

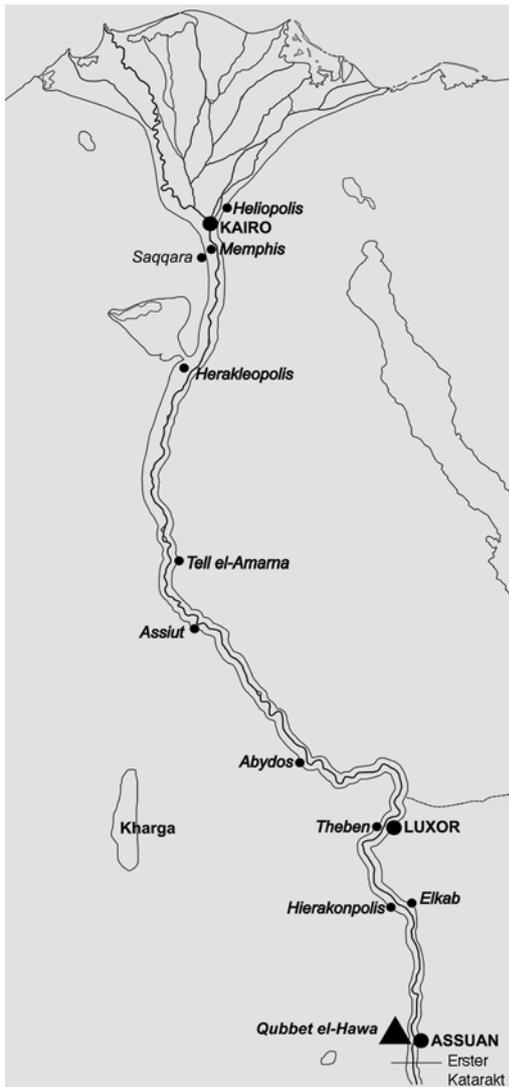
## WERKSTATTFUNDE EINES ÄGYPTISCHEN BRONZEGIESSERS DER SPÄTZEIT – EIN EINZIGARTIGES KONVOLUT IM KONTEXT AKTUELLER FORSCHUNG

Im Ägyptischen Museum der Universität Bonn werden weltweit einmalige Objekte aufbewahrt, die mit dem Guss von ägyptischen Götterfiguren im Wachs-ausschmelzverfahren in Verbindung stehen. Diese zu einer ägyptischen Gusswerkstatt der Spätzeit gehörenden Funde bieten die Gelegenheit, neben der Erforschung ihrer archäologischen Kontexte auch detaillierte Einblicke in den antiken Bronzeguss und dessen Technologie im Kontext des altägyptischen Gießereihandwerks zu erlangen. Ein von Martin Fitzenreiter, Kurator des Ägyptischen Museums der Universität Bonn, initiiertes und interdisziplinär ausgerichtetes Forschungsprojekt widmet sich aktuell diesen Artefakten. Das Projekt wird in enger Kooperation mit Michael Schmauder und Frank Willer vom LVR-LandesMuseum Bonn durchgeführt, deren langjährige Erfahrung bei der Erforschung antiker Herstellungstechniken hier einfließen konnte. An der

Abteilung für Ägyptologie der Universität Bonn ist Johannes Auenmüller am Projekt tätig. Das von der Fritz-Thyssen-Stiftung finanzierte Projekt hat sich das Ziel gesetzt, die Objekte mit der heute möglichen Präzision unter Zuhilfenahme modernster naturwissenschaftlicher, analytischer sowie bildgebender Verfahren so umfassend wie möglich zu untersuchen. Dabei stehen sowohl die antike Bronzegusstechnologie, als auch ihr sozialer und kognitiver Hintergrund im Mittelpunkt. Die aus einem Grab der Felsgräbernekropole der Qubbet el-Hawa stammenden Objekte werden in die ägyptische Spätzeit (664-332 v. Chr.) datiert. Es handelt sich um Negativformen, Wachsmodele und Gussformen für bronzene Götterfiguren, die weltweit einmalig sind. Besonders letztere hätten nach dem erfolgreichen Guss im sogenannten indirekten Wachs-ausschmelzverfahren in verlorener Form eigentlich zerstört wer-



**Abb. 1** Die Felsgräbernekropole der Qubbet el-Hawa von Süden. – (Foto J. Auenmüller).



**Abb. 2** Karte Ägyptens mit Lage der Qubbet el-Hawa gegenüber von Assuan. – (Karte J. Auenmüller).

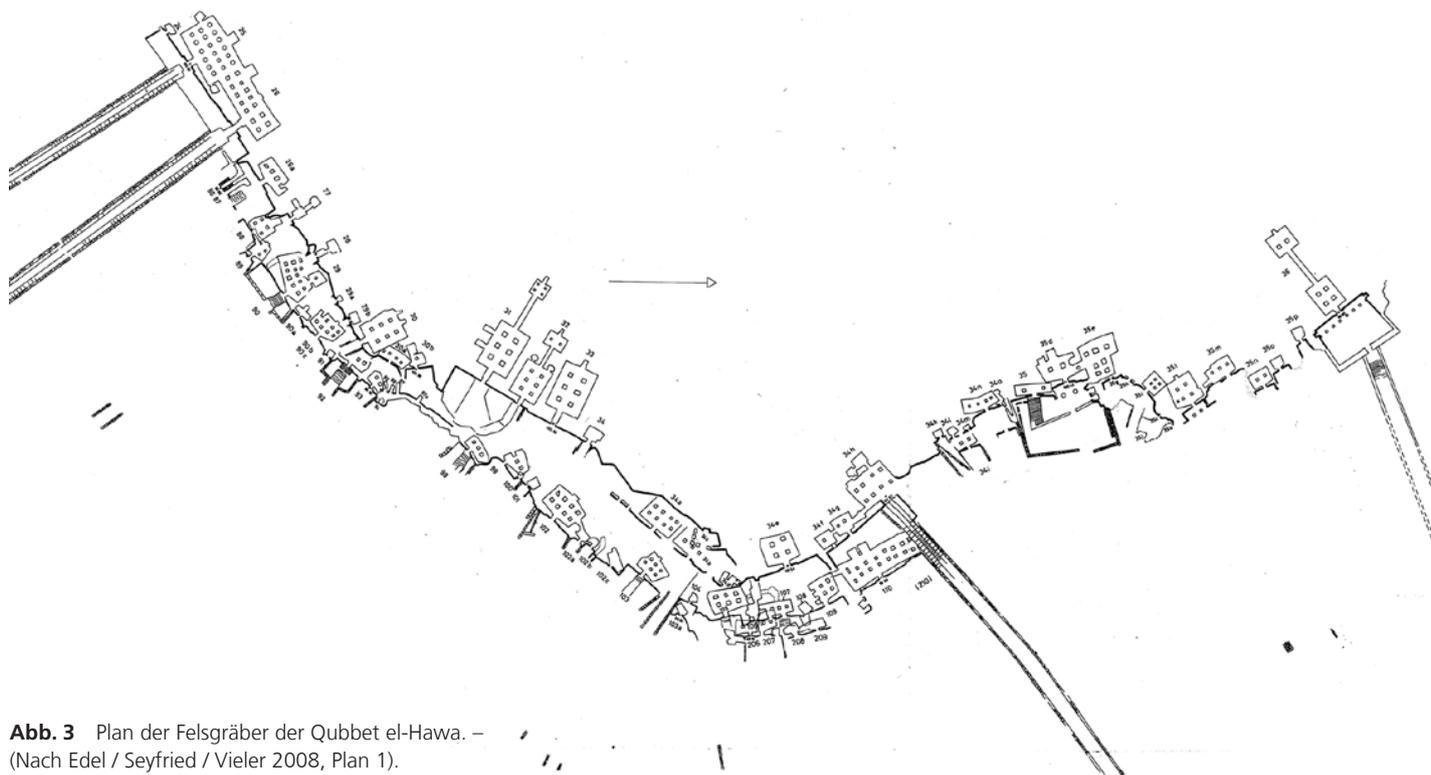
den müssen, um die in ihrem Inneren befindlichen bronzenen Götterfiguren freizulegen. Diese Objekte bieten daher die seltene Gelegenheit, der Technologie und dem Aufbau der Gussformen im Detail auf die Spur zu kommen.

### Der archäologische Kontext der Gussformen

1969 wurde auf der Felsgräbernekropole der Qubbet el-Hawa das Grab QH 207 geöffnet. Es war be-

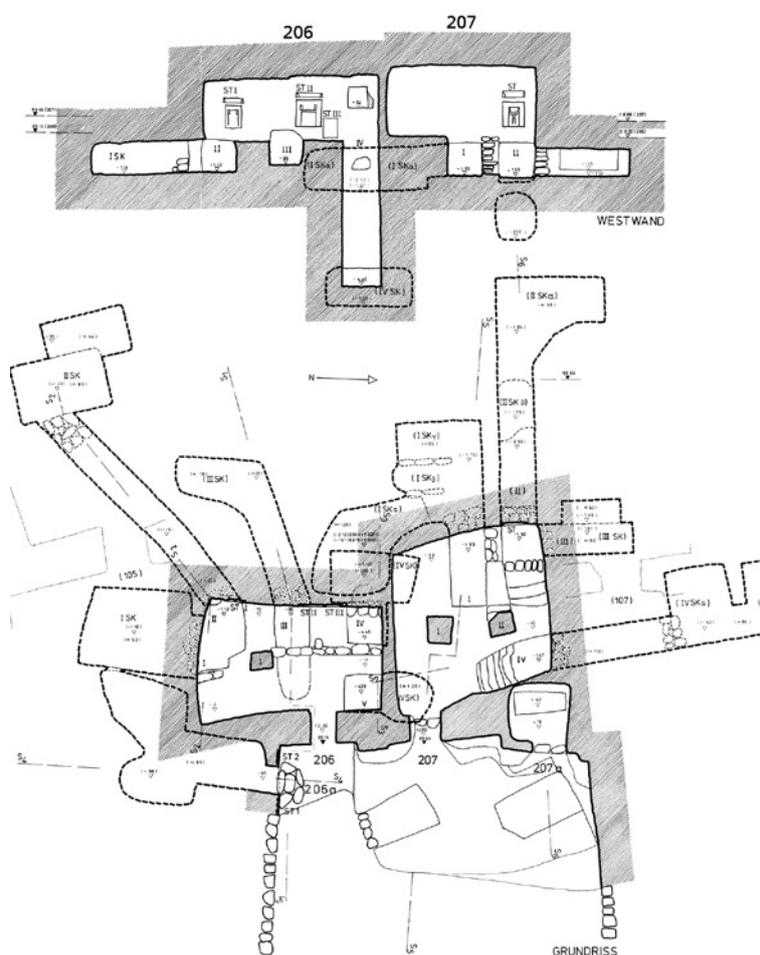
reits 1963 von Bonner Ägyptologen unter Leitung von Elmar Edel entdeckt worden, der zwischen 1958 und 1984 in über 20 Feldkampagnen die archäologischen Ausgrabungen dort leitete (Edel/Seyfried/Vieler 2008, XX-XXIII). Die Qubbet el-Hawa (arabisch für »Hügel der Winde«) ist ein sich gegenüber der modernen Stadt Assuan am westlichen Nilufer erhebender Felsenberg (Abb. 1, 2-3), der seit dem Ende des Alten Reiches (ca. 2347-2216 v. Chr.) bis über die griechisch-römische Zeit (332 v. Chr.-395 n. Chr.) hinaus als Nekropole genutzt wurde (Morenz/Höveler-Müller/El Hawary 2011). In den früheren Zeiten haben sich dort vor allem lokale Eliten des pharaonischen Staates monumentale funeräre Anlagen aus dem Fels hauen lassen, später wurde der Platz auch von größeren Bevölkerungsteilen als Friedhof genutzt (Rösing 1990).

Das Grab QH 207 wurde der Architektur, den Inschriften und den Bildern im Grab zufolge am Ende des Alten Reiches für einen »Höfling« namens Sobek-hotep errichtet (Abb. 4; Edel/Seyfried/Vieler 2008, 1861-1867; 1976-1979). In der Spätzeit haben es Mitglieder einer Priesterfamilie von der nahen Nilinsel Elephantine als Bestattungsplatz wiedergenutzt (Abb. 5; Edel 1973, 4). Die ungefähr quadratische Zwei-Pfeiler-Kammer, die im späten Alten Reich den eigentlichen Raum des Totenkults für die genannte Personen darstellte, ist dazu mit vier Trockensteinmauern in einzelne Bereiche eingeteilt worden. Aus einem ehemaligen Kultraum wird damit eine Bestattungskammer. In diese vier Abschnitte wurden die Toten mit ihrer Ausstattung nacheinander auf der eingewehten Sandschicht eingebracht (Edel 1973, 4; Edel/Seyfried/Vieler 2008, 1876-1912). Insgesamt konnten dort zwölf Begräbnisse der Spätzeit von sechs Männern und sechs Frauen dokumentiert werden, die meist in bemalten und beschrifteten anthropoiden Särgen bestattet waren. Nur der Holzsarg einer Priesterin war, da er in einem anthropoiden Sarkophag aus Sandstein lag, nahezu intakt. Die übrigen Säрге waren mehr oder weniger fragmentiert. Die Ausstattung der Toten entspricht dem bekannten Muster der Spätzeit, besonders dem des Übergangs von der Saiten- zur Ersten Perserzeit (26.-27. Dynastie; 550-400 v. Chr.) (Budka 2010).

