

**Zeitschrift:** Archäologie Bern : Jahrbuch des Archäologischen Dienstes des Kantons Bern = Archéologie bernoise : annuaire du Service archéologique du canton de Berne

**Herausgeber:** Archäologischer Dienst des Kantons Bern

**Band:** - (2014)

**Artikel:** Röntgenaufnahmen, Computertomografie und Neutronenuntersuchung : bildgebende Verfahren im Dienst der Archäologie und der Konservierung-Restaurierung

**Autor:** Tissier, Frédérique-Sophie / Brechbühl Trijasse, Sabine

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-726731>

### **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>**

# Röntgenaufnahmen, Computertomografie und Neutronenuntersuchung

Bildgebende Verfahren im Dienst der Archäologie und der Konservierung-Restaurierung

FRÉDÉRIQUE-SOPHIE TISSIER UND SABINE BRECHBÜHL TRIJASSE



Abb. 1: Erstes Röntgenbild von Wilhelm Conrad Röntgen, das die Hand seiner Frau zeigt, 1895.

1.

## Einleitung

Von den vielen naturwissenschaftlichen Techniken der Materialforschung sind für den Archäologen und den Konservator-Restaurator die Röntgenuntersuchung, die Computertomografie und die Neutronenuntersuchung von besonderem Interesse. Diese bildgebenden Verfahren erlauben es, zerstörungsfrei einen tiefen Einblick in ein archäologisches Objekt zu gewinnen. Anhand von Beispielen aus der Praxis des Archäologischen Dienstes des Kantons Bern werden die genannten Techniken hier vorgestellt.

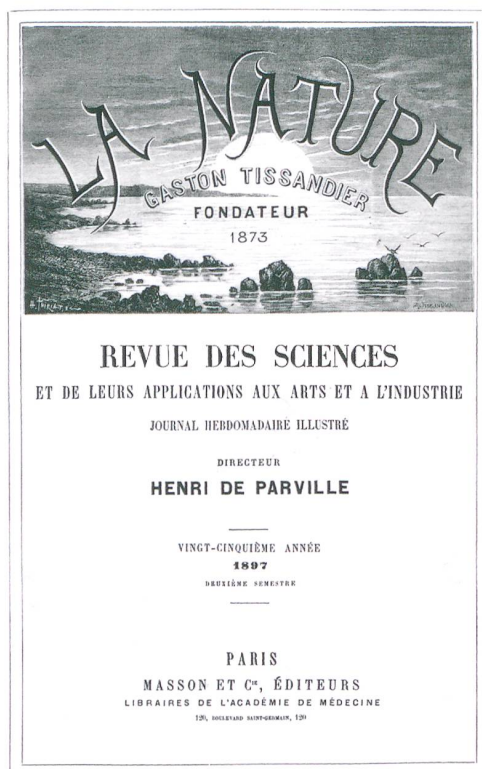
1.1

## Anfänge bildgebender Techniken in der Archäologie

Vor fast 120 Jahren, im November 1895, entdeckte der deutsche Physiker Wilhelm Conrad Röntgen zufällig eine unbekannte Strahlung, die später nach ihm benannt wurde.<sup>1</sup> Sie hatte die Eigenschaft, Materie durchdringen zu können. Seine Frau Anna Bertha gewährte ihm ein zweites Mal ihre Hand – zur Herstellung des ersten Röntgenbildes der Welt (Abb. 1).

Nur ein Jahr später untersuchte der Physiker Walter König ein Gemälde mithilfe von Röntgenstrahlen.<sup>2</sup> 1897 erschien in der Zeit-

Abb. 2: Zeitschrift *La Nature*, in der 1897 Röntgenbilder von Händen ägyptischer Mumien publiziert wurden.



- 1 Röntgen 1896.
- 2 Glasser 1934, 347.

LA NATURE.

105

de déterminer l'âge du sujet auquel appartenait cette main. De l'examen qui a été fait, sur notre demande, par notre excellent ami, M. le Dr Paul Richer, il ressort que cette main était celle d'un enfant ayant entre sept et neuf ans. En effet on distingue parfaitement bien les points d'ossification complémentaires des phalanges qui apparaissent vers la sixième ou

septième année, de même que les points complémentaires beaucoup plus avancés des quatre derniers métacarpiens qui se montrent entre la cinquième et la sixième année. D'autre part on n'aperçoit aucune trace du point épiphysaire d'ossification du cubitus qui se montre de sept à neuf ans: c'est donc bien entre sept et neuf ans qu'il faut placer l'âge de cette momie.

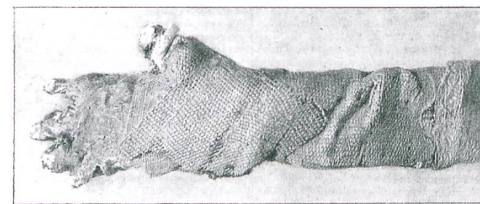


Fig. 3. — Main de momie égyptienne (Photographie).

Devant la précision de ce résultat on ne peut s'empêcher de faire remarquer une fois de plus l'étendue des applications nouvelles que nous ouvre

la méthode Röntgen: en médecine légale, la radiographie permettra de savoir très exactement l'âge des victimes, surtout pendant la période où la for-



Fig. 4. — Main de momie égyptienne (Radiographie négative).

mation des os n'est pas complète, et ceci sans altérer en quoi que ce soit la pièce à conviction.<sup>1</sup> En ce qui concerne l'étude des momies, elle donne le moyen de voir ce qu'elles renferment et il serait à désirer que ce travail fût fait d'une façon suivie.

pour toutes les belles pièces que renferment les musées et certaines collections particulières. On éprouvera peut-être quelques fois des surprises désagréables, mais à côté on ne manquera pas de faire de très intéressantes découvertes. ALBERT LOISEL.

<sup>1</sup> Notre collègue de la Salpêtrière, M. Fournier, interne de la clinique de M. le professeur Raymond, a bien voulu mettre à notre disposition quelques pièces osseuses que le manque de place ne nous permet pas de reproduire ici. Nous citerons affectant la forme d'un petit chien et qui n'était qu'un simple joint de l'époque égyptienne (pas une minute). La perfection des résultats obtenus montre l'intérêt qu'il y aurait à poursuivre ces études: nous sommes d'ailleurs complètement à la



schrift *La Nature* Röntgenbilder von Händen ägyptischer Mumien (Abb. 2).<sup>3</sup> Nach zahlreichen Erfahrungen verankerte der englische Archäologe Don Brothwell in den 1960er-Jahren die Röntgenuntersuchung fest als Methode in der Archäometrie.<sup>4</sup>

