

Zeitschrift: Mitteilungen der aargauischen Naturforschenden Gesellschaft
Herausgeber: Aargauische Naturforschende Gesellschaft
Band: 35 (1999)

Artikel: Röntgen im Museum
Autor: Foelix, Rainer / Fischer, Hans-Jürgen
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-173064>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 16.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Röntgen im Museum

X-rays were discovered about 100 years ago and have been used in medicine for diagnosis ever since. We have all had the experience of being x-rayed at the doctor's office in order to find out the cause of certain diseases. Yet only few of us are aware that X-rays are widely and successfully used in many non-medical fields. Examples range from baggage control at the airport or safety tests on certain technical materials to the exploration of outer space (X-ray astronomy). There are also many applications in archeological and art museums, e.g. when falsifications need to be determined.

We want to focus in this article on the application of X-rays in natural history museums and shall also present some examples from our own museum in Aarau. Using modern methods such as computer tomography we were able not only to inspect some exotic skeletons but also fossil bones from dinosaurs of more than 200 million years ago. Even tiny shell-bearing protozoans (e.g. foraminifera) can now be examined by microradiography, with a resolution of down to 0.5 µm.

Rainer Foelix, Hans-Jürgen Fischer

1. Einleitung

Am 8. November 1895 entdeckte der deutsche Physiker Wilhelm Conrad Röntgen eine später nach ihm benannte Strahlenart, die die unglaubliche und für die damalige Zeit sensationelle Eigenschaft besaß, Materie und den menschlichen Körper zu durchdringen und deren Binnenstrukturen auf fotografischen Emulsionen als Bild festzuhalten. Diese Strahlen traten bereits wenige Wochen nach ihrer Entdeckung einen Siegeszug ohne Gleichen um die Welt an, der bis heute anhält und die diagnostische Medizin revolutioniert hat.

Weit weniger bekannt ist die Tatsache, dass sich diese Strahlen aber auch als Forschungsinstrument einsetzen ließen, welche in den Leitwissenschaften unseres Jahrhunderts – Physik, Chemie und Biologie – entscheidende Durchbrüche und Entdeckungen ermöglichten. So sind z.B. die Aufschlüsselung der Helixstruktur der DNA, der Trägerin der Erbsubstanz, sowie die Vorstellungen über das heute gültige Modell des Atomaufbaus und ein Grossteil der Formelsprache der organischen und anorganischen Chemie wissenschaft-

lichen Methoden zu verdanken, die auf Verwendung von Röntgenstrahlen beruhen. Wenn heute Forschungssatelliten in den Weltraum geschossen werden, so unter anderem deshalb, um mit Teleskopen Röntgenstrahlen zu erfassen, welche von fernen Sternen und Galaxien vor Millionen von Lichtjahren ausgesendet worden sind. Durch diese sog. Röntgenastronomie wird Aufschluss erhofft über Anfänge und zukünftiges Schicksal des Universums. Die Möglichkeit, durch Röntgenstrahlen zerstörungsfrei Einblicke in Objekte zu erhalten, war natürlich jenen Wissenschaftlern besonders willkommen, deren Untersuchungsgegenstände unwiederbringliche Kulturgüter darstellen: von der ägyptischen Mumie bis zum Südtiroler Gletschermann Ötzi spielen Röntgenstrahlen eine wichtige Rolle im Sichtbarmachen verborgener Schmuckgegenstände oder der Aufklärung früherer Lebensumstände. Manchem Museumsdirektor und Kunsthistoriker gaben Radiographien von Gemälden bislang unbekannte Informationen über Malstile, Farbzusammensetzungen, Übermalungen, Korrekturen – und natürlich auch Fälschungen. Aber auch die argwöhnenden Augen von Polizisten, Zöllnern und Kunsthändlern haben mit Röntgenstrahlen eine entscheidende Verstärkung erfahren, entgehen ihnen doch kaum noch die Eisenfeile in der Kassiber-Banane, die Kalaschnikov im Fluggepäck oder die Aluminiumlegierung im angeblich aus der Römerzeit stammenden Dolch. Röntgenbilder aus diesem Themenkreis sind zwar für den Aussenstehenden amüsant, lassen aber den ernsten Hintergrund oft vergessen.

2. Röntgen in Naturmuseen

Auch in naturhistorischen Museen haben sich Röntgenstrahlen als hilfreich erwiesen und zwar in ästhetischer wie in wissenschaftlicher Hinsicht, frei nach Wilhelm Buschs Motto: «So sieht man klar wie selten nur, ins inn're Walten der Natur»... Wir möchten hier eine kurze Übersicht für ihre Anwendung in Naturmuseen geben und mit einigen Beispielen aus eigener Erfahrung illustrieren. Manche der Röntgenaufnahmen aus dem nicht-medizinischen Bereich verfolgen in erster Linie einen ästhetischen Zweck, ohne direkt einen wissenschaftlichen Anspruch zu haben (DÖHMANN, 1931). Ein typisches Beispiel sind etwa die schönen Röntgenbilder von Nautilus- und Schneckschalen, wie sie seit Ende 1996 auf einer Wanderausstellung des Naturmuseums Basel zu sehen sind (Abb. 1–4). Allerdings können bei solchen Aufnahmen quasi als Nebenprodukt auch neue Erkenntnisse gewonnen werden. So wird das Innenskelett des kleinen Tintenfisches *Spirula* in den meisten Lehrbüchern mit merkwürdig schiefen Kammerwänden dargestellt (LEHMANN, 1990; TARDENT, 1993), während sie im Röntgenbild als völlig symmetrische Kugelschalen erscheinen (Abb. 5, 6). Ein anderes Beispiel für überraschende Befunde erlebten wir kürzlich, als wir einen Fischschädel aus der Sammlung