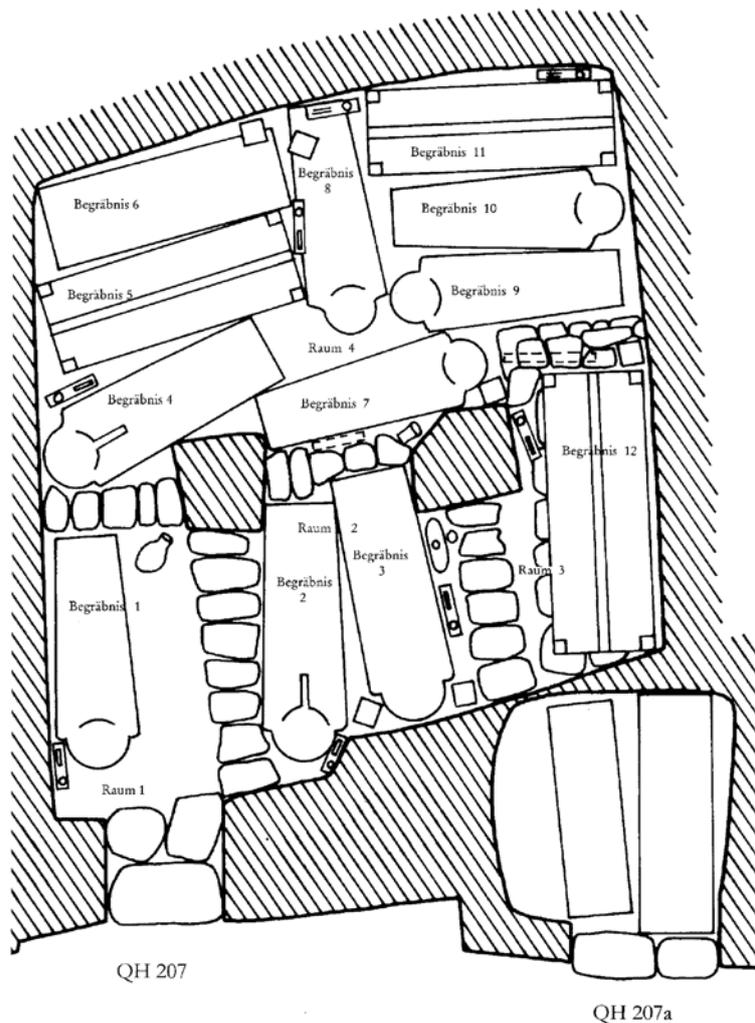


**Abb. 3** Plan der Felsgräber der Qubbet el-Hawa. – (Nach Edel / Seyfried / Vieler 2008, Plan 1).

Die vorhandene Beigabenkeramik unterstützt diesen chronologischen Ansatz. Besonders so signifikante Formen wie ein *keg* (Edel/Seyfried/Vieler 2008, 1887 Abb. 44) und eine tonnenförmige Flasche mit zylindrischem Hals, die außen mit einem roten Überzug versehen ist und am Hals zwei umlaufende Wülste aufweist (Edel/Seyfried/Vieler 2008, 1878 Abb. 29), sind aus anderen Kontexten bekannt (Aston 1999, 240f. Taf. 75, Nr. 2089-2090; Aston 2011, bes. 75. 77 Abb. 1, 4; 3, 12). Diese Flasche ist als typische Form der Zeit um 500 v. Chr. (spätes 6.-frühes 5. Jahrhundert) nicht nur für die Chronologie, sondern auch für die Provenienz der Gussformen von Interesse. Wie in der Zeichnung der spätzeitlichen Belegung von QH 207 ersichtlich, stand sie am Fußende der jüngsten Bestattung (»Begräbnis 1«) vor der rückwärtigen Trockensteinmauer (Abb. 5). Nach Ausweis der archäologischen Dokumentation (Edel/Seyfried/Vieler 2008, 1869-1878) – und der Aussage des 1969 als Grabungs-



**Abb. 4** Plan des Grabes QH 207 (oben rechts) am Ende des Alten Reiches. – (Nach Edel / Seyfried / Vieler 2008, Plan 37.1).



**Abb. 5** Plan der spätezeitlichen Belegung von QH 207. Die Artefakte stammen aus dem Kontext von »Begräbnis 1«. – (Nach Edel/ Seyfried/Vieler 2008, 1868 Abb. 1).

techniker teilnehmenden Archäologen Jürgen Wentscher (Wentscher 2011, 130-134) – befanden sich mindestens drei Artefakte in der Flasche: eine Steatitstatuette der Isis mit Kind (BoS QH 207/14), einige beschriftete Holzfragmente einer Kiste oder Statuettenbasis (BoS QH 207/62) sowie (drei?) Fragmente einer Gussform, die das technologische Highlight des Artefaktensembles bildet (BoS QH 207/132; **Abb. 6-8**; Auenmüller 2014c, 250f. Kat. I.31; 255f. Kat. I.36; 244f. Kat. I.25). Im Zuge der Ausgrabung der »Bestattung 1« wurden weitere Gussformen sowie Objekte aus Holz und Fayence dokumentiert, deren genaue Fundlage jedoch nicht verzeichnet ist.

Sie dürfen aufgrund ihres technologischen oder ikonografischen Charakters zweifellos zu den Objekten und Materialien einer auf den Guss von bronzenen Götterfiguren spezialisierten Werkstatt gezählt werden (Fitzenreiter/Auenmüller 2014a).

Das Konvolut der Gusswerkstatt enthält Artefakte, die den gesamten Herstellungsprozess von kleinformatigen Götterbronzen im indirekten Wachsausschmelzverfahren abbilden (Auenmüller 2014c). Sie stellen verschiedene Stadien der Produktion, aber auch Fehlgüsse dar. Es beginnt mit zwei verschiedenartigen Modellen zur Wachsherstellung, die Negative in Form des ägyptischen Toten- und Regenerationsgottes Osiris aufweisen. Aufgrund der in Ägypten herrschenden guten Erhaltungsbedingungen, gerade für organische Materialien, finden wir die recht empfindlichen Wachsmodele dieses Gottes tatsächlich im Befund vor; ein Glücksfall aus konservatorischer und archäologischer Sicht. Daneben gibt es Gussformen, bei denen das Wachs der Modelle nicht komplett ausgeschmolzen wurde. Dies führte dann beim nachfolgenden Einguss heißer Bronze zu eklatanten Fehlgüssen. Schließlich liegen Gussformen vor, die bereits mit Bronze ausgegossen und/oder die zum Teil freigelegt sind, sowie vollkommen leere, d.h. nie zum Guss gelangte Gussformen. Besonders spektakulär ist die bereits oben genannte Gussform, die eindeutig den seriellen Guss belegt (BoS QH 207/132; **Abb. 9**). Hier hatte man 34 Figürchen des Gottes Osiris auf engstem Raum in einem sogenannten Gussbaum platziert. Dieser sehr komplizierte und ausgeklügelte Aufbau der Gussform ist durchaus mit modernster Gussformtechnik für serielle Güsse vergleichbar, wie sie in der Zahntechnik oder der Schmuckindustrie beim sogenannten Schleuderguss zum Einsatz kommt. Der Befund von der Qubbet el-Hawa wird von einer Anzahl hölzerner Objekte und Fayenceamulette (Quarzkeramik) komplettiert, die den Charakter des Fundguts als Materialien eines kunsthandwerklich arbeitenden Ateliers bestätigen.

Ist das beschriebene Konvolut in dieser Zusammensetzung aus konservatorischer und herstellungstechnischer Sicht einmalig, so darf auch der archäologische Kontext als einzigartig bezeichnet werden. Er



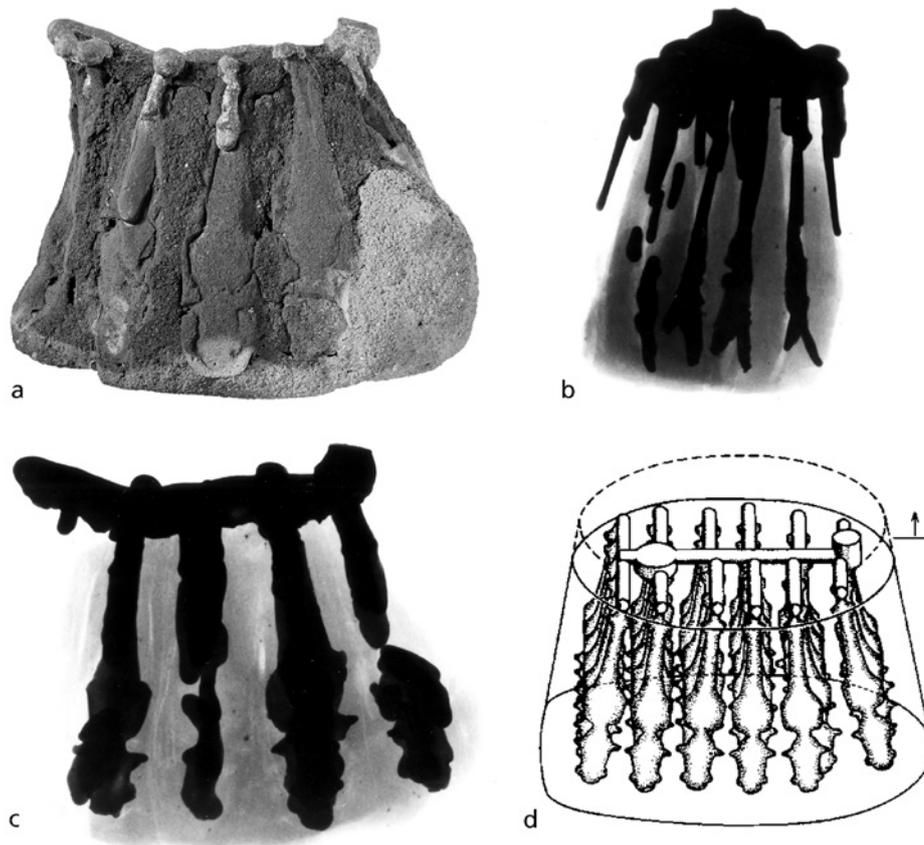
**Abb. 6** Statuette der Isis mit Kind; Steatit, Wachs; BoS QH 207/14. – (Foto J. Vogel, LVR-Landes-Museum Bonn).



**Abb. 7** Fragmente eines beschrifteten Kästchens; Holz; BoS QH 207/62. – (Foto J. Vogel, LVR-LandesMuseum Bonn).



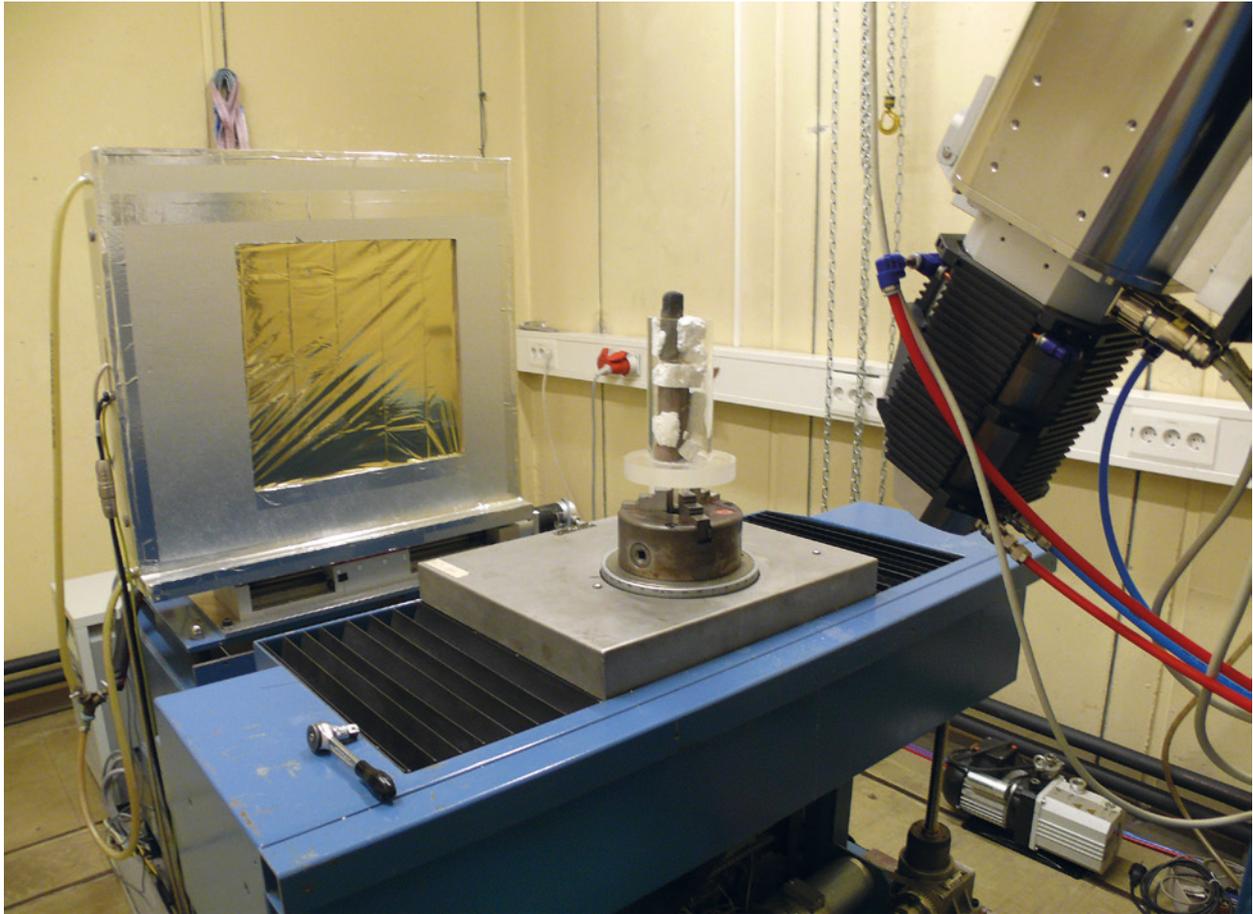
**Abb. 8** Fragmentierte Gussform für 34 Osiris-figürchen; Ton, Bronze; BoS QH 207/132. – (Foto J. Vogel, LVR-LandesMuseum Bonn).