Mit der Entwicklung des Computertomografen kam man vom zweidimensionalen Röntgenbild hin zur Darstellung eines Volumens. Der britische Ingenieur Godfrey Newbold Hounsfield baute 1972 den ersten Tomografen für medizinische Anwendungen. Das Potenzial der Technik wurde sofort erkannt und für die Archäologie genutzt.<sup>5</sup> Ausser Röntgenstrahlen können auch andere Strahlungsarten Materie durchdringen. Neutronen wurden 1932 von James Chadwick entdeckt, und bereits drei Jahre später konnten damit Durchstrahlungsbilder angefertigt werden.<sup>6</sup>

## 1.2

### Bildgebende Techniken im Archäologischen Dienst

Dem Archäologischen Dienst bot sich ab 1988 im Berner Inselspital die Möglichkeit, metallische Funde zu röntgen, bis er 2006 eine eigene Anlage einrichtete. Röntgen ist von da an ein wesentlicher Schritt im Prozess der Identifizierung und Beurteilung der archäologischen Objekte geworden. Wir verwenden ein industrielles Gerät (Abb. 3), das in einen Bleischrank eingebaut ist und deshalb als Vollschutzanlage auch von nicht spezialisiertem Personal benutzt werden kann. Tomografien mit Röntgen- und Neutronenstrahlung führt der Archäologische Dienst seit 2006 in Zusammenarbeit mit externen Institutionen durch.

## 2.

### Röntgenuntersuchung

## 2.1

#### Funktionsweise

Wie entsteht eigentlich Röntgenstrahlung? Sie wird in einer Röntgenröhre generiert, die in ihrem Aufbau einer Glühbirne gleicht (Abb. 4). In einem luftleeren Glaskörper befindet sich ein Filament aus Wolfram, die Kathode, und gegenüber eine abgewinkelte Platte aus einem schwer schmelzbaren Metall, die Anode. Die

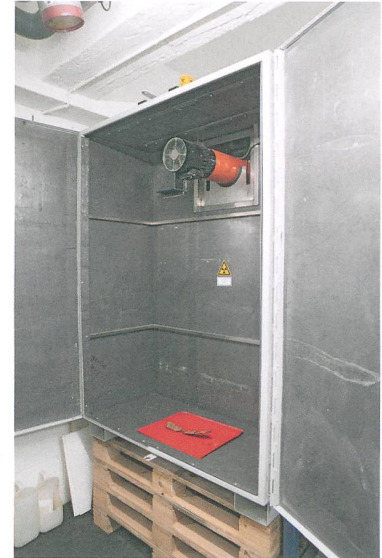


Abb. 3: Der Röntgenraum des Archäologischen Dienstes an der Brünenstrasse 66 in Bern.

Kathode wird durch Heizspannung zum Glühen gebracht, wodurch eine Elektronenwolke entsteht. Diese freien Elektronen werden durch das Anlegen einer positiven Spannung an der Anode zu dieser hin beschleunigt. Beim Aufprall an der Anode werden die Elektronen abrupt abgebremst, wodurch elektromagnetische Strahlung entsteht, die sogenannte Röntgenbremsstrahlung.<sup>7</sup>

Ein Röntgenbild entsteht, wenn ein Objekt aus einer Richtung mit Röntgenstrahlung durchstrahlt wird. Dabei absorbiert das Objekt, abhängig von dessen Materialart und Dicke,

3 Londe 1897, 105.

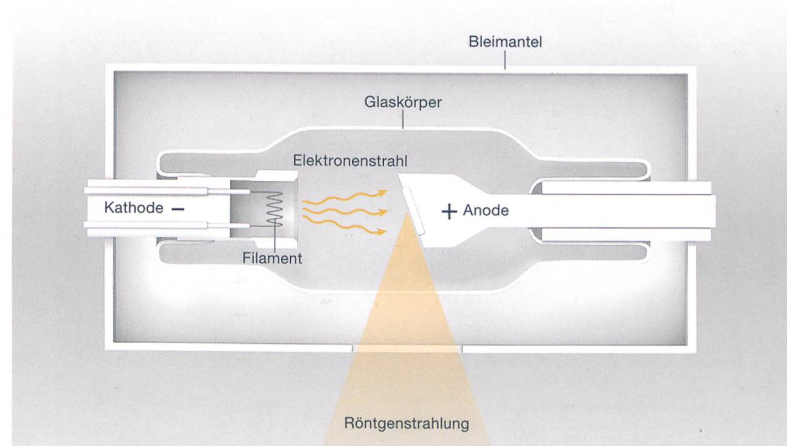
4 Fiori/Nunzi 1995, 67; Brothwell 1969.

5 Pahl 1981.

6 Lang/Andrew 2005.

7 O'Connor/Brooks 2007, 12–22.

Abb. 4: Schematische Darstellung einer Röntgenröhre.





einen Teil der Strahlung und schwächt diese.<sup>8</sup> Die Reststrahlung, die auf der Gegenseite austritt, wird entweder auf einem fotografischen Film oder auf einem Detektor eingefangen und in das charakteristische, schwarz-weiße Röntgenbild umgewandelt.

Allen voran ist Röntgen eine wichtige Untersuchungsmethode bei archäologischen Metallobjekten, die oft unter dicken Auflagen von Korrosion und Erde verborgen sind. Nebst der eigentlichen Objektidentifizierung kann eine Vielzahl an Informationen gewonnen werden, etwa zur Herstellungstechnik oder zum Abbaugrad. Zudem stellt eine Röntgenuntersuchung kurz nach der Ausgrabung eine Bestandsaufnahme dar, welche sich später nicht mehr wiederholen lässt, denn der Abbau von ausgegrabenen Objekten setzt sich über der Erde fort.

## 2.2

### Beispiele

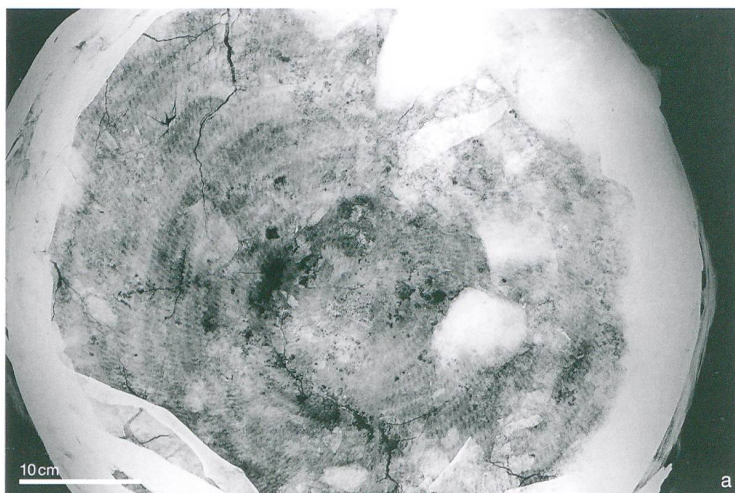
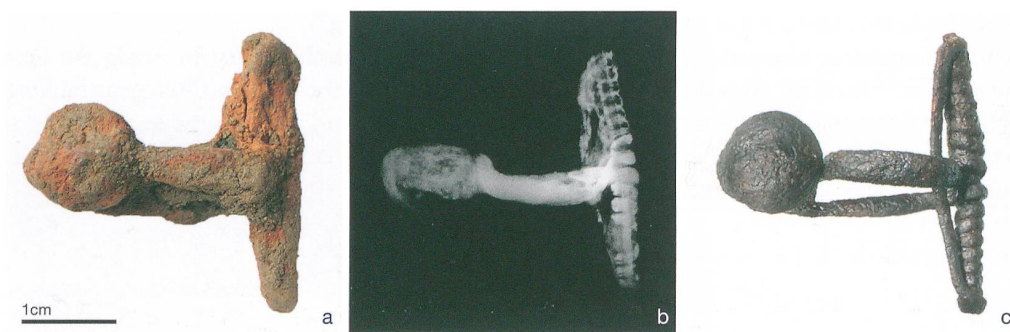
Kistenweise unkenntliche Eisenfunde, deren Wert selbst für den Spezialisten zunächst unbekannt ist, können in Serie durch die Verpa-

