Berliner Beiträge zur Archäometrie	Band 9	Seite 171–190	Berlin 1984

Die Anwendung der Computertomographie zur Untersuchung kulturgeschichtlicher Objekte

PETER REIMERS, Bundesanstalt für Materialprüfung
JOSEF RIEDERER, Rathgen-Forschungslabor der Stiftung Preußischer Kulturbesitz

1. Einleitung

Die Verfahren der zerstörungsfreien Materialprüfung spielen bei der Untersuchung von Kunstwerken eine besondere Rolle. Der Einsatz von Röntgenstrahlen zur Lösung kulturgeschichtlicher Fragestellungen, den Röntgen selbst bereits 1896, ein Jahr nach der Entdeckung dieser Strahlen, mit Gemäldedurchleuchtungen einleitete, hat heute einen festen Platz in der Archäometrie, und die in neuerer Zeit entwickelten Durchstrahlungstechniken haben rasch Eingang in die Laboratorien der Museen gefunden.

Ziel des Einsatzes solcher Durchstrahlungstechniken ist die Klärung des inneren Aufbaues kulturgeschichtlicher Objekte mit dem Ziel, das Material, die Art seiner Verarbeitung oder schädliche Veränderungen zu erkennen, ohne dabei das Objekt selbst in irgendeiner Art zu beeinträchtigen.

Ein wichtiges Anwendungsgebiet derartiger Materialprüfungen ist die Klärung des Inhalts geschlossener Körper. Die Abteilung Altamerika des Museums für Völkerkunde besitzt eine große Sammlung peruanischer Mumien, die, mit reichlichen Beigaben an Nahrungsmitteln, Gebrauchsgegenständen und Schmuck versehen, in Tücher gehüllt und schließlich in einen Leinensack eingenäht, begraben wurden. Da der archäologische Befund unwiederbringlich zerstört würde, wenn die Mumienbündel auseinandergenommen würden, bietet sich hier die Durchstrahlung an, um Aufschluß über den Inhalt zu erhalten. Häufig können solche Untersuchungen mit den herkömmlichen Röntgentechniken durchgeführt werden. Schwierigkeiten gibt es jedoch, wenn sich Gegenstände, die von den Röntgenstrahlen ungehindert durchdrungen werden, im Inneren von stark absorbierenden Objekten aus Metall oder Keramik befinden. Völkerkundler aus dem Bereich der indischen Kunst sind zum Beispiel daran interessiert, ob sich im Inneren von Bronzeskulpturen, die nach dem Guß durch eine Metallplatte verschlossen wurden, Schriftrollen befinden, die oft wichtige historische Informationen enthalten.

Ähnliche Probleme entstehen, wenn die Durchleuchtung Aussagen zur Gußtechnik liefern soll. Die Lage von Kernhaltern, die beim Wachsausschmelzverfahren den Gußkern hielten, der Verlauf von eingelassenen Dübeln, die Art der Füllung des Innenraumes oder die Technik, mit der einzeln gegossene Teile miteinander verbunden sind, lassen sich im Röntgenbild aufgrund der Streustrahlung oder wegen komplizierter Objektstruktur nicht immer mit der notwendigen Deutlichkeit erkennen.

Schließlich ist die Durchstrahlung von Museumsobjekten als Voraussetzung für die Behebung von Schäden notwendig. Korrosionsvorgänge an der Oberfläche von Metallobjekten oder Ausblühungen von Salzen bei Gefäßen aus Stein oder Keramik haben ihre Ursache oft in Umsetzungen im Innenraum, deren Art und Ausmaß bekannt sein muß, um sachgemäße Restaurierungsmaßnahmen einleiten zu können.

Um bei derartigen Problemen zu vertieften Informationen zu gelangen, erschien es zweckmäßig, Versuche anzustellen, um zu klären, ob es mit Hilfe der Computertomographie gelingt, Befunde zu liefern, die die Ergebnisse der Untersuchung mit anderen Durchstrahlungstechniken ergänzen und erweitern. Die Anwendung der CAT für nichtmedizinische Prüfungen gewinnt seit etwa 1978 ein immer breiteres Interesse[3,4]. Über archäometrische Anwendungen wird jedoch bisher nur vereinzelt berichtet[1,2].

2. Prinzip der CAT

Die Schwächung monoenergetischer Röntgenstrahlen in einem Objekt erfolgt nach einem Exponentialgesetz

$$I = I_0 \cdot \exp\left[-\int \mu \cdot ds\right] \tag{1}$$

Mit I_0 = ungeschwächte Strahlenintensität, I = geschwächte Strahlenintensität, μ = materialspezifischer linearer Schwächungskoeffizient, ds = Weginkrement in Strahlrichtung. Die in der konventionellen Radiographie ermittelte zweidimensionale Intensitätsverteilung auf dem Röntgenfilm läßt im allgemeinen keine eindeutigen Schlüsse auf μ zu, da nur das Produkt $\mu \cdot ds$ bekannt ist. Diesen Nachteil beseitigt die Computertomographie (CAT). Mit ihr ist es möglich, den linearen Schwächungskoeffizienten in Abhängigkeit vom Ort $\mu = \mu(x, y, z)$ zu bestimmen. Aus meßtechnischen Gründen wird dabei die dreidimensionale Verteilung $\mu(x, y, z)$ durch eine Folge zweidimensionaler Schnitte $\mu(x, y)$ gewonnen.

Die möglichen Meßprinzipien der Computertomographie sind in einer Reihe von Übersichtsartikeln[5–10] bereits ausführlich beschrieben. Gegenüber den Fächerstrahlmaschinen (Bild 1 a), die in der medizinischen Technik heute fast ausschließlich angewandt werden, bietet der Linear-Scanner (Bild 1 b) für Materialprüfungen den Vorteil der größeren Flexibilität, z. B. gegenüber unterschiedlichen Prüfobjektabmessungen.

Die Arbeitsweise eines Linear-Scanners mit einem Strahl und einem Detektor ist in Bild 2 dargestellt. Bei jeder Winkelstellung wird das System Röhre/Detektor schrittweise verschoben und so der ganze Querschnitt des Objektes abgetastet. Hierbei ist die schon erwähnte Kollimierung des Strahls von entscheidender Bedeutung, da nur durch die weitgehende Ausschaltung der Streustrahlung eine Abtastung möglich ist, die auch feinere Strukturen wiedergibt.