**Abb. 9** Gussform BoS QH 207/132 Seitenansicht (a), Röntgenbild Schmalseite (b), Röntgenbild Breitseite (c) und schematische Rekonstruktionszeichnung (d). – (a Foto J. Vogel, LVR-LandesMuseum Bonn; b-c Röntgenaufnahmen J. Auenmüller; d Zeichnung nach Edel/Seyfried/Vieler 2008, Abb. 31i).

gibt den Ägyptologen bislang einige Rätsel auf (vgl. zur Diskussion Edel/Seyfried/Vieler 2008, 1869; Fitzenreiter/Auenmüller 2014a, 105f.; 2014b, 62-64): die Fundsituation auf einem Friedhof bzw. in einem Grab ist für solche Objekte bislang nicht belegt und auch die Objektgattungen entsprechen überhaupt nicht dem für Gräber jener Epochen bekannten Fundgut. Im pharaonischen Ägypten sind Objekte der Berufsausstattung im funerären Beigabeninventar allgemein recht selten, in der Spätzeit jedoch absolut unüblich. Daher kann das Konvolut nicht als berufsbegleitendes Inventar angesehen werden. Eine weitere Möglichkeit wäre, dass die Artefakte eine Bronzegusswerkstatt auf der Qubbet el-Hawa selbst repräsentieren. Dabei dürfte sicher eher an eine temporäre Installation zu denken sein. Allerdings sind bislang keine archäologischen Hinweise wie Holzkohle, Schmelzreste oder typische Objekte wie Gusstiegel und Luftdüsen (*tuyères*) gefunden worden, die eine solche Idee unterstützen.

Daher bleibt schließlich noch ein drittes Szenario zu bedenken. Nekropolen galten, wie die besonders in der Spät- und Ptolemäerzeit genutzten und von Kultgemeinschaften frequentierten Tierfriedhöfe, als liminale, d.h. dem sakralen Jenseits nahe Bereiche (Fitzenreiter 2013). In einem solchen gedanklichen Rahmen könnten die Gussformen und die weiteren Artefakte als gesicherte Deponierung von sakral aufgeladenen Objekten an einem als Grab genutzten liminalen Ort zu verstehen sein. Da es sich jedoch meist um Fehlgüsse und halbfertige Produkte handelt, scheinen mit den Artefakten wohl weniger religiöse Heilserwartungen verbunden gewesen zu sein. Daher dürfte die Idee einer Deponierung von durch ihre Form (Götterfiguren) und ihr Material sakralisierten Abfällen das Phänomen bislang am besten erklären. Vergleichbare Depots sind aus Tempeln und Tiernekropolen bekannt, diese enthalten aber nach bisherigem Kenntnisstand keine Zwischenprodukte und Werkstattabfälle.



**Abb. 10** Mikro-CT mit Flachdetektor (links), Röntgenröhre (rechts) und Drehtisch mit Gussform (Mitte). – (Foto D. Meinel).

## Gussformen und bildgebende Verfahren

### Prinzip der computertomographischen Untersuchung

Wie die klassische Radiographie nutzt die Röntgen-Computertomographie (CT) die Eigenschaft von Materie, Röntgenstrahlung abhängig von Ordnungszahl und Weglänge zu schwächen. Zur Durchführung einer CT wird das Untersuchungsobjekt auf einem Drehteller zwischen Röntgenröhre und Detektor fixiert (**Abb. 10**). Während sich das Objekt um 360° im Kegel der emittierten Röntgenstrahlen dreht, nimmt ein hinter dem Objekt positionierter Flachdetektor eine Vielzahl von Durchstrahlungsbildern auf. Aus diesen digitalen Radiographien wird computergestützt ein dreidimensionaler Bild Datensatz errechnet, der die radiographische Dichte

des Objekts für jeden Punkt im Raum (Voxel) als Grauwert wiedergibt. Auf diese Weise lassen sich unterschiedliche Materialien durch verschiedene Grauwerte oder zugewiesene Farben darstellen. Volumina, Oberflächen und Distanzen können dank der geometriegenauen Abbildung dann auch direkt im virtuellen Objekt vermessen werden. Somit ist es möglich, auch komplexe Strukturen und Dichteverteilungen dreidimensional zu analysieren, ohne das Untersuchungsobjekt einer Gefahr auszusetzen.

### CT in der BAM

Seit den 1980er Jahren wird an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Berlin (BAM) die Computertomographie als zerstörungsfreie Un-

tersuchungsmethode entwickelt und angewandt. Bereits mit dem ersten in der BAM projektierten Universal-Computertomographen wurden von Beginn an auch Untersuchungen von Kunst- und Kulturobjekten durchgeführt. Diese CT-Anlage ermöglicht durch den Einsatz von Strahlenquellen hoher Energie (Linearbeschleuniger, Kobalt 60) auch die Messung von Objekten, die aufgrund ihres Materials die Röntgenstrahlen stark schwächen. Als Beispiele für die erfolgreiche Anwendung dieser Technologie sind die Untersuchungen an zahlreichen römischen Bronzestatuen im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojektes »Römische Großbronzen am UNESCO-Welterbe Limes« zu nennen (Meinel/Willer 2014). Die räumliche Auflösung der CT-Aufnahmen wird generell durch die Objektgröße und den damit einhergehenden Abbildungsmaßstab bestimmt. Des Weiteren limitieren auch die Brennfleckgröße der Strahlenquelle und die Abmessungen des Detektors die erreichbare Auflösung. Da bei der Universal-CT die räumliche Auflösung auf ca. 0,3 mm Voxelgröße begrenzt ist, werden kleinere Objekte wie die Gussformen mit Mikro-Computertomographen ( $\mu$ CT) untersucht. In der BAM stehen dafür mehrere Geräte mit unterschiedlichen Einsatzschwerpunkten zur Verfügung.

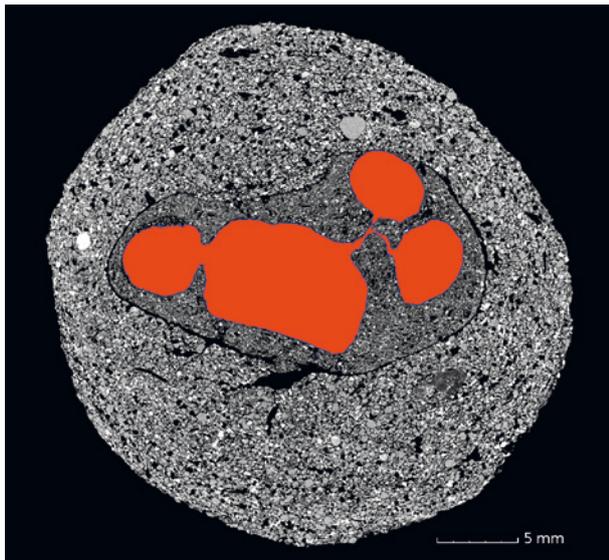
### Untersuchung der Gussformen mit der $\mu$ CT

Die für die Untersuchung der Gussformen benutzte  $\mu$ CT-Anlage (Abb. 10) der BAM liefert Abbildungen, die je nach Objektgröße eine Detailerkennbarkeit von unter 0,1 mm aufweisen. Um die höchstmögliche Auflösung zu erreichen, wurden die meist länglichen Gussformen in unterschiedlichen Höhen gemessen und die anschließend rekonstruierten Bild-daten im Computer passgenau aneinander gefügt. In den so erzeugten Bildern lassen sich die verschiedenen Materialien anhand unterschiedlicher Grauwerte, oder – wie im Fall der verschiedenen keramischen Schichten bei den Gussformen – anhand der unterschiedlichen Struktur im gesamten Objektvolumen identifizieren und quantitativ auswerten. Einschlüsse, Poren, Risse und Reste der Bronze können

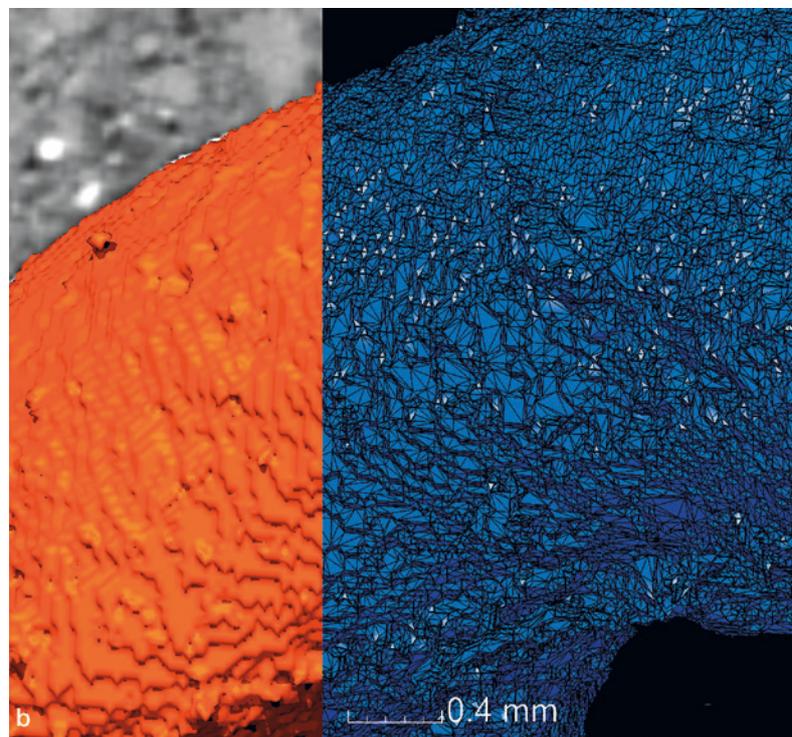
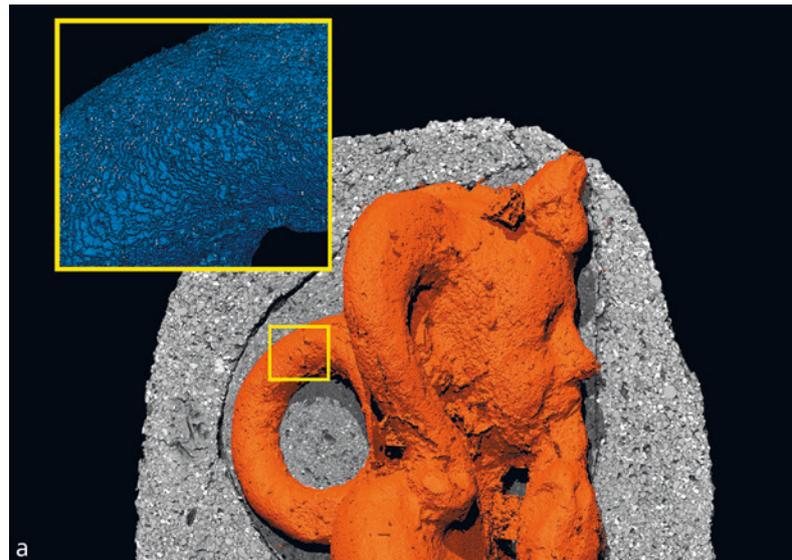
auf diese Weise ebenfalls analysiert werden. Zudem lässt sich der für den Guss bestimmte Hohlraum im 3D-Bilddatensatz virtuell fluten, wodurch von der ursprünglich nur als Negativ vorhandenen Gussform ein freistehendes Volumenmodell der intendierten Figur erzeugt wird (Abb. 11-12). Um ein Eindringen der virtuellen Bronze in den Tonmantel zu vermeiden, müssen vorher alle Trocknungs- und Schwundrisse in der Gussform, die einen Zugang zu dem zu gießenden Objekt haben, im Computerprogramm per Hand geschlossen werden. Die so erschaffene Figur lässt sich durch Triangulation der Oberfläche in ein weniger Speicherplatz benötigendes Netzmodell überführen (Abb. 13). Als STL-Datei exportiert, dient das Modell schließlich als Vorlage für Gussimulationen mithilfe entsprechender Computerprogramme (S. 16) sowie für den 3D-Druck (S. 17-18).

### Artefaktkorrektur

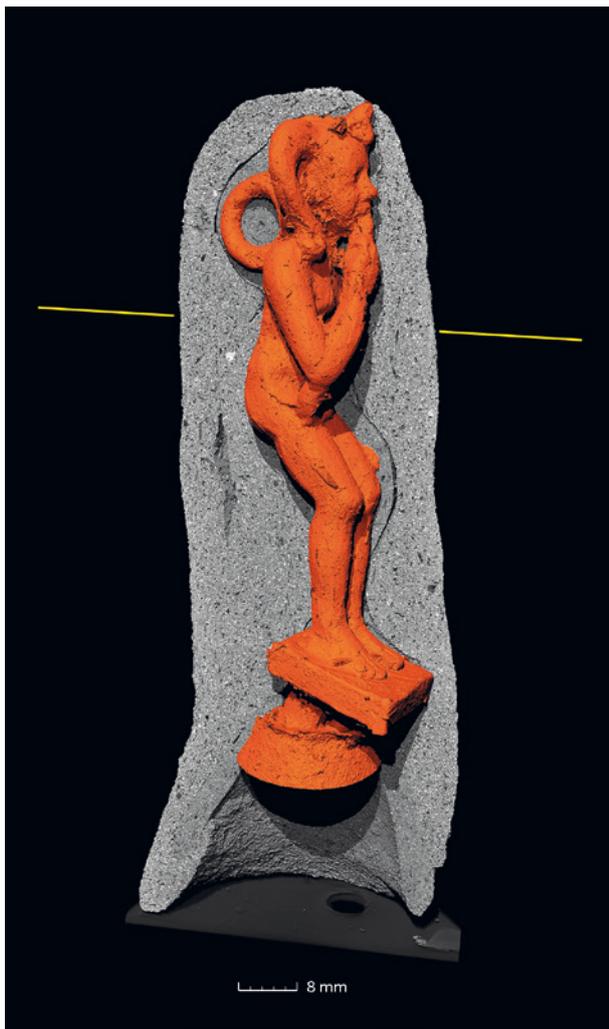
Die für die CT genutzte Bremsstrahlung der Röntgenröhre besteht aus einem Spektrum, dessen minimale Wellenlänge der angelegten Beschleunigungsspannung entspricht. Da niederenergetische Anteile der Röntgenstrahlung durch das Untersuchungsobjekt stärker geschwächt werden, ergeben sich im resultierenden Bild störende sogenannte Aufhärtungsartefakte, die durch Korrekturfunktionen nachträglich eliminiert oder durch Vorfilterung bei der Messung abgeschwächt werden können. Die in den Gussformen BoS QH 207/40, QH 207/41, QH 207/43 und QH 207/48 (Auenmüller 2014c, 229f. Kat. I.10; 231 Kat. I.11; 232f. Kat. I.13; 238 Kat. I.19) vorhandenen Bronzereste von Fehlgüssen führen aufgrund der eingeschränkten Durchstrahlbarkeit des Metalls mit der Mikrofokusröntgenröhre zu zusätzlichen Bildstörungen, die sich durch eine einfache Aufhärtungskorrektur nicht beseitigen lassen. Da diese Artefakte aber die Identifikation von Oberflächen anhand des Grauwerts erschweren oder sogar teilweise unmöglich machen, wurden diese Daten mithilfe eines speziellen Metall-Artefakt-Reduzierungs-Filters (MAR) rekonstruiert, welcher in der CERA-Software von Siemens verfügbar ist. Diese