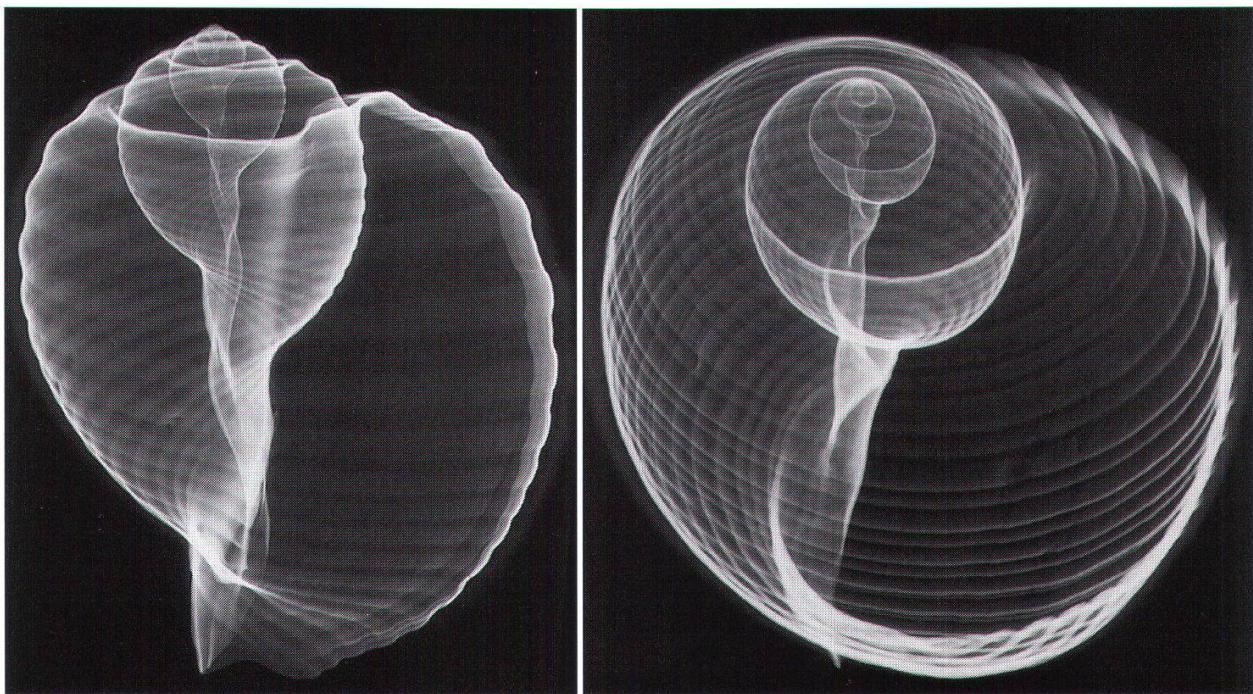


Abb. 1: Schneckenschalen eignen sich besonders gut für Röntgenaufnahmen. In dieser Fassschnecke (*Tonna galea*) aus dem Mittelmeer werden die Innenwindungen samt Spindel deutlich sichtbar (Foto: H.J. Fischer).

Abb. 2: Kippt man die Längsachse des Schneckengehäuses zur Strahlrichtung, so tritt die Räumlichkeit der Schalenwindungen noch klarer hervor (Foto: D. Bönhof und R.F. Foelix).

des Aargauischen Naturmuseums geröntgt haben. Das Präparat eines sog. Kreuzwelses war schon insofern kurios, als es in folkloristischer Weise bemalt wurde, auf der Oberseite mit einer Mönchsfigur und auf der Unterseite mit einer Kreuzigungsdarstellung (Abb. 7). Der Eintrag im Eingangsbuch stammt aus dem Jahr 1939 und ist nicht weniger interessant: «Herkunft Samoa, von einem zum Christentum bekehrten Samoaner als Kruzifix gestaltet». Beim Röntgen trat nicht nur die kreuzartige Knochenstruktur der Schädelbasis zutage, sondern es fielen auch zwei helle Flecken im Schädelinneren auf, die wir zunächst für eingespülte Kieselsteinchen hielten (Abb. 8). Bei genauerem Hinsehen entpuppten sie sich eindeutig als Knochenscheiben, die sich etwas aus ihrer ursprünglichen Lage im Hinterhaupt verschoben hatten. Höchstwahrscheinlich handelt es sich hierbei um sehr grosse Ohrsteine, sog. Otolithen, aus dem Gleichgewichtsorgan.

Die meisten Röntgenaufnahmen verfolgen allerdings spezifische Ziele, etwa die Abklärung des (unsichtbaren) Inhaltes vor einer Präparation, oder die Dimensionsbestimmungen für flächige und räumliche Rekonstruktionen. Typische Beispiele für die Inhaltsabklärung bieten gewisse archäologische, osteologische und paläontologische Objekte. Der entscheidende Vorteil einer Röntgenuntersuchung liegt darin, dass es sich hierbei um eine «non-invasive

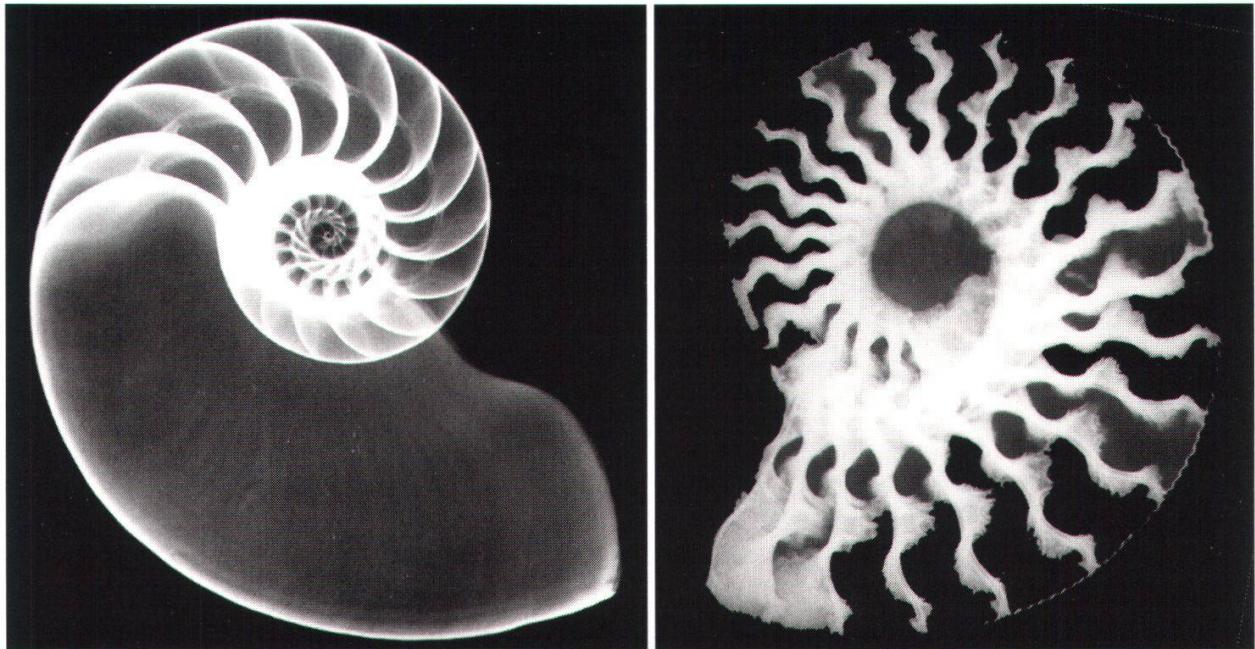


Abb. 3: Röntgenbild des seltenen Perlbootes *Nautilus scrobiculatus*. Im Gegensatz zu *Nautilus pompilius* besitzt diese Art einen «offenen Nabel», d.h. die Innenwindungen sind hier gut erkennbar. Die relativ grosse Wohnkammer nimmt den unteren Bildteil ein, darüber schliessen sich über 30 kleine, gasgefüllte Kammern an (Foto: D. Bönhof).