ckung hindurch geröntgt werden, und in fast allen Fällen lassen sie sich dadurch ansprechen. So wird es möglich, die Funde nach Kategorien zu unterteilen: Wichtige Objekte werden freigelegt, erkennbare Objekte vom Röntgenbild gezeichnet und Klumpen und Nägel ohne Aussagewert allenfalls entsorgt. Erst eine Röntgenuntersuchung ermöglicht eine solche Auswahl und lässt demnach einen gezielten Einsatz von Ressourcen zu, denn Freilegen wird immer zeit- und kostenintensiv bleiben.

Eine eisenzeitliche Armbrustfibel von Attiswil BE wurde gleich nach der Ausgrabung geröntgt (Abb. 5a–b). Auf nur einem Bild sind nahezu alle für den Archäologen relevanten Informationen enthalten: Acht Spiralwindungen können pro Seite gezählt werden, in der Spirale ist eine metallische Achse zu erkennen, und die Sehne läuft vor dem Bügel durch. Masse und Proportionen sind ebenfalls dem Röntgenbild zu entnehmen, da diese nahezu 1:1 abgebildet

Abb. 5: Attiswil, Wiesenweg 11. a: Hallstattzeitliche Fibel im Fundzustand. b: Röntgenaufnahme der Fibel. Alle typologischen Merkmale sind erkennbar. c: Fibel nach der Restaurierung.

Abb. 6: Saanen, Dorfstrasse 175 / Dorf 184. a: Röntgenbild des Kessels im Fundzustand. Die Hammerspuren der Herstellung sind sichtbar. b: Innenseite des Kesselbodens nach der Demon- tage und Freilegung.



<sup>8</sup> Ein dünnes Silberblech kann daher gleich abgebildet werden wie ein dickes Stück Eisen.



werden. Die Fibel konnte somit typologisch als Paukenfibel eingeordnet und in die Späthallstattzeit datiert werden (Ha D3, 500–450 v. Chr.), dies ohne jeden Eingriff am Objekt. Für die Restaurierung der Fibel war das Röntgenbild ebenfalls eine unschätzbare Hilfe. Es wird nämlich sichtbar, an welchen Stellen das Objekt wie stark abgebaut ist. Zum Beispiel wurde die Spirale am im Bild oberen Teil hauptsächlich schwarz mit hellen Konturen wiedergegeben. Sie besteht dort nur noch aus einer Haut aus Eisenkorrosion und ist darunter hohl. Hier kann bei der Freilegung höchstens eine Annäherung an die ursprüngliche Form versucht werden. Der zweite Teil der Spirale wurde hell abgebildet, denn die Materie muss dort noch entsprechend dicht sein. Hier konnte die Freilegung bis auf die ursprüngliche Oberfläche des Objekts erfolgen (Abb. 5c).

In Saanen BE wurde 2010 ein nahezu kompletter Kessel aus einem Kupferwerkstoff gefunden. Auf der Röntgenaufnahme war sichtbar, dass der Boden des Kessels vollständig erhalten, jedoch von mehreren Spalten und Rissen durchzogen war. Das blasige oder wolkige Bild mit helleren und dunkleren Zonen zeigte die unregelmässige Korrosion des Blechs. Es können also Bereiche noch metallisch vorliegen, während andere Stellen durchgehend mineralisiert und daher brüchig und spröde sind. Ferner erkannte man am Kesselboden bereits vor der Freilegung Spuren der Herstellungstechnik. Die Hammerspuren sind in konzentrischen Kreisen angeordnet, nahe beieinander und immer identisch in Form und Grösse (Abb. 6).

Stösst man mit der klassischen Röntgenuntersuchung an Grenzen, etwa wenn sich Strukturen in der 2D-Ansicht überlagern, so bietet sich die Computertomografie als ergänzende oder gar alternative Untersuchungsmethode an.

### 3.

## Computertomografie

### 3.1

#### Funktionsweise

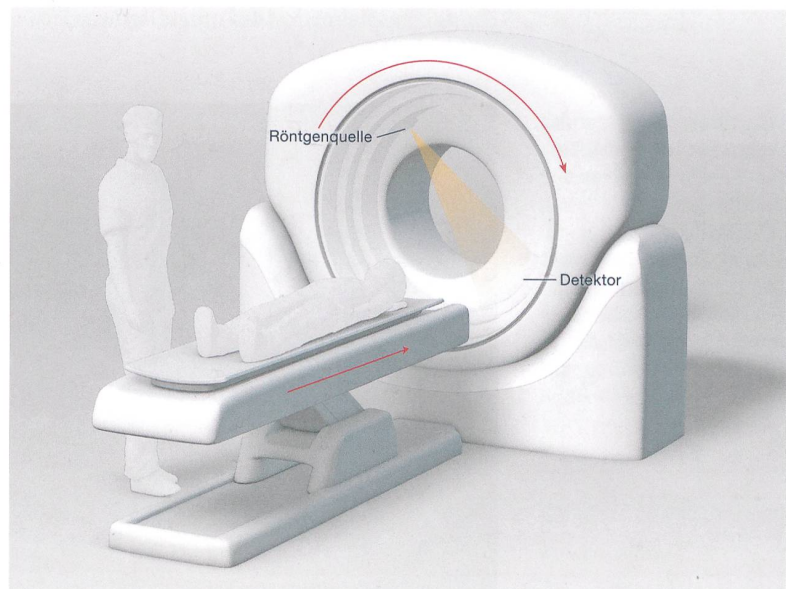
Die Tomografie (vom griechischen *tomê* Schnitt und *graphein* schreiben) basiert auf dem gleichen Prinzip wie die Röntgenuntersuchung. Der Computertomograf durchstrahlt ein Objekt in vielen feinen Schnitten und errechnet daraus die dreidimensionale Darstellung.