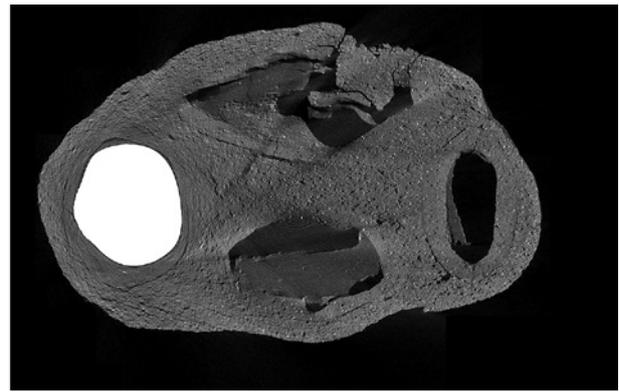
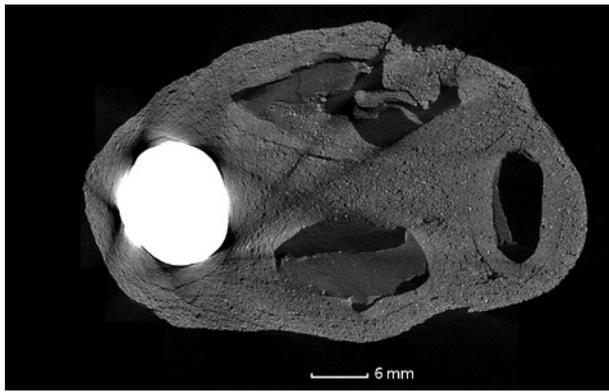
**Abb. 11** CT-Schnittbild der Gussform BoS QH 207/42 mit eingefärbtem Hohlraum, Röntgenenergie 130 kV, Voxelgröße  $28\mu\text{m} \times 28\mu\text{m} \times 28\mu\text{m}$ . – (Aufnahme D. Meinel).



**Abb. 13** **a** Überführung des Volumenmodells in ein Oberflächennetzwerk durch Triangulation. – **b** Überführung des Volumenmodells (links) in ein Oberflächennetzwerk durch Triangulation (rechts), Detail. – (Graphik D. Meinel).



**Abb. 12** Virtuell geschnittene Gussform BoS QH 207/42 mit freigestelltem Hohlraum (orange). Größe des aus drei Messungen zusammengesetzten Bilddatensatzes  $2021 \times 2021 \times 4339$  Pixel (17,4 GB), gelbe Linie Schnittebene **Abb. 11**. Größe der Gussform  $11,3\text{ cm} \times 3,60\text{ cm}$ . – (Aufnahme D. Meinel).



**Abb. 14** Horizontale CT-Schnitte der Gussform BoS QH 207/40 für vier Osirisfiguren. Sichtbare Bronze- und Wachsreste in den Hohlräumen. Links ohne Korrektur, rechts mit Metall-Artefakt-Reduzierung. – (Aufnahme D. Meinel).



**Abb. 15** CT-Ansichten der Gussform BoS QH 207/42 für eine Figur des Harpokrates mit freigestelltem Hohlraum (orange). – (Aufnahme D. Meinel, J. Auenmüller).

Software ermöglicht die Rekonstruktion der Daten in zwei Schritten unter Angabe eines Schwellwertes zur Trennung von Metall und übrigen Bilddaten. Dabei werden zuerst die stärker schwächenden Metall-

teile herausgerechnet, um anschließend eine Rekonstruktion ohne diese Bestandteile durchzuführen. Dann werden die Metallteile wieder in die Bilddaten eingesetzt. Erste Tests waren recht vielversprechend, jedoch bedarf es noch einiger Parameteranpassungen, um das Ergebnis für alle Datensätze zu optimieren (Abb. 14). Mit den neu rekonstruierten Bilddaten sollen dann auch die unvollständig gegossenen Figuren virtuell extrahiert und mithilfe der gefüllten Hohlräume zu einem vollständigen Objekt komplettiert werden.

## Die Technologie der Gussformen

### Die Ergebnisse der CT-Untersuchungen

Nach ihrer Entdeckung gelangten die Objekte im Kontext der damals praktizierten Fundteilung um 1970 nach Bonn. Dort wurden vor allem die Gussformen einer Röntgenuntersuchung unterzogen, um erste aussagekräftige Einblicke in deren Inneres zu erhalten (vgl. Abb. 9). Anhand der gewonnenen Bilder ließ sich feststellen, welche Götterfiguren oder Amulette in den einzelnen Gussformen angelegt waren und wo sich noch Reste von Bronze befanden. Die technologischen Details der Gussformen und die genaue Anordnung und Form der Gussstücke blieben jedoch zum größten Teil im Dunkeln (vgl. Auenmüller 2014b, 116-118). Im Kontext des hier vorgestellten Forschungsprojekts konnten insgesamt neun

Gussformen in Berlin an der BAM im  $\mu$ CT untersucht werden (Auenmüller 2014b, 118-126). Dabei sind spektakuläre Ergebnisse erzielt worden. Neben der Erfassung von ikonographischen Details der zu gießenden oder gegossenen Kleinbronzen sind vor allem die Technologie und die Konstruktion der Gussformen betreffende Resultate anzuführen.

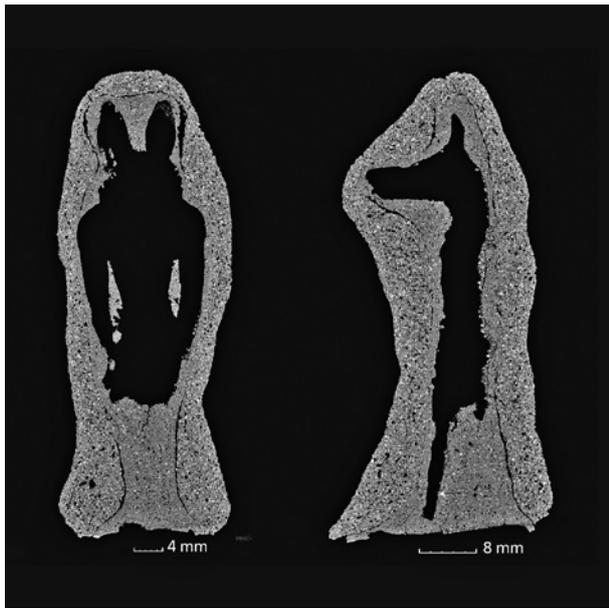
Im Hinblick auf den konzeptionellen Aufbau der Gussformen fällt ins Auge, dass es solche für eine Figur (BoS QH 207/42, **Abb. 15** [Harpokrates]; QH 207/43, **Abb. 16** [Isis mit Kind]; QH 207/46, **Abb. 17** [Anubis]; QH 207/48, **Abb. 18** [Anuket]), oder solche für zwei (BoS QH 207/45, **Abb. 19** [Osiris]), drei (BoS QH 207/41, **Abb. 20** [Osiris]) und vier Figuren (BoS QH 207/40, **Abb. 21** [Osiris]), ja sogar für 34 (BoS QH 207/132, **Abb. 9** [Osiris]) Figuren gibt (Auenmüller 2014b). Darin ist eine Abhängigkeit des Gussformkonzepts von der Komplexität der Figur zu erkennen. Während schwieriger zu gießende und durch besondere Formen charakterisierte Figuren wie der Kindgott Harpokrates, die Göttin Isis mit Kind, der Gott Anubis oder die Göttin Anuket als Einzelfiguren angelegt sind, sind vor allem die eher flachen und von ihren Körperformen her wesentlich kompakteren Bilder des Totengottes Osiris als Mehrfachgüsse in den Formen konzipiert. Die Serienproduktion solcher Objekte prägt sich schließlich in der Gussform BoS QH 207/132 mit 34 kleinen Metallplättchen in Form des Gottes Osiris am deutlichsten aus.

Die Untersuchung der Gussformen per  $\mu$ CT erlaubt auch Aussagen über eventuelle Füllungen des inneren Hohlraums über die Anwesenheit von Bronze hinaus. Während Bronze im Röntgenbild als schwarze Zone in Erscheinung tritt (vgl. **Abb. 9**), repräsentieren die weißen Bereiche in den CT-Daten das vorhandene Metall (vgl. z.B. **Abb. 18**). Neben solchen Füllungen konnten auch Reste des nicht ausgeschmolzenen Waxes in einigen Gussformen nachgewiesen werden. Im Fall der Gussform BoS QH 207/56c für ein Amulettplättchen füllt das Wachs den unteren Innenbereich (**Abb. 22**), im Fall der Gussformen BoS QH 207/39 und 40 (Auenmüller 2014b; Auenmüller 2014c, 228-230 Kat. I.9-10) für vier Osirisstatuetten sind die Fussbereiche der Figu-



**Abb. 16** CT-Schnitt der Gussform BoS QH 207/43 für eine Figur der Isis mit Kind, Höhe der Gussform 13,3 cm. Fehlguss, mit geringen Bronzeresten (helle Zonen). – (Aufnahme D. Meinel, J. Auenmüller).

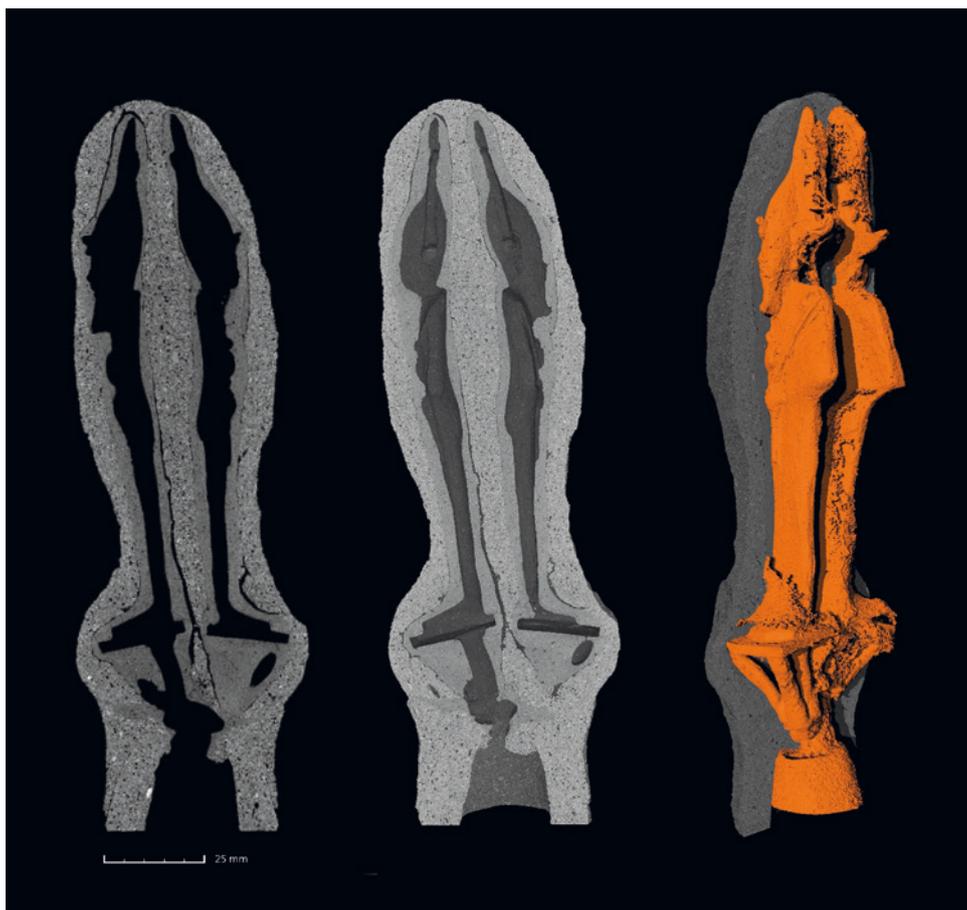
ren mit Bronze ausgegossen, während im Rest der Form noch das Wachs der Modelle steckt (vgl. **Abb. 14**). Diese Wachsreste belegen, dass hier das Wachs nicht fachgerecht ausgeschmolzen wurde. Dies ist sehr verwunderlich, da das Wachs ausschmelzen selbst zu den einfacheren Arbeitsschritten des Bronzegusses zählt. Eine plausible Erklärung hierfür könnte in der seriellen Fertigung der Stücke liegen, bei denen größere Stückzahlen zu Flüchtigkeiten beim Wachs ausschmelzen führten. Je höher die Stückzahl der zu gießenden Stücke, desto



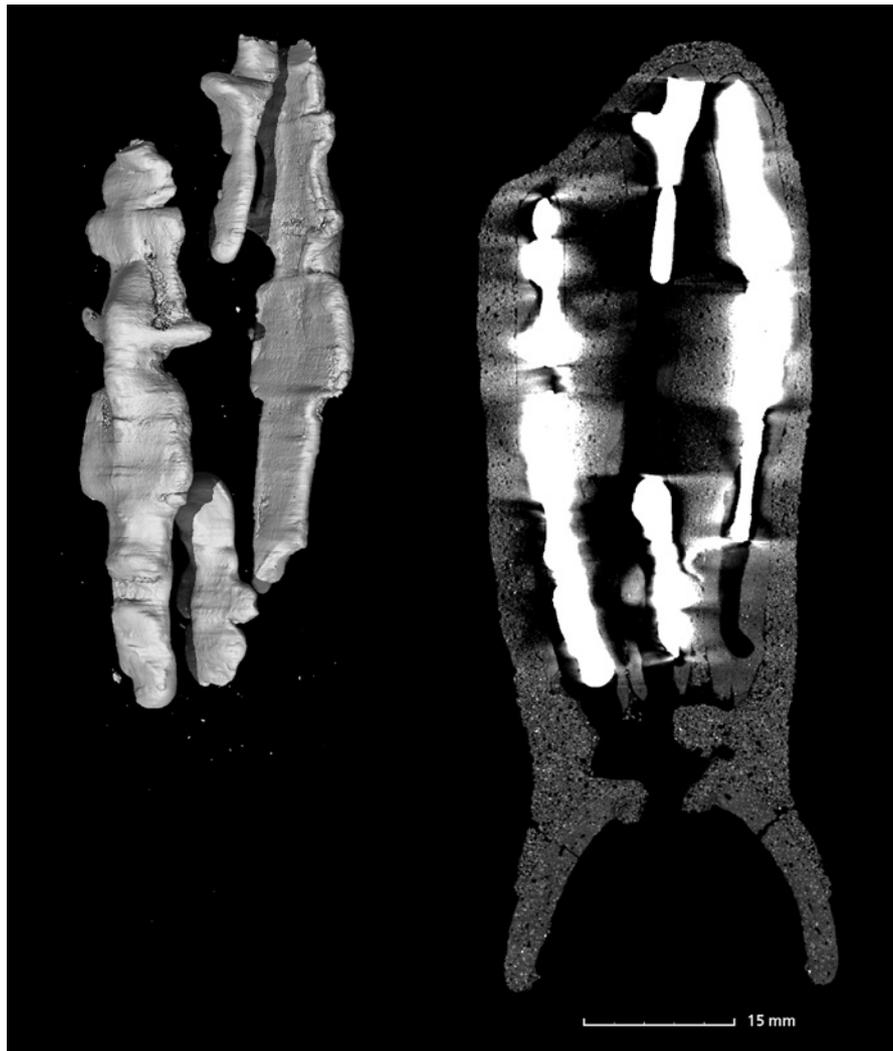
**Abb. 17** CT-Schnitte der Gussform BoS QH 207/46 für eine Figur des Anubis. – (Aufnahme D. Meinel, J. Auenmüller).