Man erhält damit für jeden Winkel ein Schwächungsprofil, zusammengesetzt aus einzelnen Meßwerten (Gl. 1). Nach Normierung auf die ungeschwächte Intensität I_0, Invertierung und Logarithmierung liefert Gleichung 1 das Linienintegral P des Schwächungskoeffizienten $\mu(x, y)$ in Strahlrichtung längs eines Weges S durch das Objekt,

$$p = \ln\left[I_0/I\right] = \int_S \mu_{(x,y)} \cdot dS, \tag{2}$$

im weiteren kurz Projektionswert genannt. Die Gesamtheit aller Projektionswerte ist der Ausgangspunkt für die verschiedenen Bildrekonstruktionsverfahren, die sich in drei Klassen aufteilen lassen:

1. Iterativ algebraische Rekonstruktionsverfahren
2. Fourierverfahren
3. Verfahren der gefilterten Rückprojektion

Die einzelnen Verfahren sind in einer Reihe von Artikeln[11–15] bereits ausführlich beschrieben, so daß im weiteren nur das Verfahren der gefilterten Rückprojektion behandelt wird, das in der Praxis am häufigsten Verwendung findet. Der Vorteil des Verfahrens liegt zum einen in der Schnelligkeit des Rekonstruktionsalgorithmus, zum anderen darin, daß jede aufgenommene Projektion sofort im Rechner verarbeitet werden kann, parallel zu der Aufnahme weiterer Projektionen.

In Bild 3 ist die Geometrie für einen Linearscanner nochmals genauer abgebildet. Entsprechend der Aufnahme der Meßwerte werden die Projektionswerte p in Abhängigkeit des Winkels φ und des Abstands r vom Drehmittelpunkt dargestellt,

$$p_{(r,\varphi)} = \ln\left[I_0/I\right] = \int_S \mu_{(x,y)} \cdot dS \tag{3}$$

Für jede Projektion werden diese Werte mit einem Faltungskern h(r) gefaltet

$$p_{(r,\varphi)} \cdot h_{(r)} = f_{(r,\varphi)} = \int p_{(r',\varphi)} \cdot h_{(r-r')} \cdot dr \tag{4}$$

und in die Bildmatrix rückprojiziert

$$\mu_{(x,y)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} f(x \cdot \cos\varphi + y \cdot \sin\varphi) \cdot d\varphi \qquad (5)$$

Das Argument $x \cdot \cos\varphi + y \cdot \sin\varphi$ wählt dabei alle die Projektionswerte aus, die einen Beitrag zum Schwächungswert im Punkt (x, y) liefern. Die Notwendigkeit, die einzelnen Projektionen zu falten, läßt sich folgendermaßen anschaulich machen:

Jeden Bildpunkt kann man sich als Überlagerung einer Anzahl von geraden Linien denken, wobei das Ergebnis eine Glockenkurve darstellt, deren Flanken mit 1/r abfallen. Die Rückprojektion ohne Faltung würde daher eine Verteilung des Schwächungskoeffizienten in der Schnittebene wiedergeben, die mit 1/r gefaltet wäre

$$\mu_{(x,y)} \cdot 1/r.$$

Ein weiterer Vorteil des Rekonstruktionsverfahrens der gefalteten Rückprojektion liegt nun darin, daß die Entfaltung schon für jede einzelne Projektion durchgeführt werden kann und nicht erst am fertigen Bild zu erfolgen hat. Die Bildentstehung aus den Meßdaten nach diesem Verfahren ist schematisch in Bild 4 dargestellt.

3. Beispiele

Die sehr eindrucksvollen Möglichkeiten dieser neuen zerstörungsfreien Prüfmethode lassen sich am besten anhand von Beispielen demonstrieren.

Das erste Beispiel ist der Kopf einer altperuanischen Mumie (Bild 5) aus dem Fundus des Museums für Völkerkunde der Stiftung Preußischer Kulturbesitz in Berlin. Bei Röntgenreihenuntersuchungen zeigte dieser Kopf eine für Röntgenstrahlen undurchlässige Platte oder Folie im Bereich der Stirnpartie. Es war zu klären, ob dieser Kopf ein Loch in der Stirn aufweist, welches mit einer Metallplatte verschlossen oder zumindest verdeckt worden war. Das mit Hilfe der CAT gewonnene sagittale Schnittbild (Bild 6) zeigt deutlich, daß der gesamte Schädelknochen keine groben Verletzungen aufweist. Über der „Metallfolie" ist die einhüllende Gewebeschicht zu erkennen.

Der zweite Fall ist eine Statue des Merkur aus dem 19. Jahrhundert (Bild 7). Bei ihm sollte die Verbindungstechnik der Arme und Beine mit dem Rumpf aufgeklärt werden. Äußerlich sind rund um die Oberarme und -schenkel sehr feine gradlinige Fugen zu erkennen. In Höhe der Verbindungsstellen wurden zwei computertomographische Schnitte durch die Oberschenkel gelegt (Bild 8a, b). Beide Schnittbilder zeigen deutlich, daß in die hohlen Oberschenkel Metallstücke eingelegt sind, die an die Innenwand angepaßt sind. Diese „Stützrohre" sind nach hinten offen und die scharfen Kanten nach innen umgebördelt. Ob die Einzelteile dieser „Rohrverbindung" miteinander verlötet sind, kann aus den Tomogrammen wegen der zur Zeit noch mäßigen Ortsauflösung nicht abgelesen werden.

Auch im dritten Beispiel interessierte die Verbindungsart von Metallteilen. Es handelt sich dabei um eine Statue aus massivem Eisen, die einen Ritter mit einem Drachen kämpfend darstellt (Bild 9). Vom Künstler wurde behauptet, daß die Statue aus einem Stück Eisen herausgearbeitet worden sei. Ein tomographischer Schnitt in Höhe des Ansatzes des Pferdeschweifes (Bild 10 a) zeigt neben vielen recht großen Lunkern im Rumpf des Pferdes eine Zone geringerer Dichte um den Ansatz des Schweifes, was darauf hinweist, daß dieser nachträglich eingesetzt wurde. Noch deutlicher ist der Ansatz des Drachenschweifs zu erkennen (Bild 10b).

Beispiel vier ist eine chinesische Reiterstatue aus dem 20. Jahrhundert (Bild 11). Die Tomogramme (Bild 12a und 12b) lassen deutlich mehrere Kernhalter (Eisenstäbe) im Inneren von Pferd und Reiter erkennen. Weiter ist zu sehen, daß Pferd und Reiter mit einer homogenen Masse gefüllt sind, während der links neben dem Pferd schreitende „Führer" hohl ist. Aus dem Histogramm des Tomogramms läßt sich sogar quantitativ der Schwächungswert μ des Füllmaterials berechnen. Durch Vergleich mit dem bekannten Schwächungswert des Bronzemantels (Bild 13) ergibt sich der Wert $\mu = 0{,}1\ cm^{-1}$, der dem Schwächungswert von SiO_2 für Co-60-Strahlung entspricht. Ein weiterer Befund der CAT sind die hellen Flecken, die sich kegelförmig von außen nach innen ausbreiten (Bild 12 b). Es handelt sich hierbei

um Zonen größerer Dichte als der des Füllmaterials, die wahrscheinlich durch Korrosion entlang den eisernen Kernhaltern von außen nach innen entstanden sind.