Abb. 4: Röntgenbild eines pyritisierten Ammoniten (*Cosmoceras*), ca. 150 Mio. Jahre alt. Verglichen mit den glatten Kammerwänden von *Nautilus*, sind hier die Septen deutlich verfaltet. Die innersten Windungen sind nicht erhalten (Foto: H.J. Fischer).

technique» handelt, d.h. dass keinerlei äussere Eingriffe gemacht werden müssen und das Objekt völlig intakt bleibt. In der Archäologie hat man seit langem Mumien oder antike Vasen geröntgt, um ohne Beschädigung etwas über den versteckten Inhalt zu erfahren. Mit der moderneren Computertomographie (CT) kann man so nicht nur verborgene Knochen, Münzen oder Schmuck orten, sondern sogar auf die Herstellungsweise bestimmter Objekte (Waffen, Werkzeuge) rückschliessen (FLISCH et al. 1996). Bei urgeschichtlichen Skelettfunden, z.B. Schädeln von Neanderthalern, konnte man so die komplizierten Strukturen des Innenohres räumlich rekonstruieren. Aus einer Serie von CT-Bildern lässt sich am Computer ein 3D-Bild aufbauen, das dann mittels *Stereolithographie* in ein naturgetreues Plastikmodell umgesetzt werden kann (ZOLLIKOFER et al. 1995, 1998).

Am Naturmuseum St. Gallen hat man kürzlich einen gut erhaltenen Flugsaurierschädel (*Tropeognathus*, 110 Mio. Jahre alt) computertomographisch untersucht und anhand von Querschnittserien die Grösse und Gestalt des Gehirns bestimmen können. Hieraus liessen sich dann auch weitere Schlüsse hinsichtlich der Verwandtschaft innerhalb dieser Sauriergruppe ziehen, d.h.

vermutlich waren die Flugsaurier näher mit den Krokodilen verwandt als mit den Vögeln (BÜRGIN, 1997).

Bei peruanischen Inka-Mumien wies man mit Hilfe modernster Röntgenmethoden Schädelfrakturen nach, die deutlich zeigen, dass es sich um rituelle Opfer gehandelt haben muss (REINHARD, 1996, 1997). Aus fast 700 CT-Einzelbildern wurde der Schädel eines Mädchens rekonstruiert und dabei eine gewaltsame Fraktur im Schläfenbereich diagnostiziert. Da die Mumie, ähnlich wie Ötzi, im ewigen Eis gefunden wurde (Anden: Nevado Ampato, 6900 m üM), waren auch noch die Weichteile erhalten. Entsprechend zeigten die CT-Bilder das Gehirn, das durch einen massiven Bluterguss zur Seite verschoben worden war.

In unserem Museumsmaterial stiessen wir unlängst auf Ober- und Unterkiefer einer ägyptischen Mumie und haben bereits konventionelle Röntgenbilder davon gemacht; für eine genauere Auswertung stehen aber noch Panorama-Aufnahmen der gesamten Zahnreihen aus. Allgemein sind Röntgenaufnahmen von Zähnen oder Knochen besonders aufschlussreich, weil sie auch etwas über das Alter eines Individuums verraten. Im Basler Naturhistorischen Museum konnte z.B. vor kurzem eine wissenschaftliche Debatte darüber entschieden werden, ob es sich bei einer besonders kleinen Fledermaus um eine eigene Art oder lediglich um ein Jungtier handle. Die Röntgenaufnahmen zeigten eindeutig noch unverschlossene Wachstumsfugen an den langen Röhrenknochen, was klar belegte, dass es sich um ein noch nicht erwachsenes Tier handeln musste (OAKLEY & FISCHER, unveröffentl.). Am Senckenberg Forschungsinstitut in Frankfurt hat man fossile Fledermäuse mit der Röntgenmethode untersucht, um anhand der Grösse des Innenohres (Cochlea) Hinweise zu bekommen, ob diese bereits über eine Echolot-Orientierung verfügten (HABERSETZER & STORCH, 1993). Dies scheint tatsächlich bereits im Eozän (50 Mio. Jahre) der Fall gewesen zu sein, auch wenn die Cochleae bei den damaligen Fledermäusen etwas kleiner waren als bei den heutigen.

3. Röntgen von Fossilien

Für paläontologische Objekte (Fossilien) besteht eine besonders lange Tradition der Röntgenuntersuchung. Die ersten Veröffentlichungen erschienen nur neun Monate nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen (BRÜHL, 1896; LEMOINE, 1896). Systematische Forschungen begannen 1932 durch W.M. LEHMANN. Er konzentrierte sich auf Versteinerungen des Hunsrückschiefers (Unterdevon) und fertigte bereits Stereo-Röntgenaufnahmen an. Wesentlich bekannter wurde später W. Stürmer, der als Mitarbeiter der Firma Siemens sein technisches Wissen einbringen konnte und zwischen 1957 und 1980 weit über 20 000 Röntgenbilder von Fossilien erstellte, z.T. mit spektakulären Ergebnissen (STÜRMER et al. 1980). Mit verfeinerten Methoden war es ihm ge-