**Abb. 18** CT-Schnitt der Gussform BoS QH 207/48 für eine Figur der Anuket, mit Bronze im Kopfbereich. – (Aufnahme D. Meinel, J. Auenmüller).



**Abb. 19** CT-Ansichten der Gussform BoS QH 207/45 mit gut erkennbarem Schichtaufbau für zwei Figuren des Osiris, mit freigestellten Hohlräumen (orange). – (Aufnahme D. Meinel, J. Auenmüller).



**Abb. 20** CT-Ansichten der Gussform BoS QH 207/41 für drei Figuren des Osiris, links freigestellt die fehlgeschlagenen Ausgüsse. – (Aufnahme D. Meinel, J. Auenmüller).

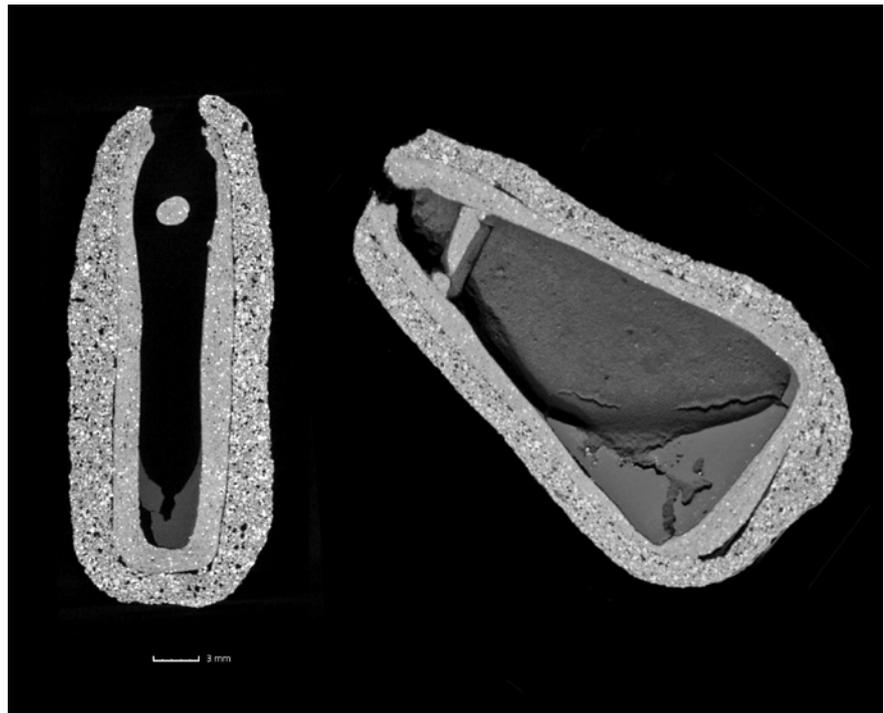
weniger ist eine genaue Kontrolle des einzelnen Werkstückes möglich. Da verbliebene Wachsreste im Inneren kaum erkannt werden konnten, kam es dann zu Fehlgüssen. Erstaunlich ist in diesem Zusammenhang, dass die Gussformen dabei nicht zerplatzten. Vermutlich lag dies daran, dass die Bronze, ausgelöst durch den Gasdruck des verdampfenden Wachses, nicht weiter in die Gussform vordringen konnte und bereits erstarrte, noch bevor sie das Wachs erreichte.

In allen Fällen, also unabhängig von der Komplexität des Gusses, ist das Fehlen von Entlüftungskanälen in der Gussform zu verzeichnen. Dies ist insofern be-

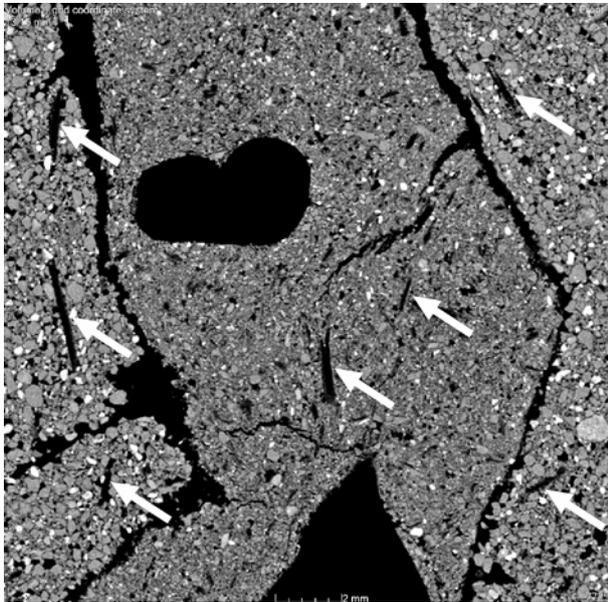
merkenswert, als die Ableitung des beim Guss entstehenden Gasdrucks hier durch die Wandung der Gussform geschehen musste. Der Verzicht auf solche zusätzlichen Kanäle belegt die enorme Kompetenz der Gießer im Hinblick auf die Machbarkeit solcher komplizierter Güsse. Lediglich an den Zuläufen der größten Statuetten des Osiris in der Gussform BoS QH 207/45 ist ein System von Kanälen angelegt. Jede Figur wird von drei Kanälen versorgt, die vom zentralen Eingusstrichter abgehen und in der Basis der Statuetten enden (vgl. **Abb. 19**). Sie dienten jedoch nicht der Entlüftung des Innenraums, sondern dem Einguss der heißen Bronzelegierung.



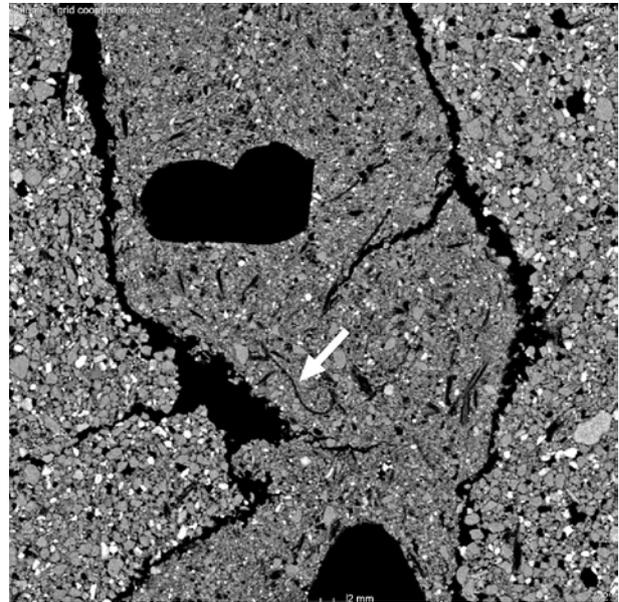
**Abb. 21** Ansicht der Gussform BoS QHw 207/40 für vier Osirisstatuetten. – (Foto J. Vogel, LVR-LandesMuseum Bonn).



**Abb. 22** CT-Ansichten der Gussform BoS QH 207/56c. Wachsreste sind unten links im Vertikalschnitt und rechts im Volumenmodell als partielle Füllung des Hohlraums zu erkennen. – (Aufnahme D. Meinel, J. Auenmüller).



**Abb. 23** CT-Schnitt durch die Gussform BoS QH 207/42 mit erkennbaren Fasern. – (Aufnahme D. Meinel, F. Willer).



**Abb. 24** CT-Schnitt durch die Gussform BoS QH 207/42 mit sichtbarem Haar. – (Aufnahme D. Meinel, F. Willer).

Schon bei der ersten Autopsie der Gussformen fiel auf, dass diese nach heutigen Vorstellungen äußerst dünnwandig gearbeitet sind, wobei das Formmantelmaterial durch bemerkenswert hohe Sandanteile charakterisiert ist. Diese Beobachtung konnte anhand der Schnittaufnahmen der Computertomographien sowie der Dünnschliffanalysen (S. 15-16) bestätigt werden. Die Tomographien zeigen, dass der Auftrag des Formmaterials in mehreren Schichten erfolgte, wobei die erste, d. h. innerste Schicht aus einem wesentlich feineren Material bestand als die äußere(n) Schicht(en). Die innerste Schicht diente – dünn auf das Wachsmo- dell aufgebracht – der detailgetreuen Wiedergabe der Oberfläche und verringerte somit den Aufwand für deren nachträgliche Überarbeitung am Gussstück. Alle Gussformen weisen diese Schicht auf (vgl. **Abb. 15-20**). Die nun nach außen folgenden, mit größeren Partikeln und größeren Sandkörnern versetzten Mäntel stabilisieren den inneren Kern der Gussform und geben beim Guss den nötigen Halt. Die äußeren Mäntel, von denen bis zu vier dokumentiert sind, zeigen z. B. bei BoS QH 207/43 nur geringfügige Unterschiede in ihrer Beschaffenheit (**Abb. 16**). Einzelne äußere Formmäntel sind wie bei BoS QH 207/48 im Vergleich zu den anderen sehr grob (**Abb. 18**). Die feinste innere Schicht setzt sich jedoch stets deutlich von den äußeren ab. In einigen Fällen konnten bei den äußeren Schichten kleinere zusätzliche Aufträge an bestimmten, entweder dünnen oder potentiell gefährlichen Stellen der Gussformmäntel beobachtet werden. Sie belegen wiederum die durchdachte Technologie und den bewussten Einsatz solcher Materialien.

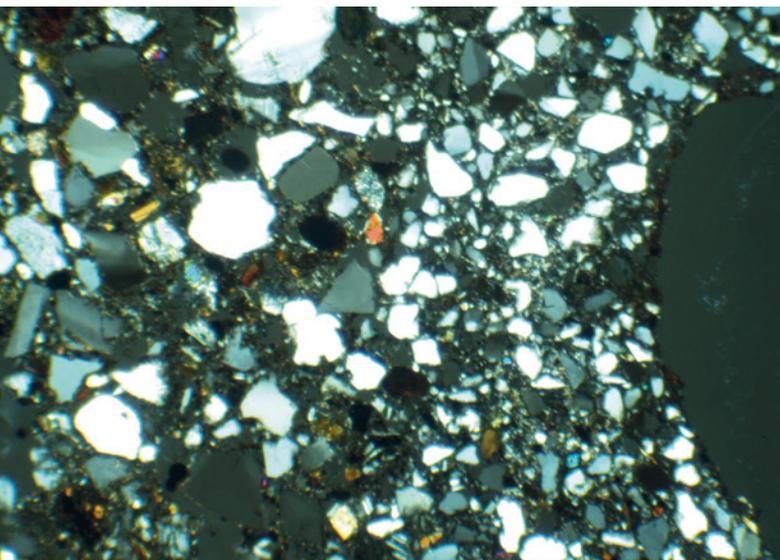
Im Gegensatz zum modernen Gießverfahren erforderte der antike Bronzeguss, wie er uns hier am Beispiel des Qubbet el-Hawa-Materials vor Augen tritt, bestimmte technologische Voraussetzungen. Diese betreffen neben dem Aufbau der Gussformen auch deren gerade angesprochene Materialzusammensetzung. So mussten explosionsartig entstehende Gase während des Gussvorgangs sicher abgeleitet werden. Hierzu eignet sich besonders poröses und eher sandiges als tönernes Material, das zudem durch lange, offene Poren charakterisiert ist. Diese

sollten das Entweichen der heißen Gase (z. B. Restfeuchte) beim Gießvorgang ermöglichen. Solche Poren, die z. B. durch Zugaben von Tierhaaren oder Pflanzenfasern gezielt erzeugt wurden, lassen sich am Beispiel der Gussform BoS QH 207/42 anhand der  $\mu$ CT-Daten nachweisen (**Abb. 23-24**). Die organischen Bestandteile verbrennen beim starken Erhitzen der Gussform während des Wachsausschmelzens zu Hohlräumen, die dann der Ableitung der heißen Schmelzgase beim Verguss dienen. Insgesamt scheinen solche organischen Zuschläge jedoch eher selten zu sein, die sandigen Anteile überwiegen.