Bei der Statuette eines altägyptischen Osiris (Bild 14) aus dem 5. Jahrhundert vor Christus sollten Herstellungstechnik und innerer Aufbau geklärt werden. Die CAT (Bild 15 a, b) läßt erkennen, daß es sich um einen relativ dünnwandigen Guß handelt, wobei sogar die kugelförmige Ausweitung am Ende der Krone hohl ist. Der Innenraum ist homogen mit dem Gußkern ausgefüllt. Der Hohlraum im Armbereich und die Bohrung im unteren Teil der Figur wurden erst in jüngster Zeit bei der Entnahme von Materialproben bzw. der Sockelung geschaffen. Im Bereich des Kopfes zeichnen sich eine schräge Metallplatte im Halsbereich sowie ein Stift in der Krone ab. Auch an den Beinen und den Oberarmen sind Metallteile in den Innenräumen erkennbar, die mit der Innenseite der Statuette verbunden sind.

Der letzte Fall demonstriert besonders spektakulär die gute Dichteauflösung der CAT. Bild 16 zeigt eine tibetische Buddha-Statue aus dem 18. Jahrhundert. Oft enthalten diese Statuen, deren Sockel unten mit einer Metallplatte verschlossen sind, Schriftrollen, deren Inhalt von historischem bzw. kunstwissenschaftlichem Interesse ist. Man möchte diese Statue jedoch nicht auf reinen Verdacht hin öffnen. Mit Hilfe der CAT (Bild 17 a, b) ist es möglich, im Inneren eines immerhin 3 mm dicken Bronze-Sockels eine Papierrolle zu lokalisieren, ohne die Statue in irgendeiner Weise zu beschädigen.

4. Zusammenfassung

Die CAT ist ein neues zerstörungsfreies Prüfverfahren, welches die herkömmliche Radiographie in wertvoller Weise ergänzt und erweitert. Sie liefert Schnittbilder durch das Prüfobjekt, während bei der normalen Radiographie Schattenbilder erzeugt werden, bei denen alle Details in eine Bildebene übereinanderprojiziert werden.

Besonders hervorzuheben ist die gute Dichteauflösung der CAT, die im medizinischen Bereich Werte von 0,1 % erreicht hat. In den Fällen, wo Details im Inneren einer stark absorbierenden Hülle sichtbar gemacht werden sollen, bietet die CAT einzigartige Prüfmöglichkeiten.

Literaturangaben

1 TOUT, R. E., GILBOY, W. B., und CLARK, A. J.: „The use of computerized tomography for nondestructive examination of archaeological objects".
Archaeo-Physica 10, 608 (1979)

2 REIMERS, P., H. HEIDT, J. STADE und H.-P. WEISE: Beispiele für die Anwendung der Computer-Tomographie (CAT) in der zerstörungsfreien Materialprüfung.
Materialprüfung 2 (1980), S. 214–217

3 REIMERS, P., und J. GOEBBELS: New Possibilities of Nondestructive Evaluation by X-ray Computed Tomography.
Mat. Eval. 41 (1983), S. 732–737

4 GILBOY, W. B., und J. FOSTER: Industrial Applications of Computerized Tomography with X- and Gammaradiation.
Research Techniques in Nondestructive Testing, Vol. 6, pp 255–287
R. S. SHARP Editor, Academic Press 1981 (ISBN: 0-12-63 90 56-8)

5 BROOKS, R. A., und G. DI CHIRO: Principles of Computer Assisted Tomography (CAT) in Radiographic and Radioisotopic Imaging
Phys. Med. Biol. 21 (1976), S. 689–732

6 KOWALSKI, G., und W. WAGNER: Generation of Pictures by X-ray Scanners.
Optica Acta 24 (1977), S. 327–348

7 SCHWIERZ, G., W. HÄRER und E. P. RÜHRNSCHOPF: Principles of Image Reconstruction in X-ray Computer Tomography.
Siemens Forsch.- und Entwickl.-Ber. 7 (1978), Hf. 4, S. 196–203

8 KEIL, P.: Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgen-Computer-Tomographie.
Phys. Bl. 39 (1983), S. 2–8

9 HOUNSFIELD, G. N.: Computed Medical Imaging.
J. Comp. Ass. Tom. 4 (1980), S. 665–674

10 SNYDER, D. L., und J. R. COX, jr.: On overview of reconstructive tomography and limitations imposed by a finite number of projections in: „Reconstruction Tomography in Diagnostic Radiology and Nuclear Medicine";
University Park Press, Baltimore (1977), S. 3–32

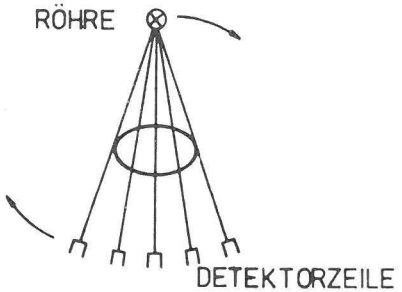
11 RAMACHANDRAN, G. N., und L. V. LAKSHMINARAYANAN: Three-dimensional reconstruction from radiographs and electron micrographs: application of conclution insted of Fourier transforms.
Proc. Nat. Acad. Sci. USA 68 (1971), S. 2236–2240

12 HERMAN, G. T., und S. W. ROWLAND: Three methods for reconstructing objects from X-rays: a comparative study.
Comp. Graph. Image Processing 2 (1973), S. 151–178

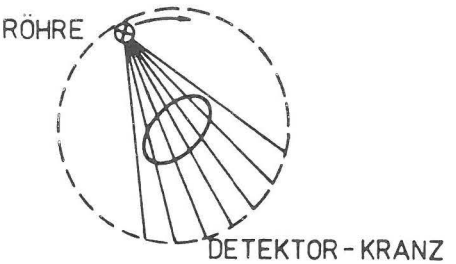
13 BRACEWELL, R. N., und A. C. RIDDLE: Inversion of fan-beam scans in radio astronomy.
Astrophys. J. 150 (1967), S. 427–434

14 SHEPP, L. A., und B. F. LOGAN: The Fourier reconstruction of a head section.
IEEE Trans. Nucl. Sci. NS 21 (1974), S. 21–43

15 HERMAN, G. T., Ed.: Image Reconstruction from Projections. Topics in Applied Physics Vol. 32
Springer-Verlag, Berlin (1979)