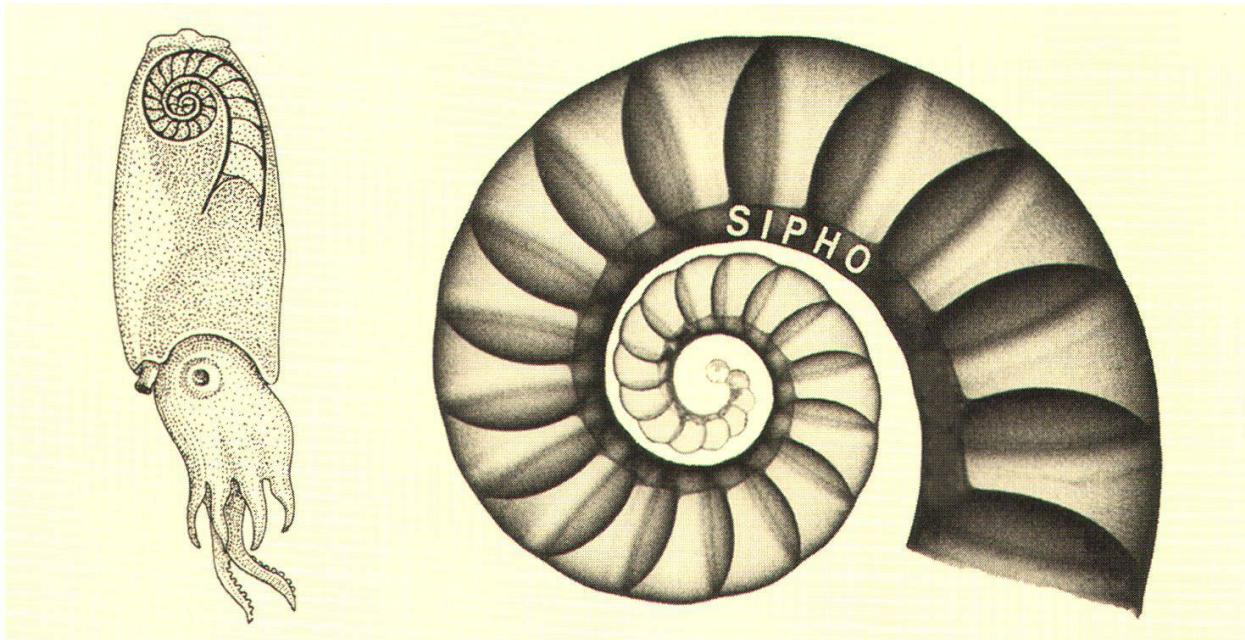


Abb. 5: Der kleine Tintenfisch *Spirula* (5 cm) schwimmt in senkrechter Körperlage in der Tiefsee; er besitzt ein spiralisches, gekammertes Innenskelett (Aus TARDENT, 1993).

Abb. 6: Im Röntgenbild zeigt die *Spirula*-Schale senkrecht stehende Kammerwände und einen innengelegenen Siphon (Foto: R.F. Foelix).

lungen, selbst gewisse «Weichteile» darzustellen, etwa den Darm von Trilobiten und Fischen, den sepiahaltigen Beutel von Tintenfischen sowie Fangarme von Belemniten und Ammoniten. Nebenher setzte er die Röntgenmethode auch zum Nachweis raffinierter Fälschungen ein. Es ist bemerkenswert, dass die erste Fälschung eines in Bernstein eingeschlossenen Frosches bereits 1906 mittels Röntgenaufnahmen entlarvt wurde, nämlich durch W. BRANCO. Häufig wird die Röntgenmethode in der Paläontologie vorbereitend zur mechanischen Präparation eingesetzt. Beim «Durchleuchten» fossilhaltiger Gesteinsplatten kann man nicht nur abklären, welche Fossilien darin enthalten sind, sondern auch wie sie orientiert sind, was eine grosse Hilfe beim späteren Freipräparieren bedeutet. Manchmal sind die Skelettteile im Gestein stark komprimiert, so dass man die verschiedenen Knochen und Zähne nur anhand von Röntgenaufnahmen bestimmen und einander zuordnen kann. Mit Hilfe von Stereo-Aufnahmen war es beispielsweise möglich, den zerdrückten Schädel des Giraffenhalssauriers *Tanystropheus* aus den Tessiner Kalkalpen räumlich zu rekonstruieren. Dabei liessen sich systematisch wichtige Schädelöffnungen bestimmen, die *Tanystropheus* als frühen Verwandten der Eidechsen ausweisen (WILD, 1973; 1988). Beim Röntgen des berühmten Urvogels *Archaeopteryx* stellte sich heraus, dass die drei Mittelfussknochen teilweise verwachsen sind und somit funktionell den völlig verwachsenen Laufknochen der Vögel entsprechen (WELLNHOFER, 1989).

Seit etwa 1970 benutzt man auch fahrbare Röntgenlabors, d.h. Kleinbusse mit kompletter Röntgen-Einrichtung, mit denen man schon im Steinbruch die notwendigen Abklärungen treffen kann. Statt Röntgenfilm benutzt man heute einen Röntgenbildverstärker, der Röntgenquanten in Lichtquanten und anschliessend mit einer Fotokathode in Elektronen umwandelt. Diese werden dann mit einer Elektronenoptik auf ein fluoreszierendes Austrittsfenster abgebildet. Dadurch wird das Bild bis zu 2500x verstärkt und kann dann auf eine hochauflösende Fernsehkamera projiziert werden. Unter Monitor-Kontrolle wird das digitalisierte Röntgen-Fernsehbild noch bearbeitet und gespeichert. Diese Methode spielt bei den empfindlichen Fossilien der berühmten Ölschiefergrube von Messel (Eozän) eine wichtige Rolle (HABERSETZER & SCHAAL, 1990). Erst kürzlich hat man dort in einem versteinerten Exkrement (Koprolith) ein Unterkieferstück mit Zähnen eines Halbaffen gefunden (FRANZEN, 1997). Nach Röntgenaufnahmen und genauerer Präparation der Backenzähne konnte man sogar die Art (*Europolemur koenigswaldi*) bestimmen. In Messel sind Primatenfunde relativ selten und stets nur als Fragmente bekannt; man vermutet, dass die Knochenbruchstücke auf das Werk von Raubtieren bzw. Aasfressern zurückzuführen sind.

Zuweilen findet man auch fossile Skelettreste, die auf natürliche Verletzungen und nachfolgende Regeneration hindeuten. Beispielsweise sind manche Saurierrippen an einer Stelle knotenartig verdickt, was man allgemein als einen verheilten Knochenbruch interpretiert. Wir haben vom Sauriermuseum in Frick

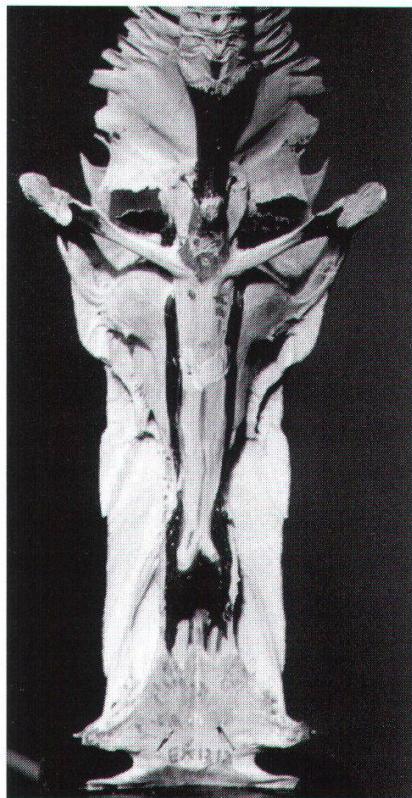


Abb. 7: Bemalter Schädel eines Kreuzwelses aus Samoa. Die kreuzförmigen Strukturen der Schädelbasis regten einen Eingeborenen zur Darstellung der Kreuzigung Christi an (Foto: R.F. Foelix).



Abb. 8: Röntgenbild eines Kreuzwelschädels. Auffallend sind zwei helle Scheibchen in der Bildmitte; vermutlich handelt es sich um grosse Ohrsteine (Otolithen), die aus ihrer ursprünglichen Lage leicht nach unten verschoben wurden (Foto: H.J. Fischer).

