

Journal für
Mineralstoffwechsel
Zeitschrift für Knochen- und Gelenkserkrankungen
Orthopädie • Osteologie • Rheumatologie

**Mikro-CT-Anwendungen in der
biologischen Anthropologie**

Weber GW, Benazzi S, Kullmer O

*Journal für Mineralstoffwechsel &
Muskuloskelettale Erkrankungen*

2014; 21 (2), 68-68f

Homepage:

**[www.kup.at/
mineralstoffwechsel](http://www.kup.at/mineralstoffwechsel)**

**Online-Datenbank mit
Autoren- und Stichwortsuche**

Member of the



Indexed in SCOPUS/EMBASE/Excerpta Medica
www.kup.at/mineralstoffwechsel



Offizielles Organ der
Österreichischen Gesellschaft
zur Erforschung des Knochens
und Mineralstoffwechsels



Österreichische Gesellschaft
für Orthopädie und
Orthopädische Chirurgie



Österreichische
Gesellschaft
für Rheumatologie

Krause & Pachernegg GmbH · VERLAG für MEDIZIN und WIRTSCHAFT · A-3003 Gablitz

P.b.b. GZ02Z031108M, Verlagspostamt: 3002 Purkersdorf, Erscheinungsort: 3003 Gablitz

Erschaffen Sie sich Ihre ertragreiche grüne Oase in Ihrem Zuhause oder in Ihrer Praxis

Mehr als nur eine Dekoration:

- Sie wollen das Besondere?
- Sie möchten Ihre eigenen Salate, Kräuter und auch Ihr Gemüse ernten?
- Frisch, reif, ungespritzt und voller Geschmack?
- Ohne Vorkenntnisse und ganz ohne grünen Daumen?

Dann sind Sie hier richtig



Mikro-CT-Anwendungen in der biologischen Anthropologie

G. W. Weber^{1,2}, S. Benazzi^{3,4}, O. Kullmer⁵

Kurzfassung: Die biologische Anthropologie erlebte in der letzten Dekade eine technologische Revolution. Neue Disziplinen wie die „Virtuelle Anthropologie“ fördern die fächerübergreifende Zusammenarbeit und nutzen modernste Technologien wie Mikro-Computertomographie, statistische Gestalt- und Formanalysen und biomechanische Modellierungen. Die im Bereich der Hominiden-evolution entwickelten Verfahren lassen sich in vielen anderen Forschungsfeldern nutzen, wodurch zukünftig verstärkte Kooperationen mit den medizinischen Wissenschaften wahrscheinlich werden. Zwei Beispiele erfolgreicher Innovationen werden hier beschrieben. Das erste erläutert die Entdeckung der ältesten europäischen modernen Menschen (Grotta del Cavallo, ~ 45.000 Jahre), die fälschlicherweise in den 1960er-Jahren als Neandertaler klassifiziert wurden. Die internen und externen morphologischen Strukturen zweier Milchzähne wurden mithilfe von Mikro-CT-Daten untersucht und mit jenen von modernen Menschen und Neandertalern verglichen. Die Cavallo-Individuen erwiesen sich dabei eindeutig als anatomisch moderne Menschen. Dieser Befund wirft auch ein neues Licht auf die Interpreta-

tion der begleitenden Artefakte und die Hersteller der Werkzeugkulturen. Das zweite Beispiel beschäftigt sich mit der ersten Simulation der Biomechanik von menschlichen Molaren, die realitätsnahe Parameter verwendet. Dabei werden 3D-Daten aus der Mikro-CT mit Analysen des individuellen Abkauungsmusters von Zähnen kombiniert, um die auftretenden Belastungen während des Kauvorgangs zu simulieren.

Schlüsselwörter: Virtuelle Anthropologie, Mikro-Computertomographie, Geometric Morphometrics, Gestaltanalyse, Biomechanik, Finite-Elemente-Analyse

Abstract: Micro-CT Applications in Biological Anthropology. Biological anthropology has seen a technological revolution in the past decade. New interdisciplinary fields such as “Virtual Anthropology” stimulate collaborations across borders and use latest technologies such as micro-computed tomography, statistical shape and form analysis, and biomechanical modelling. Many procedures developed in the course of research in human evolution can be applied in other fields

as well which will likely boost cooperations with medical sciences. Two examples of successful innovations are described here. The first demonstrates the discovery of the oldest European modern humans (Grotta del Cavallo, ~ 45,000 years) that were erroneously classified as Neanderthals in the 1960s. The internal and external morphological structures of two milk teeth were investigated by means of micro-CT data and compared with those of modern humans and Neanderthals. The Cavallo individuals clearly proved to be anatomically modern humans. This result sheds new light on the interpretation of the accompanying artefacts and the makers of tool cultures. The second example deals with the first simulation of biomechanics of human molars that uses realistic parameters. 3D data from micro-CT and the analysis of the individual wear pattern are combined to simulate the occurring loadings during the mastication process. **J Miner Stoffwechs 2014; 21 (Pre-Publishing Online).**

Key words: virtual anthropology, micro-computed tomography, geometric morphometrics, shape analysis, biomechanics, finite element analysis