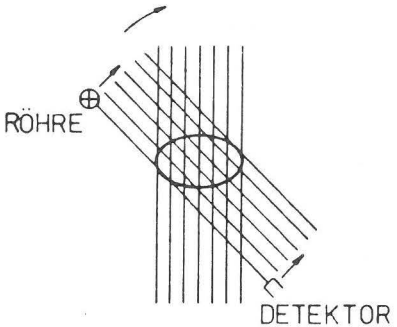


ROTATION VON
RÖHRE + DETEKTOR

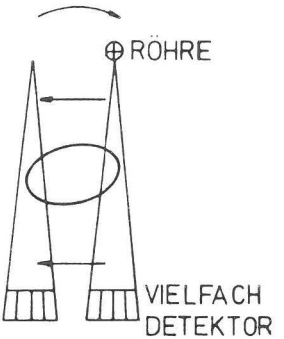


ROTATION DER RÖHRE

Bild 1 a Fächerstrahl-Computertomographen



ROTATION + TRANSLATION
VON RÖHRE + DETEKTOR



ROTATION + TRANSLATION
VON RÖHRE + VIELFACHDETEKTOR

Bild 1 b Computertomographen mit linearer Abtastung (Linear-Scanner)

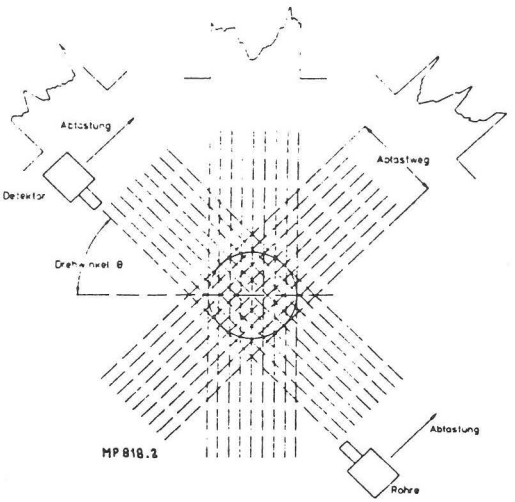


Bild 2 Prinzip eines einfachen Computertomographen mit einem Strahl und einem Detektor (lineare Abtastung und Drehung)

