

# Der Linac, der Kopf von Kythera, und die Gießereitechnik

Bernhard ILLERHAUS\*, Jürgen GOEBBELS\*, Dietmar MEINEL\*, Yener ONEL\*  
\* BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

**Kurzfassung.** Seit 1984 hat die BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung wiederholt den "Knabekopf von Kythera" (Inv. Nr. Misc. 6324, Preußischer Kulturbesitz, Staatliche Museen zu Berlin, Antikensammlung) mit den jeweils verfügbaren Mitteln der Röntgencomputertomographie untersucht. Der kleine Bronzekopf gehörte wohl zu einer Staupe, die ca. ein Meter hoch war und von der man annimmt, das sie aus Kythera stammt. Der Kopf, datiert auf das dritte Jahrhundert vor Christus [1], wurde 1873 in Athen gekauft, dann in 1975 gestohlen, wurde schließlich in 1982 wiedergefunden. Erste Untersuchungen wurden an der BAM 1984 mit  $^{60}\text{Co}$ , inklusive einer 3D Messung, durchgeführt [2]. Mittlerweile wurden 2004 und 2012 Untersuchungen mit dem 12MeV Linearbeschleuniger der BAM durchgeführt. Im Beitrag werden die unterschiedlichen Ergebnisse gezeigt, die Qualität der verschiedenen CTn in Bezug auf Dichte- und Ortsauflösung verglichen, jeweils mit unterschiedlichem Detektor und Aufnahmebedingungen. In den letzten CTn sind bisher nicht geklärte Phänomene der Gußtechnik sichtbar. Hier fordern die Autoren zu weiteren Diskussionen, weiteren Erklärungen aus dem Bereich der Gießereitechnik auf.

## Einführung

Aus archäologischer Sicht ist der Kopf von Kythera ein interessantes Objekt, da er als einer der wenigen größeren Bronzenstatuen(teile), der Kopfdurchmesser beträgt ca. 10cm, noch den fast vollständigen Gußkern enthält. Der Kopf gehört zu einer nicht gefundenen oder nicht identifizierten Statue, von der er gewaltsam getrennt wurde. Aus Sicht der Computertomographie ist der Kopf ebenfalls wegen seines Gußkerns interessant, da dadurch hohe Anforderungen an den Tomographen bezüglich der Dichteauflösung gestellt werden: gefordert ist die Untersuchung eines gering schwächenden Materials in einer strukturierten, relativ dickwandigen (hoch schwächenden) Form, wobei innerhalb des Kerns zwei verschiedene Dichten zu unterscheiden sind. Dieser Arbeitsauftrag hat uns über Jahrzehnte begleitet. Eine Bewertung der neueren Ergebnisse aus archäologischer Sicht wird getrennt veröffentlicht [3].