■ Biologische Anthropologie

Anthropologie (griechisch *ánthropos* – „Mensch“ und *-lógos* – „Lehre“) wurde vom Autor des ersten deutschsprachigen Lehrbuchs der Anthropologie als die „Naturgeschichte des Menschen in Raum und Zeit“ beschrieben [1]. Sie wird heute meist in verschiedene Divisionen unterteilt, die in separaten Lehrstühlen unterrichtet werden: die biologische Anthropologie (Biologie, Evolution), die Kulturanthropologie (Ethnographie), die Archäologie und die Linguistik. Die biologische Variabilität der Menschen, ihrer Vorfahren und ihrer nächsten Verwandten ist das zentrale Forschungsthema der biologischen Anthropologie. Weil die Ursachen der Variabilität bis zur Erkenntnis einer tatsächlich existierenden Evolution [2–4] wenig Anreiz zur Forschung gaben, ist die Anthropologie eine eher junge Wissenschaft, die sich erst Mitte des 19. Jahrhunderts in ersten Institutsgründungen äußerte. Es waren damals vor allem Anatomen, Ethnographen, Archäologen und Mediziner, die in dieser Anfangszeit Impulse setzten [5], nach-

dem sich die Erkenntnis einer biologischen Evolution und der Wandelbarkeit der Arten durchzusetzen begann.

Die Anthropologie bietet ein unglaublich vielfältiges Spektrum an Forschungsmöglichkeiten, das Fächer wie Anatomie, Physiologie, Embryologie, Osteologie, Morphometrie, Funktionsmorphologie, Ontogenie, Auxologie, Humangenetik/Molekularbiologie, Populationsgenetik, Hominidenevolution, Systematik, Taphonomie, Primatologie oder Paläodemographie inkludiert. Sie war mit dem Anspruch eines ganzheitlichen Faches gegründet worden und durch weite Teile des 20. Jahrhunderts gegangen. Angesichts der heutigen Informationsdichte und Fächer-Spezialisierung ist der Anspruch, auch nur einige dieser Bereiche aktuell zu überblicken, nicht mehr zu halten. Daher kann es in einzelnen Institutionen zum Abdriften von Inhalten von der Anthropologie in andere Disziplinen kommen, wie z. B. der Paläoanthropologie in die Paläontologie, der forensischen Anthropologie in die Gerichtsmedizin, der Auxologie in die Pädiatrie und so weiter. Die Spezialisierung hat generell nicht nur Vorteile. Mehr und mehr Forscher erkennen, wie eng ihr Blick wird und dass eine gewisse Gefahr besteht, zum „Fachidioten“ zu mutieren. Der Blick über den eigenen Tellerrand hinaus ist vielen schon verlorengegangen, was auch bedauert wird. Große Funding-Agencies rufen in ihren Calls immer mehr zur „interdisziplinären Zusammenarbeit“ auf, was die Notwendigkeit unterstreicht, Barrieren aufzubrechen. Hier ist wiederum eine Chance für die Anthropologie, an Bedeutung zu gewinnen, vor allem wenn in innovativer Weise modernste Technik genutzt wird.

Eingelangt am 8. Jänner 2013; angenommen am 15. März 2013; Pre-Publishing Online am 12. Mai 2014

Aus dem ¹Department für Anthropologie und der ²Core Facility for Micro-Computed Tomography, Universität Wien, Österreich; dem ³Department of Cultural Heritage, University of Bologna, Italien; dem ⁴Department of Human Evolution, Max Planck Institute for Evolutionary Anthropology, Leipzig; dem ⁵Department of Palaeoanthropology and Messel Research, Senckenberg Research Institute, Frankfurt am Main, Deutschland

Korrespondenzadresse: Univ.-Prof. Dr. Gerhard W. Weber, Department für Anthropologie, Universität Wien, A-1090 Wien, Althanstraße 14; E-Mail: gerhard.weber@univie.ac.at

Die „Virtuelle Anthropologie“ [6] ist so ein Ansatz. Sie beschäftigt sich hauptsächlich mit der funktionellen Morphologie von rezenten und fossilen Homininen. Im Unterschied zu den klassischen Methoden der biologischen Anthropologie werden ausschließlich digitalisierte Untersuchungsobjekte (die Daten stammen oft aus dem Medical-Imaging-Bereich wie Computertomographie [CT] oder Magnetresonanztomographie [MRT], aber auch Mikro-Computertomographie [μ CT] und Oberflächenscans werden eingesetzt) innerhalb einer Computerumgebung verarbeitet. Die entscheidenden Vorteile liegen in der Zugänglichkeit versteckter Strukturen (z. B. Gehirn, Sinus, Dentin), der ständigen Verfügbarkeit der virtuellen Objekte (24/7) sowie in der hohen Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Die Entstehung der Virtuellen Anthropologie (VA) ging einher mit der computertechnologischen Revolution des späten 20. Jahrhunderts, denn ohne die Möglichkeiten der raschen Verarbeitung sehr großer Datenmengen ist sie nicht denkbar. Auch die Entwicklung der dahinter stehenden Mathematik und Statistik wäre ohne elektronische Rechnersysteme nicht durchführbar gewesen.

■ Die Rolle der Technologie in der Virtuellen Anthropologie (VA)

Funktionelle Morphologie führt die Ergebnisse von Strukturanalysen mit jenen der Funktionsanalysen zusammen und ist ein immer bedeutender werdender Teil der biologischen, aber auch der medizinischen Forschung. Schon Georges Cuvier (1769–1832) hat mit seinen „conditions d’existence“ die Idee von „form follows function“ zum Ausdruck gebracht. Obwohl wir mittlerweile gelernt haben, dass Gestalt und Form von diesem strengen Kanon abweichen können – Genetik und Evolutionstheorie waren noch unentdeckt zu Cuviers Zeiten –, müssen wir doch die Wichtigkeit des Zusammenhangs zwischen Form und Funktion anerkennen. Funktionelle Morphologie ist daher ein sehr fundamentaler Ansatz, um Biologie auf der Makroebene zu studieren, mit dem Ziel zu verstehen, wie Gestalt und Größe die Funktion beeinflussen beziehungsweise was die Funktion einer Struktur überhaupt sein könnte.