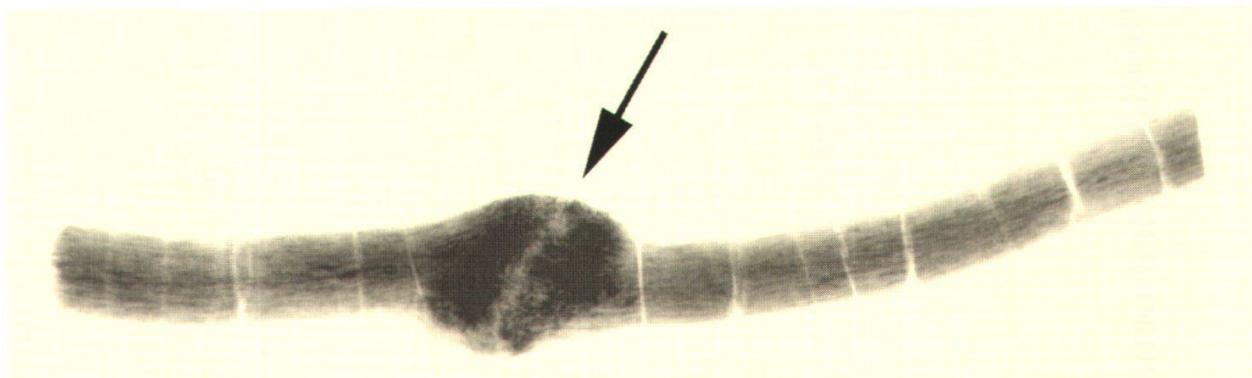


Abb. 9: Gebrochene und verheilte Bauchrippe eines Dinosauriers (*Plateosaurus*) aus Frick. Ehemalige Bruchstelle (Pfeil) und Callusbildung sind selbst nach 200 Mio. Jahren noch gut erkennbar (Foto: D. Bönhof).

eine lokal verdickte Bauchrippe von *Plateosaurus* untersucht und konnten im Röntgenbild deutlich die ehemalige Bruchstelle sowie die Callusbildung innerhalb der Verdickung feststellen (Abb. 9). Von Dünnschliffen der Saurierrippen wussten wir, dass die äussere Knochenzone in sog. Wachstumsringen abgelagert wurde (Abb. 10), was auf ein periodisches Wachstum (und evtl. auf Kaltblütigkeit?) hinweist (CASTANET, 1987; CHINSAMY & DODSON, 1995; FOELIX, 1997). Mittels Computertomographie konnten wir ähnliche Wachs-

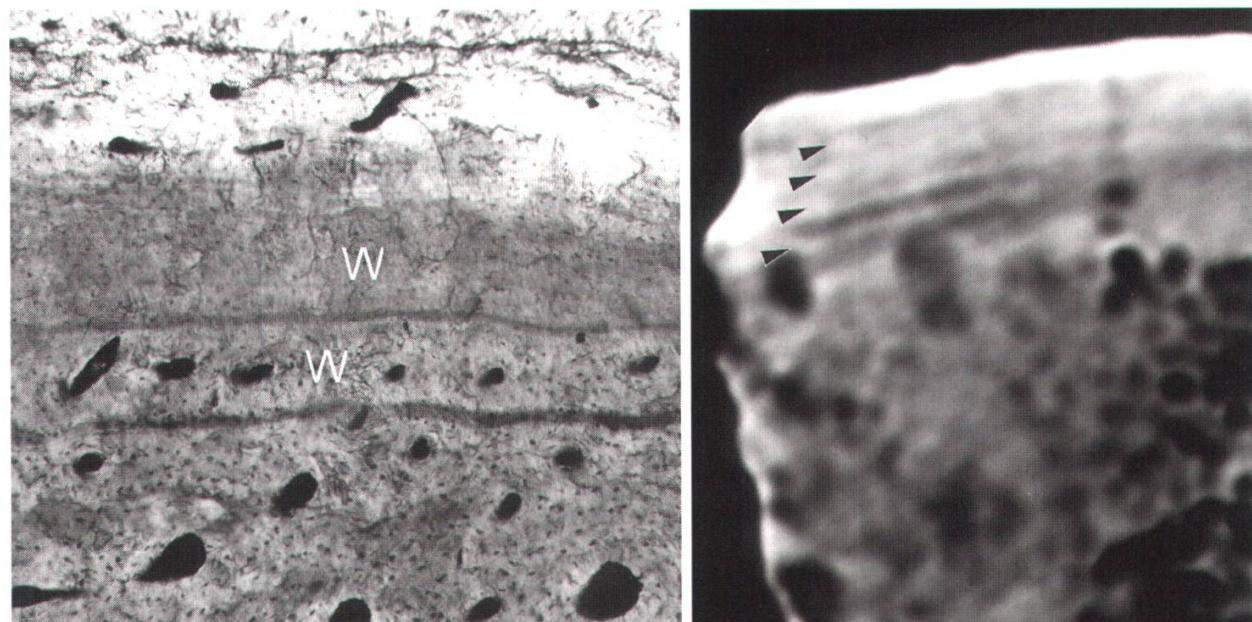


Abb. 10: Dünnschliff einer *Plateosaurier*-Rippe mit deutlichen Wachstumsringen (W). Quergetroffene Blutgefäße erscheinen schwarz (Foto: R.F. Foelix, 60x vergr.).

Abb. 11: Die CT-Aufnahme eines grossen Saurierknochens (*Diplodocus*) zeigt ebenfalls periodische Wachstumszonen (Pfeilspitzen) und darunter eine dunkle Spongiosa (Foto: B. Rehmann).

