fund wahnsinnig überrascht sind, heißt das doch, dass wir noch nicht verstanden haben, wie unsere Vorfahren lebten.“ (Timothy Bromage)

von Ottmar Kullmer, Friedemann Schrenk & Timothy G. Bromage

Es geht um nichts weniger als um die Gründung einer neuen Fachrichtung. Das Startkapital dafür ist schon da: Es sind 750 000 Euro Preisgeld des Max-Planck-Forschungspreises für internationale Kooperation, mit dem der Paläoanthropologe Timothy Bromage im Jahr 2010 ausgezeichnet wurde. Er und seine beiden Mitstreiter Ottmar Kullmer und Friedemann Schrenk wollen die Paläoanthropologie weiterentwickeln.

▲  
Abb. 1  
Multifokus-3D-Mikroskopaufnahme mit zirkular polarisiertem Licht der Mikrostrukturen menschlicher Knochen. Zu sehen sind die konzentrischen Mineralisationslamellen sogenannter Osteone (funktionale Grundeinheiten von Röhrenknochen). Die kleinen Vertiefungen in den Lamellen sind Knochenzellen (Osteozyten) die in die mineralisierte umgebende Grundsubstanz eingebaut sind. Im Zentrum der Osteone befindet sich jeweils ein Gefäßkanal.  
Foto: Timothy Bromage

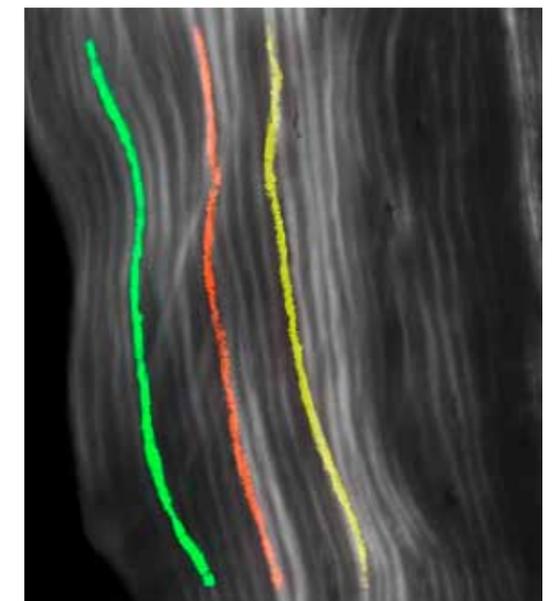
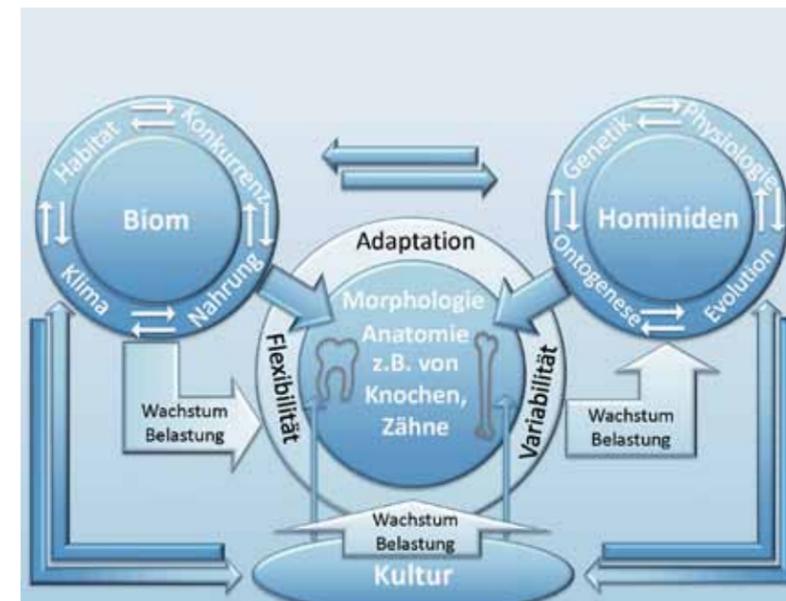
Die klassische Paläoanthropologie hat das primäre Ziel, die Evolution der ersten Hominiden bis zu den modernen Menschen zu erforschen. Dabei stehen meist die stammesgeschichtliche Entwicklung (Phylogenie) und die Ausprägung typischer Hominidenmerkmale (Hominisation), wie z. B. der aufrechte Gang oder die Gehirnvergrößerung, im Fokus. Die methodischen Ansätze dazu sind vielseitig, ein Schwerpunkt liegt im Vergleich von Morphologie und Anatomie mit lebenden Primaten. Ergänzend dienen analoge Folgerungen aus Beobachtungen der Lebensgewohnheiten von Menschenaffen, z. B. Schimpansen, und auch modernen Menschen für die Interpretation der Lebensweise und