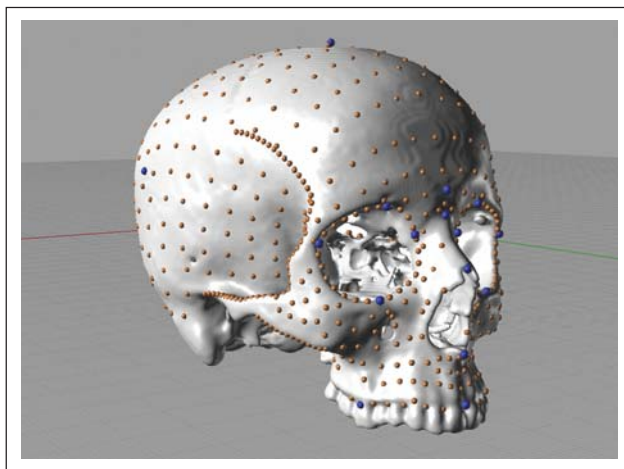


Abbildung 1: Virtuelle Kopie eines menschlichen Kraniaums mit 25 klassischen Landmarks (biologisch homologe Messpunkte) als blaue Kugeln und 824 Semi-Landmarks (geometrisch homologe Messpunkte) als gelbe Kugeln. Nahezu die gesamte Geometrie des Kraniaums kann mit dieser Methode erfasst werden.

Technologie hat einen ganz entscheidenden Einfluss auf unsere Forschungsmöglichkeiten. Die generellen anatomischen Strukturen sind mittlerweile hinlänglich beschrieben, aber Form und Gestalt im Detail quantitativ zu analysieren, in Strukturen zerstörungsfrei hineinzusehen, in die Mikroebenen vorzudringen und in Verbindung damit die Biomechanik von Strukturen zu analysieren, sind Aufgaben, die erst in jüngster Zeit möglich werden. Über die so genannte „geometric morphometrics“ [7, 8], ein wesentlicher Bestandteil der Virtuellen Anthropologie, ist es ungefähr seit der Jahrtausendwende möglich, komplexe 3D-Strukturen wie Schädel, Gesichter oder postkraniale Elemente mithilfe von hunderten Messpunkten zu vergleichen, mittlere Formen zu berechnen, die Variation darzustellen oder hypothetische Zwischenformen zu berechnen. Das alles passiert mithilfe von ausgereiften mathematischen und statistischen Methoden wie der „procrustes superimposition“, „thin plate spline warping“ oder „principal component analysis“ [6]. Der Vorteil der 3D-Koordinaten-basierten Methoden ist, dass Objekte in viel größerer Detailgenauigkeit vermessen werden können und hunderte Messpunkte an vielen Objekten gleichzeitig verarbeitet werden können (Abb. 1). Das alles wäre mit den traditionellen Methoden der Anthropometrie nicht möglich, die meist auf qualitative Beschreibungen oder auf Distanz- und Winkelmaße zurückgreifen.

Seit den 1970er-Jahren [9] ermöglicht uns die medizinische Bildgebung, 3D-Daten aus dem Inneren von Körpern zu gewinnen. Die Radiographie existierte zwar schon viel länger [10], aber aufgrund der Einschränkung auf 2 Dimensionen sowie der damit verbundenen Projektions- und Kontrastprobleme liefert sie Daten, die für die Forschung nur eingeschränkter Wert haben. Die räumlichen Eigenschaften von 3-dimensionalen Körpern wie Homininenschädeln müssen in 3 Dimensionen analysiert werden, um Form und Funktion zu verstehen. Projektionen davon sind dazu weitgehend ungeeignet. Die Tomographen wurden über die Jahre immer besser und wir stehen heute im medizinischen Bereich bei Auflösungen von 100–200 μ m in der Schichtebene. Nicht genug allerdings für manche Aufgaben. So genannte „Industriescanner“, heute eher „ μ CTs“ genannt, erlauben uns jetzt Auflösungen hinunter bis in den niedrigen Mikrometerbereich (1–100 μ m). Detailanalysen trabekulärer Strukturen, Zahnschmelzdicken- oder kortikale Knochendickenmessungen werden so mit hoher Genauigkeit möglich. 2009 eröffnete die Universität Wien das „Vienna Micro-CT Lab“, das einer der Autoren (GW) seither leitet. Der Scanner in diesem Labor ist sehr außergewöhnlich (Abb. 2). In der Tat gibt es nur eine Handvoll davon in Europa. Er erlaubt, Objekte in der Größe von kompletten Schädeln zu scannen, und das in einer sehr hohen Auflösung (www.micro-ct.at). Damit wird es z. B. möglich, zerstörungsfrei in Teilgebiete größerer Objekte hinein zu zoomen, wie etwa auf einen bestimmten Zahn des Oberkiefers, wobei dieser nicht aus dem Schädel extrahiert werden muss (Abb. 3).