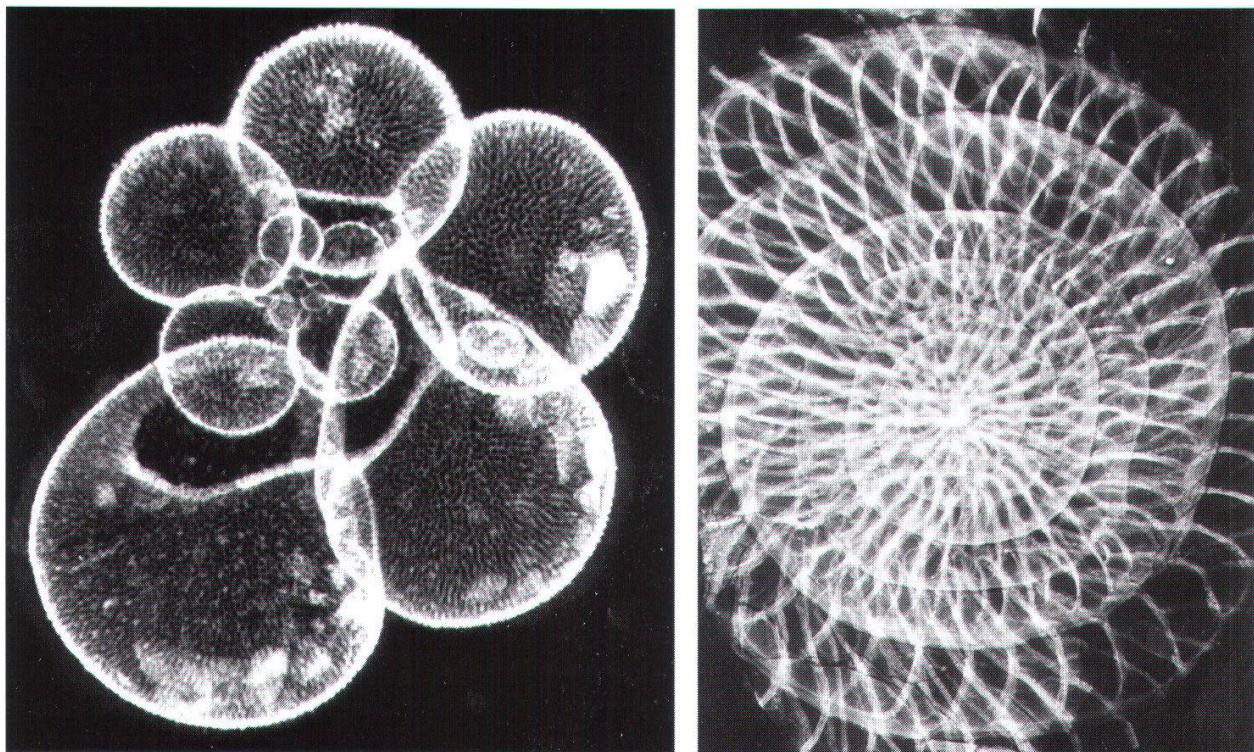


Abb. 12: Mikroradiographie einer rezenten Foraminifere (*Globigerinella*) aus dem Roten Meer: Die einzelnen Kammern sind in einer lockeren Spirale angeordnet (Foto: J. Mehl, 120x vergr.).

Abb. 13: Mikroradiographie einer fossilen Foraminifere (*Nummulites*) aus den Pyrenäen (Eozän): Darstellung der komplizierten Innengeometrie (Foto: J. Mehl, 30x vergr.).

tumsringe auch in grossen Saurierknochen (*Diplodocus*) feststellen, welche Dr. Ben Pabst (Sauriermuseum Aathal) in Wyoming ausgegraben hatte (Abb. 11). Mit der CT-Technik hat man übrigens auch Dinosaurier-Eier auf eventuell vorhandene Embryonen hin untersucht. Leider sind die Ergebnisse dort nur selten spektakulär, weil die Dichte des ausfüllenden Gesteins in etwa gleich ist wie in den embryonalen Knochen. In solchen Fällen ist die mühsame Hand- und Säurepräparation, wie sie der Spezialist Terry Manning aus England praktiziert, tatsächlich die überlegene Methode.

4. Röntgen von mikroskopisch kleinen Objekten

Schon seit 1950 hat man versucht, das Auflösungsvermögen von Röntgenbildern zu erhöhen, um auch in den mikroskopischen Bereich vorzustossen (SCHMIDT, 1952; ENGSTRÖM et al., 1955). In jüngerer Zeit hat man damit besonders in der Mikropaläontologie erstaunliche Erfolge erzielt. So konnte man die komplizierten Windungsgänge beschalter Einzeller (Foraminiferen)

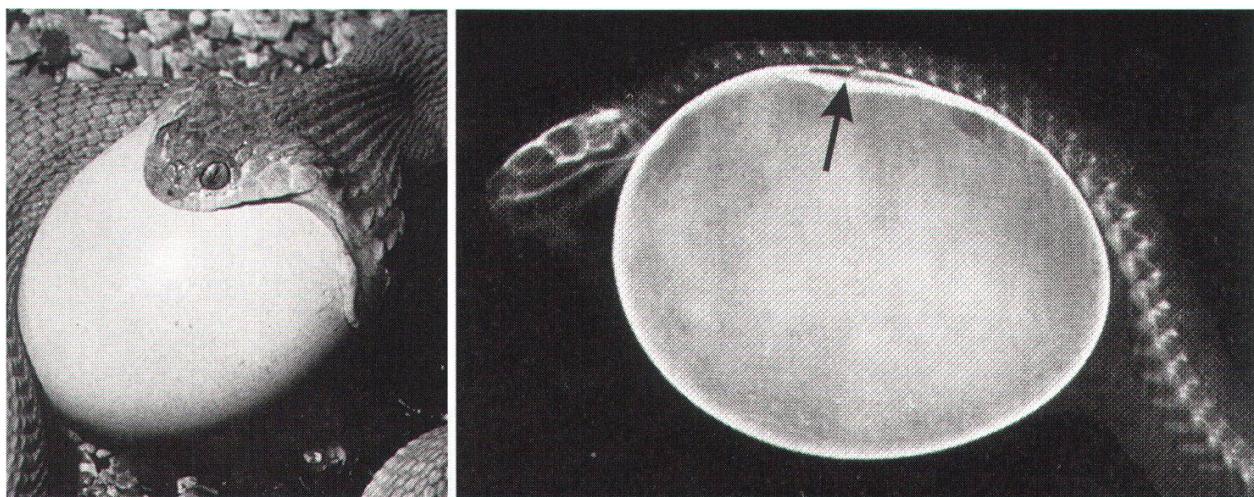


Abb. 14: Eierschlange beim Verschlucken eines Hühnereies (Foto: R. Burger).
 Abb. 15: Röntgenbild kurz nach Verschlucken des Eies: Die ersten Bruchstellen erscheinen direkt unter der Halswirbelsäule (Pfeil), die vermeintliche «Eiersäge» liegt rechts vom Ei (Foto: W. Güntert).

durch Stereoradiographien dreidimensional darstellen und analysieren (MEHL & NOE, 1990; HOTTINGER et al., 1993). Die Mikrofossilien werden bei dieser Technik direkt auf eine extrem feinkörnige Filmemulsion gelegt und dann relativ «weichen» Röntgenstrahlen (10–30 kV) ausgesetzt. Die im Massstab von 1:1 erzeugten Schattenbilder lassen sich dann in der Filmschicht direkt unter dem Lichtmikroskop untersuchen und stark vergrössert abfotografieren (Abb. 12, 13). Unter optimalen Bedingungen kann man mit dieser «Kontakt-Mikroradiographie» eine Auflösung von 0.5 µm erreichen, also durchaus vergleichbar mit der normalen Lichtmikroskopie. Eine alternative Methode besteht darin, in einer speziellen Röntgenröhre einen mikroskopisch kleinen Brennfleck zu erzeugen, und damit durch Projektion schon bei der Aufnahme «vorzuvergrössern». Danach können relativ gering auflösende Bildwandler oder Filme eingesetzt werden, so dass sich extrem lange Belichtungszeiten, wie bei den Mikrofilm-Emulsionen, vermeiden lassen (HABERSETZER, 1991; 1995).