## 1. CT-Messungen

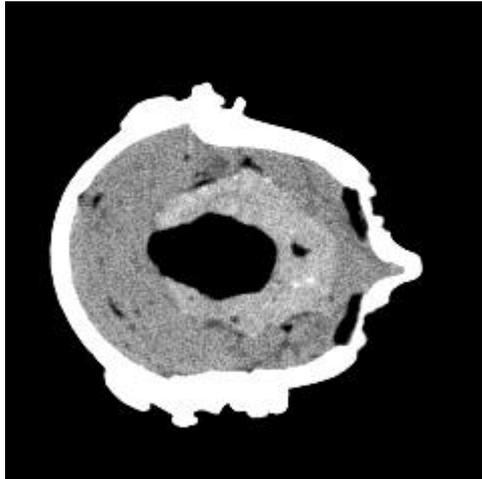


Abb. 1 2D CT des Kopf von Kythera 1983

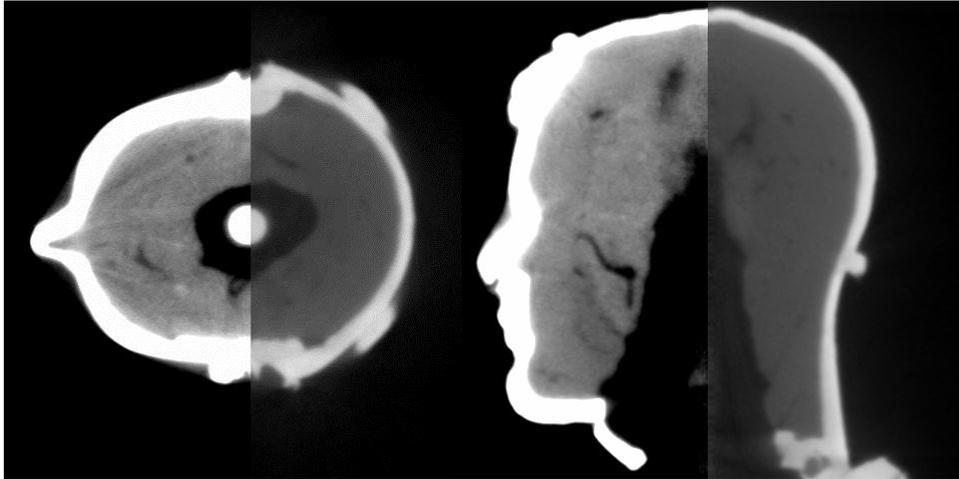


Abb. 2 Zwei Schnitte aus dem 3D Datensatz 1983

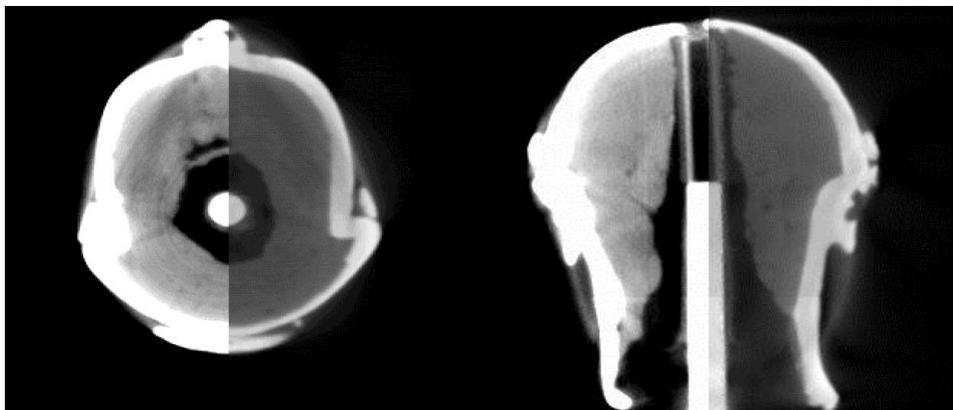
Fast zeitgleich mit dem Beginn der CT-Messungen an der BAM wurde der Knabenkopf von Kythera von der Antikensammlung, Preußischer Kulturbesitz, Staatliche Museen zu Berlin, angekauft (Inv. Nr. Misc. 6324). Erste CT-Untersuchungen wurden im Jahr 1983 durchgeführt. Der Tomograph der BAM arbeitet(e) nach dem Prinzip der Translation-Rotation mit einer  $^{60}\text{Co}$  Quelle und war mit kollimierten, photonenzählenden Einzeldetektoren ausgerüstet [4]. Es konnten 2D Tomogramme mit einer maximalen Größe von  $256^2$  berechnet werden. Abbildung 1 zeigt eine Spreizung der gemessenen Schwächungswerte so, daß die Dichteverteilung des inneren Kerns sichtbar wird, (Da der Kopf nach unten offen ist, war bekannt, daß ein Kern vorhanden ist.) die Bronzewerte sind



Abb. 3 Der Kopf von Kythera auf dem BAM Tomograph (2004) mit Heimann Detektor und Raytech 12MeV Linearbeschleuniger, rechts.