Solche hochauflösende Daten können einerseits dazu verwendet werden, Mikrostrukturen zu untersuchen, und andererseits dazu, die Biomechanik zu simulieren. Die „Finite-Elemente-Analyse“ (FEA) ist ein Verfahren, das aus dem Ingenieurwesen kommt. Zunächst wurde sie nur in der Technik angewendet, um im Computer konstruierte Bauteile mechanisch zu überprüfen. Es erwies sich jedoch diese Technologie auch in der Biologie als sehr



Abbildung 2: µ-Computertomograph (VISCOM X8060 II) am Department für Anthropologie der Universität Wien. Die Maschine kann Objekte in der Größe kompletter Schädel in sehr hoher Auflösung scannen.

nützlich [11–13]. Die Biomechanik unseres Kauapparates, der einer der am meisten belasteten Teile unseres Körpers ist [14], ist beispielsweise nur sehr lückenhaft bekannt. Wir verstehen nicht wirklich, warum das Relief unserer Zähne genau so gestaltet ist, wie wir es vorfinden, welchen Sinn die Fissuren, die durch die Okklusalfächen verlaufen, haben könnten oder warum Zahnschmelz am Zahnhals der Krone häufiger bricht als an anderen Stellen. Wir haben auch längst nicht die Konsequenzen der evolutiven Reduzierung unserer Kiefer verstanden (unsere Vorfahren hatten wesentlich mächtigere und vorspringende Kiefer). Tagtäglich füllen Menschen mit Kieferproblemen die Praxen der Kieferorthopäden. Wir wissen auch nicht, ob es hauptsächlich eine Umstellung der Ernährungsweise war, die zunächst in der Evolution unsere Kiefer umformte und schlussendlich zu unserer eigenen Spezies, dem anatomisch modernen Menschen, führte [15].

Die heutige Mainstream-Forschung konzentriert sich sehr stark auf genetisch/molekulare Ansätze. Aber hinsichtlich der funktionellen Morphologie gibt es mindestens ebenso viel zu tun, um unsere eigenen Körpersysteme zu verstehen. Der Einsatz von moderner Technologie ist unabdingbar, um hier Fortschritte zu erzielen. Manche Methoden müssen erst entwickelt werden, und das vorwiegend in interdisziplinärer Zusammenarbeit. Genau so ist es geschehen in der VA, als viele Methoden zur Formanalyse eigentlich für den paläoanthropologischen Einsatz entwickelt wurden [16–18]. Danach stellten sich einige als durchaus brauchbar auch für medizinische Zwecke heraus [19–21]. Im Moment kämpfen wir damit, organismische Formanalysen und Ergebnisse von Bewegung (Kinematik) mit denen der mechanischen Belastung zu verbinden [22]. Die Algorithmen dafür sind noch nicht geschrieben worden, die einzelnen Gebiete lassen sich bislang nur getrennt voneinander auswerten und nur subjektiv, also im Kopf des Betrachters, miteinander verbinden. Wir müssen erst die Werkzeuge entwickeln, um dies numerisch zu tun.

Die folgenden 2 Beispiele aus der biologischen Anthropologie sollen Anwendungen vorstellen, die Nutzen ziehen aus den

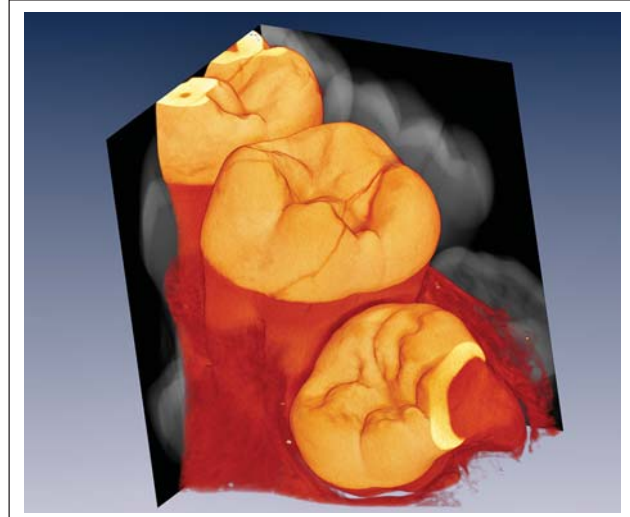


Abbildung 3: Beispiel eines µCT-Scans: ein oberer mittlerer Molar eines Menschen (M²) mit seinen Nachbarn, dem schon etwas abgekauten M¹ (abgeflachte Zahnhöcker) im oberen Teil des Bildes und dem noch nicht voll eruptierten M³ im unteren Teil. Die Auflösung beträgt 30 µm, der Scan wurde auf den Oberkiefer des kompletten Schädels gezoomt.

Techniken der Virtuellen Anthropologie und der µCT. Auch wenn hier keine klinischen Applikationen vorkommen, ist der potenzielle Einsatzbereich doch deutlich erkennbar.

■ Der erste Europäer

Für dieses Beispiel gehen wir weit zurück in die Urzeit. Eine spannende Frage der Hominidenevolution ist, wann wir modernen Menschen (*Homo sapiens*) nach Europa kamen und damit auch begannen, die andere hier lebende Menschenform, die Neandertaler, zu verdrängen. Wie wir gleich sehen werden, passierte dies nämlich etliche tausend Jahre früher, als man bisher dachte. Ein Wissenschaftler-Team unter der Leitung des Departments für Anthropologie der Universität Wien untersuchte 2 prähistorische Milchzähne. Diese wurden 1964 in der „Grotta del Cavallo“, einer prähistorischen Höhle in Süditalien (Apulien), gefunden, damals aber irrtümlich den Neandertalern zugeordnet. Unsere Studie zeigt, dass sie von anatomisch modernen Menschen stammen und die dazugehörigen Fundschichten 43.000–45.000 Jahre alt sind. Das bedeutet, dass diese Fossilien älter sind als alle bisher bekannten europäischen Funde von modernen Menschen. Der Artikel dazu erschien im Fachjournal *Nature* [23].