Entwicklung unserer Vorfahren. Zusätzlich versucht die Paläogenetik mithilfe von Regelmäßigkeiten in der Veränderung des Erbguts (der DNA) die Abstammung von *Homo sapiens* zu klären.

### Die Zeit ist reif zum Umdenken

Im Forschungsalltag lassen sich die Ergebnisse der Genetik und der vergleichenden Morphologie nicht immer in Einklang bringen. Es fehlt bislang an entscheidenden Erkenntnissen über die Abhängigkeiten und Wirkungsweisen genetischer und morphologischer Ausprägungen und damit auch an

▼  
Abb. 2  
Adaptation, Flexibilität und Variabilität in den Strukturen von Knochen und Zähnen sind ein Spiegel und Wegweiser der Einflüsse des Bioms, der organismischen Prozesse und der kulturellen Entwicklung der Hominiden. Das Verständnis der komplexen Mechanismen der Mineralisation von Hartgewebe ist ein Schlüssel zur Rekonstruktion unserer Evolution.  
Grafik: Ottmar Kullmer



Informationen zu Ursachen und Prozessen, die den biologischen Wandel durch Zeit und Raum steuern. Auch wenn heute in der Paläoanthropologie meist mehrere Disziplinen an einem Forschungsprojekt beteiligt sind, so zeigt sich allzu oft, dass sich so mancher Spezialist in kleinen Details seines Fachgebiets verliert und damit doch sehr reduktionistisch arbeitet – der Blick für das große Ganze bleibt ihm leider versperrt.

Es fehlt der Paläoanthropologie bis heute eine ganzheitliche systembiologische Betrachtung des Bioms, der Erde als Lebensraum, in dem Vor-, Früh- und Urmenschen sowie *Homo sapiens* als Akteure auftraten, mit ihrer Umwelt interagierten, sie beeinflussten und deren biologischer Organismus wiederum auf die äußeren Umwelteinflüsse reagierte (Abb. 2). Nur wenn uns ein grundsätzliches Umdenken in der paläoanthropologischen Forschung gelingt hin zu einer tatsächlichen integrativen Wissenschaft, werden wir die Fragen nach dem Werden des Menschen klären können. Nur wenn wir biologische Prozesse, wie z. B. die Phylogenie, das Wachstum, die Funktion und die Physiologie im Zusammenhang mit klimatischen Bedingungen und allen weiteren Aspekten der Lebensräume inklusive der Flora und Fauna verstehen,

werden wir ein umfangreiches Verständnis für die Evolution der Menschen entwickeln können.

### Die Fachdisziplinen müssen durchlässig werden

Die Zeit ist reif, unsere Physiologie und Anatomie als das Resultat einer multifaktoriellen Prozesssteuerung zu verstehen und die steuernden Elemente und Mechanismen in ihren gegenseitigen Wirkungen zu erklären. Dann werden wir nicht mehr über das Aussehen und die Einordnung von Neufunden rätseln, wie z. B. über *Australopithecus sediba* aus der Höhlenfundstelle Malapa in Südafrika, der eine Vermischung ursprünglicher und moderner Merkmale zeigt, oder auch über die zwergwüchsigen *Homo floresiensis* von der Insel Flores in Indonesien. Mit einer solchen Herangehensweise können wir in Zukunft Funde oder bestimmte Merkmalsausprägungen in einer bestimmten Umwelt möglicherweise sogar voraussagen, denn wir wären in der Lage, die Faktoren und Prozesse zu verstehen, die zu morphologischen und anatomischen Änderungen führen. Darüber hinaus wird es dann auch möglich sein, die kulturellen Errungenschaften der Hominiden aus der Zeit der frühesten Steinwerkzeuge bis hin zu unserer hochtechnisierten Moderne in ihren verhaltensbiologischen Zusammenhängen und organismischen Auswirkungen zu erklären.