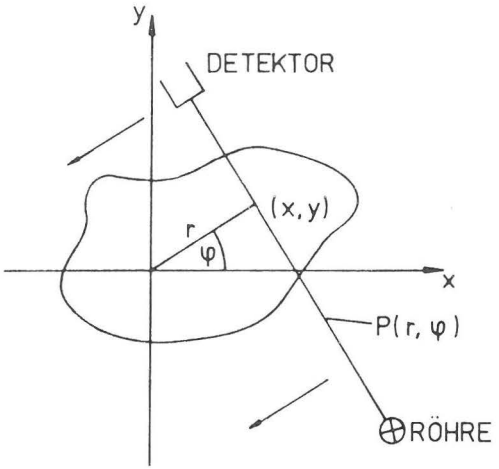


Bild 3 Koordinatentransformation beim Linear-Scanner

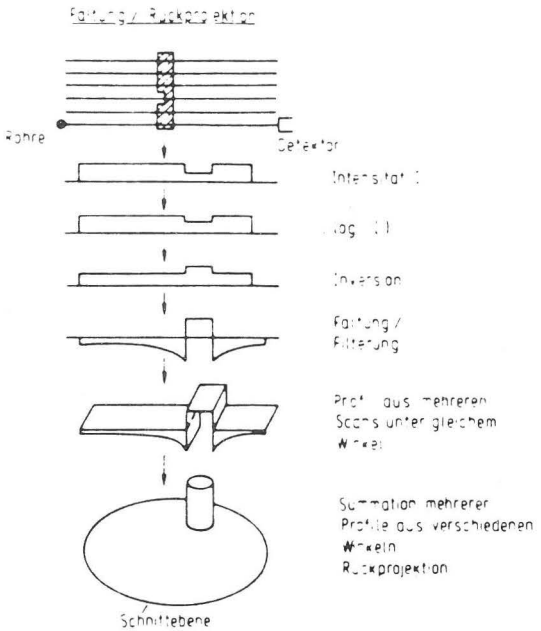


Bild 4 Computertomographie, Wirkung von Faltung und Rückprojektion

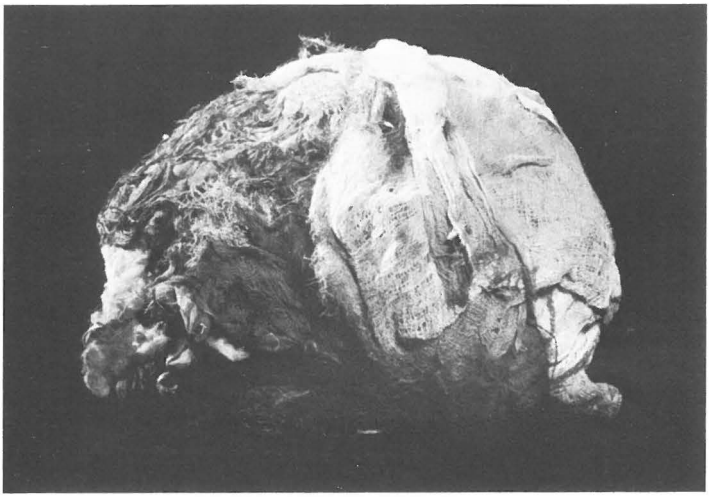


Bild 5 Photo vom Mumienkopf oder Röntgenaufnahme von Frau Dr. von Schuler

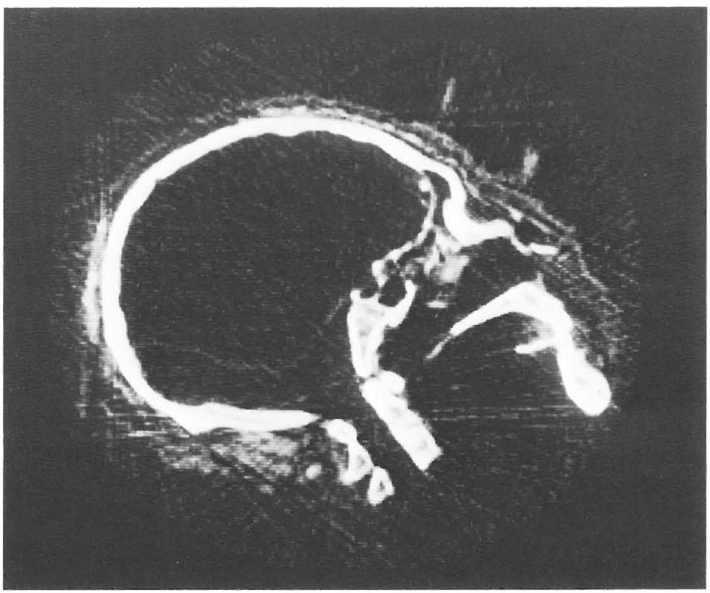


Bild 6 Sagittaler Schnitt durch den Mumienkopf

Bild 7 Bronzestatue des Merkur, 19. Jahrhundert, Höhe 40 cm

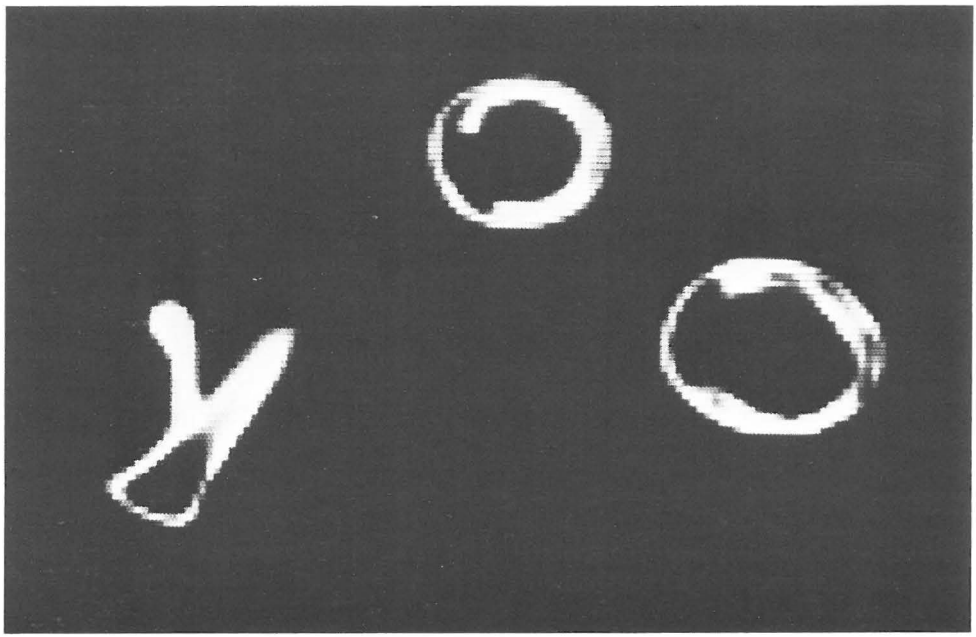


Bild 8 a Tomogramm in der Ebene A aus Bild 7

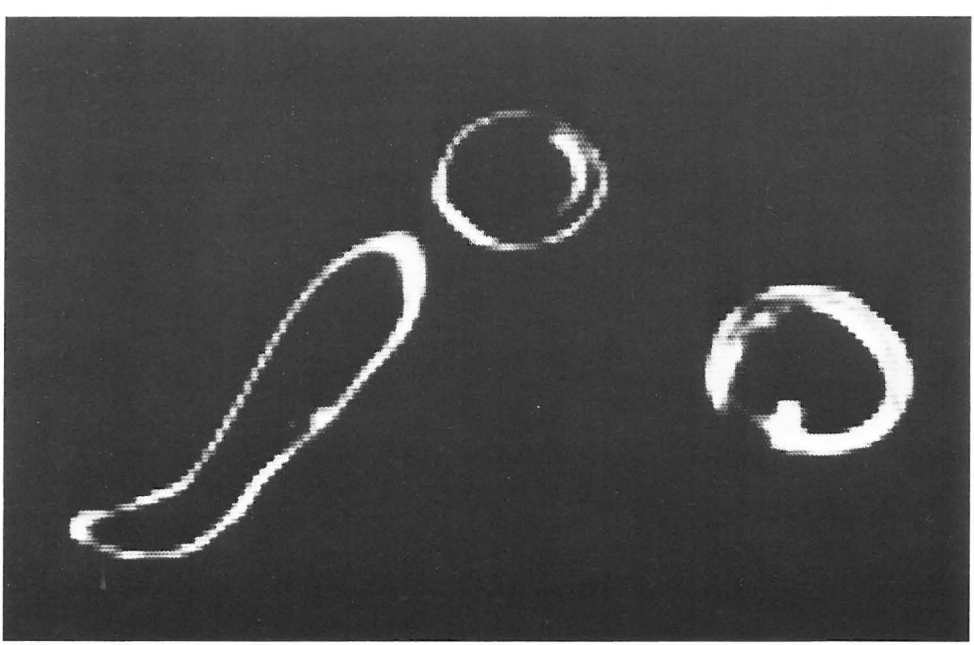


Bild 8 b Tomogramm in der Ebene B aus Bild 7

Bild 9 Eiserne Reiterstatue, darstellend den Großen Kurfürsten als hl. Georg, von Gottfried Christian Leygebe; Nr. 58 in „Die Brandenburgisch-Preußische Kunstkammer", Staatliche Museen Preußischer Kulturbesitz Berlin 1981, ISBN 3-88-60 90 30-2

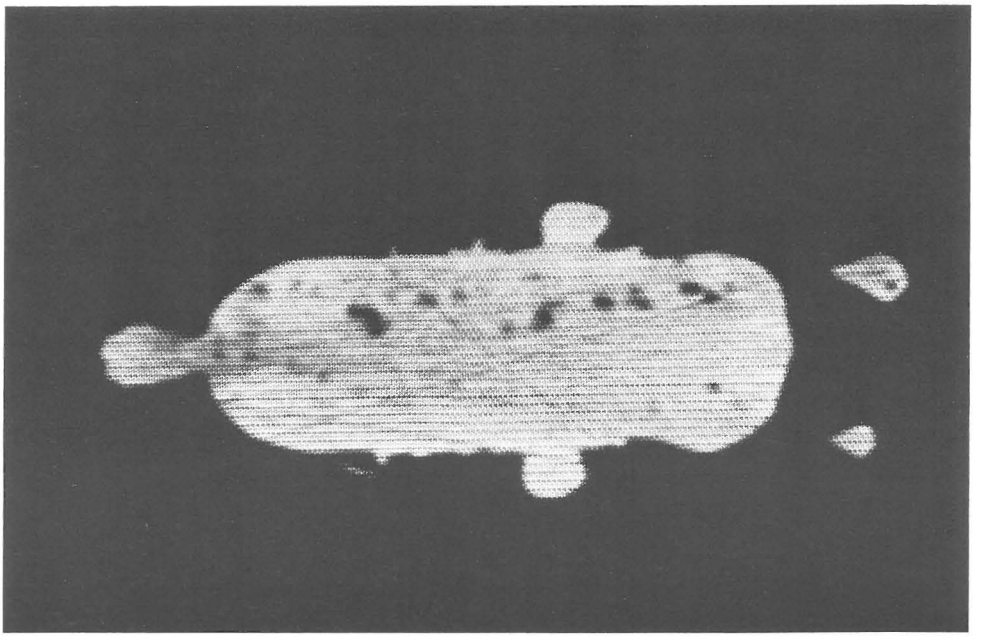


Bild 10 a Schnittbild der Reiterstatue (Bild 9) in Höhe des Ansatzes des Pferdeschweifs

