

Roland Schwab, Gerhard Eggert, Ernst Pernicka und Frank Willer

Zu den Bronzefunden aus dem Schiffswrack von Mahdia

Alte Proben, neue Untersuchungen

Bei der neueren wissenschaftlichen Bearbeitung des antiken Schiffswracks von Mahdia im Rheinischen Landesmuseum Bonn während der Jahre 1987 bis 1994 wurden von den meisten Bronzefunden Proben entnommen und deren chemische Zusammensetzung ermittelt¹. Vordringliches Ziel dieser Untersuchungen war es, die Zusammengehörigkeit von Einzelstücken oder Objektensembles zu klären.

Um auch die jeweilige Herkunft der Gegenstände aus der Ladung einordnen zu können, wurden zudem erste Untersuchungen der stabilen Isotope von Blei an den Stücken aus diesem Material durchgeführt². Man vermutete eine ausgeprägte Verwendung von Altmetall bei der Herstellung der Bronzen und erwartete folglich von den Materialanalysen kaum aussagekräftige Ergebnisse zum Produktionsort der Fundstücke. Daher lag der Schwerpunkt auf einer schnellen, kostengünstigen und möglichst zerstörungsarmen Methode. Aus diesem Grund entschied man sich in erster Linie für die energiedispersive Röntgenfluoreszenzanalyse zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung. Weil sich aber zeigte, dass vor allem die Bleiwerte mit systematischen Fehlern behaftet waren, wurde bei einigen Proben der tatsächliche Gehalt mittels Atomabsorptionsspektrometrie bestimmt und im Falle der Herme wurde die Legierung zusätzlich durch Neutronenaktivierung untersucht³. Weitere Analysen wurden 1996 durchgeführt und sind bislang unpubliziert.

Anlass für eine erneute Beschäftigung mit diesem älteren Probenmaterial war die Frage nach der Echtheit einer Herme unbekannter Herkunft im Museum J. Paul Getty in Malibu (Abb. 1), die wegen ihrer deutlichen Ähnlichkeit zur Herme von Mahdia (Abb. 2) hinsichtlich ihrer Herkunft, Datierung und kunsthistorischen Einordnung diskutiert wird⁴. Neben gemeinsamen Äußerlichkeiten zeigen beide auf den ersten Blick auch eine verwandte Legierungszusammensetzung⁵. Bei einer eingehenden Untersuchung zur Herstellungstechnik offenbarten sich jedoch

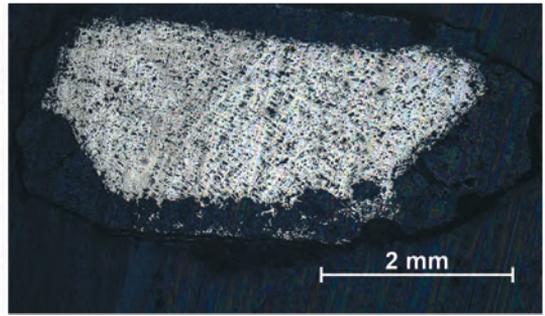
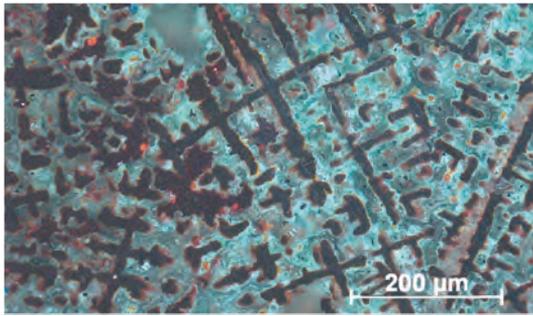
¹ Pernicka/Eggert, Zusammensetzung.

² Begeemann/Schmitt-Strecker, Blei.

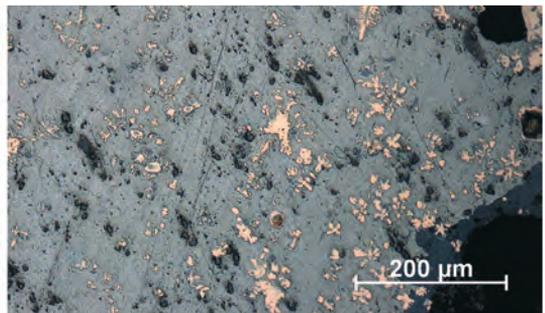
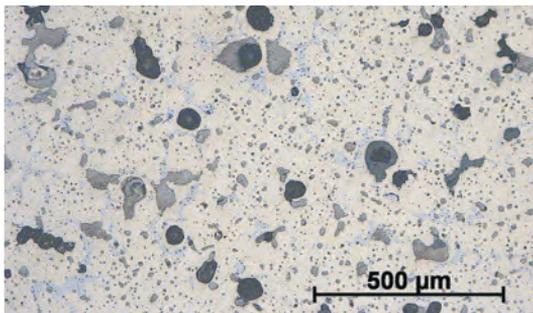
³ Pernicka/Eggert, Zusammensetzung.