Abb. 7: Medizinischer Tomograf im Institut für Rechtsmedizin der Universität Bern.

Der Tomograf kann auf zwei Arten gebaut sein. Bei der medizinischen Anlage, wie im Institut für Rechtsmedizin der Universität Bern, wo wir unsere Objekte untersuchen lassen, gleitet der Patient auf einer Liege durch ein Portal, in welchem sich die Röntgenquelle und der Detektor um ihn herum drehen (Abb. 7–8). Bei der industriellen Anlage dreht sich das Objekt selber zwischen Strahlenquelle und Detektor (Abb. 9). In beiden Fällen unterstützt der Computer die Bildgewinnung und Speicherung. Der Operator hat anschliessend unzählige Möglichkeiten, die Bilder – abhängig von der verwendeten Software – zu visualisieren und darzustellen. Zum Beispiel kann man im virtuellen Objekt navigieren und sich in jeder beliebigen Schnittebene das entsprechende Röntgenbild überlagerungsfrei

Abb. 8: Schematische Darstellung eines medizinischen Tomografen.





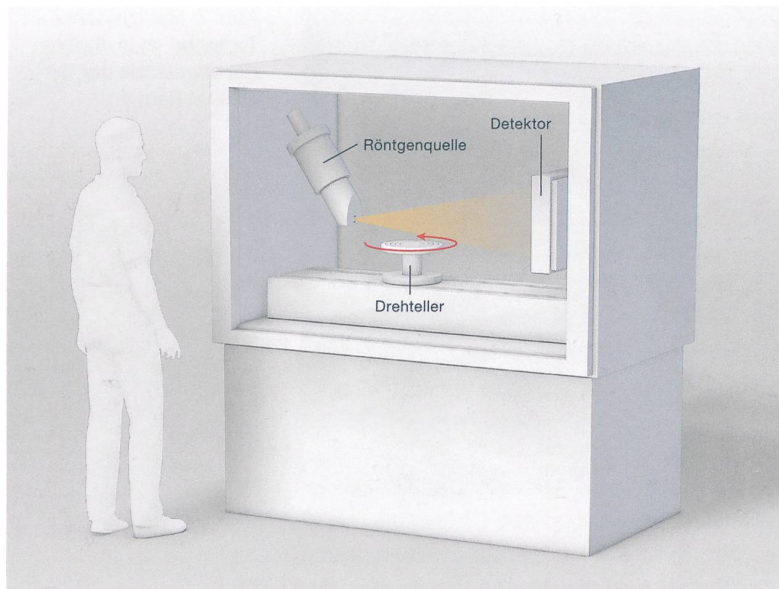


Abb. 9: Schematische Darstellung eines industriellen Tomografen.

anschauen. Daneben können in der dreidimensionalen Ansicht Elemente entsprechend ihrer Dichte angezeigt, hervorgehoben oder ausgeblendet werden, alles ohne Manipulation am Original. Die gleichen Vorteile wie beim Röntgen ergeben sich auch hier: zerstörungsfrei, schnell und kosteneffizient. Die Tomografie ist besonders hilfreich bei im Erdblock geborgenen Objekten oder Objektgruppen. Durch dicke und feuchte<sup>9</sup> Erdpakete hindurch schafft es eine konventionelle Röntgenanlage nicht, ein kontrastreiches, scharfes Bild zu erzeugen. Ausserdem ist bei Blöcken die räumliche Anordnung der Objekte oft von Bedeutung. Diese kann mit der distortionsfreien tomografischen Untersuchung massstabgetreu dokumentiert werden.

Abb. 10: Basel, Gasfabrik. Computertomografiebild des Blocks. 3D-Rekonstruktion.

Abb. 11: Basel, Gasfabrik. Computertomografiebild des Blocks. Ansicht von unten. Man erkennt den Armreif aus Lignit.



Der Nutzen einer Untersuchung ist jedoch immer gegen die damit verbundenen Risiken abzuwägen, da neben der Bestrahlung auch Transport und Handhabung als zusätzliche Belastung anfallen.<sup>10</sup>

### 3.2

#### Beispiele

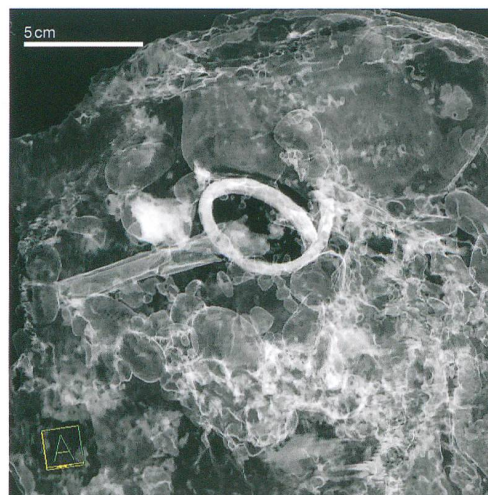
Bei einer Ausgrabung im Jahr 2006 auf dem Gelände der Novartis in Basel hat der Archäologische Dienst Amtshilfe zur Bergung eines keltischen Kindergrabes geleistet. Die Blockbergung mit Skelettresten und reichen Beigaben wurde geröntgt, aber die ineinander verschachtelten Objekte konnten auf dem zweidimensionalen Bild nur begrenzt dargestellt werden. Die Archäologen wollten wissen, ob die Schmuckobjekte vom verstorbenen Mädchen getragen wurden oder ob es sich um eine sekundäre Beigabe handelte.<sup>11</sup> Die Objekte schienen nämlich zu gross für das vierjährige Kind. Dank der räumlichen Darstellung der Tomografie konnten diese Fragen beantwortet werden: Die Glasarmreifen, die Gürtelkette und die Bronzefibeln wurden auf der Brust des Mädchens beigesetzt, sie trug aber einen Armreif aus Lignit an ihrem Handgelenk (Abb. 10–11).

2008 wurde in Saanen BE ein längliches Eisenobjekt gefunden: ein Schwert, waren sich

<sup>9</sup> Feuchtigkeit streut Röntgenstrahlung stark.

<sup>10</sup> O'Connor/Brooks 2007, 91–95.

<sup>11</sup> Hecht 2011, XIX; Tissier 2007.