Bild 10 b Schnittbild der Reiterstatue (Bild 9) in Höhe des Ansatzes des Drachenschweifs

Bild 11 Chinesische Reiterstatue aus dem 20. Jahrhundert

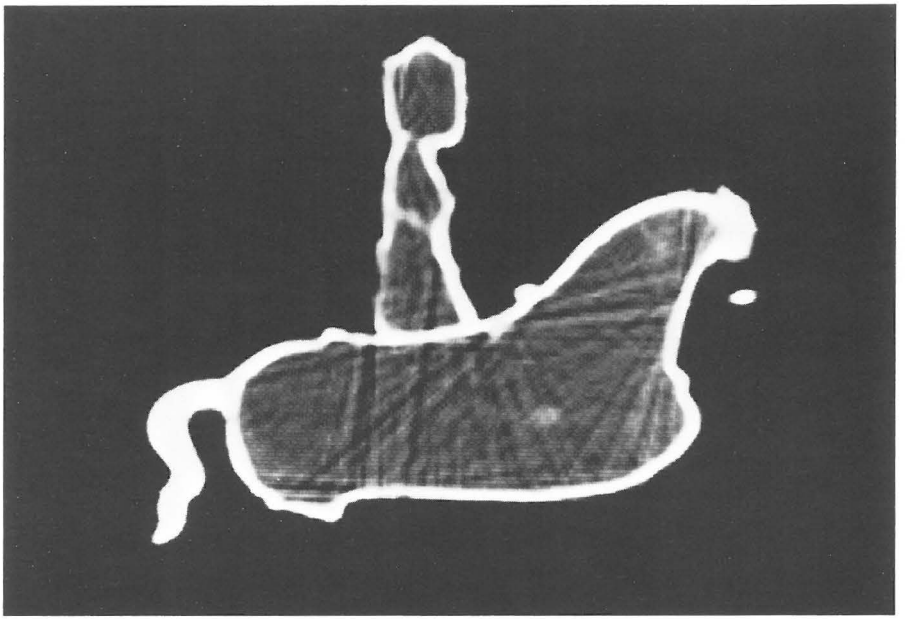


Bild 12 a Längsschnitt durch den aufrecht sitzenden Reiter (Bild 11)

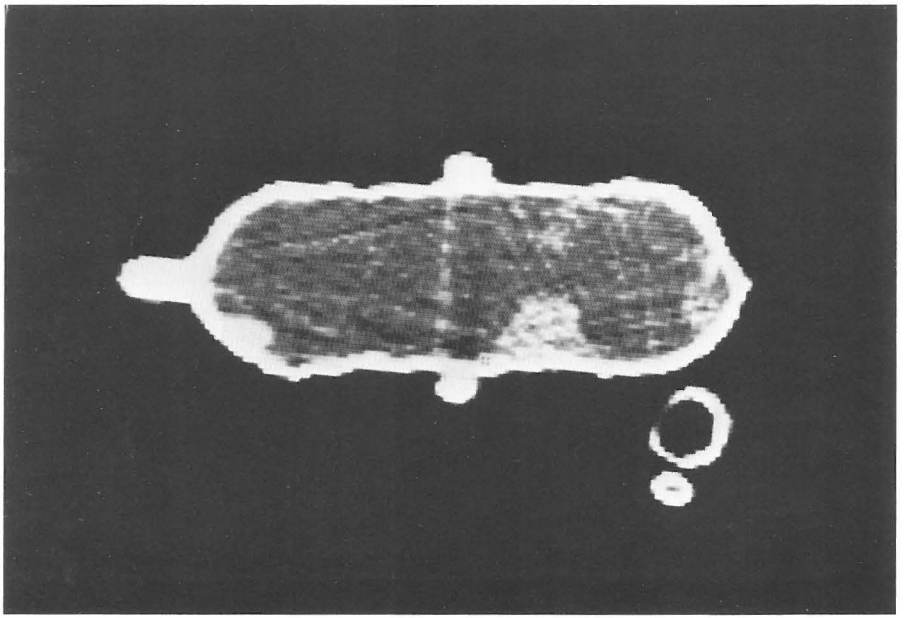


Bild 12 b Querschnitt durch den Pferderumpf in Höhe des Schweifansatzes

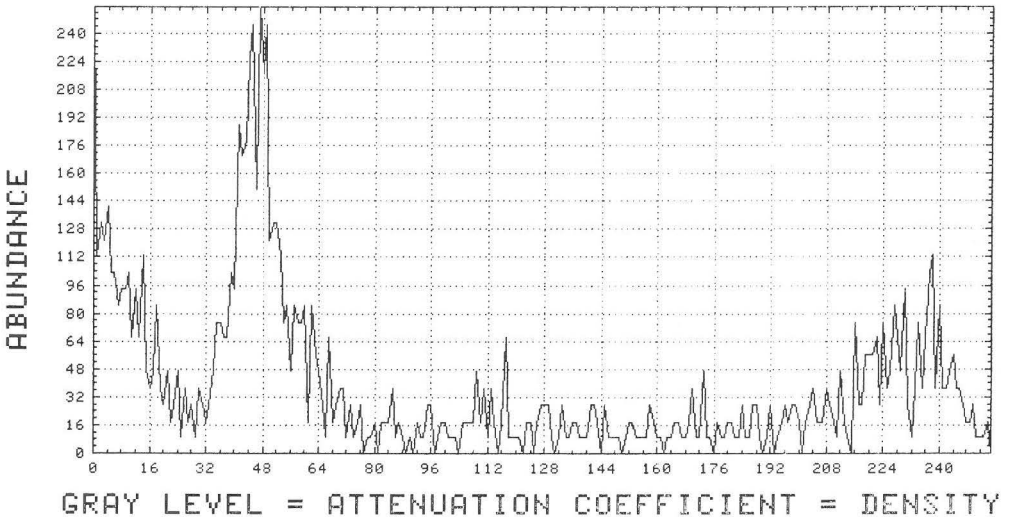


Bild 13 Histogramm der Tomographie Bild 12 a

Bild 14 Osiris, Ägypter, 5. Jahrhundert v. Chr.