⁴ Mattusch, Herm; Mattusch, Statuary 796; Pernicka/Eggert, Zusammensetzung 1048; Willer, Herme 969.

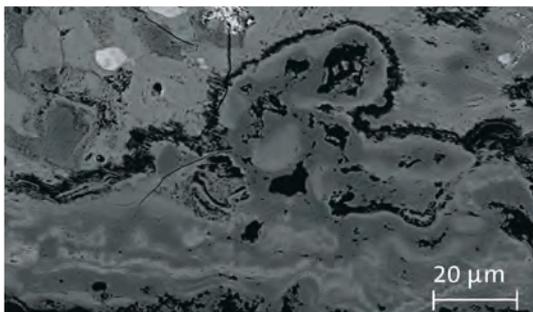
⁵ Zweifel gab es jedoch an den Angaben zum Gehalt an Kobalt in der Publikation über die Herme im Getty-Museum. Vgl. Pernicka/Eggert, Zusammensetzung 1048 und Tab. 3; D. A. Scott / J. Podany in: M. True / J. Podany (eds.), *Small Bronze Sculpture from the Ancient World*, Kongr. Malibu 1989 (Malibu 1990) 43 Tab. 2.



- (1) Interdendritisch korrodiertes Kapitellblech von Mahdia mit Resten unkorrodierten Metalls. Im polarisierten Licht erscheint der metallische Mischkristall schwarz, während die korrodierten Bereich charakteristische Mischfarbeneffekte aufweisen. – (2) Querschnitt durch einen Reparaturflicken des Agon von Mahdia. Die schwarzen Punkte entsprechen den irregulär verteilten Bleieinschlüssen und Lunklern (Gussfehler). Die Metalloberflächen sind vollkommen korrodiert.



- (3) Die lichtmikroskopische Detailaufnahme von einem Reparaturflicken des Agon von Mahdia zeigt die irreguläre Verteilung von dunkelgrauen Bleipartikeln, schwarzen Gussblasen und blaugrauem Delta-Eutektoid. Der durch metallographische Bildanalyseverfahren ermittelte Bleigehalt beträgt 15,3 Prozent ($s = 1,7$). – (4) Phasenseparation in einer spätlatènezeitlichen Bleibronze aus dem Oppidum von Manching. In einem durch Blockseigerung entstandenen Bleitropfen hat sich Kupfer dendritisch ausgeschieden.



- (5) Der Ordnungszahlkontrast der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme von der Patina des Reparaturblechs des Agon von Mahdia zeigt die äußere Korrosionsschicht mit dunkelgrauem Kupfersulfid zwischen mittelgrauen Kupferoxidverbindungen und hellgrauen Zinnoxidverbindungen, in die weiße Partikel von Blei beziehungsweise Bleioxid eingebaut sind. – (6) Im Aufbau der Patinaschicht des Reparaturblechs des Agon von Mahdia resultiert der hohe Rückstreuoeffizient aus den angereicherten Zinnoxidverbindungen. Sekundäre Verwachsungen der Korrosion mit Sedimentbestandteilen haften oberflächlich an.



1 und 2 Hermen des Dionysos im Museum J. Paul Getty (links) und aus dem Schiffsfund von Mahdia (rechts).

	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Ag	Sn	Sb	Te	Au	Pb	Bi
soll.	0,11	n.z.	0,122	87,7	0,56	0,0213	0,001	0,059	10,6	0,033	n.z.	n.z.	0,74	0,002
RFA	0,12	0,02	0,12	88	0,5	0,01	<0,01	0,06	10,2	0,03	n.b.	<0,01	0,72	0,01
s	0,01	0,01	0,01	0,5	0,02	0,01		0,003	0,2	0,004			0,02	0,002

Tabelle 1 Mittelwerte und Standardabweichung $\pm s$ im Vergleich mit den zertifizierten Werten (\pm Soll.) des bei allen Messungen mit Röntgenfluoreszenzanalyse mitbestimmten Standards BAM 211.

deutliche Unterschiede im Produktionsverfahren⁶. Daher wurde die Herme im Getty-Museum nochmals beprobt und untersucht⁷. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden auch die Proben der Bronzen von Mahdia nochmals analysiert, die dank der seinerzeit angewendeten zerstörungsfreien Röntgenfluoreszenzanalyse noch zur Verfügung standen.