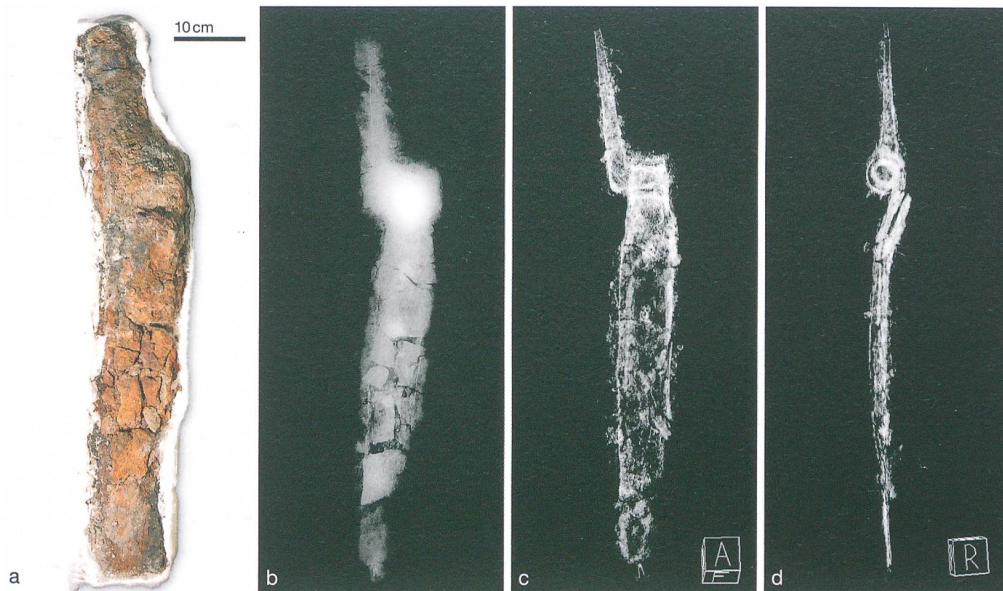


Abb. 12: Saanen, Dorfstrasse 174 / Altes Landhaus. 1a: Blockbergung mit vermuteten Schwert. b: Röntgenbild des Objektes. Der mittlere Bereich bleibt nicht erkennbar. c: Computertomografiebild. Ansicht von oben. d: Computertomografiebild. Seitenansicht. Es handelt sich um ein Scharnier mit Beschlagband.

alle Bearbeiter einig (Abb. 12a). Dieses Schwert wurde im Block geborgen und bei uns geröntgt. An der interessantesten Stelle, dem Übergang zwischen Griff und Scheide, war der Block jedoch zu dick, sodass das Röntgenbild das Objekt nur lückenhaft wiedergab (Abb. 12b). Mit der Tomografie wurde innert Minuten deutlich, dass es sich hier nicht um ein Schwert handelte, sondern um ein Scharnier. Nebst dem Drehbolzen sind mehrere Nägel sichtbar, die das Beschlagband durchqueren (Abb. 12c–d). Nach diesem Resultat war die kulturhistorische Bedeutung des Objekts nicht mehr gegeben, weshalb auf eine Restaurierung verzichtet wurde.

Kürzlich wurden zwei Urnen bei Ausgrabungen eines römischen Friedhofs in All-

mendingen BE im Block geborgen. Bei diesen Brandgräbern ist die Position der Objekte zufällig und daher nicht relevant für die archäologische Untersuchung. Zunächst war jedoch nicht klar, welche und wie viele Objekte sich in und um die Urnen befanden. Die Tomografie hat in einem der Blöcke eine stark fragmentierte, gläserne Urne, gefüllt mit verbrannten Knochen, gezeigt (Abb. 13). Im Sediment daneben befanden sich gegen 100, zuvor nicht sichtbare Metallobjekte. Diese konnten als Nägel identifiziert werden (Abb. 14), bei der Freilegung war daher keine besondere Vorsicht nötig. Der Zeitaufwand für die Bearbeitung des Blocks konnte durch die gewonnenen Informationen im Voraus eingeschätzt werden.

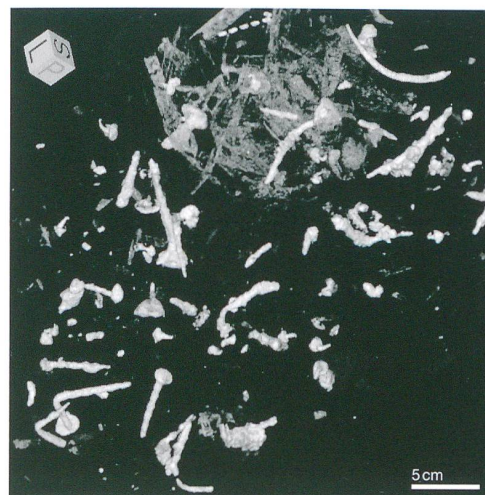
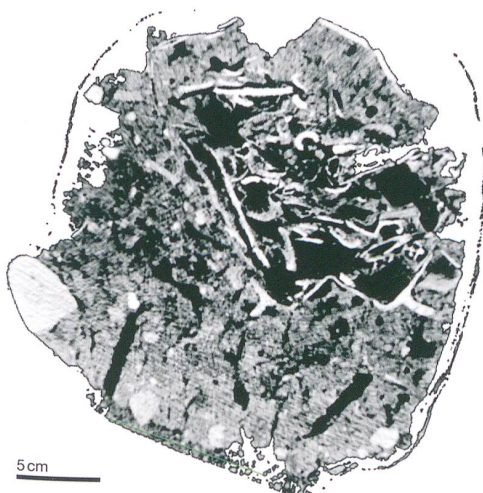


Abb. 13, links: Allmendingen, Gümligenweg. Computertomografiebild. Virtueller Schnitt durch den Block. Der Boden der Glasurne ist erkennbar.

Abb. 14, rechts: Allmendingen, Gümligenweg. Computertomografiebild. Nägel rund um die Urne.





Abb. 15: Stuttgart, Kranstrasse 8. Mikrotomograf der Firma GE phoenix|x-ray.

4.

## Mikrotomografie

4.1

### Funktionsweise

Die Mikrotomografie ist eine Röntgentomografie mit erhöhter Auflösung. Diese wird erreicht, indem der Röntgenstrahl über magnetische Linsen, ähnlich wie bei einem optischen System, gebündelt wird. Dank einer Ortsauflösung, die unter der Mikrometergrenze<sup>12</sup> liegen kann, ist es möglich, feinste interne Strukturen zu zeigen. Die Mikrotomografie wird in der Forschung und Industrie vor allem für die Qualitätskontrolle von Werkstücken verwendet. Auch können medizinische Behandlungen an Tieren *in vivo* und in Echtzeit dargestellt werden. Desgleichen können bei der Konservierungsfor-

schung Effekte von Konservierungsprodukten in der Materie mitverfolgt werden.

Unsere Tests mit dem Verfahren konnten bei GE phoenix|x-ray Systems + Services GmbH in Stuttgart durchgeführt werden (Abb. 15).