Die Felshöhle „Grotta del Cavallo“ beherbergt 7 m dicke archäologische Schichten, die genau jene Zeit umfassen, in der die Neandertaler von den modernen Menschen abgelöst wurden. 1964 wurden von Arturo Palma di Cesnola [24] 2 Milchzähne aus der so genannten „Uluzzian“-Schicht ausgegraben. Charakteristisch für die Uluzzian-Kultur [25] – beschrieben in mehr als 20 Fundorten in Italien – sind die Produktion von Schmuck und Knochenwerkzeugen sowie der Gebrauch von Farbstoffen. Solche Artefakte werden üblicherweise mit dem symbolischen Verhalten von modernen Menschen in Verbindung gebracht. Die Zähne von Cavallo wurden in den 1960ern fälschlicherweise aber den vor 200.000 bis 40.000 Jahren lebenden Neandertalern zugerechnet, und diese Zuordnung galt seither als Beleg dafür, dass die Uluzzian-Kul-

tur mit ihren komplexen Ornamenten und Werkzeugen auf die Neandertaler zurückgehen sollte.

Mithilfe hochauflösender mikro-computertomographischer Aufnahmen der menschlichen Überreste der Grotta del Cavallo (Abb. 4) konnten diese mit einer großen Stichprobe von modernen Menschen und Neandertalern verglichen werden. Dabei wurde einerseits die Dicke des Zahnschmelzes vermessen und zum anderen der Umriss der Zahnkronen. Dem Einsatz der Mikro-Computertomographie ist es zu verdanken, dass diese inneren und äußeren Formmerkmale der Zahnkronen untersucht werden konnten. Die Resultate zeigten ohne Zweifel, dass die Funde der Grotta del Cavallo von modernen Menschen stammen und nicht von Neandertalern, wie ursprünglich angenommen wurde. Die Oxford Radiocarbon Accelerator Unit erstellte gleichzeitig neue chronometrische Analysen. Frühere Datierungen waren problematisch und von Verunreinigungen beeinträchtigt [26]. Da die Zähne für eine direkte Datierung zu wenig

Material liefern würden, entwickelten die Forscher der englischen Elite-Uni einen neuen Ansatz, um Muschelperlen aus derselben Fundschicht wie die Zähne zu untersuchen. Dies zeigte, dass die Zähne ca. 43.000–45.000 Jahre alt sind. Die beiden Zähne der Grotta del Cavallo sind somit von den ältesten modernen Menschen in Europa, die man bisher gefunden hat. Dies bestätigt, dass die Ankunft unserer Spezies auf dem Kontinent einige tausend Jahre früher erfolgte (cf. [27]) und damit auch die Koexistenz mit den Neandertalern wesentlich länger dauerte als bisher angenommen. Mit diesen fossilen Belegen konnte auch bestätigt werden, dass moderne Menschen, und nicht Neandertaler, die fortschrittliche Uluzzian-Kultur geschaffen hatten. Ob dieser technologische – und vielleicht auch mentale – Vorsprung an der Verdrängung der Neandertaler beteiligt war, ist schwer zu beweisen, aber doch eher wahrscheinlich.

In der Vergangenheit waren die Möglichkeiten zur Identifizierung von so seltenen menschlichen Fossilien wie den beiden

kleinen Milchzähnen eingeschränkt und erfolgten hauptsächlich aufgrund der äußeren Morphologie [24]. Es ist dem Einsatz der μ CT und den metrischen Analysen der Virtuellen Anthropologie zu verdanken, dass diese Funde richtig eingeordnet werden konnten. Der Fall ist auch ein gutes Beispiel dafür, dass die Zusammenarbeit von mehreren europäischen Institutionen sehr fruchtbar sein kann. Ohne diese wären das fossile Material und die verschiedenen Methoden für die entsprechenden Analysen nicht kombinierbar gewesen.

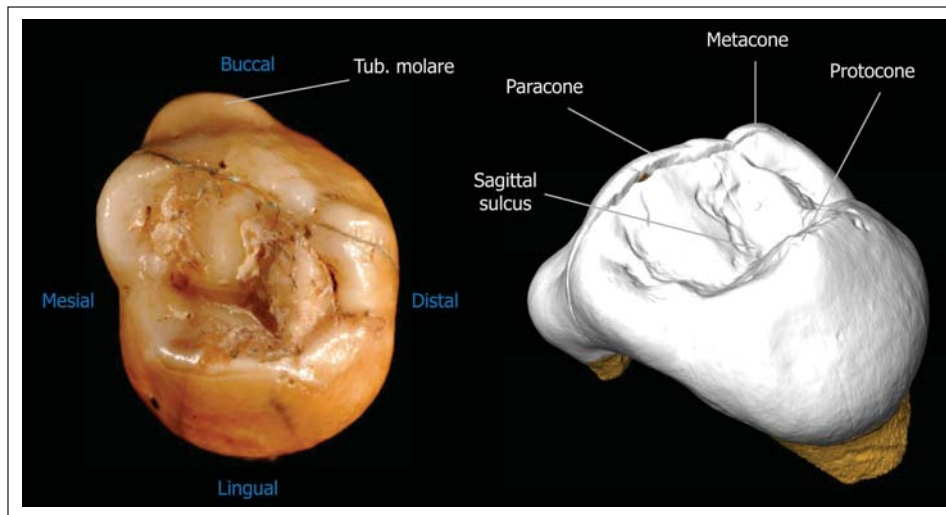


Abbildung 4: Links das Original von Cavallo-B (einer der beiden 45.000 Jahre alten Milchzähne) und rechts seine virtuelle Kopie, an der die Messungen der Zahnschmelzdicke und der Umrisslinien durchgeführt wurden. Räumliche Auflösung 25 μ m. Mod. nach [23].