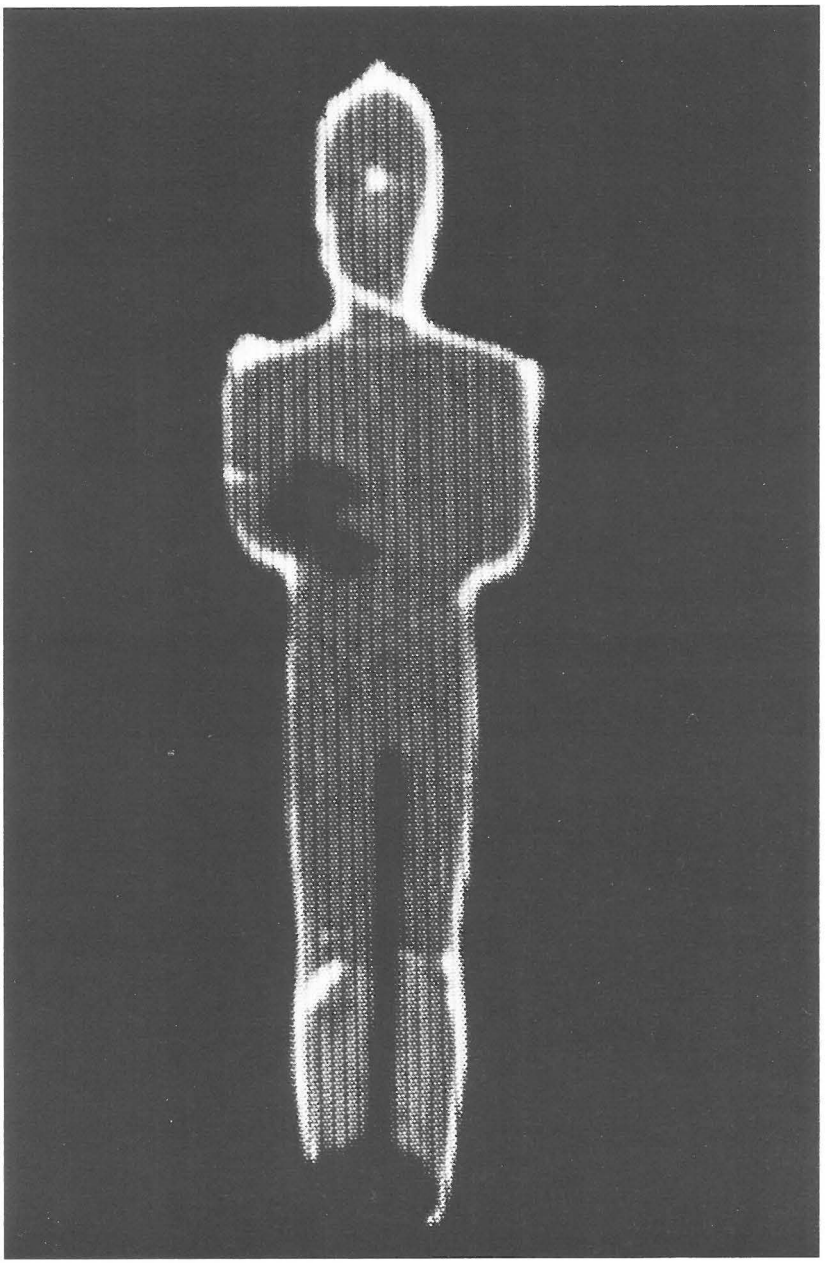


Bild 15 a Längsschnitt durch die Statue (Bild 14)