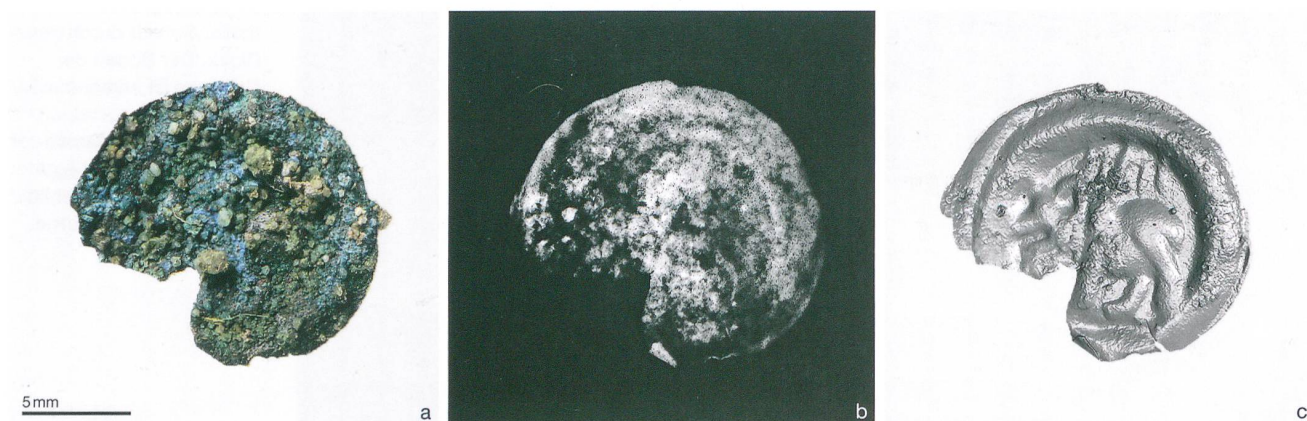
4.2

### Beispiele

Münzen sind eine wichtige materielle Quelle für die Archäologie, sofern sie lesbar sind. Durch gewöhnliches Röntgen der Münzen kann die unter Korrosionsschichten verborgene Prägung nur bedingt sichtbar gemacht werden. Die beiden Prägebilder der Vorder- und Rückseite überlagern sich nämlich und sind schwer auseinanderzuhalten. Brakteaten sind auf dem Röntgenbild lediglich als Plättchen zu sehen, weil das Münzbild weiche Konturen aufweist und die Dicke des Blechs über die ganze Münze hinweg ähnlich ist (Abb. 16a–b). Eine stark abgenutzte Prägung auf einer dicken Münze wird nicht abgebildet, da der Münzkern alles überdeckt (Abb. 17a–b). All diese Nachteile werden mit der 3D-Untersuchung hinfällig. Jedoch ist ein hochauflösendes Verfahren nötig, damit die Prägung präzise genug abgebildet werden kann.<sup>13</sup>

Die Münzen wurden durch die Verpackung hindurch untersucht. Anschliessend konnten Korrosionsauflagen bildnerisch am Computer entfernt und das Prägebild durch virtuelle Licht-

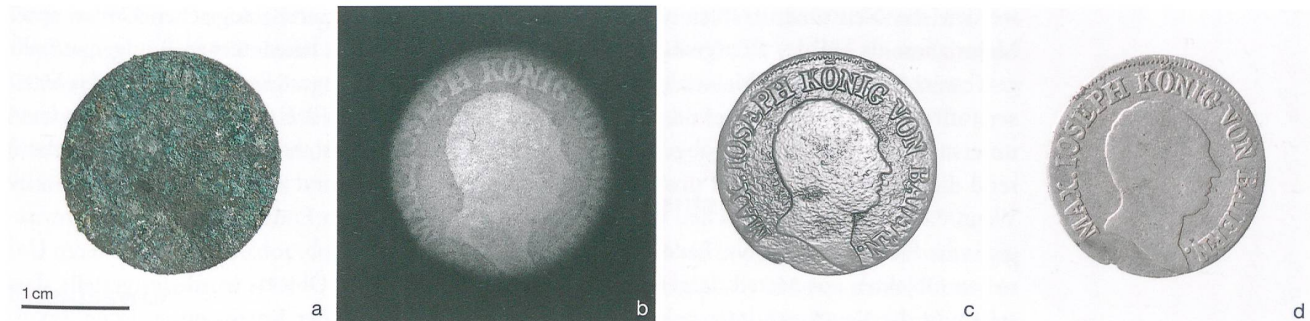
Abb. 16: Bern, Kramgasse 36, Konservatorium. a: Brakteat im Fundzustand. b: Röntgenaufnahme. c: Mikrotomografieaufnahme. 3D-Rekonstruktion und virtuelle Freilegung des Brakteaten.



<sup>12</sup> Die erreichte Auflösung ist im Einzelfall von der Objektgrösse abhängig. Mitteilung Martin Taupitz, GE phoenix|x-ray 10. 03. 2010.

<sup>13</sup> Ebinger-Rist 2011, 343.





gebung hervorgehoben werden (Abb. 16c; 17c). Je nach gewünschter Qualität sind diese grafischen Arbeiten aufwendig, und das Ergebnis reichte im vorliegenden Versuch nicht ganz an das Publikationsbild einer restaurierten Münze heran. Es fehlt hier die Wiedergabe von Materialqualität und von Gebrauchsspuren am Objekt (Abb. 17d). Es liegt aber eine nicht invasive und objektive Möglichkeit zur Grobbestimmung der Münzen vor. Bis diese Technik breiter angewandt und dadurch günstiger wird, wird es sich kaum lohnen, sie standardmässig einzusetzen. Die Mikrotomografie ist jedoch die wohl einzige Lösung für die Bestimmung mehrerer aneinander korrodierter Münzen.

5.

## Neutronentomografie

5.1

### Funktionsweise

Wie Röntgenstrahlen durchqueren auch Neutronen Materie. Neutronen sind Bestandteile von Atomkernen und dort an Protonen gebunden. Diese Verbindung ist sehr stark, weshalb Neutronen nur in einem Reaktor freigesetzt werden

können (Abb. 18). Das geschieht zum Beispiel, indem Bleiatome mit hochenergetischen Protonen beschossen werden. Der so entstandene Neutronenfluss wird durch mehrere Meter lange Röhren gelenkt, an deren Ende die Messungen stattfinden. Das Objekt befindet sich zwischen dem Röhrenaussgang und dem Detektor auf einer drehbaren Achse (Abb. 19). Die Bildauswertung geschieht über den Computer.

Neutronen interagieren mit dem Kern statt mit der Elektronenhülle der Atome. Somit

Abb. 17: Unterseen, Westabschluss. a: Silbermünze im Fundzustand. b: Röntgenaufnahme. c: Mikrotomografieaufnahme. 3D-Rekonstruktion und virtuelle Freilegung der Silbermünze. d: Zustand nach der Restaurierung.



Abb. 18: Villigen, Paul Scherrer Institut. Die Grossinstallation SINQ zur Bildgebung mit Neutronen.