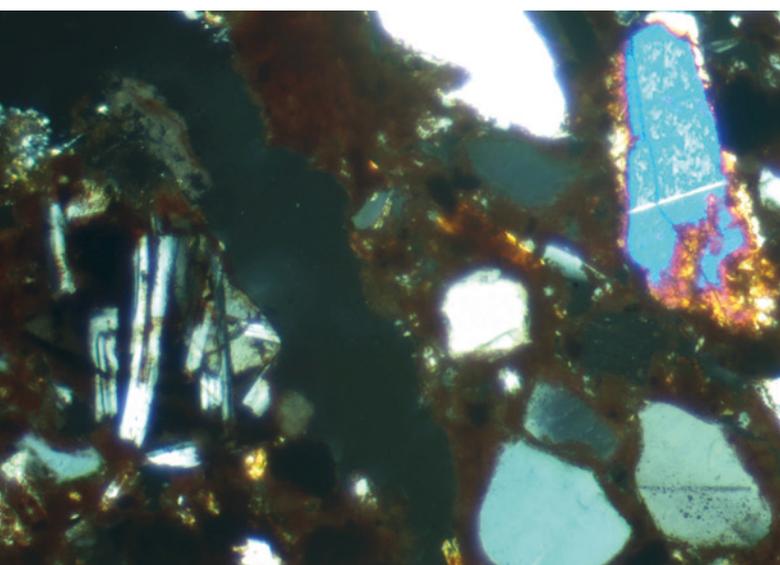
### Die Ergebnisse der Dünnschliffuntersuchungen

Zum besseren materialkundlichen Verständnis der Gussformen und ihrer Bestandteile wurden einzelne Fragmente und kleinere Partien der Formmäntel der Gussformen BoS QH 207/44, QH 207/52, QH 207/55 (Auenmüller 2014c, 233 f. Kat. I.14; 239 f. Kat. I.20; 242 f. Kat. I.24) und QH 207/132 mittels der polarisationsmikroskopischen Analyse von Dünnschliffen bestimmt und klassifiziert. Die von Gerwulf Schneider am Exzellenzcluster TOPOI der FU Berlin durchgeführte Analyse gewährt wichtige Einblicke in den Aufbau der hitzebeständigen Formmasse. Unter dem Durchlichtmikroskop ist es beim Betrachten der Proben im Wechsel zwischen normalem und polarisiertem Licht möglich, charakteristische mineralische Beimengungen sowie organische Magerungszuschläge, die in der Tonmatrix eingelagert sind, zu erkennen und zu dokumentieren.

Alle Proben sind mehr oder weniger gleich zusammengesetzt und bestehen aus feinem Sand mit vorwiegend gerundeten, aber auch eckigen Körnern. Mineralogisch besteht der Sand vorwiegend aus Quarz, der sich unter Einwirkung des polarisierten Lichts als weiße bis blaue Körner darstellt (**Abb. 25**). Zudem enthalten die Proben Anteile an Feldspat (Plagioklas, Mikroklin) sowie Pyroxene (**Abb. 26**). Zusätzlich sind kleine Körner vulkanischen Gesteins nachweisbar. Diese Bestandteile entsprechen der lokalen Geologie und der vermutlichen Zusammen-



**Abb. 25** Dünnschliff von einer Probe der Gussform BoS QH 207/55. Bildausschnitt 2,8mm. – (Aufnahme G. Schneider).



**Abb. 26** Dünnschliff von einer Probe der Gussform BoS QH 207/44. Bildausschnitt 0,7 mm. – (Aufnahme G. Schneider).

setzung des Nilsandes bei Assuan. Bei allen Proben ist auffällig, dass nur geringe Tonanteile im Dünnschliff beobachtet werden können. Dies bestätigt den bei der ersten äußeren Betrachtung der Gussformen gewonnenen Eindruck auch makroskopisch. Organische Magerungszusätze konnten im Mikro-

skop nicht nachgewiesen werden. Bemerkenswert ist, dass die geringen Tonanteile die Festigkeit der auffallend dünnwandigen Gussformen ausreichend gewährleisten und auch die spätere Zerstörung der Gussform nicht beeinträchtigen. Man hat es hier also mit einem Material zu tun, dessen Tonanteil geringer als der der zugegebenen Magerungsbestandteile ist. Hier scheint die Erfahrung im täglichen Umgang mit dem Material zu einer optimalen Werkstattrezeptur geführt zu haben, die deutlich das enorme Know-how der antiken Bronze gießer im Umgang mit solchen Materialien belegt.

### Gussimulationen

Es ist geplant, die zahlreichen neuen Erkenntnisse zum inneren Aufbau und zur Funktion der Gussformen auch im Rahmen von rechnergestützten Gussimulationen zu überprüfen. Dieses Verfahren dient der Simulation von Gieß- und Erstarrungsprozessen. Variationen an den für den Guss wesentlichen Parametern, wie Gieß- oder Formtemperatur, Gießzeit oder Veränderung der Legierungszusammensetzung, ermöglichen Optimierungen für den späteren realen Guss. Diese Technik konnte für antike Gussformen bereits erfolgreich eingesetzt werden. Formtemperatur, Gießzeit und Schmelztemperatur der eingestellten Bronzelegierung lassen sich so variieren, dass sogar Gussfehler eines Originals in Echtzeit simuliert werden können (Bühning-Polaczek/Wirth 2014). Schlussfolgernd erhält man so zusätzliche Informationen zur antiken Gießtechnik und deren Schwachstellen. Als Basis für die Simulation dienen die durch die Tomographien erhaltenen STL-Dateien. Die Simulationen selbst werden am Gießerei-Institut der RWTH in Aachen mit dem Simulationsprogramm Magmasoft erarbeitet. Im Rahmen der experimentellen Archäologie sollen dann schließlich Nachgüsse der Gussformen im Praxistest auf ihre Funktion hin überprüft werden. Es ist geplant, diese Versuchsreihen im Labor für experimentelle Archäologie des RGZM in Mayen im Rahmen eines Seminars durchzuführen.



**Abb. 27** Der Hohlraum aus Gussform BoS QH 207/42 als 3D-Druck, Wachsmo­dell und Bronzefigur. Größe der Bronzefigur 7,2 cm. – (Aufnahme J. Vogel, LVR-LandesMuseum Bonn; J. Auenmüller; M. Fitzenreiter).

### Moderne Replikationsmethoden: 3D-Druck und Bronzeguss

Die  $\mu$ CT-Daten der Gussformen bilden nicht nur die Basis für digitale Simulationen des Gusses am Rechner, sondern sie dienen auch dazu, die in den Gussformen angelegten Objekte erneut – oder besser: zum ersten Mal – wieder »zum Leben zu erwecken«. Dies soll am Beispiel der Gussform BoS QH 207/42 des Kindgottes Harpokrates vorgestellt werden. Die an der BAM per  $\mu$ CT gewonnenen Daten wurden

zunächst in eine STL-Datei überführt (siehe S. 8). Um handelsübliche 3D-Drucker nutzen zu können, musste diese über 1 GB große Datei mithilfe entsprechender Computerprogramme heruntergerechnet werden. Nach erfolgreicher Reduktion, bei der naturgemäß ein Teil der Detailinformation zur inneren Oberfläche der Gussform verloren gehen musste, konnte Dank der Unterstützung der Stadtbibliothek Köln ein Ausdruck der Datei erfolgen (Abb. 27, links). Der eingesetzte Desktop-3D-Drucker vom Typ MakerBot Replicator2 setzt den Ausdruck mithilfe

von feinsten Kunststoffäden (Filament) in Schichten zusammen. Die in der Abbildung erkennbaren Rillen sind Artefakte des Drucks und kein Messergebnis aus dem  $\mu$ CT.

Der 3D-Druck des Harpokrates wurde von Martin Fitzenreiter mit Unterstützung der Kunstgießerei Flierl in Berlin per moderner Silikonform abgeformt, um neue Wachsmodelle des Gottes inklusive des Gusszulaufs- und trichters zu erstellen (**Abb. 27**, Mitte). Diese Wachsmodelle weisen also auch die Charakteristika des 3D-Drucks auf. Nach dem Einbetten eines solchen Wachsmodells in eine moderne Gussform, dem Ausschmelzen des Wachses, dem Guss in die Form, der Zerstörung derselben und der Nachbearbeitung des Gussstücks erhält man eine Bronzefigur, die einerseits exakt den Eigenheiten des 3D-Drucks entspricht, andererseits die moderne Replikation einer in der Antike nie zum Guss eingesetzten Gussform bzw. ihres Inneren ist (**Abb. 27**, rechts). Das Potential der zerstörungsfreien Untersuchung solcher Artefakte im  $\mu$ CT wird an dieser Stelle besonders deutlich. Gelingt es doch mit diesem Verfahren, detailgetreue digitale Daten zu gewinnen, die mit modernen Methoden auch wieder in physische Objekte umgewandelt werden können.

## Weiterführende Analysen

### Röntgenfluoreszenzanalysen der Gusslegierungen

Zu genauen Bestimmung der verwendeten Bronzelegierungen wurden an acht Objekten des Werkstattbefundes, die Metall enthalten oder aus Bronze bestehen, feine Bohrspanproben mit einem 1 mm starken, gehärteten HSS-Bohrer (Hochleistungsschnellschnittstahl) entnommen. Um eine Kontamination der Probe mit Korrosionsprodukten aus den äußeren Zonen des Metalls zu vermeiden, wurden die obersten Bereiche zuvor mit einem 1,5 mm starken Diamantkugelfräser an der zu beprobenden Stelle gereinigt. Zudem sind die ersten Bohrspäne, die im Kontext einer oberflächlichen Korrosion oder

Seigerung durch eine Anreicherung oder Entmischung bestimmter Legierungspartner charakterisiert sein können, nicht verwendet worden. Die Probenentnahme erfolgte durch Frank Willer vom LVR-LandesMuseum Bonn, die Analyse mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenz (EDRFA) wurde am Curt-Engelhorn-Zentrum für Archäometrie gGmbH (CEZ) in Mannheim von Roland Schwab durchgeführt.

Die RFA-Methode beruht auf der Anregung von Materie zur Aussendung ihrer eigenen charakteristischen Röntgenstrahlung durch die Bestrahlung der Probe mit Röntgenstrahlen. Das Verfahren ist abgesehen von der notwendigen, aber sehr geringen Probenentnahme, zerstörungsfrei. Die Proben stehen nach der Analyse für weitere Untersuchungen zur Verfügung. **Tabelle 1** stellt die metallanalytischen Messungen dar. Die Werte für die Elemente Zink (Zn), Selen (Se), Cadmium (Cd) liegen mit weniger als 0,01 %, der Wert für Tellur (Te) mit weniger als 0,005 % unterhalb der Nachweisgrenze und sind daher nicht aufgeführt (**Tab. 1**).

Ziel der derzeit noch laufenden Auswertung ist es, einen Überblick über die Legierungen zu erhalten und diese mit bekannten Datensätzen (wie Riederer 2002) abzugleichen (Auenmüller 2014a). Durch die Tatsache, dass es sich recht zweifelsfrei um Bronze-güsse in Gussformen einer Werkstatt handelt, bietet sich hier die bislang einmalige Möglichkeit, genauere Einblicke in die verwendeten Werkstattrezepturen zu erlangen. Fragen nach den technischen Eigenschaften der Legierungen sollen dabei ebenfalls untersucht werden. Da es sich bei der Mehrzahl der beprobten Objekte um Fehlgüsse, also um beiseitegelegte Ausschussware handelt, muss auch die bei einem Fehlguss mögliche Inhomogenität der Legierungsbestandteile bei der Auswertung berücksichtigt werden. Gleiches gilt für die Frage nach der möglichen Wiederverwendung von Altmittel.

Der nahezu perfekte Gussformaufbau weist auf eine hoch entwickelte Schmelz- und Gusstechnik der Werkstatt hin, in der die vorliegenden Fehlgüsse wohl nicht an einem Tag, sondern eher über einen längeren Zeitraum gesammelt wurden. Diese Annahme ist für die Interpretation der Legierungen in-

Labor-Nr.	Original-Nr.	Erhaltungszustand	Cu %	Mn	Fe	Co	Ni	Zn	As	Se	Ag	Cd	Sn	Sb	Te	Pb	Bi
MA-145251	ÄBB 1	Späne, Metall	82	<0,01	0,07	0,02	0,09	<0,1	0,43	<0,01	0,066	<0,01	1,78	0,89	<0,005	15	0,05
MA-145252	ÄBB 2	Späne, Metall	86	<0,01	<0,05	0,01	0,08	<0,1	0,09	<0,01	0,052	<0,01	3,5	0,030	<0,005	9,7	<0,01
MA-145253	ÄBB 3	Späne, Metall	86	0,02	1,1	<0,01	0,05	<0,1	0,19	<0,01	0,041	<0,01	5,9	0,064	<0,005	6,7	<0,01
MA-145254	ÄBB 4	Späne, Metall	75	<0,01	0,12	0,07	0,27	<0,1	0,42	<0,01	0,047	<0,01	2,84	0,031	<0,005	21	<0,01
MA-145255	ÄBB 5	Späne, Metall	91	<0,01	0,32	<0,01	0,04	<0,1	0,14	<0,01	0,047	<0,01	0,71	0,050	<0,005	7,7	0,01
MA-145256	ÄBB 6	Späne, Metall	82	<0,01	0,73	<0,01	0,03	<0,1	0,23	<0,01	0,014	<0,01	3,2	0,018	<0,005	13	<0,01
MA-145257	ÄBB 7	Späne, Metall	86	<0,01	0,02	<0,01	0,04	<0,1	0,04	<0,01	0,083	<0,01	0,60	0,113	<0,005	13	<0,01
MA-145258	ÄBB 8	Späne, Metall	79	<0,01	0,46	0,10	0,13	<0,1	0,12	<0,01	0,040	<0,01	6,1	0,013	<0,005	14	<0,01

**Tabelle 1** Die Ergebnisse der EDRFA-Metallanalysen am CEZ Mannheim. – Alle Angaben sind in Gew. %. Bei Werten mit vorangestelltem «<»-Zeichen handelt es sich um Nachweisgrenzen, d. h. der tatsächliche Wert ist kleiner als der in der Tabelle angegebene Wert. – (Tabelle R. Schwab, CEZ Mannheim).

sofern bedeutsam, als die Zusammensetzungen verschiedener Gusschargen – z. B. im Hinblick auf die Zinn- und Bleianteile – gerade im Kontext des antiken Schmelzverfahrens deutlich voneinander abweichen können. Gegen eine willkürliche Wahl des verwendeten Schmelzgutes aus reinem Altmetall mit unbekanntem Gießverhalten sprechen die durchaus recht anspruchsvoll ausgießenden Gussformen. Daher dürfte hier eine intentionelle Anpassung der Legierung an das zu gießende Werkstück anzunehmen sein, die bei Bedarf mit Altmetallzuschlägen gestreckt wurde. Dies gilt insbesondere für Güsse nach antikem Verfahren, die ohne moderne, die Gießbarkeit fördernde Zuschläge wie Phosphorkupfer, erfolgten. Zahlreiche experimentelle Versuche zur antiken Gusstechnik, die in den letzten Jahren am LVR-LandesMuseum Bonn erfolgreich durchgeführt wurden, haben dies belegt (Steiger-Nawarotzky/Willer 2003; Steiger-Nawarotzky/Willer 2005; Willer 2007).