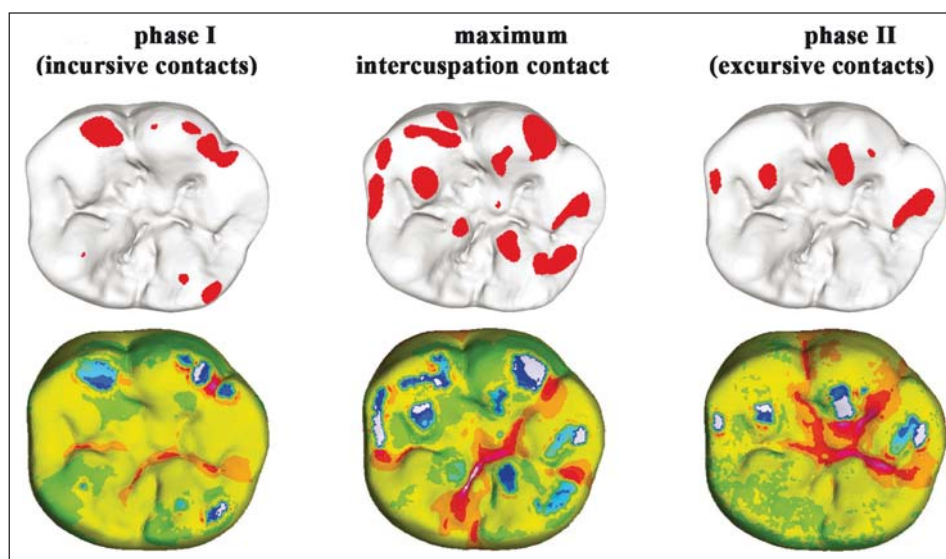


Abbildung 5: Finite-Elemente-Analyse eines menschlichen unteren Molaren („maximum and minimum principal stress distribution“). Die Situation an der Okklusalfäche wird für die 3 Phasen des Arbeitstaktes dargestellt. Die obere Reihe zeigt die ermittelten okklusalen Kontaktflächen (rote Areale), die untere die dazugehörigen Visualisierungen der Finite-Elemente-Analyse unter Belastung. Beachtenswert sind die sehr hohen Zugbelastungen in den Fissuren (rot = hoher Zug, blau bzw. weiß = hoher Druck) zum Zeitpunkt der maximalen Verzahnung und in Phase II. Mod. nach [30].

Die Biomechanik unserer Zähne

Im zweiten Beispiel begeben wir uns wieder in die Gegenwart. Die Biomechanik der Zähne ist, auch wenn es seltsam erscheint, ein fast weißer Fleck auf der Landkarte unseres Wissens. Wenn solche Studien überhaupt gemacht werden, verwenden sie realitätsferne Szenarien für die Belastung der Zähne. Während des Kauvorgangs kommen die Höcker unserer Zähne in einer ganz bestimmten Weise in Kontakt. Auf die „Phase I“ (Ineinandergleiten) des Arbeitstaktes folgt die so genannte „maximale Verzahnung“, und schließlich die „Phase II“ (Auseinander-

gleiten). Die Belastungen ändern sich naturgemäß je nach Arbeitsphase und Reliefform der beteiligten Zähne. Die meisten biomechanischen Simulationen gehen aber von einem sehr einfachen Szenario aus, nämlich einer Belastung parallel zur Längsachse des Zahnes [28, 29].

In einer 2011 erschienen Studie [30] in Zusammenarbeit mit dem Senckenberg-Forschungsinstitut Frankfurt konnten wir weltweit zum ersten Mal eine Finite-Elemente-Studie vorlegen, die jene tatsächlichen individuellen Abkauungsmuster am Zahn (unterer erster Molar) und seiner entsprechenden Antagonisten (oberer zweiter Prämolare und oberer erster Molar) in Betracht zieht, wie wir sie vorfinden. Das wird möglich über die so genannte „occlusal fingerprint analysis“ [31, 32], die es erlaubt, die jeweiligen Kontaktflächen und die relative Bewegung der Zähne zueinander zu erfassen. Virtuelle Modelle der Zähne wurden anhand von μ CT-Aufnahmen (Auflösung 55 μ m) produziert und dann in der biomechanischen Simulation eben jenen realitätsnahen Szenarios ausgesetzt. Diese Art der Erforschung der funktionellen Morphologie der Zähne steht noch ganz an ihrem Anfang. Aber einige erstaunliche Dinge zeigten sich bereits bei diesem Pilotprojekt: Die Druck- und Zugbelastungen ändern sich dramatisch in den verschiedenen Phasen des Arbeitstaktes (Abb. 5) und sehen erheblich anders aus als bei den bisher verwendeten simplifizierten Belastungsszenarien. Sehr hohe Druckbelastungen entstehen natürlich an den so genannten Abnutzungsfacetten, dort wo der Zahnschmelz zunächst erodiert wird durch die ständige Berührung während des Kauvorgangs. Weniger erwarteten wir aber die sehr hohen Zugbelastungen in den Furchen der Kaufläche, den so genannten Fissuren, zu finden (Abb. 5). Die Ursachen sind noch unklar, aber die Resultate mahnen zur Vorsicht, z. B. hinsichtlich der heutzutage oft angewendeten Versiegelung der Fissuren [33]. Dies mag einerseits vor Karies schützen, was wir damit aber biomechanisch dem Zahn antun, ist noch völlig ungeklärt. Oder um in Anlehnung an den anfangs zitierten Georges Cuvier zu sprechen: Organische Strukturen, die wir untersuchen, sind in den meisten Fällen bereits auf ihre Funktion hin optimiert, auch wenn wir das zunächst noch nicht erkennen.