**Abb.4** Der Kopf von Kythera, BAM Tomographie (2004) mit 12MeV Linac, zwei senkrechte Schnitte, Grauwertdarstellung jeweils links gespreizt dargestellt.



**Abb. 5** Der Kopf von Kythera BAM Tomographie (2004) mit  $^{60}\text{Co}$  als Strahlenquelle, zwei senkrechte Schnitte, Grauwertdarstellung jeweils links gespreizt dargestellt.

entsprechend vollständig weiß. Auf den ersten Blick ist sichtbar, daß im Kern zwei unterschiedlich dichte Materialien vorhanden sind. Durch die Verwendung von  $^{60}\text{Co}$  als Strahler sind keine Aufhärtungsartefakte festzustellen. Der "Brennfleck" hat ungefähr einen Durchmesser von 5mm, die Ortsauflösung wird aber durch die Einzelkollimatoren auf 0,8mm in der Breite und 5mm in der Höhe bestimmt. Mit einigen TBq war die Quelle hoch aktiviert, die Dichteauflösung hing nur von der Meßzeit ab. Es ergab sich die Frage: wodurch und warum entstand der Dichteunterschied im Kern? Deswegen wurde versucht, den Kopf mit 2D Schichten dicht zu vermessen. Den damaligen Verhältnissen der Computertechnik entsprechend und um den Zeitaufwand in realistischen Grenzen zu halten wurden 51 Schnitte mit einer Bildgröße von 51 x 51 Pixeln gemessen. Trotzdem blieb die Bedeutung der Dichteunterschiede im Kern verborgen, eine virtuelle 3D Darstellung war aus technischen Gründen nicht möglich.

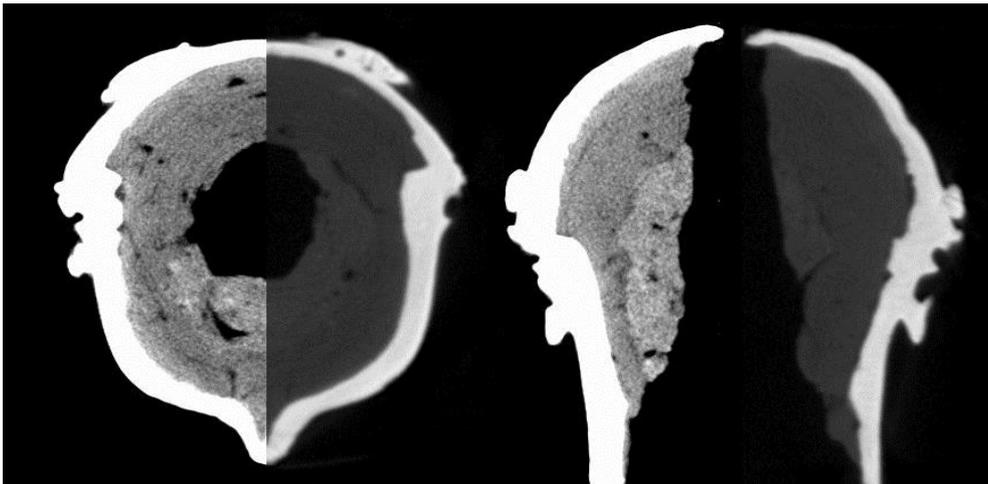
Ab 1990 stand in der BAM ein CT-System mit Linearbeschleuniger zur Verfügung [5]. Bei einem Öffnungswinkel von ca. zehn Grad können neun Einzeldetektoren betrieben werden, ohne daß es zu einer Beeinflussung der Kanäle aufgrund ungenügender Kollimation kommt. Bei einer Meßzeit von einer Stunde pro Schnitt ist hier in einem Faß von 1m Durchmesser die Unterscheidung zwischen Wasser, Benzin und Öl (in kleinen Flaschen) möglich. Zudem war die Kollimatorbreite zwischen 1,2 und 0,2mm einstellbar [5a]. Leider liegen hier keine Vergleichsmessungen für den Kopf von Kythera vor.