▲  
Abb. 3  
Mikroskopische Darstellung mit polarisiertem Licht der Knochenlamellen in der Außenwand eines Oberarmknochens eines heranwachsenden Makaken (*Macaca nemestrina*) (Bildbreite = 237 µm). Die farbigen Linien zeigen vitale Markierungen des Knochenwachstums nach Antibiotikagabe in zweiwöchigen Intervallen (aus Bromage 2009). Abbildung: Timothy Bromage

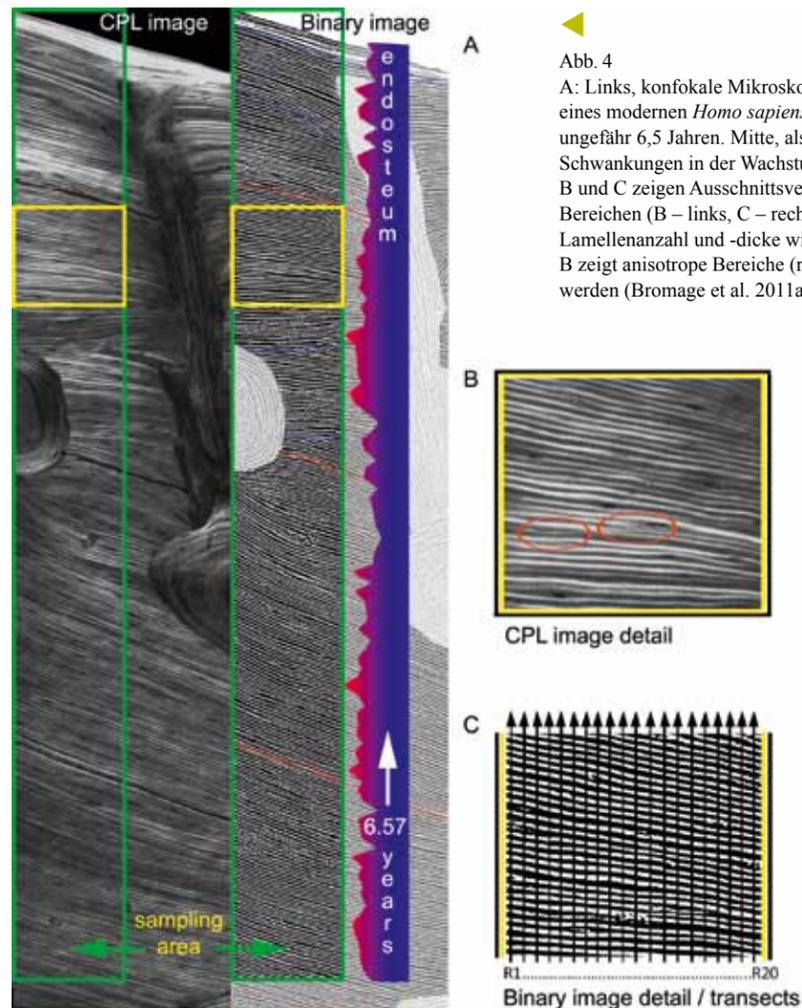


Abb. 4  
 A: Links, konfokale Mikroskopaufnahme mit polarisiertem Licht (CPL) von Knochenlamellen eines modernen *Homo sapiens*. Die eingerahmte Sequenz repräsentiert einen Zeitraum von ungefähr 6,5 Jahren. Mitte, als Binärbild umgewandelter Ausschnitt. Die blau-rote Säule gibt die Schwankungen in der Wachstumsrate (Mineralisation) wieder.  
 B und C zeigen Ausschnittsvergrößerungen der Lamellenabfolge in den gelb umrandeten Bereichen (B – links, C – rechts). In etwa 20 Profilen (transects) werden die Messungen der Lamellenanzahl und -dicke wiederholt für eine statistische Berechnung der Durchschnittswerte. B zeigt anisotrope Bereiche (rote Ellipsen), die bei der statistischen Auswertung eliminiert werden (Bromage et al. 2011a). Fotos und Grafik: Timothy Bromage