5. Diverse Anwendungen der Röntgenmethode

Abschliessend sollte noch erwähnt werden, dass in manchen Naturmuseen die Röntgenmethode auch an lebenden Tieren eingesetzt wird. So werden am Zoologischen Museum der Universität Zürich «schwangere» Schnecken der Gattung *Viviparus* geröntgt, um Anzahl und Grösse der (bereits beschalteten) Embryonen festzustellen. Auch für systematische Untersuchungen sind Röntgenaufnahmen geeignet, um anhand der Schneckengehäuse verschiedene Arten oder Populationen voneinander abzugrenzen (Ribi, pers. Mitt.).

Schliesslich darf auch daran erinnert werden, dass unsere ANG-Ehrenmitglieder Dr. W. Güntert und Dr. A. Mittelholzer schon vor 25 Jahren eine Eierschlange (*Dasypeltis*) beim Verschlucken eines Hühnereies geröngt haben und dabei der Mechanismus der Eiöffnung aufgeklärt wurde (Abb. 14, 15). In einer Sequenz von Röntgenaufnahmen gelang der Nachweis, dass das Ei nicht, wie bislang angenommen, durch ventrale Fortsätze der hinteren Halswirbel aufgesägt, sondern einfach durch Muskeldruck gegen die vordere Halswirbelsäule aufgequetscht wird (MITTELHOLZER, 1970; GANS, 1974).

Auch in unserem Naturmuseum wird die Röntgenmethode weiterhin für spezifische Abklärungen eingesetzt, zuletzt etwa an unserem berühmtesten Präparat, dem vor 150 Jahren ausgerotteten Riesenalk. Bei der Restauration tauchte die Frage auf, ob im Inneren des Stopfpräparates eventuell noch Skelettteile vorhanden seien. Beim Durchleuchten zeigten sich tatsächlich Schädel und Extremitätsknochen, dagegen fehlte die Wirbelsäule sowie Schulter- und Beckengürtel. Als recht interessant erwies sich das Armskelett: zwar sind die Flügel äusserlich stark reduziert, aber die Arkmöglichkeiten erscheinen im Röntgenbild relativ kräftig. Besonders am Oberarmknochen sind die Ansatzstellen für die Muskeln des Schultergürtels gut ausgeprägt (Abb. 16). Obwohl der Riesenalk nicht fliegen konnte, erscheint dies doch sinnvoll, denn die Flügelstummel wurden als alleiniger Vortrieb beim Tauchen benutzt und verliehen ihm eine beträchtliche Geschwindigkeit, wie ein Chronist es beschrieb: «dass er ein mit 6 Rudern ausgerüstetes Boot überholte» (BENT, 1919; FOELIX, 1996).

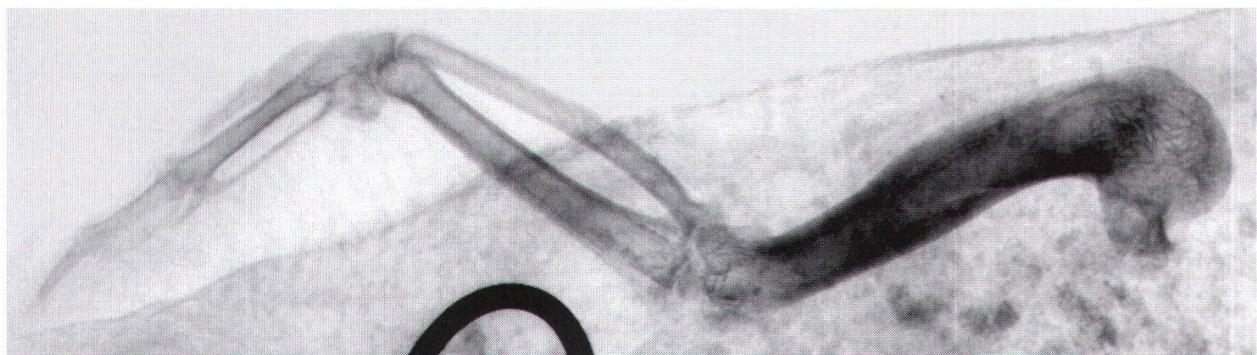


Abb. 16: Der rückgebildete Flügel des ausgestorbenen Riesenalks zeigt im Röntgenbild ein kräftiges Armskelett. Der Kopf des Oberarmknochens ist besonders gross ausgebildet und bietet gute Ansatzstellen für Brust- und Schultermuskeln (Foto: D. Bönhof).

6. Ausblick auf neue Bildmethoden

Wie wird es in der Zukunft weitergehen? Sicher wird die heutige Tendenz, Bilder zu digitalisieren und auf dem PC-Bildschirm zu bearbeiten, wie dies be-

reits in einigen Röntgenlabors praktiziert wird (z.B. Forschungsinstitut Senckenberg), sich allgemein durchsetzen. In naher Zukunft werden möglicherweise neue, der Röntgenmethode verwandte oder konkurrenzierende Methoden auch für den Museumsgebrauch zur Verfügung stehen.

6.1 Neutronenradiographie

Neutronenstrahlen werden anders absorbiert als Röntgenstrahlen. Während beispielsweise die meisten Metalle, insbesondere Blei, nahezu undurchlässig für Röntgenstrahlen sind, werden sie von Neutronen durchstrahlt. Viele in der belebten Natur und in der anorganischen Chemie vorkommende Elemente (z.B. Wasserstoffionen und Boratome), absorbieren hingegen Neutronen. Dies kann ausgenutzt werden, um solche Komponenten in verschiedensten versteinerten oder metallhaltigen Objekten darzustellen. Zur Zeit führt einer der Autoren (HJF) entsprechende Experimente am Paul Scherrer-Institut in Villigen durch.

6.2 Magnetresonanz (NMR)-Tomographie

Diese in der diagnostischen Medizin bereits bestens eingeführte Methode vermag Schnittbilder vom Inneren biologischer Objekte herzustellen. Wasserstoffatomkerne (Protonen) sind nämlich kleine magnetische Kreisel, die unter bestimmten Bedingungen in einem starken Magnetfeld Radiowellen aussenden. Diese werden gemessen und mittels Computer zu einem Schnittbild des untersuchten Objektes umgerechnet. Dadurch werden aus dem Inneren Bilder von biologischen Strukturen ermöglicht, die fast an die Genauigkeit anatomischer Präparate heranreichen.

Solche ausserordentlich teuren und apparativ aufwendigen Verfahren werden allerdings ganz speziellen Fragestellungen in der Forschung vorbehalten bleiben.