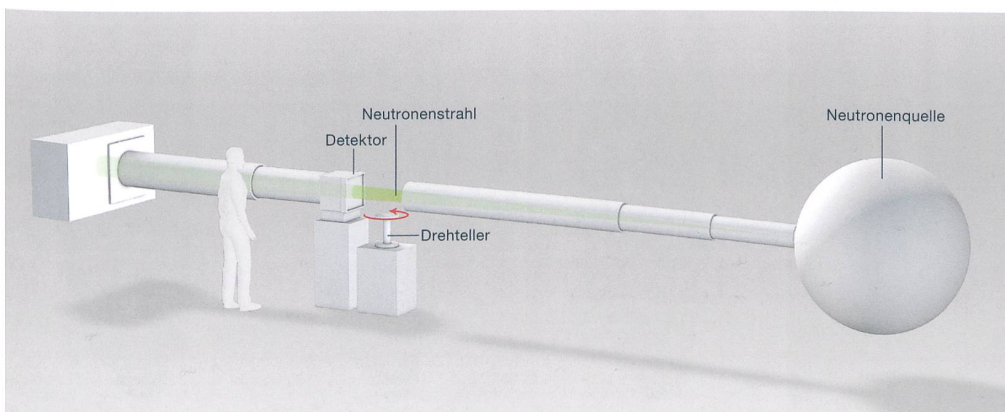


Abb. 19: Schematische Darstellung der Anlage für die Untersuchung mit Neutronenstrahlung.



Abb. 20: Ipsach, Räberain. a: Gürtelhaken im Fundzustand. Vorderseite. b: Röntgenaufnahme des Gürtelhakens. Der Aufbau aus drei Eisenstäben wird sichtbar. c, d und e: Neutronentomogramm. Rekonstruktionen mit unterschiedlicher Filterung der Grauwerte. Ein Textil lässt sich auf der Unterseite des Objekts nachweisen.

werden die Neutronenstrahlen von anderen Materialien als bei der Röntgenuntersuchung geschwächt. Organische Materialien, die wasserstoffreich sind, werden bei der Neutronenuntersuchung kontrastreich abgebildet, während die meisten Metalle fast unsichtbar sind. Wenn daher bei archäologischen Objekten organische Elemente wie Holz, Leder oder Textil neben Objekten aus Metall dargestellt werden sollen, ist die Neutronenuntersuchung ein einmaliges Mittel oder überhaupt die einzige Möglichkeit zur Bildgebung.<sup>14</sup>

Während das Röntgen von archäologischen Objekten bei uns nahezu seriell betrieben werden kann, gibt es weltweit nur knapp 40 Neutronenquellen; davon sind nur 10–15 für Untersuchungen zugänglich.<sup>15</sup> In der Schweiz können Neutronenuntersuchungen am Paul Scherrer Institut, einem multidisziplinären Forschungsinstitut in Villigen AG, gemacht werden, wie im folgenden Beispiel.

## 5.2

### Beispiele

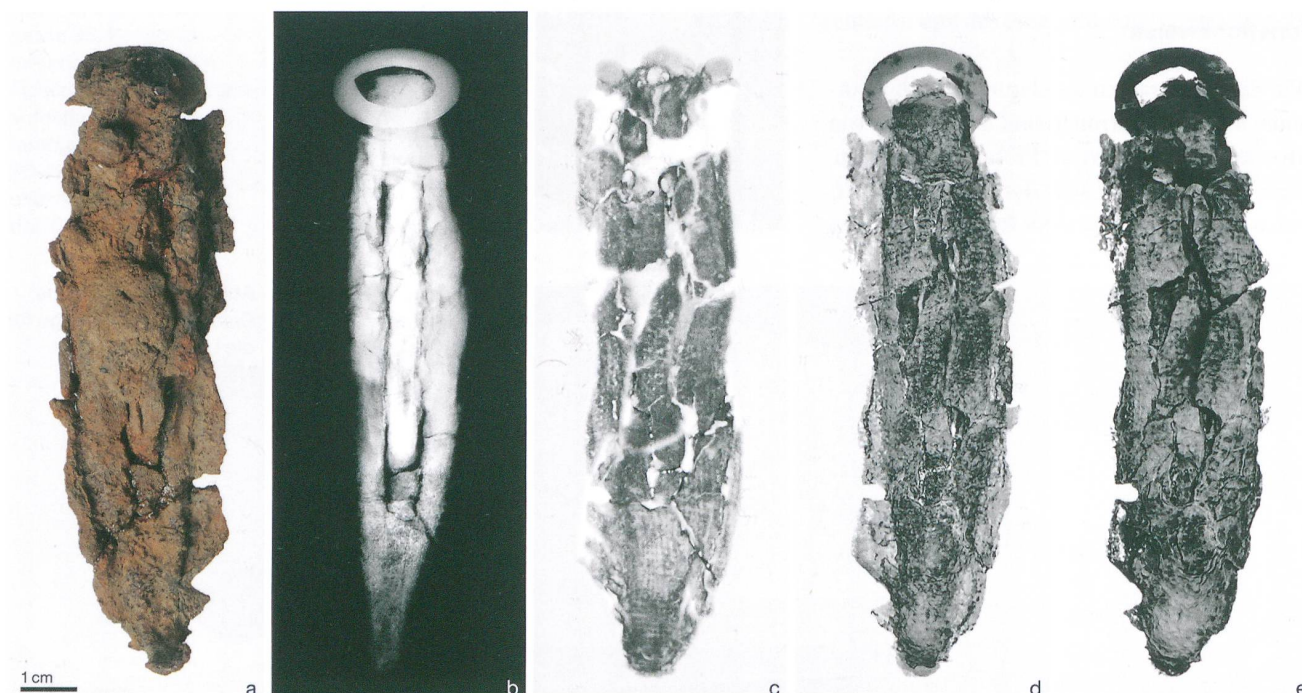
Bei der Ausgrabung von fünf keltischen Gräbern in Ipsach BE wurde ein Gürtelhaken aus Eisen mit einem Gürtelring aus Bronze geborgen (Abb. 20a). Typ und genaue Funktion dieses Objekts sind bis anhin unbekannt, man darf

also von einem archäologischen Unikat sprechen. Durch die hausinternen Röntgenaufnahmen konnte festgestellt werden, dass das wertvolle Objekt aus drei zusammengeschmiedeten Eisenstäben besteht. Diese wurden an einem Ende verjüngt und zu einem Haken geschmiedet, am anderen Ende fassen sie einen bronzernen Ring ein (Abb. 20b). Nach der weiteren Untersuchung des Objekts wurde festgestellt, dass sich innerhalb der Korrosionsauflagen Textilreste verbergen müssen.<sup>16</sup> Diese fragilen Reste können mit restauratorischen Methoden nicht freigelegt werden. Daher kam als wohl einzige Lösung, um das Textil flächig nachzuweisen, die Neutronentomografie in Frage. Wie erwartet konnte auf der gesamten Unterseite des Gürtelhakens das Textil gezeigt werden. Die Fadenrichtung verläuft parallel zum Objekt, und das Textil scheint keine Falten aufzuweisen (Abb. 20c–e). Möglicherweise handelt es sich um ein leinwandbindiges Gewebe mit zehn Fäden pro cm, jedoch ist bei der vorliegenden Aufnahme die Auflösung zu gering, um dies mit Sicherheit sagen zu können. Dagegen ist es dem

<sup>14</sup> NIAG 2006, 7.