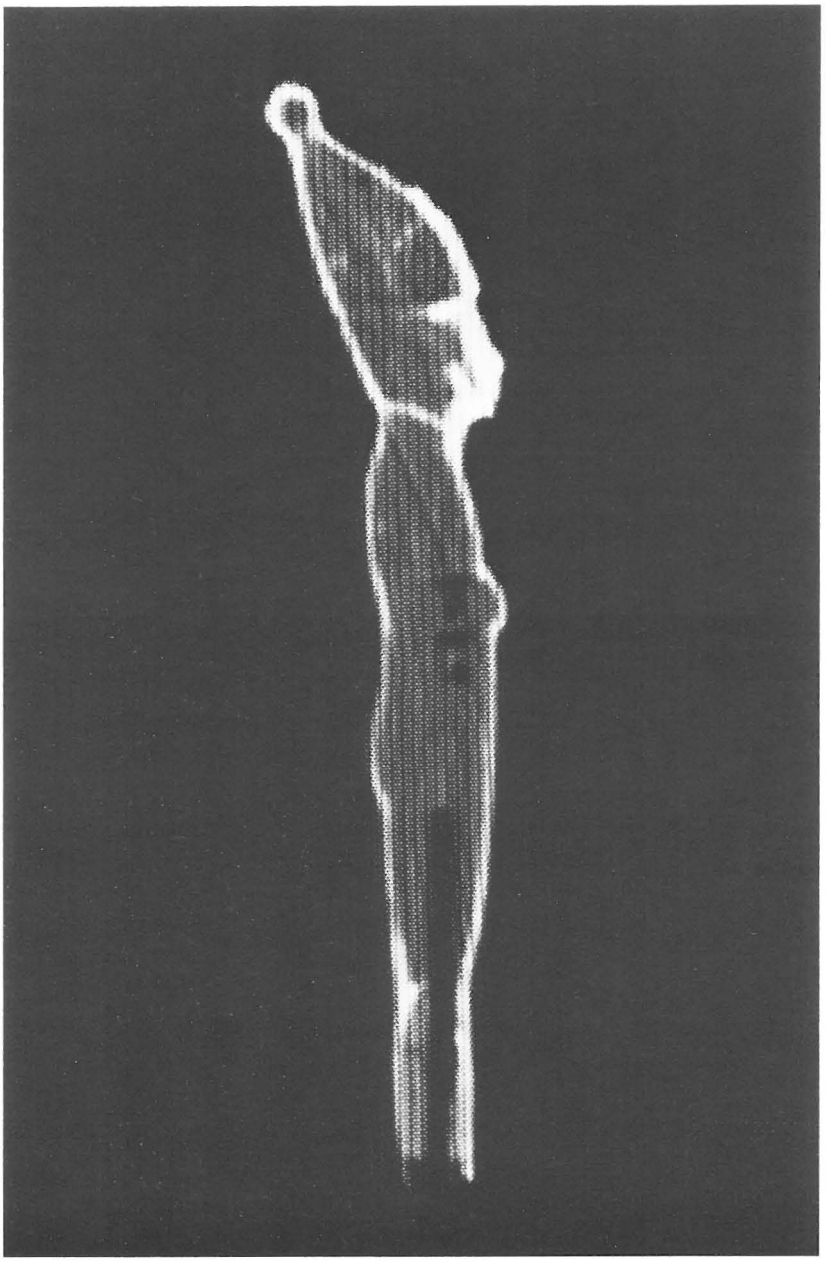


Bild 15 b Längsschnitt durch die Statue (Bild 14), um 90° gedreht

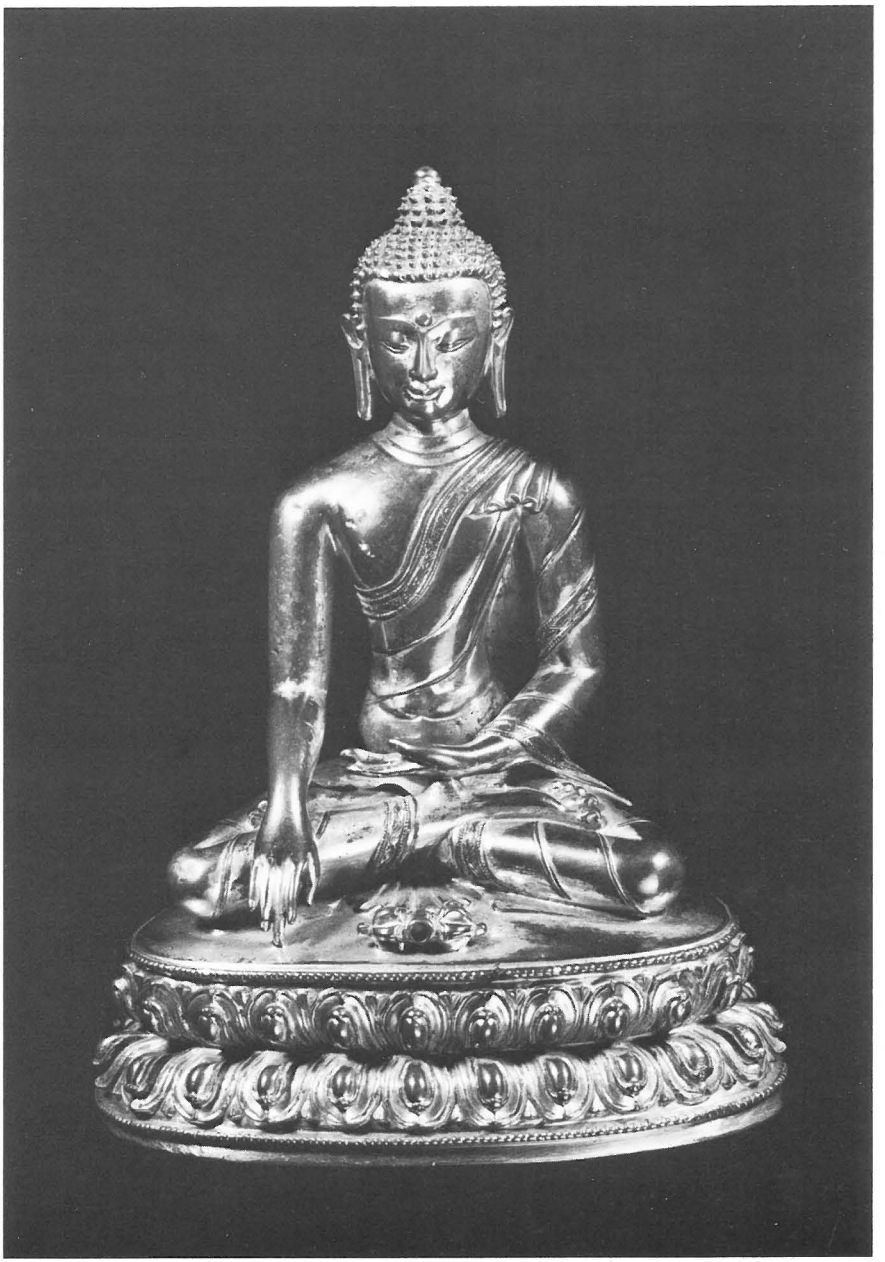


Bild 16 Tibetische Buddha-Statue, 18. Jahrhundert, Völkerkunde-Museum der Stiftung Preußischer Kulturbesitz, Berlin

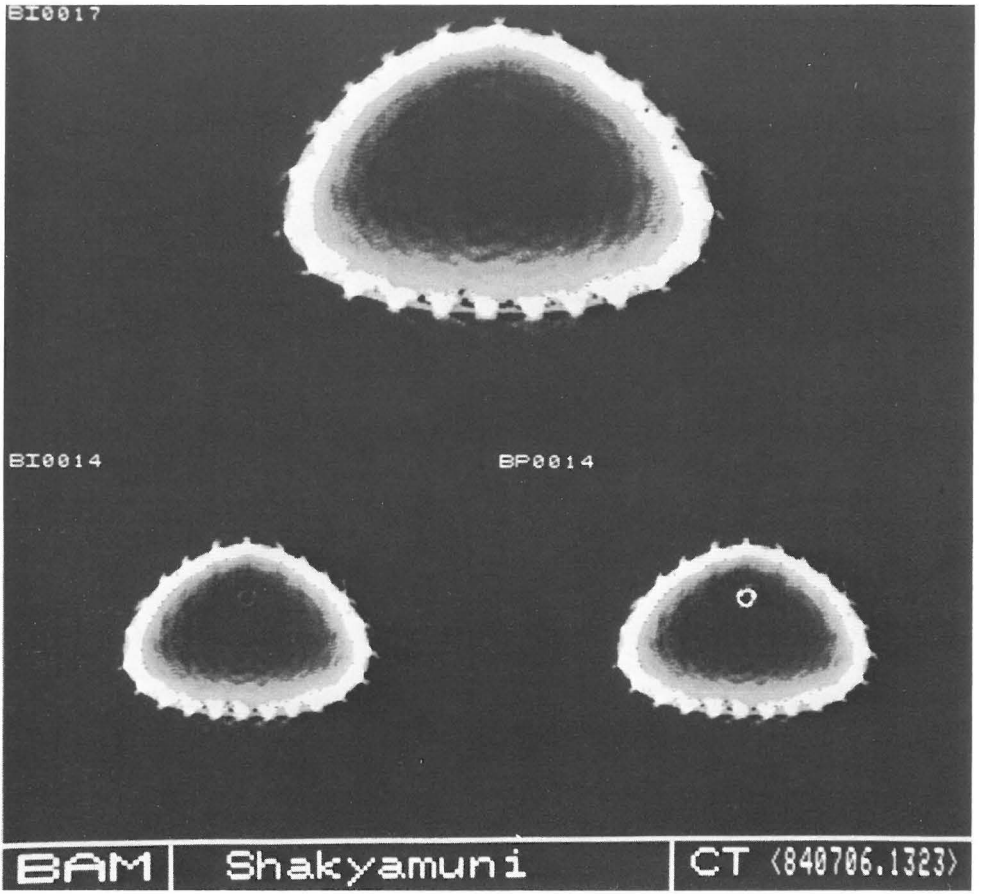


Bild 17 a Tomogramm des Sockels der Statue Bild 16, aufgenommen mit Co-60-Strahlung

Bild 17 b Tomogramm derselben Ebene wie 17 a, aufgenommen mit Röntgenstrahlung (Up = 125 kV)