7. Literatur

- BENT, A.C. (1919): Life histories of North American living birds. Bull. US. Nat. Mus. 107, Washington.
- BRANCO, W. (1906): Die Anwendung der Röntgenstrahlen in der Paläontologie. Abh. kgl. preuss. Akad. Wiss. Berlin 1906: 3–55.
- BRÜHL, L. (1896): Über Verwendung von Röntgenschen X-Strahlen zu paläontologischen diagnostischen Zwecken. Verh. Berliner Physiol. Ges., Arch. Anat. Physiol. Berlin 1896: 547.
- CASTANET, J. (1987): La squelettochronologie chez les Reptiles. III. Application. Ann. Sci. Nat. (Zool.) 13 (Série 8): 157–172.
- CHINSAMY, A. & P. DODSON (1995): Inside a dinosaur bone. Amer. Scientist 83: 174–180.

- DÖHMANN, K. (1931) Durchleuchtete Körper. Schaubücher 39. Orell Füssli Verlag Zürich-Leipzig.
- ENGSTRÖM, E. & S. BELLMANN, B. ENGFELDT (1955): Microradiography: a review. Br. J. Radiology 28: 517–532.
- FLISCH, A. & T. LÜTHI, C.P.E. ZOLLIKOFER, M.S. PONCE DE LEON (1996): CT-Applications in archeological and paleontological/anthropological research. Industrial Computed Tomography Topical Conference, Huntsville Alabama, USA.
- FOELIX, R.F. (1996): Seltsame Vögel im Aargauischen Naturmuseum. Aarauer Neujahrsblätter 1996: 52–59.
- FOELIX, R.F. (1997): Neue Saurierfunde in Frick. Aarauer Neujahrsblätter 1997: 40–46.
- FRANZEN, J.L. (1997): Ein Koprolith als Leckerbissen. Der siebte Primatenfund aus Messel. Natur und Museum 127: 46–52.
- GANS, C. (1974): Biomechanics: An Approach to Vertebrate Biology. Lippincott Co. Philadelphia, p. 58.
- HABERSETZER, J. (1991): Die verschiedenen Mikro-Röntgenverfahren und ihre Weiterentwicklung für paläontologische und biologische Anwendungen. Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg 139: 147–155.
- HABERSETZER, J. (1995): Paläontologie. In: Heuck, F. H. W. & E. Macherauch, : Forschung mit Röntgenstrahlen. Springer Verlag Berlin, p. 633–641.
- HABERSETZER, J. & S. SCHAAL (1990): Röntgenmethoden zur Untersuchung fossiler und rezenter Wirbeltiere. Natur und Museum 120: 254–266.
- HABERSETZER, J. & G. STORCH (1993): Radiographic studies of the cochlea in extant Chiroptera and Microchiropterans from Messel. Kaupia, Darmstädter Beitr. Naturgesch. 3: 97–05.
- HOTTINGER, L. & E. HALICZ, Z. REISS (1993): Recent Foraminiferida from the gulf of Aqaba, Red Sea. Ljubljana: Slovenska akademija znanosti in umetnosti, 1993.
- LEHMANN, U. (1990): Ammonoideen. Enke Verlag Stuttgart.
- LEHMANN, W.M. (1932): Stereo-Röntgenaufnahmen als Hilfsmittel bei der Untersuchung von Versteinerungen. Natur und Museum 62: 323–330.
- LEMOINE, V. (1896): De l'application des rayons de Röntgen à la paléontologie. C.R. Acad. Sci. Paris 23: 764–765.
- MEHL, J. & S. NOE (1990): Morphological investigations of Miliolidae (Foraminifera) from the Upper Permian of the Southern Alps, based on thin sections and X-ray microradiographs. Paläont. Zeitschr. 64: 173–192.
- MITTELHOLZER, A. (1970): Wenn der Bissen grösser ist als der Mund... Das Röntgenbild enthüllt den «Trick» der Eierschlange. Aquarien Magazin, Kosmos Verlag Stuttgart 1970 (7): 313–315.
- REINHARD, J. (1996): Peru's ice maidens. Natl. Geogr. 189 (6): 62–81.
- REINHARD, J. (1997): Peruvian mummies revisited. Natl. Geogr. 191 (1): 36–43.
- SCHMIDT, R.A.M. (1952): Microradiography of microfossils with X-ray diffraction equipment. Science 115: 94–95.

- STÜRMER, W. & F. SCHAARSCHMIDT, H.G. MITTMAYER (1980): Versteinertes Leben im Röntgenlicht. Kleine Senckenberg Reihe Nr. 11, Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt.
- TARDENT, P. (1993): Meeresbiologie. Eine Einführung. Thieme Verlag Stuttgart-New York.
- WELLNHOFER, P. (1989): Fossilien: Bilder frühen Lebens. Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung, Heidelberg, 174–188.
- WILD, R. (1973): *Tanytropheus longobardicus* (Bassani) (Neue Ergebnisse). In: Kuhn-Schnyder, E; Peyer, B.: Die Triasfauna der Tessiner Kalkalpen. Schweiz. paläont. Abh. 95: 1–163.
- WILD, R. (1988): Die Röntgenaufnahme in der Paläontologie. Dt. Ges. für zerstörungsfreie Prüfung. Ber. Band 13: 162–169.
- ZOLLIKOFER, C.P.E. & M.S. PONCE DE LEON, R.D. MARTIN, P. STUCKI (1995): Neanderthal computer skulls. Nature 375: 283–285.
- ZOLLIKOFER, C.P.E. & M.S. PONCE DE LEON, R.D. MARTIN (1998): Computer-assisted paleoanthropology. Evol. Anthropology 6: 39–76.

Dank

Viele Kollegen haben uns beim Zusammentragen des Materials für diesen Artikel mit Rat und Tat unterstützt: Dr. D. Bönhof (Aarau), Dr. T. Bürgin (St. Gallen), Dr. W. Güntert (Rombach), Dr. J. Habersetzer (Frankfurt), Dr. L. Hottiger (Basel), Dr. P. Kaufmann (Rohr), Dr. E. Lehmann (Villigen), Dr. J. Mehl (Erlangen), Dr. M. Meier (Aarau), Dr. B. Pabst (Aathal), Dr. B. Rehmann (Aarau), Dr. G. Ribi (Zürich), Dr. M. Sander (Bonn), Dr. R. Wild (Stuttgart) und Dr. C. Zollikofer (Zürich). Die Digitalisierung der Röntgenaufnahmen erfolgte durch A. Rohner (Dottikon).

Ihnen allen sei hier herzlich gedankt.

Adressen der Verfasser:

Dr. Rainer Foelix
Segesserweg 8
5000 Aarau

Dr. Hans-Jürgen Fischer
Hôpital Régional, Radiologie
2900 Porrentruy