In 2003 wurde ein Heimann Flachdetektor mit  $256^2$  Pixeln, 0,8mm Elementgröße in Betrieb genommen. Nach zwanzig Jahren Ruhezeit wurde das Projekt „Kytherakopf“ 2004 wieder in Angriff genommen. Die Idee war, daß es durch den Einsatz des 12MeV Linacs

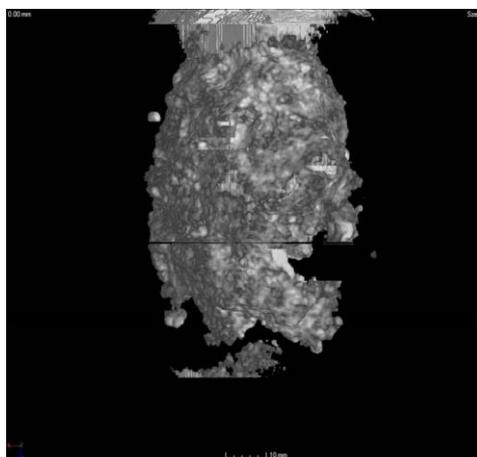
möglich sein würde, sowohl eine gute Dichte als auch eine gute Ortsauflösung zu erreichen. Es wurde eine Bildmatrix von 511 x 511 x 481 Voxel gemessen, bei 1440 Winkeln verteilt auf 360 Grad. Die Meßzeit betrug ca. 40min. Als Vorfilter wurden 90mm Eisen verwendet. Bei einer Detektorpixelgröße von 0,8mm ergibt sich eine Pixelgröße von 0,65mm am Objektort. Um eine höhere Ortsauflösung zu erreichen, wurde der Objektstisch um einen halben Pixel versetzt und eine zweite Messung durchgeführt. Diese wurde dann vor der Rekonstruktion mit der ersten verschachtelt. Rechnerisch ergibt sich so eine Pixelgröße von 0,325mm. Um den gesamten Kopf messen zu können, wurde ein zweites Dateipaar mit einem Höhenversatz von 48,975mm gemessen.

Das Ergebnis war ernüchternd: Die Konturen waren sehr flau und die Dichteauflösung schlechter als bei den ursprünglichen Aufnahmen (Abb. 4). Deswegen wurde eine Vergleichsaufnahme mit  $^{60}\text{Co}$  durchgeführt (Bildgröße: 311 x 311 x 363, 720 Winkel, 19,2h Meßzeit, 0,5mm Pixelgröße, Vorfilter 0mm Fe, Abb. 5). Bei einer 1:1 Darstellung erscheint die Tomographie mit den etwas größeren Pixel etwas schärfer, da das Bild kleiner ist, die Ortsauflösung ist aber vergleichbar. Aber auch hier reicht die Dichteauflösung nicht. Die Nachweiswahrscheinlichkeit der Szintillatorfolie im Detektor ist wesentlich geringer, als bei den Einzeldetektoren. Das Projekt wurde an dieser Stelle abgebrochen.

In 2012 erhielten wir einen Prüfauftrag zur Tomographie an Gasflaschen, wobei es nicht um den Stahlmantel, sondern um das darin befindliche gering schwächende Material