Unter Berücksichtigung der bekannten Fakten entsprechen die Werte solchen Bronzelegierungen, die man heute aufgrund ihrer Zinn- und Bleianteile als Blei-Zinn-Bronzen mit erhöhtem Bleigehalt bezeichnen würde (ÄBB 1, 4, 6, 7 und 8; BoSQH 207/18, 40, 132, 53, 55). Blei-Zinn-Bronzen, deren Bleigehalte mehr als 10 % aufweisen, sind verhältnismäßig gut gießbar, weil die im Kupfer der Bronze unlöslichen Bleipartikel die Erstarrung verzögern. Zudem lassen sich diese im kalten Zustand gut mechanisch überarbeiten, da die erstarrten, fein verteilten Bleitropfen als sogenannte Spanbrecher fungieren. Die Proben

ÄBB 2, 3 und 5 (BoS QH 207/19, 39, 44) können als Blei-Zinn-Bronzen mit mittlerem Blei- und Zinngehalt, bzw. Probe 5 mit geringem Zinngehalt angesprochen werden. Auffällig sind drei Proben mit sehr geringem Zinnanteil (ÄBB 1, 5 und 7; BoS QH 207/18, 44, 53). Vergleichsanalysen ägyptischer Bronzen zeigen, dass solche geringen Zinnanteile zwar nicht der Regel entsprechen, aber durchaus vorkommen (vgl. Riederer 2002). Der Grund hierfür ist bislang noch nicht eindeutig geklärt. Als mögliche Ursache kommen wiederverwendete Fehlgüsse in Frage, denen beim erneuten Einschmelzen kein frisches Zinn zugefügt wurde. Nach antikem Verfahren, bei dem die Luft zur Erhitzung der Holzkohle direkt auf das Schmelzgut aufgeblasen wird, kann es, bedingt durch Oxidationsprozesse in der Schmelze, zu einer Verringerung des Zinnanteils in der Legierung kommen. Ebenso könnte es sich aber auch um fehlerhaft erschmolzene und nicht ausreichend durchmischte Legierungen handeln. Die Anteile an Silber, Arsen sowie Antimon stammen aus den Kupfererzen und sind nicht Bestandteil einer intentionellen Zufügung. Mangan und Eisen können aus der Bodenlagerung oder dem Gusstiegel sowie dem Formenmaterial stammen.

### Zur Herkunftsbestimmung des Bleis in der Bronze

Ergänzend zu den RFA-Messungen werden derzeit am CEZ Mannheim an den acht Bohrproben Bleiisotopenanalysen für eine lagerstättenkundliche



**Abb. 28** Modelle von Osirisfigürchen BoS QH 207/59; Bienenwachs. – (Foto J. Vogel, LVR-LandesMuseum Bonn).

Bestimmung des Bleianteils in der Bronze durchgeführt. Diese Analysen sollen Auskunft über die Herkunft und Handelswege des verwendeten Bleis liefern. Zahlreiche Fragen, die in Verbindung mit der Entstehung und Produktion der Gussformen sowie der Handelswege stehen, sollen hierbei nach Möglichkeit beantwortet werden. Aufgrund der hohen Bleianteile in den Proben ist recht sicher auszuschließen, dass der Bleigehalt in den Bronzen auf natürliche Verunreinigungen des verwendeten Kupfers zurückgeht. Die hier vorliegenden Objekte von der Qubbet el-Hawa belegen durch die hohe Qualität des Gussformenaufbaus eine hoch entwickelte Bronzegusstechnik, bei der eine intentionelle Zugabe von Blei zur Verbesserung der Gieß Eigenschaften angenommen werden kann. Dass dabei aber immer auch Altmetallanteile zum Einsatz kamen, ist nicht von vornherein auszuschließen.

Bislang wurden an altägyptischen Bronzestatuetten nur wenige Bleisotopenmessungen durchgeführt. Bedeutsam sind im Zusammenhang mit den hier vorgestellten Bronzen u. a. im Jahr 1982 durchgeführte Vergleichsanalysen an 20 spätzeitlichen Statuetten, die auf die Verwendung italischer bzw. griechischer Abbaugelände hinweisen (Fleming 1982-1983; vgl. zu weiteren Analysen Stos-Gale 1995; Shortland 2006). Aktuelle Analysen an Bronzen der Sammlung des Museums August Kestner in Hannover deuten hingegen neben den Gebieten Sinai und Timna primär auf den Abbau zyprischer Lagerstätten hin, die in diesem Umfang bislang für ägyptische Bronzen nicht bekannt waren (Schulze/Lehmann 2014). Durch die neuen Messungen an den Funden der Qubbet el-Hawa sind weitere Informationen zur Verwendung von Bleisorten und ihren Handelswegen zu erwarten.

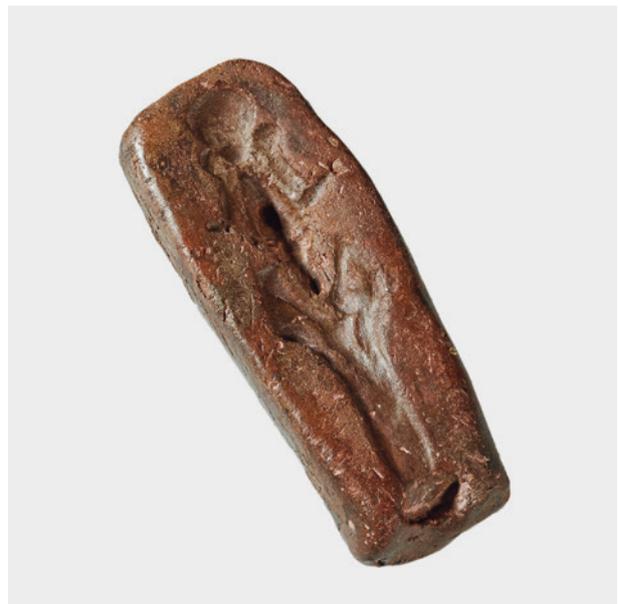
## Organische Werkstoffe und Materialien

Gut erhaltene organische Werkstoffe sind in archäologischen Befunden insgesamt recht selten, da diese sich in der Regel während der Bodenlagerung, bedingt durch chemische Reaktionen oder biologische Prozesse, z.T. völlig abbauen. Das Beispiel eines im Jahr 2005 durch das Doerner Institut in München erfolgreich analysierten thermoplastischen Klebstoffes an einem römischen Reiterhelm aus dem Bestand des LVR-LandesMuseum Bonn zeigt, welch enorme Aussagekraft solche leicht vergänglichen Stoffe haben, wenn diese durch günstige Lagerungsbedingungen noch erhalten sind (Willer/Baumer/Koller 2006). Dagegen können sich organische Materialien in den trockenen Wüstenzonen Ägyptens in weitaus besserem Maße erhalten. Dennoch sind die organischen Fundstücke von der Qubbet el-Hawa als äußerst spektakulär einzustufen, denn hier kommt die Temperaturempfindlichkeit der Stücke und neben dem Wachs das besondere Material kittförmiger Harzmischungen hinzu, die im direkten Produktionskontext der Werkstatt stehen (zu Wachs und Harzen im Alten Ägypten vgl. Raven 1983; 1990; Serpico/White 2000, 409-411. 420-422; Serpico 2000).

Zu den Objekten mit organischen Bestandteilen zählen drei rötliche Wachsmodelle kleiner Figuren des Gottes Osiris (**Abb. 28**; Auenmüller 2014c, 221 f. Kat.-Nr. I.3; BoS QH 207/59) sowie drei kittähnliche Negativformen (Matrizen) selbiger Gottheit, die auf einem Vierkantholz angebracht sind und der seriellen Fertigung von Wachsmodellen dienten (**Abb. 29**; Auenmüller 2014b, 220 f. Kat.-Nr. I.2; BoS QH 207/37). Eine weitere Negativform zur Herstellung von Wachsmodellen des Gottes Osiris besteht aus einem deutlich härteren, bislang noch nicht näher bestimmten keramischen Material von rötlich-pinker Farbe (**Abb. 30**; Auenmüller 2014c, 218 f. Kat.-Nr. I.1; BoS QH 207/35). Sie ist von einer dünnen Wachs-schicht umgeben, die sich im Zuge der kontinuierlichen Nutzung des Negativs zum Herstellen von Wachsfiguren am Objekt angelagert hat bzw. in das saugfähige keramische Material eingedrungen ist. Zudem sind in einigen Gussformen Reste des unvollkommen ausgeschmolzenen Formwachses do-



**Abb. 29** Modelklotz mit Negativformen BoS QH 207/37; Holz, Harzgemisch. – (Foto J. Vogel, LVR-LandesMuseum Bonn).



**Abb. 30** Negativform für Osirisfigur BoS QH 207/35; Keramik, Wachs. – (Foto J. Vogel, LVR-LandesMuseum Bonn).

kumentiert. Die Analyse der organischen Materialien wird derzeit von Ursula Baumer am Doerner-Institut in München mittels Infrarotspektroskopie und Gaschromatographie in Kombination mit Massenspektrometrie durchgeführt.

Erste Ergebnisse liegen bereits vor und belegen die Verwendung von Bienenwachs für die Osirisfigürchen (**Abb. 28**; Probe OPB 4) sowie ein weiteres Wachsobjekt (BoS QH 207/58; Probe OPB 3; Auenmüller 2014c, 222 f. Kat. I.4). Inwieweit das Material sich durch die Bodenlagerung abgebaut hat bzw. gealtert ist, muss noch überprüft werden. Eine Analyse des Wachses per Raman-Spektroskopie durch Thorsten Geisler-Wierwille am Steinmann-Institut der Universität Bonn bestätigte einerseits die Diagnose »Bienenwachs«, machte andererseits durch die geringe Intensität der Spektren auf die Frage nach den Alterungsprozessen aufmerksam. In der Probe des keramischen Negativmodells (**Abb. 30**; Probe OPB 1) scheinen auch Anteile von Bienenwachs enthalten zu sein, die anhand der Raman-Spektroskopie verifiziert werden konnten. Besonders auffällig ist, dass in den kittähnlichen Abformmassen (**Abb. 29**; Probe OPB 2) auch Naturharze wie Mastix oder Pistazienterpentin vorhanden sind. Darüber hinaus haben sich Monoterpene enthalten. Zu klären ist, ob diese zu den Triterpenen gehören oder der Formmasse zur Erhöhung der Plastizität ätherische Öle zugemengt wurden. Eine abschließende Auswertung der Proben durch das Doerner Institut wird im Frühjahr 2015 erwartet. Zusätzlich zu diesen Analysen sind derzeit eine Holzartenbestimmung am Modelklotz BoS QH 207/37 und eine <sup>14</sup>C-Datierung seines Holzes sowie der Wachsmodule BoS QH 207/59 und der Wachsreste in der fragmentierten Gussform BoS QH 207/55 im Gang. Während beim Holz die Nutzung lokaler Rohstoffe anzunehmen ist, soll die Kohlenstoffdatierung die Zeitstellung des Konvoluts mit naturwissenschaftlichen Methoden eingrenzen.

## Schlussbemerkungen

Die Untersuchungen an den Materialien einer Gusswerkstatt der ägyptischen Spätzeit aus der Region

von Assuan haben vor allem neue und spektakuläre Erkenntnisse zum Gussformaufbau erbracht. Das gesamte Aussagepotential der Objekte ist damit aber noch längst nicht ausgeschöpft. Anhand der in Bonn aufbewahrten Stücke ist die gesamte Produktionskette von bronzenen Götterfiguren nicht nur zu erschließen, sondern erstmalig in einem kohärenten Konvolut auch archäologisch dokumentiert. Während das Aussehen von antiken Gussformen für Kleinbronzen im Vollguss über Rückschlüsse anhand erhaltener Bronzefiguren schon früher skizziert werden konnte, treten deren tatsächliche Technologie und Aufbau nun anhand komplett erhaltener Objekte in den Blick. Dies ist insofern ein Glücksfall, als ja beim Wachsausschmelzverfahren – das nicht ohne Grund auch »Guss in verlorener Form« heißt, die Gussformen regelhaft zerstört wurden. Während die Deponierung der Artefakte in einem Grab rätselhaft bleibt, so sind besonders die Gussformen trotz ihres mehrheitlichen Charakters als »Ausschussware« dennoch als Belege einer ägyptischen Gusswerkstatt anzusehen, die den Guss von Bronzefiguren auf höchstem Niveau beherrschte. Das betrifft die verschiedenen Schichten der Formmäntel, die Konzeption der Gussformen und das von dieser Werkstatt angebotene Spektrum von Götterfiguren. Dort wurden neben Statuetten und Figürchen des Gottes Osiris und kleineren Amuletten auch Bronzebilder von solch bekannten Sujets wie der Isis mit Kind, dem Harpokrates oder dem Anubis im seriellen Verfahren gefertigt (zu weiteren Sujets ägyptischer Götterbronzen vgl. Weiß 2012).