<sup>15</sup> Lehmann 2012.

<sup>16</sup> Mitteilung Antoinette Rast, Archeotex, 07.09.2010.





Landesamt für Denkmalpflege Baden-Württemberg gelungen, bei einem archäologischen Objekt mit vergleichbarer Fragestellung mit der Neutronentomografie die Webart, Dicke und Drehrichtung der Fäden von einem Textilrest zu bestimmen.<sup>17</sup>

6.

## Schlusswort

Bildgebende Untersuchungsmethoden ermöglichen einen ganz anderen Zugang zu archäologischen Objekten. Noch im Fundzustand können damit zerstörungsfrei verschiedenste Erkenntnisse gewonnen werden. Diese reichen von der Identifikation der Objekte mit Dekor, den Herstellungsspuren und einer möglichen typologischen Zuordnung über die Prüfung von Materialart, Zustand und Echtheit bis hin zur räumlichen Verteilung mit Volumen und Größen der Elemente. Diese und viele weitere Informationen erlauben es dem Konservator-Restaurator und dem Archäologen, bezüglich der Objekte vorausschauend zu handeln.<sup>18</sup> Darüber hinaus lassen sich die gewonnenen Daten vielseitig weiterverwenden, etwa in der kulturellen Vermittlung. Immer öfter bereichern virtuelle Präsentationen von Objekten die museale Erfahrung.

Was bringen uns die bildgebenden Verfahren für die Zukunft? Sicher ist, dass sich die Techniken sehr schnell weiterentwickeln und immer neue Möglichkeiten eröffnen. Wird es bald unnötig sein, archäologische Objekte zu restaurieren, weil sie virtuell rekonstruiert und ausgewertet werden können? Ist dies ein Gewinn, weil wir dadurch die empfindlichen Originale schützen und dennoch einen Zugang zu ihnen gewähren können? Es ist an uns, die

Tragweite dieser Techniken zu verstehen, das Sinnvolle zu benützen und im Dienst unserer gemeinsamen Ziele einzusetzen: Erhalten, Verstehen, Vermitteln.

## Zusammenfassung

Zerstörungsfreie bildgebende Untersuchungsmethoden haben seit Langem ihren Nutzen in der Archäologie und der Konservierung-Restaurierung gezeigt. Röntgenaufnahmen, Tomografien und Neutronenbilder haben nach und nach Einzug in die Dokumentation des Archäologischen Dienstes gehalten. Anhand verschiedener Beispiele aus der Praxis wird hier aufgezeigt, welche Kenntnisse zu archäologischen Objekten gewonnen werden können, wo die Grenzen der verschiedenen Methoden liegen und wie sie einander ergänzen.

## Résumé

Les techniques d'imagerie non destructive ont montré depuis longtemps leur utilité en archéologie et en conservation-restauration. Parmi elles, la radiographie, la tomographie assistée par ordinateur et la tomographie aux neutrons ont progressivement fait leur entrée dans les archives du Service archéologique du canton de Berne. Par le biais de différents exemples rencontrés au fil des ans dans notre institution, nous cherchons ici à donner un aperçu des apports, limites et complémentarités de ces techniques, toutes pouvant être mises au service de l'enquête archéologique.

<sup>17</sup> Stelzner et al. 2010, 102–104.

<sup>18</sup> Ebinger-Rist 2011, 346–347.



## Literatur

### *Brothwell 1969*

Don Brothwell et al., The application of X-rays to the study of archaeological material. Science in archaeology: a survey of progress and research. London 1969, 521–523.

### *Ebinger-Rist 2011*

Nicole Ebinger-Rist et al., Computed tomography: a powerful tool for non-destructive mass documentation of archaeological metals. Metal 2010, 2011, 342–347.

### *Fell/Mould/White 2006*

Vanessa Fell, Quita Mould und Rob White, Guidelines on the X-radiography of archaeological metalwork. Swindon 2006.

### *Fiori/Nunzi 1995*

Mario G. Fiori und Maria Grazia Nunzi, The earliest documented applications of X-rays to examination of mummified remains and archaeological material. Journal of the Royal Society of Medicine 88, 1995, 67–69.

### *Glasser 1934*

Otto Glasser, Wilhelm Conrad Röntgen and the early history of the Röntgen rays. Springfield, Ill., 1934.

### *Hecht 2011*

Yolanda Hecht und Andreas Niederhäuser, Alltagskultur und Totenrituale der Kelten. Ein Siedlungszentrum am Oberrhein um 100 v. Chr. Basel 2011.

### *Lang/Andrew 2005*

Janet Lang und Andrew Middleton, Radiography of Cultural Material. Burlington 2005.

### *Lehmann 2012*

Eberhard H. Lehmann, Imaging with X-rays, Neutrons and Synchrotron Radiation. In: Lectures of the IFF Spring School 2012 Scattering. Jülich 2012.

### *Londe 1897*

Albert Londe, Les rayons Röntgen et les momies. La Nature n°1253 à 1278, Paris 1897, 103–105.

### *NIAG 2006*

Neutron Imaging & Activation Group NIAG, Neutron Imaging an der Spallations-Neutronenquelle SINQ. Hrsg. v. Paul Scherrer Institut PSI. Villigen 2006.

### *O'Connor/Brooks 2007*

Sonia O'Connor und Mary M. Brooks, X-Radiographie of textiles, dress and related objects. Oxford 2007.

### *Pahl 1981*

W. M. Pahl, La tomographie par ordinateur appliquée aux momies égyptiennes. Bulletins et Mémoires de la Société d'anthropologie de Paris 8/3, 1981, 343–356.

### *Ramstein 2013*

Marianne Ramstein, Attiswil, Wiesenweg 11. Ein eisenzeitlicher Gusthof am Jurasüdfuss. Archäologie Bern 2013. Jahrbuch des Archäologischen Dienstes des Kantons Bern, 2013, 72–73.

### *Röntgen 1896*

Wilhelm Conrad Röntgen, Eine neue Art von Strahlen. Würzburg 1896.

### *Stelzner et al. 2010*

Jörg Stelzner et al., The application of 3D computed tomography with X-rays and neutrons to visualize archaeological objects in blocks of soil. Studies in Conservation 55/2, 2010, 95–106.

### *Tissier 2007*

Frédérique-Sophie Tissier, Le cyclododécane en archéologie: tests et applications pratiques. Master Université Paris 1, 2007.