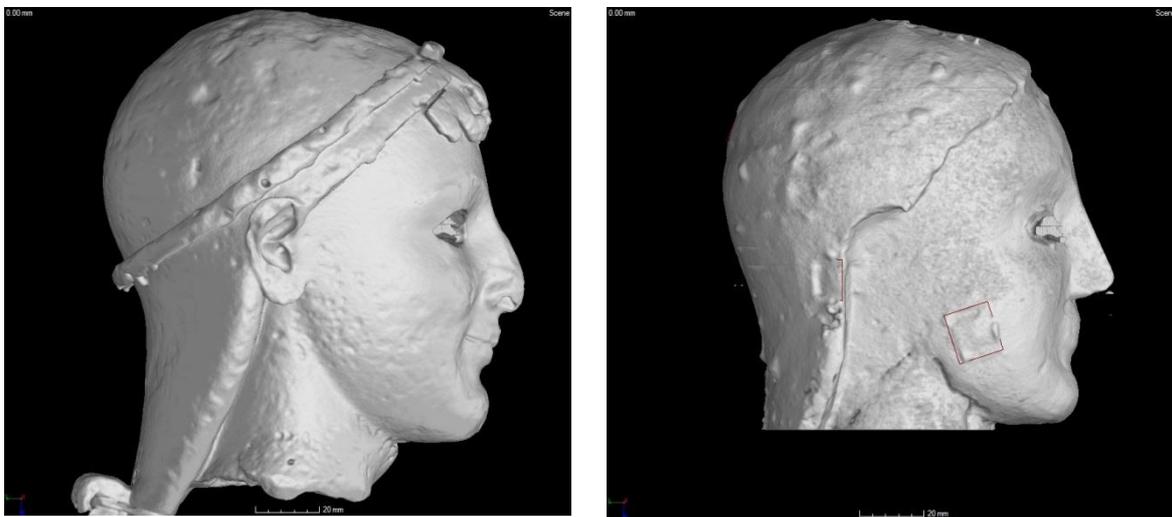


**Abb. 6** Der Kopf von Kythera, BAM Tomographie (2012) mit dem 12MeV Linac als Strahlenquelle, zwei senkrechte Schnitte, Grauwertdarstellung jeweils links gespreizt dargestellt.



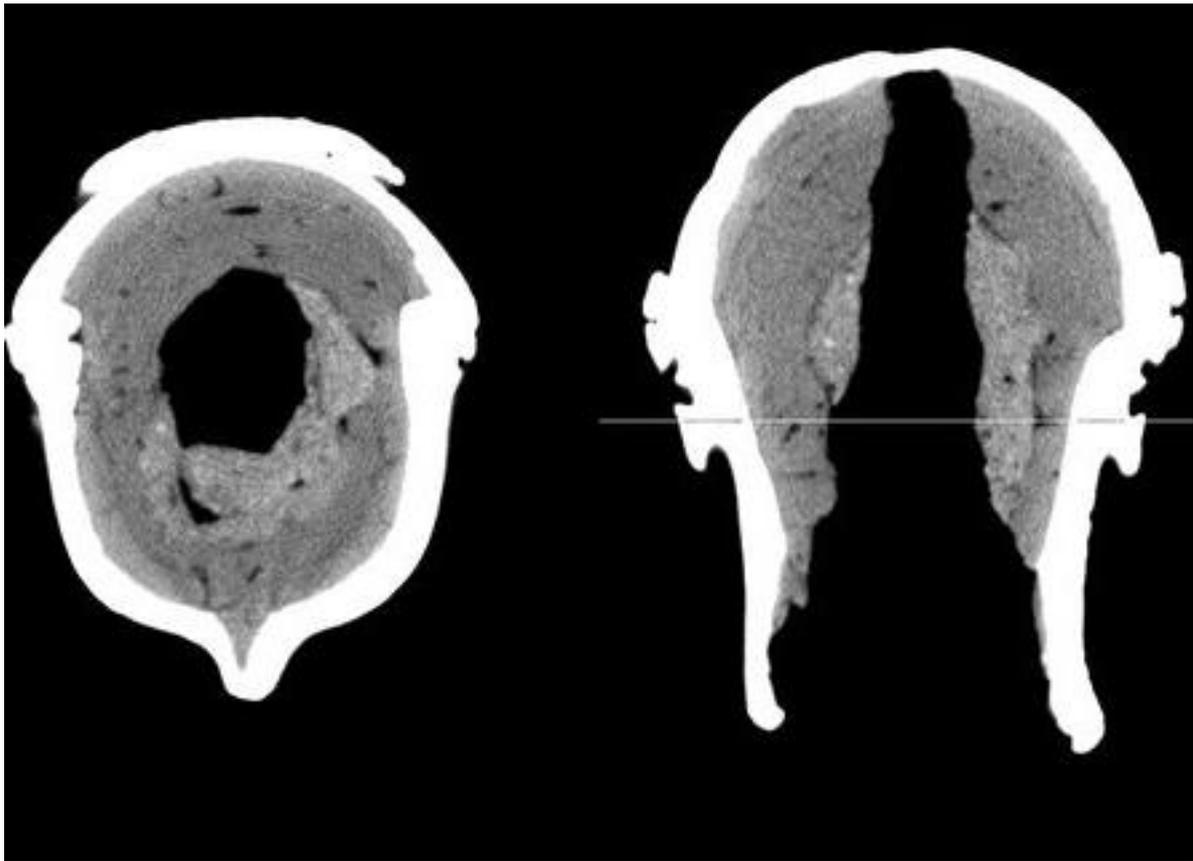
**Abb. 7** Der innerste Kern des Kopfes von Kythera, BAM Tomographie (2012).