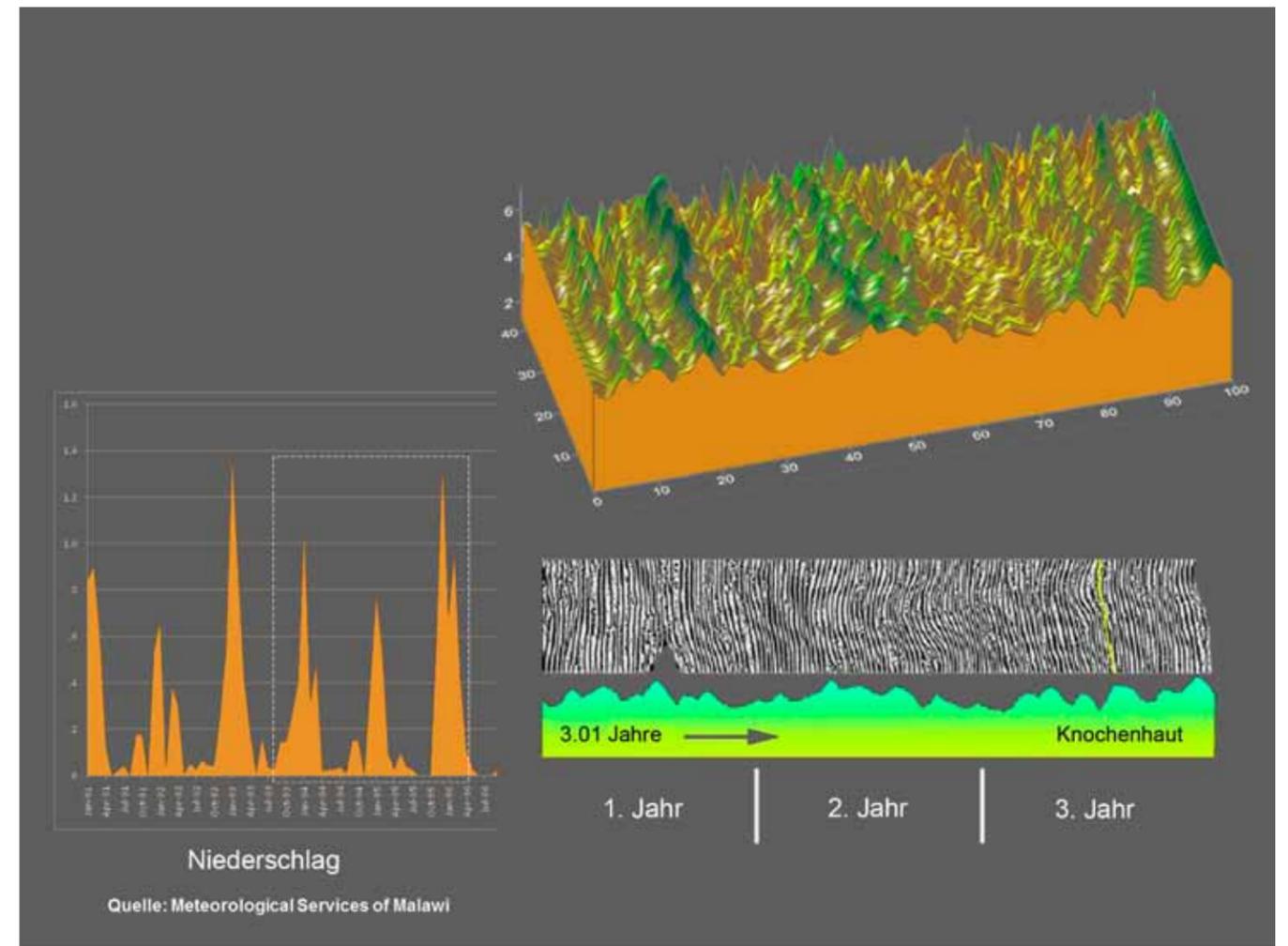
Veränderung muss wiederum Spuren hinterlassen haben in den Organismen, also auch in den Knochen und Zähnen der überlieferten Hominiden. Mit diesem Modell im Sinn bringen wir nun die computergesteuerte 3D-Vermessung von Knochen- und Zahngewebe in einen Zusammenhang mit der Auswertung von Daten zum Klima, der Geografie sowie der Fauna und Flora in den verschiedenen Lebensräumen und schon eröffnen sich mitunter atemberaubende Fragestellungen: Wie haben sich die extremen Schwankungen in der Nährstoffzufuhr auf die tägliche Stoffwechselproduktivität der Hominiden ausgewirkt? Welchen Einfluss hatten Temperaturschwankungen und die Verfügbarkeit von Nahrung auf die Physiologie des Energiestoffwechsels und somit auf das Wachstum und die Veränderungen von Gewebestrukturen z. B. in den Knochen und Zähnen der frühen Hominiden?