■ Relevanz für die Praxis

Die beiden erwähnten Beispiele hier sind nur einige von vielen aus dem vergangenen Jahrzehnt. Aber generell kann gesagt werden, dass modernste Technologie wie die Mikro-Computertomographie natürlich die Grenzen erweitert und damit neue Zugänge zu alten Problemen erlaubt. Ein Schelm jedoch wer glaubt, dass sich damit alleine schon die Pforten zu neuem Wissen öffnen. Die entsprechenden Methoden und Forschungsansätze zu ihrem sinnvollen Einsatz müssen erst entwickelt werden – und dies gelingt vor allem in einem interdisziplinären Umfeld am besten. Wenn Anthropologen, Biologen, Mathematiker, Statistiker, Computerwissenschaftler und Ingenieure zusammenarbeiten, entfalten sich die Möglichkeiten einer neuen Technologie erst richtig. Forscher aus den Naturwissenschaften oder der Medizin sind oft angewiesen auf die Mitwirkung von technisch orientierten Fachkollegen, um neue Apparate auszureizen. Techniker

sind oft leichter zu begeistern für biologische oder medizinische Fragen als man glaubt, vielleicht weil die Sinnhaftigkeit der Problemlösung so offensichtlich ist. Die Formulierung der Problemstellung aber auf den Punkt zu bringen, ist der entscheidende Schlüssel. Und diese Formulierungen kommen in den meisten Fällen von jenen, die in ihrer Ausbildung näher am Organismus dran sind: den Anthropologen/Biologen und den Medizinern. Zwischen den beiden Feldern eröffnen sich damit viele Möglichkeiten zur Zusammenarbeit. Der klinische Alltag mit steigender Patientenfrequenz lässt immer weniger Zeit und Spielraum für Forschungsarbeit. Offene Fragen hingegen tun sich mehr als genug auf. In diesem Sinne könnte eine intensivierte Zusammenarbeit zwischen Medizinern und virtuellen Anthropologen in Zukunft vielleicht noch sehr interessant werden.

■ Danksagung

Wir danken Prof. Heinrich Resch und Prof. Franz Kainberger für die gute Zusammenarbeit der letzten Jahre und die Einladung zu diesem Artikel. Dank geht auch an Prof. Ian Grosse für seine Mitarbeit an der FEA der Zähne, an Mag. Cinzia Fornai für die Aufbereitung von Daten sowie auch an die zahlreichen Kollegen der Cavallo-Publikation für ihre Mitarbeit. Diese Arbeit wurde gefördert von US-NSF 01-120 Hominid Grant 2007, A.E.R.S. Dental Medicine Organisations GmbH FA547013, der Foundation Fyssen, DFG INST 37/706-1 FUGG, und ist Publikation Nr. 65 von der DFG Forschergruppe 771 „Funktion und Leistungssteigerung in der Bezahnung von Säugetieren – phylogenetische und ontogenetische Einflüsse auf den Kauapparat“.

■ Interessenkonflikt

Es liegen keine Interessenkonflikte vor.

Literatur:

1. Martin R. Lehrbuch der Anthropologie in systematischer Darstellung. Verlag von Gustav Fischer, Jena, 1914.
2. Darwin C. On the origin of species by means of natural selection or the preservation of favoured races in the struggle for life. 1st ed. John Murray, Albemarle Street, London, 1859.
3. Wallace AR. On the tendency of varieties to depart indefinitely from the original type. J Proc Linn Soc Zool 1858; 3: 53–62.
4. Mendel G. Versuche über Pflanzen-Hybriden. In: Verhandlungen des naturforschenden Vereines in Brünn. Bd. IV. Naturforschender Verein in Brünn, Brno, 1866; 3–47.
5. Knußmann R, Schwidetzky I, Jürgens H, et al. (Hrsg). Wesen und Methoden der Anthropologie. Anthropologie. Handbuch der vergleichenden Biologie des Menschen. Vol. 1. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart-New York, 1988.
6. Weber GW, Bookstein FL. Virtual Anthropology – A guide to a new interdisciplinary field. Springer Verlag, Wien-New York, 2011.
7. Bookstein FL. Morphometric tools for landmark data: geometry and biology. [Orange Book]. Cambridge University Press, Cambridge-New York, 1991.
8. Slice DE. Modern morphometrics in physical anthropology. [Black Book]. Kluwer Press, New York, 2005.
9. Hounsfield GN. Computerized transverse axial scanning (tomography): I. Description of system. Br J Radiol 1973; 46: 1016–22.
10. Roentgen CW. Über eine neue Art von Strahlen. Vorläufige Mittheilung. Aus den Sitzungsberichten der Würzburger Physico-med. Gesellschaft, 1895; 1–10.
11. Richmond BG, Wright BW, Grosse I, et al. Finite element analysis in functional morphology. Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol 2005; 283: 259–74.
12. Strait DS, Weber GW, Neubauer S, et al. The feeding biomechanics and dietary ecology of *Australopithecus africanus*. Proc Natl Acad Sci U S A 2009; 106: 2124–9.
13. Ross CF, Patel BA, Slice DE, et al. Modeling masticatory muscle force in finite element analysis: Sensitivity analysis using principal coordinates analysis. Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol 2005; 283: 288–99.
14. Lucas PW. Dental functional morphology – how teeth work. Cambridge University Press, Cambridge, 2004.