ging. Konventionelle Radiographien konnten keinen Inhalt in den Flaschen nachweisen. Glücklicherweise ergab schon die erste Tomographie ein überraschendes Ergebnis. Wir hatten den Vorfilter auf 10mm verringert und benutzten somit im Wesentlichen nur den weichen Anteil der Linacstrahlung, so daß auch die Detektoreffizienz besser war, der Linac wird also als intensive Röntgenröhre benutzt. Als Detektor wurde ein PerkinElmer XRD1622 eingesetzt. Dieselben Einstellungen wurden dann für eine neue Messung des Kopfes von Kythera benutzt (Bildgröße 601 x 601 x 817, 1200 Winkel, 12MeV, 9Gy, 40min Meßzeit, 0,29mm Pixelgröße). (Abb. 6). Leider zeigte sich, daß die jetzt erreichte Dichteauflösung immer noch nicht ausreicht, um die seit 30 Jahren geplante Darstellung des innersten Kerns automatisch zu erreichen. Im Vergleich erscheint der Einzelschnitt von 1984 noch besser. Um die Frage des Aussehens des innersten Kerns doch noch zu beantworten, wurden per Hand einige äußere Bereiche des Kerns virtuell entfernt, so daß der Bereich der höheren Dichte nun erkennbar wird: es ergibt sich eine unstrukturierte, in der Höhe längliche, runde Form (Abb. 7).