#### Hartgewebe als Wegweiser biologischer Rhythmen

Fossile Knochen- und Zahnreste sind die einzigen vorhandenen physischen Belege unserer Evolution. Auf ihrer Beurteilung und Einordnung beruhen zahlreiche Hypothesen unseres stammesgeschichtlichen Werdegangs (Schrenk 2008). Die spezifischen anatomischen und morphologischen Merkmale der unterschiedlichen fossilen Hominidenarten zeigen sich auch in der Variabilität des Knochenwachstums und der permanenten Umbaumaßnahmen in den mineralisierten Knochenstrukturen. Die zugrunde liegenden Prozesse sind abhängig von der Energiezufuhr und dem Stofftransport sowie regulierenden Stoffwechselmechanismen im Körper. Es ist schon einige Jahrzehnte bekannt, dass in den Hartgewebestrukturen von Knochen und Zähnen Spuren und Signale zu finden sind, die das Wachstum des Organismus und die Wechselwirkungen mit der Umwelt widerspiegeln (Okada und Mimura 1940, Bromage 1991). Die Mikrostrukturen von Knochen und Zähnen werden an vielen Stellen unseres Skeletts schubweise gebildet, so z. B. im Zahnschmelz und in den kompakten Außenwänden von Langknochen. Diese Wachstumsschübe lassen sich als rhythmische mineralisierte Lamellen erkennen (Bromage et al. 2011a), ähnlich wie wir es von den Jahresringen der Bäume kennen (Abb. 3). Die Mineralisationsproduktivität im Knochen und in den Zähnen ist u. a. abhängig von der Calciumverfügbarkeit im Körper und der damit verbundenen

#### Das Gedächtnis von Knochen und Zähnen

Die biologischen Prozesssteuerungen und deren Ergebnisse aufzuzeigen und zu interpretieren, das sind die anspruchsvollen Ziele der neuen Forschungsrichtung *Human Paleobiomics*. Die Evolution der Menschen unter ihren jeweiligen Umweltbedingungen vom Tertiär bis ins Pleistozän wird in einem Gesamtkonzept betrachtet und die Mechanismen, die Veränderungen im Organismus hervorrufen, werden detailliert erforscht. Dies bedeutet für künftige Forschungsprojekte, dass die Ergebnisse innovativer paläoanthropologischer und ökologischer Methoden eng mit prozessorientierten biologischen Fragen verknüpft werden. Wir wissen beispielsweise, dass sich in Afrika vor drei Millionen Jahren das Klima gravierend verändert hat. Sämtliche Ökosysteme mussten sich von ganzjährig feucht-warmen Verhältnissen auf ein jahreszeitliches Klima mit einem Wechsel von Trocken- und Regenzeiten umstellen. Weite Baum- und Grassavannen breiteten sich dort aus, wo zuvor tropischer Regenwald gewachsen war. Das Angebot an Nahrung muss sich drastisch verändert haben und diese



Aktivität verschiedener Zellen und Enzyme, die das Calcium freigegeben, an den benötigten Ort transportieren und zur Kristallisation einsetzen (Ganong 1979). Dies geschieht tatsächlich mit einer täglichen Aktivitätsrhythmik des Stoffwechsels, was sich dann in der Dicke und der Anzahl der Lamellen in den knochenartigen Hartsubstanzen zeigt.