Während die Artefakte von der Qubbet el-Hawa die hoch entwickelte Technologie des ägyptischen Bronzegusses um 500 v. Chr. belegen, so ist doch zu diskutieren, auf welche Vorläufer dieses Know-how zurückgeht (zum Metallhandwerk in Ägypten vgl. u. a. Scheel 1989; Ogden 2000) oder ob technologische Innovationen aus dem östlichen Mittelmeerraum dafür als Vorbild genommen werden können (vgl. die Beiträge in Curtis 1988). So ist dort doch im Zeitraum vom 6. zum 5. Jahrhundert v. Chr. ein technologischer Innovationsschub festzustellen, der im 4. Jahrhundert v. Chr. im griechischen Raum in der Hochzeit der Großbronzengüsse mündet (Bol

1985; Haynes 1992). Während in Griechenland zu dieser Zeit also lebens- bis überlebensgroße Bronze- statuen hergestellt werden können, deren Produk- tionsorte auch archäologisch dokumentiert sind (Zimmer 1990), lässt sich im spätzeitlichen Ägypten anhand der Werkstattabfälle von der Qubbet el- Hawa nun auch die »Hochtechnologie« in der seriellen Fertigung von Kleinbronzen nachweisen. Verschiedene Studien haben gezeigt, auf welchen Wegen Ideen und Innovationen im östlichen Mittel- meerraum zu dieser Zeit vermittelt worden sein können und unter welchen sozialen und politischen

Modalitäten sich dort eine umfassende Internatio- nalität etablierte (Boardman 2003; Vittmann 2003). Der Befund aus Ägypten, soviel ist klar, kann nicht isoliert betrachtet werden. Er ist stets eingebunden in die technologische Gemeinschaft dieser Zeit und dieses Raumes zu sehen. Im März 2015 sollen alle angesprochenen Arbeiten abgeschlossen sein. Die erzielten Ergebnisse werden im Rahmen eines inter- nationalen Workshops am Ägyptischen Museum der Universität Bonn Anfang März einem interdiszi- plinärem Fachpublikum präsentiert und zur Diskus- sion gestellt.

### Abgekürzt zitierte Literatur

- Aston 1999: D. Aston, Pottery from the Late New Kingdom to the Early Ptolemaic Period. Elephantine 19. Archäologische Veröffentlichungen 95 (Mainz 1999).
- 2011: D. Aston, The Saqqara Embalmers' Caches Reconsidered: Typology and Chronology. In: D. Aston/B. Bader / C. Gallorini / P. Nicholson / S. Buckingham (Hrsg.), Under the Potter's Tree. Studies on Ancient Egypt Presented to Janine Bourriau on the Occasion of her 70<sup>th</sup> Birthday. *Orientalia Lovaniensia Analecta* 204 (Leuven 2011) 45-79.
- Auenmüller 2014a: J. Auenmüller, Die Ergebnisse der naturwissen- schaftlichen Untersuchungen. In: M. Fitzenreiter / Ch. E. Loe- ben / D. Raue / U. Wallenstein, Gegossene Götter – Metall- handwerk und Massenproduktion im Alten Ägypten [Ausstel- lungskat. Bonn] (Rahden/Westf. 2014) 107-111.
- 2014b: J. Auenmüller, Die Ergebnisse der bildgebenden Verfah- ren. In: M. Fitzenreiter / Ch. E. Loeben / D. Raue / U. Wallenstein (Hrsg.), Gegossene Götter – Metallhandwerk und Massenpro- duktion im Alten Ägypten [Ausstellungskat. Bonn] (Rahden/ Westf. 2014) 113-126.
- 2014c: J. Auenmüller, Katalog der Objekte. Kat. I.1-1.61. In: M. Fitzenreiter / Ch. E. Loeben / D. Raue / U. Wallenstein (Hrsg.), Gegossene Götter – Metallhandwerk und Massenproduktion im Alten Ägypten [Ausstellungskat. Bonn] (Rahden/Westf. 2014) 218-279.
- Boardman 2003: J. Boardman, Die Perser und der Westen. Eine archäologische Untersuchung zur Entwicklung der Achämeni- dischen Kunst. *Kulturgeschichte der Antiken Welt* 96 (Mainz 2003).
- Bol 1985: P. C. Bol, Antike Bronzetechnik. Kunst und Handwerk antiker Erzbildner (München 1985).
- Budka 2010: J. Budka, Bestattungsbrauch und Friedhofsstruktur im Asasif. Eine Untersuchung der spätzeitlichen Befunde anhand der Ergebnisse der österreichischen Ausgrabungen in den Jahren 1969-1977. *Untersuchungen der Zweigstelle Kairo des Österrei- chischen Archäologischen Instituts* 34 (Wien 2010).
- Bühning-Polaczek/Wirth 2014: A. Bühning-Polaczek / M. Wirth, Gussimulation des Gordiankopfes. In: Gebrochener Glanz. Römische Großbronzen am UNESCO-Welterbe Limes [Ausstel- lungskat.] (Bonn 2014) 197-198.
- Curtis 1988: J. Curtis (Hrsg.), *Bronzeworking Centres of Western Asia c. 1000-539 B.C.* (London 1988).
- Edel 1974: E. Edel, Vorbericht über die Arbeiten in den Gräbern der Qubbet el Hawa bei Assuan. *Zeitschrift für Ägyptische Sprache und Altertumskunde* 100, 1973, 2-6.
- Edel/Seyfried/Vieler 2008: E. Edel / K.-J. Seyfried / G. Vieler, Die Felsgräbernekropole der Qubbet el-Hawa bei Assuan. I. Abtei- lung, Band 1-3 (Paderborn 2008).
- Fitzenreiter 2013: M. Fitzenreiter, Tierkulte im pharaonischen Ägypten. *Ägyptologie und Kulturwissenschaft* 5 (München 2013).
- Fitzenreiter/Auenmüller 2014a: M. Fitzenreiter / J. Auenmüller, Eine Gusswerkstatt auf der Qubbet el-Hawa? In: M. Fitzenreiter / Ch. E. Loeben / D. Raue / U. Wallenstein (Hrsg.), Gegossene Götter – Metallhandwerk und Massenproduktion im Alten Ägypten [Ausstellungskat. Bonn] (Rahden / Westf. 2014) 101-106.
- 2014b: M. Fitzenreiter / J. Auenmüller, Cast Away. Gussformen von der Qubbet el-Hawa / Ägypten. *Antike Welt* 6/2014, 58-64.
- Fleming 1982-1983: S. J. Fleming, Lead Isotope Analyses of Late Period Egyptian Bronzes. *Museum Applied Science Center for Archaeology Journal* 2, 1982-1983, 65-69.
- Haynes 1992: D. Haynes, The Technique of Greek Bronze Statuary (Mainz 1992).
- Meinel/Willer 2014: D. Meinel/F. Willer, Die Computertomographie. In: Gebrochener Glanz. Römische Großbronzen am UNESCO- Welterbe Limes [Ausstellungskat.] (Bonn 2014) 189-191.
- Morenz/Höveler-Müller/El Hawary 2011: L. D. Morenz / M. Höve- ler-Müller / A. El Hawary (Hrsg.), Zwischen den Welten. Grabfun- de von Ägyptens Südgrenze [Ausstellungskat. Bonn] (Rahden/ Westf. 2011).

- Ogden 2000: J. Ogden, Metals. In: P. T. Nicholson / I. Shaw (Hrsg.), *Ancient Egyptian Materials and Technology* (Cambridge 2000) 148-176.
- Raven 1983: M. J. Raven, Wax in Egyptian magic and symbolism. *Oudheidkundige mededelingen uit het Rijksmuseum van Oudheden* 64, 1983, 7-47.
- 1990: M. J. Raven, Resin in Egyptian magic and symbolism. *Oudheidkundige mededelingen uit het Rijksmuseum voor Oudheden te Leiden* 70, 1990, 7-22.
- Riederer 2002: J. Riederer, Die Berliner Datenbank von Metallanalysen kulturgeschichtlicher Objekte IV. Objekte der mitteleuropäischen Bronzezeit sowie etruskische, sardische, griechische, ägyptische, vorderasiatische Objekte. *Berliner Beiträge zur Archäometrie* 19, 2002, 72-226.
- Rösing 1990: W. Rösing, Qubbet el-Hawa und Elephantine. Zur Bevölkerungsgeschichte von Ägypten (Stuttgart 1990).
- Scheel 1989: B. Scheel, *Egyptian Metalworking and Tools*. *Shire Egyptology* 13 (Aylesbury 1989).
- Schulze/Lehmann 2014: M. Schulze / R. Lehmann, Alte und neue Analyseverfahren an den Bronzen des Museum August Kestner und was sie uns verraten. In: M. Fitzenreiter / Ch. E. Loeben / D. Raue / U. Wallenstein (Hrsg.), *Gegossene Götter – Metallhandwerk und Massenproduktion im Alten Ägypten* [Ausstellungskat. Bonn] (Rahden/Westf. 2014) 133-154.
- Serpico 2000: M. Serpico, Resins, amber and bitumen. In: P. T. Nicholson / I. Shaw (Hrsg.), *Ancient Egyptian Materials and Technology* (Cambridge 2000) 430-474.
- Serpico/White 2000: M. Serpico / R. White, Oil, fat and wax. In: P. T. Nicholson / I. Shaw (Hrsg.), *Ancient Egyptian materials and technology* (Cambridge 2000) 390-429.
- Shortland 2006: A. J. Shortland, Application of lead isotope analysis to a wide range of Late Bronze Age Egyptian materials. *Archaeometry* 48/4, 2006, 657-669.
- Steiger-Nawarotzky/Willer 2003: B. Steiger-Nawarotzky / F. Willer, Experimentelle Archäologie. Bronzezeitlicher Bronzeguss 1: Vorbereitung. Das Rheinische Landesmuseum Bonn: *Berichte aus der Arbeit des Museums* 2003/2, 31-37.
- 2005: B. Steiger-Nawarotzky / F. Willer, Bronzezeitlicher Bronzeguss 2: Herstellung der Gussformen und Guss. *Berichte aus dem Rheinischen Landesmuseum Bonn* 2005/1-4, 5-12.
- Stos-Gale 1995: Z. Stos-Gale, Lead isotope provenance studies for metals in ancient Egypt. In: F. A. Esmael (Hrsg.), *Proceedings of the First International Conference on ancient Egyptian mining, metallurgy and conservation of metallic artifacts*, Cairo, 10-12 April 1995 (Kairo 1995) 273-285.
- Vittmann 2003: G. Vittmann, Ägypten und die Fremden im ersten vorchristlichen Jahrtausend. *Kulturgeschichte der Antiken Welt* 97 (Mainz 2003).
- Weiß 2012: K. Weiß, Ägyptische Tier- und Götterbronzen aus Unterägypten. Untersuchungen zu Typus, Ikonographie und Funktion sowie der Bedeutung innerhalb der Kulturkontakte zu Griechenland. *Ägypten und Altes Testament* 81 (Wiesbaden 2012).
- Wentscher 2011: J. Wentscher, Persönliche Erinnerungen an die Ausgrabungen auf der Qubbet el-Hawa. In: L. D. Morenz / M. Höveler-Müller / A. El Hawary (Hrsg.), *Zwischen den Welten. Grabfunde von Ägyptens Südgrenze* [Ausstellungskat. Bonn] (Rahden/Westf. 2011) 125-136.
- Willer 2007: F. Willer, Experimental Reconstruction of the Bronze Casting Process of the »Smiting God« on a Bull. *Berytus: Archaeological Studies* 50, 2007, 49-58.
- Willer/Baumer/Koller 2006: F. Willer / U. Baumer / J. Koller, Die Metallklebemasse am römischen Reiterhelm aus Xanten-Wardt. *Bonner Jahrbücher* 206, 2006, 145-157.
- Zimmer 1990: G. Zimmer, Griechische Bronzegusswerkstätten. Zur Technologieentwicklung eines antiken Kunsthandwerks (Mainz 1990).

## Zusammenfassung / Summary

### **Werkstattfunde eines ägyptischen Bronze gießers der Spätzeit – Ein einzigartiges Konvolut im Kontext aktueller Forschung**

Im Ägyptischen Museum der Universität Bonn werden weltweit einmalige Objekte eines altägyptischen Bronze-gussateliers aufbewahrt. Sie stammen von der Qubbet el-Hawa, einem Felsgräberberg gegenüber der modernen Stadt Assuan und wurden dort im Jahr 1969 von Bonner Ägyptologen unter Elmar Edel in Grab QH 207 entdeckt. Das Grab datiert an das Ende des Alten Reiches (2347-2216 v. Chr.) und wurde in der ägyptischen Spätzeit (664-332 v. Chr.) für Bestattungen einer lokalen Priesterfamilie von der Nilinsel Elephantine wiederverwendet. Die genannten Artefakte stammen aus dem Kontext der jüngsten Bestattung (»Bestattung 1«), ihre genaue Lage ist damals jedoch nicht dokumentiert worden. Dennoch bieten eben diese Artefakte Ägyptologen, Restauratoren und Naturwissenschaftlern zum ersten Mal die Möglichkeit, die Bronze-gusstechnologie der Spätzeit mithilfe eines breiten Spektrums moderner Analysemethoden zu erforschen.

### **Finds of a Late Period Egyptian Bronze Caster Workshop – Current research on an unparalleled group of artifacts**

The Egyptian Museum of Bonn University (Germany) houses a unique collection of bronze casting workshop materials from the Qubbet el-Hawa necropolis, opposite from modern Aswan. They were discovered in 1969 by members of the Bonn excavation team under Elmar Edel in tomb QH 207. This tomb dates back to the end of the Old Kingdom (2347-2216 BC). It was reused during the Late Period (664-332 BC) for several burials of members of the local Elephantine priesthood. The aforementioned artifacts belong to the latest burial (»Bestattung 1«), but their specific archaeological context has not been recorded in detail. Nevertheless, they enable Egyptologists, conservators and natural scientists alike to thoroughly study the technology of Bronze casting in the Late Period for the first time using a wide range of modern methods of analysis.

## Schlagworte

Ägypten / Spätzeit / Gussformen / Bronze-guss / Wachs-ausschmelzverfahren / bildgebende Verfahren / naturwissenschaftliche Analysen / Computertomographie