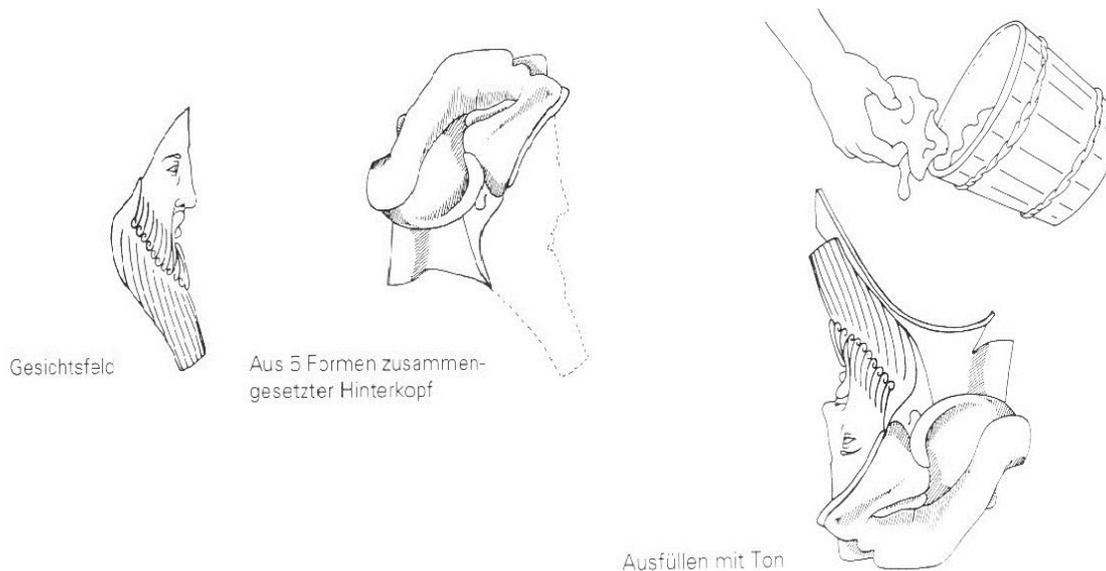


**Abb. 8** Innenseite, links, und Außenseite, rechts. Das Ohr ist im Kern nicht vorhanden. Auf der Innenseite sind quadratische Flicker und Kernhalter sichtbar.

Aus dem Projekt "Das Wrack, Der Antike Schiffsfund von Mahdia" [6] ist bekannt, das die innere Oberfläche eines antiken Gusses wesentliche Informationen über die Herstellung enthalten kann: Kernhalter, Flicker und Wachsteile sind hier deutlicher zu erkennen, auch ein Geometrievergleich mit ähnlichen Bronzen ist hier einfacher möglich, da keine Bearbeitungen der Originalform vorliegt. Ein dabei entdecktes Phänomen sind mehrere gleichgroße, fast quadratische "Flicker", die offensichtlich, daß ergibt die Untersuchung der Tomogramme der Bronzewand, schon im Wachsmoell eingebracht worden sein müssen. Sie sind gekennzeichnet durch drei begrenzende Schnitte die nach innen gehen und eine Wölbung nach außen. Am hinteren Kopfteil gibt es zudem einen solchen "Flicker", der aber halbiert erscheint (Abb. 8). Dasselbe, seltene Phänomen ist von J. Maish in [7] für den "Victories Athlete" des J.Paul Getty Museums beschrieben worden und wird dort als Lüftungsöffnungen zum Trocknen des Kerntones bezeichnet. Bei der weiteren Betrachtung des Kernes im Kopf von Kythera fällt insbesondere im senkrechten Schnitt auf, das es eine Struktur aus geschichteten, der Oberfläche der Bronze folgenden (umfangsparallelen), Anzeigen geringer Dichte, Blasen und Risse gibt. Diese Beobachtung war in den voran gegangenen Untersuchungen nicht möglich und bestätigt die von F. Willer [8] gegebene Darstellung des antiken Gußvorganges: der Kern wurde gegossen und nicht modelliert. Daher ist zu schließen, daß auch der Kopf von Kythera in indirekter Gußtechnik hergestellt wurde: "Mit Hilfe einer Abformung (Negativform) von einer Vorlage (Modell)



**Abb. 9** Der Kopf von Kythera, BAM Tomographie (2012). Im Tonkern sind umfangsparallele Strukturen, insbesondere im senkrechten Schnitt, rechts, sichtbar.



**Abb. 10** Darstellungen aus: Frank Willer, Zur Herstellungstechnik der Herme [8]

hatte man Wachpositive erzeugt. Je komplexer die Form, desto mehrteiliger musste die Negativform sein. Bei dem Kopf von Kythera, hat man wohl erst eine Tonschicht eingebracht, die dann trocknen konnte, bevor man dann die zweite inneren zur Stabilisierung eingebracht hat (Abb. 10). Die rechtwinkligen Öffnungen im Wachmodell zum Trocknen des Tonkerns kennt man noch heute, diese bezeichnet der Bronzegießer als Kernlager. Manche schließen diese nach dem Trocknen vor dem Guss, es gibt aber auch

Beispiele bei denen diese erst nach dem Guss geschlossen wurden. Der Vorteil diese nach dem Guss mit Flickplättchen zu schließen besteht in einer besseren Entgasung des inneren Tonkernes während des Gusses über die Kernlager" [9].