#### „Tagesringe“ im Zahnschmelz

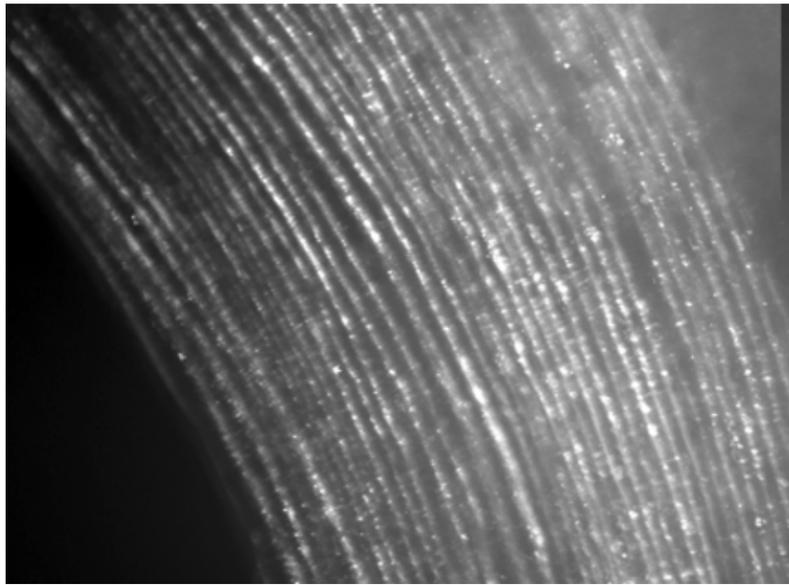
In einem 24-Stunden-Rhythmus wird entlang sogenannter Mineralisationsfronten Knochensubstanz aus Hydroxylapatit-Kristallen aufgebaut, ganz Ähnliches zeigt sich in den täglichen Anwachslinien bei der Bildung von Zahnschmelz (Bromage 2011b). Darüber hinaus lässt sich in den Lamellen der Außenwand von Extremitätenknochen beim Menschen auch ein lang periodischer Rhythmus von ca. 6 bis 11 Tagen feststellen, ebenso wie es die sogenannten „Reizuslinien“ im Zahnschmelz zeigen (Bromage 2011b). Mithilfe neuer Ansätze der Probenaufbereitung, Mikroskopie und Statistik können wir heute anhand von Knochendünnschliffen die Wachstumslamellen im Knochen identifizieren und für ver-

gleichende Untersuchungen vermessen (Abb. 4). Hierbei ist auffällig, dass die Lamellendicke z. T. stark variiert und damit die Wachstumsrate wiedergibt. So hat die Untersuchung zeitlich genau referenzierter Knochenproben eines Fischers am Malawisee gezeigt, dass seine Knochenwachstumsrate tatsächlich mit der saisonalen Niederschlagsmenge korreliert und im Muster des Knochenaufbaus sich in Form von Langzeitrhythmen in der Lamellenentwicklung abbildet (Abb. 5).

#### Saisonale Trockenheit steuert das Knochenwachstum

Das Muster der Knochenlamellen korrespondiert offensichtlich mit der Aktivität des Energiestoffwechsels und zeigt eine deutliche Variabilität in der Knochenmineralisation in Abhängigkeit von saisonalen Trockenheitsphasen. Verschiedene Testanalysen von Knochenmikrostrukturen in fossilen Hominidenknochen belegen, dass die Feinstrukturen von Lamellen prinzipiell sogar fossil erhaltungsfähig sind. So ließen sich in einer ca. 1,5 Millionen Jahre alten