Neben nur noch einer Probe von der Mahdiaherme wurden weitere hundertachtundzwanzig Metallproben des Schiffsfundes, die 1994 nicht für die Untersuchung mit Atomabsorptionsspektrometrie verbraucht worden waren, erneut analysiert. Es wurden auch einige bei der ersten Untersuchung unberücksichtigte Probenfragmente für metallographische Analysen herangezogen. Dadurch sollten Fragen zur Korrosion und zur möglichen intentionellen Farbgebung der Bronzen nachgegangen werden. Da die Funde von Mahdia seit 1995 wieder in Tunis sind, stand nur das zuvor entnommene Probenmaterial zur Verfügung, das teilweise nicht mehr für eine Analyse ausreichte. Manche Fragestellungen und Probleme, wie zum Beispiel die Frage nach dem vereinzelt Auftreten von Zink in den Legierungen oder die im Laufe der Neuuntersuchung offensichtlich gewordenen Verwechslungen mancher Proben, konnten daher nicht vollständig geklärt werden.

Zu den Untersuchungsmethoden

Die schon bei den ersten Untersuchungen der Bronzefunde von Mahdia angewendete Röntgenfluoreszenzspektrometrie ist ein zerstörungsfreies Multielementanalyseverfahren, bei dem es inzwischen auf Grund langjähriger Erfahrungen erhebliche Verbesserungen für die Untersuchung von Nicht-Eisen-Metallen aus kulturgeschichtlichen Zusammenhängen gibt. Die chemische Zusammensetzung aller noch vorhandenen Proben wurde deshalb mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse entsprechend dem von Joachim Lutz und Erich Pernicka beschriebenen Korrekturverfahren ermittelt⁸. Für diese neuen Analysen wurden die Korrekturfaktoren neu berechnet und durch mehrfache Wiederholung jeder Messung Richtigkeit und Präzision er-

⁶ Bei einem einwöchigen Forschungsaufenthalt im November 1991 am Getty-Museum untersuchte einer der Autoren (F. W.) die dortige Herme. Die Gusstechnik beider Hermen ist bereits dokumentiert. Vgl. Willer, Herme; Scott/Podany (Anm. 5) 47–58.

⁷ Die Proben wurden 2005 von Jeff Maish, Associate Conservator of Antiquities im Museum J. Paul Getty entnommen und von Autor G.E. an das Institut für Archäometrie der Technischen Universität Freiberg weitergeleitet, wo erste Analysen durchgeführt wurden. Wiederholungen der Messungen und die Neuanalyse der Mahdiafunde erfolgte 2007 und 2008 am Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie in Mannheim.

⁸ Die Grundlagen der Methode und die Probenaufbereitung sind bereits bei Pernicka/Eggert, Zusammensetzung beschrieben, detaillierte Angaben über Korrekturverfahren

und Nachweisgrenzen finden sich bei J. Lutz / E. Pernicka, *Archaeometry* 38, 1996, 313–323.

⁹ Pernicka/Eggert, *Zusammensetzung* Tab. 1–9.

¹⁰ Grundlagen und weiterführende Literatur zur Klassifikation s. E. Pernicka, *Jahrb. RGZM* 37, 1990, 76–99.

¹¹ So erforderte z. B. die Einführung der Feuervergoldung die Modifizierung der bis dahin weitgehend üblichen, hoch bleihaltigen Legierungen. Vgl. W.A. Oddy u. a. in: True / Podany (Anm. 5) 103–124; W.A. Oddy in: T. Drayman-Weisser (ed.), *Gilded metals. History, technology and conservation* (London 2000) 10.

¹² Vgl. E. R. Caley in: S. Doeringer / D. G. Mitten / A. Steinberg (Hrsg.), *Art and technology. A symposium on classical bronzes* (London 1970) 37–49; G. Lahusen / E. Formigli, *Römische Bildnisse aus Bronze* (München 2001).

heblich verbessert, so dass die Zuordnung der Einzelteile nun auf besser gesicherter Grundlage ruht.