## 2. Ergebnisse

Die Kombination aus Flächendetektor und Linac ergibt gute Ergebnisse bei geringem Vorfilter. Für ein Spektrum mit überwiegend hohen Energien hingegen, hat der Flachdetektor nur eine geringe Nachweiswahrscheinlichkeit, das Rauschen z. B. Durch Paarbildung nimmt über-proportional zu. Messungen mit  $^{60}\text{Co}$  als Strahlenquelle bei kollimiertem Detektor sind weiterhin eine bedenkenswerte Alternative. Die zeitliche Einordnung des direkten und des indirekten Gußverfahrens in der Archäologie und deren Zuschreibung zu bestimmten Objekten muß geändert werden.

## Referenzen

- [1] Carol C. Mattusch, Greek Bronze Statuary, Cornell University Press 1988, ISBN 0-8014-2148-9, pp. 70.
- [2] J. Goebbels, H. Heidt, A. Ketschau, P. Reimers Fortgeschrittene Durchstrahlungstechniken zur Dokumentation antiker Bronzen in " Archäologische Bronzen, Antike Kunst, Moderne Technik" Staatliche Museen Preussischer Kulturbesitz Museum für Vor- und Frühgeschichte, Hrsg. H. Born Berlin, 1985, S. 126-131.
- [3] Wolf-Dieter Heilmeyer, 11./12. April in Bonn, Kolloquium zu Limesbronzen, "antike Praxis und moderne Technik".
- [4] P. Reimers, H. Heidt, J. Stade and H.-J. Weise. "Beispiele für Anwendung der Computer-Tomographie (CAT) in der zerstörungsfreien Materialprüfung", Materialprüfung, Vol. 22. 1980, pp. 214-217.
- [5] B. Illerhaus, J. Goebbels, P. Reimers, V. Simsek Einsatz eines Linearbeschleunigers für die Computertomographie stark schwächender Objekte Berichtsband DGZfP-Jahrestagung, Trier, 21.-23.5.1990, S. 108-114.
- [5a] M. R. Sené, M. Bailey, D. J. S. Findlay, B. Illerhaus, O. Haase, "High energy accelerator tomography" European commission, nuclear science and technology, contract No FI2W-CT91-0107, Final report, EUR17101 EN, (1996).
- [6] J. Goebbels, B. Illerhaus, D. Meinel Computertomographie an "Agon" und "Herme" in "Das Wrack: Der antike Schiffsfund von Mahdia" Hrsg. G. Hellenkemper Salies, Kataloge des Rheinischen Landesmuseums Bonn, Band 2 (1994) S. 985-990.
- [7] J. Maish, B. Illerhaus, W.D. Heilmeyer, J. Goebbels Computed Tomographic Investigation of the Victorious Athlete with further observations on the square patching and other features ART 2002, 7th Int. Conf. On Non-destructive Testing and Microanalysis for the Diagnostics and Conservation of the Cultural Environmental Heritage, 2-6 June 2002 Antwerpen, Belgium Projekt-Nr.: 0103-I-0017.
- [8] Frank Willer, "Zur Herstellung der Herme" in "Das Wrack: Der antike Schiffsfund von Mahdia" Hrsg. G. Hellenkemper Salies, Kataloge des Rheinischen Landesmuseums Bonn, Band 2 (1994) S. 959-970.
- [9] priv. Mitteilung, Frank Willer, Restaurator am Rheinischen Landesmuseum Bonn, 2013.