Abb. 5  
 Die Auswertung der zeitlich kalibrierten Wachstumsrate der Knochenlamellen im Langknochen eines Fischers am Malawisee (links) bildet den Rhythmus der saisonalen Niederschlagsmenge in dem referenzierten Zeitraum von ca. drei Jahren ab. Das Knochenwachstum repräsentiert die Aktivitätsschwankungen des Energiestoffwechsels mit geringerer Aktivität zum Zeitraum klimatischer Trockenheitsperioden. Grafik: Timothy Bromage



▲ Abb. 6  
Ausschnitt der Wachstumslamellen des kompakten Knochens in einen ca. 1,5 Millionen Jahre alten Mittelhandknochen von *Paranthropus robustus* aus Swartkrans in Südafrika.  
Foto: Timothy Bromage

Probe von *Paranthropus robustus* aus der Höhlenfundstelle Swartkrans in Südafrika die täglichen Knochenlamellen darstellen (Abb. 6). Es zeigte sich nach der Auswertung ein bislang noch nicht in Knochen nachgewiesener circa 28-tägiger Langzeitrhythmus im Knochenwachstum des Individuums. Inwieweit diese lunare Periodik mit den tatsächlichen Mondphasen übereinstimmt und die individuelle

Stoffwechselschwankung vielleicht eines weiblichen Individuums innerhalb einer Mondphase widerspiegelt, ist bislang noch nicht zu klären. Viele Fragen ergeben sich durch die Feststellung, dass der variable schichtartige Aufbau von Langknochen unterschiedliche Wiederholintervalle in seinem Muster aufweist.

### Eine neue Forschungsrichtung wird etabliert

Die Klärung der Entstehung der Langzeitrhythmen in den Strukturen in modernen und fossilen Knochenproben steckt noch in den Kinderschuhen. Aber bereits jetzt ergeben sich durch die ersten Vergleiche zeitlich referenzierter Umweltdaten mit der Knochenmineralisation gemeinsame Muster, die als Resultat der Beeinflussung der molekularbiologischen Steuerung der Knochenmineralisation durch äußere Einflüsse gewertet werden können. Die methodischen Fortschritte in der vergleichenden Funktionsmorphologie werden in der Zukunft die integrativen Ansätze von *Human Paleobiomics* deutlich vorantreiben, sodass die Mechanismen der Steuerung und Ausprägung morphologischer Veränderungen im evolutionären Zusammenhang der Hominisation besser verstanden werden.

Die Auszeichnung von Timothy Bromage mit dem Max-Planck-Forschungspreis 2010 durch die Max-Planck-Gesellschaft und die Alexander-von-Humboldt-Stiftung zeugt von der Anerkennung dieses neuen, innovativen Forschungsan-

### Begrifflichkeiten

Biom:	Zusammenfassung aller Eigenschaften der Tier- und Pflanzenzusammensetzung sowie unbelebter Faktoren (z. B. Klima und Geografie) in einem definierten Großlebensraum (z. B. Klimazone).
Biomics:	integrative prozessorientierte Biologie zum Verständnis der Gesamtheit eines Organismus (Systembiologie), angewandt auf die Untersuchung von Biomen.
Paleobiomics:	integrative prozessorientierte Biologie zum Verständnis der Gesamtheit eines Organismus (Systembiologie), angewandt auf die Untersuchung vergangener Biome.
Human Paleobiomics:	integrative prozessorientierte Biologie zum Verständnis der Gesamtheit eines Organismus (Systembiologie), angewandt auf die Untersuchung vergangener Biome, die von menschlichen Vorfahren besetzt waren.

### Die Autoren

Privatdozent Dr. Ottmar Kullmer leitet seit 2001 die Sektion Tertiäre Säugetiere in der Abteilung Paläoanthropologie und Messelforschung am Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum in Frankfurt a. M. 2003 und 2004 hatte er eine Gastprofessur am Department für Anthropologie der Universität Wien inne. Seit 1992 ist Ottmar Kullmer an Gelände- forschungsprojekten zur Evolution der Menschen in Afrika beteiligt. Seine Arbeit in internationalen Forschungsprojekten zur virtuellen Paläoanthropologie und Dentalanthropologie spiegelt sich in zahlreichen Publikationen zur Entwicklungsgeschichte der Menschen wider.