15. Lieberman DE. The evolution of the human head. The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge MA, 2011.
16. Weber GW, Gunz P, Mitteröcker P, et al. External geometry of Mladec neurocrania compared with anatomically modern humans and Neandertals. In: Teschler-Nicola M (ed). *Early Modern Humans at the Moravian Gate*. Springer Verlag, Vienna-New York, 2006; 453–71.
17. Gunz P, Bookstein FL, Mitteroecker P, et al. Early modern human diversity suggests subdivided population structure and a complex out-of-Africa scenario. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2009; 106: 6094–8.
18. Gunz P, Mitteroecker P, Neubauer S, et al. Principles for the virtual reconstruction of hominin crania. *J Hum Evol* 2009; 57: 48–62.
19. Traxler H, Ender HG, Weber G, et al. Applying circular posterior-hinged craniotomy to malignant cerebral edemas. *Clin Anat* 2002; 15: 173–81.
20. Heuzé Y, Marreiros F, Verius M, et al. The use of Procrustes average shape in the design of custom implant surface for large skull defects. *Int J CARS* 2008; 3 (Suppl 1): S283–S284.
21. Recheis W, Nixon E, Thiesse J, et al. Methods of in-vivo mouse lung micro-CT. In: Amini AA, Manduca A (eds). *Proceedings of the SPIE* 2005; 5746: 40–9.
22. Weber GW, Bookstein FL, Strait DS. Virtual anthropology meets biomechanics. *J Biomech* 2011; 44: 1429–32.
23. Benazzi S, Douka K, Fornai C, et al. Early dispersal of modern humans in Europe and implications for Neanderthal behaviour. *Nature* 2011; 479: 525–8.
24. Palma di Cesnola A, Messeri MP. Quatre dents humaines paléolithiques trouvées dans des cavernes de l'Italie Meridionale. *L'Anthropologie* 1967; 71: 249–62.
25. Palma di Cesnola A. L'Uluzzien: facie's italiani du leptolithique archaïque. *L'Anthropologie* 1989; 93: 783–812.
26. Higham TF. European Middle and Upper Palaeolithic radiocarbon dates are often older than they look: problems with previous dates and some remedies. *Antiquity* 2011; 85: 235–49.
27. Trinkaus E, Moldovan O, Milota S, et al. An early modern human from the Pestera cu Oase, Romania. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2003; 100: 11231–6.
28. De Jager NM, de Kler M, van der Zel JM. The influence of different core material on the FEA-determined stress distribution in dental crowns. *Dent Mater* 2006; 22: 234–42.
29. Hattori Y, Satoh C, Kunieda T, et al. Bite forces and their resultants during forceful intercuspal clenching in humans. *J Biomech* 2009; 42: 1533–8.
30. Benazzi S, Kullmer O, Grosse IR, et al. Using occlusal wear information and finite element analysis to investigate stress distributions in human molars. *J Anat* 2011; 219: 259–72.
31. Kullmer O, Benazzi S, Fiorenza L, et al. Technical note: Occlusal fingerprint analysis: quantification of tooth wear pattern. *Am J Phys Anthropol* 2009; 139: 600–5.
32. Kullmer O, Schulz D, Benazzi S. An experimental approach to evaluate the correspondence between wear facet position and occlusal movements. *Anat Rec (Hoboken)* 2012; 295: 846–52.
33. McLean JW, Wilson AD. Fissure sealing and filling with an adhesive glass-ionomer cement. *Br Dent J* 1974; 136: 269–76.

Mitteilungen aus der Redaktion

Besuchen Sie unsere zeitschriftenübergreifende Datenbank

☒ [Bilddatenbank](#)

☒ [Artikeldatenbank](#)

☒ [Fallberichte](#)

e-Journal-Abo

Beziehen Sie die elektronischen Ausgaben dieser Zeitschrift hier.

Die Lieferung umfasst 4–5 Ausgaben pro Jahr zzgl. allfälliger Sonderhefte.

Unsere e-Journale stehen als PDF-Datei zur Verfügung und sind auf den meisten der marktüblichen e-Book-Readern, Tablets sowie auf iPad funktionsfähig.

☒ [Bestellung e-Journal-Abo](#)

Haftungsausschluss

Die in unseren Webseiten publizierten Informationen richten sich **ausschließlich an geprüfte und autorisierte medizinische Berufsgruppen** und entbinden nicht von der ärztlichen Sorgfaltspflicht sowie von einer ausführlichen Patientenaufklärung über therapeutische Optionen und deren Wirkungen bzw. Nebenwirkungen. Die entsprechenden Angaben werden von den Autoren mit der größten Sorgfalt recherchiert und zusammengestellt. Die angegebenen Dosierungen sind im Einzelfall anhand der Fachinformationen zu überprüfen. Weder die Autoren, noch die tragenden Gesellschaften noch der Verlag übernehmen irgendwelche Haftungsansprüche.

Bitte beachten Sie auch diese Seiten:

[Impressum](#)

[Disclaimers & Copyright](#)

[Datenschutzerklärung](#)