Prof. Dr. Friedemann Schrenk studierte Geologie, Zoologie und Paläontologie an der Technischen Universität Darmstadt und in Johannesburg, Südafrika. Nach einer Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Tübingen war er Leiter der Paläontologischen Abteilung und Museumsdirektor am Hessischen Landesmuseum Darmstadt und habilitierte sich 1994 mit einer Arbeit über den Hominidenkorridor Südostafrikas an der TU Darmstadt. Seit 2000 leitet er die Sektion Paläoanthropologie bei Senckenberg sowie die Abteilung Paläobiologie und Umwelt am Fachbereich Biologie der Goethe-Universität. Schwerpunkte seiner Kooperationen sind derzeit die Länder Malawi, Zambia und Südsudan.

Prof. Dr. Timothy Bromage lehrt am New York College of Dentistry der New York City University in den USA. Der studierte Paläoanthropologe ist seit 2010 Ehrenamtlicher Professor an der La Salle Universität in Madrid und ehrenamtlicher Mitarbeiter am Senckenberg Forschungsinstitut und Naturmuseum in Frankfurt. Timothy Bromage wurde 2010 für seine mikrobiologische Forschung an den inneren Strukturen fossiler Zähne und Knochen von Frühmenschen mit dem Max-Planck-Forschungspreis der Alexander-von-Humboldt-Stiftung und der Max-Planck-Gesellschaft ausgezeichnet.

Kontakt (korresp. Autor): PD Dr. Ottmar Kullmer, Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung, Senckenberganlage 25, D-60325 Frankfurt a. M.; ottmar.kullmer@senckenberg.de



satzes. Gemeinsam mit dem New York University College of Dentistry will das Senckenberg Forschungsinstitut eine umfassende paläoanthropologische Forschung etablieren. Die Paläobiologie aller beteiligten Organismen eines Bioms ist zentraler Bestandteil der neuen Betrachtungsweise. Die Akteure der lebenden Umwelt und die Faktoren der nicht

lebenden Umwelt werden dabei in ihrer Wirkung auf die organismischen Prozesse der Individuen als Momentaufnahmen der Hominidenevolution untersucht. Der Energiestoffwechsel unserer Hominidenvorfahren wird dabei als steuernde Größe des Wachstums, der Ontogenie und der Fortpflanzung, und somit als Motor der Evolution der Menschen verstanden.

### Schriften

Bromage (1991): Issues related to mineralized tissue biology in human evolutionary research. *Human Evolution*, 6(2): 165–174. Bromage, T.G., Lacruz, R.S., Hogg, R., Goldman, H.M., McFarlin, S.C., Warshaw, J., Dirks, W., Perez-Ochoa, A., Smolyar, I., Enlow, D.H. & Boyde, A. (2009): Lamellar bone is an incremental tissue reconciling enamel rhythms, body size, and organismal life history. *Calcif. Tissue Int.* 84, 388–404. Bromage T.G., Juwayeyi Y.M., Smolyar I., Hu B., Gomez S., Scaringi V.J., Chavis S., Bondalapati P., Kaur K. & Chisi, J. (2011 a): Signposts Ahead: Hard Tissue Signals on Rue Armand de Ricqlès. *Comptes rendus Palevol* 10, 499–507. Bromage T.G., Juwayeyi Y.M., Smolyar I., Hu B., Gomez S. & Chisi, J. (2011 b): Enamel-Calibrated Lamellar Bone Reveals Long Period Growth Rate Variability in Humans. *Cells Tissues Organs* 194, 124–130. Ganong W.F. (1979): Lehrbuch der medizinischen Physiologie. Die Physiologie des Menschen für Studierende der Medizin und Ärzte, 3. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo. Okada, M. & Mimura, T. (1940): Zur Physiologie und Pharmakologie der Hartgewebe. IV. Mitteilung: Tagesrhythmus in der Knochenlamellenbildung. *Proc. Japan Pharm. Soc.*, 95–97. Schrenk, F. (2008): Die Frühzeit des Menschen. – C. H. Beck Verlag.