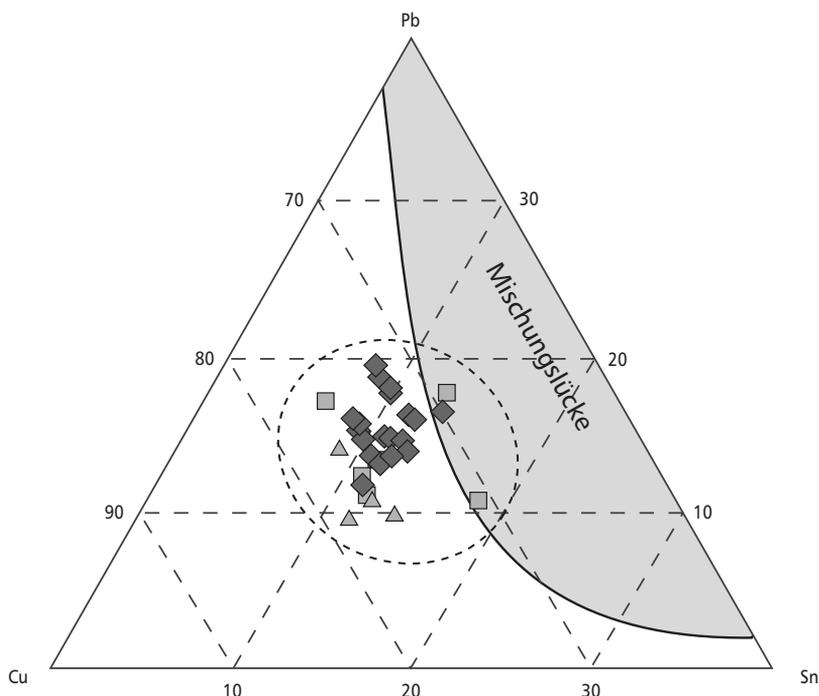
Für eine Klassifizierung der Objekte anhand ihrer chemischen Zusammensetzung muss die Standardabweichung berücksichtigt werden, die nicht für jeden einzelnen Wert (s. u., Tabelle 3) angegeben werden kann und deshalb stellvertretend aus Tabelle 1 entnommen werden muss. Hier ist anzumerken, dass die Standardabweichung bei den Mahdiafunden in vielen Fällen relativ hoch ist, da das Probenmaterial sehr viel inhomogener ist als dasjenige moderner Standards. In erster Linie wichtig für die Präzision und Richtigkeit bei der Analyse von Metallfunden ist deren Erhaltungszustand. Der teilweise sehr hohe Eisengehalt bei den Ergebnissen der ersten Analysen verweist auf Verunreinigung durch Korrosion⁹. Die Proben wurden deshalb soweit wie möglich unter dem Binokular ausgelesen, wobei wegen des Erhaltungszustandes etwa im Fall eines Kapitellblechs (Taf. 1, 1) keine korrosionsfreie Probe vorliegt.

Bei den vorwiegend bleihaltigen Bronzen des Schiffsfundes von Mahdia tritt das Problem der spektralen Interferenz von Blei und Arsen auf. Da intensitätsschwache Linien für die Quantifizierung von Arsen herangezogen werden müssen, wird die Nachweisempfindlichkeit für Arsen herabgesetzt, und die gemessenen Werte können deshalb häufig nicht für die Auswertung benutzt werden. Für die Zuordnung der einzelnen Objekte durch die multivariate Datenanalyse wurden deshalb nur die Spurenelemente Kobalt, Nickel, Silber, Antimon und Tellur verwendet¹⁰. Die Analysen sind in Tabelle 3 jeweils zu Objektgruppen zusammengefasst und entsprechend der Ergebnisse der Clusteranalyse aufeinanderfolgend zusammengestellt.

Untersuchungen an antiken Metallobjekten zeigen, dass in der Regel für bestimmte Objektgruppen standardisierte Legierungen verwendet wurden, die zeitlich und regional variieren. Änderungen beruhen meist auf technischer Weiterentwicklung, ökonomisch veränderten Gegebenheiten oder einem neuen Zeitgeschmack¹¹. In der Forschung zu antiken Großbronzen versucht man deshalb auch gelegentlich, die Anteile der Legierungselemente Blei und Zinn chronologisch auszuwerten¹². Die These, höhere Bleigehalte in Bronzestatuen würden erst bei hellenistischen Bronzen auftreten, ist vermutlich auf Earle Caley zurückzuführen. Die Kriterien für solche Einordnungen beruhen auf dem Verhältnis zwischen Zinn und Blei sowie auf dem



3 Der sogenannte Agon von Mahdia
nach der Restaurierung (1994)



4 Kupferecke des ternären Systems Kupfer-Zinn-Blei mit der Mischungslücke nach Hanson und Pell-Walpole (s. Anm. 18) und den Zusammensetzungen des Agon und der Herme von Mahdia sowie der Getty-Herme. Die theoretischen Zinngehalte der Herme von Mahdia (Quadrate) sind als Differenz zu den durch Atomabsorptionsspektrometrie gemessenen Kupfer-, Blei- und Antimonwerten errechnet. Die Daten der Getty-Herme (Dreiecke) entsprechen den Werten in Tabelle 3 und den Angaben von Scott und Podany (s. Anm. 5).

absoluten Bleigehalt, da römische Statuen tendenziell mehr Blei enthalten als ihre griechischen Vorbilder¹³. Der sogenannte Agon (Abb. 3) – wir verwenden hier diese Bezeichnung als eingeführten Namen weiter – sowie die beiden hier untersuchte Bronzehermen enthalten aber als späthellenistische Großbronzen auch nach dem Ergebnis der erneuten Analysen einen so hohen Bleianteil, als ob sie in die Kaiserzeit gehörten, also zur Gruppe C der römischen Bronzen nach Caley beziehungsweise zur Gruppe B nach Götz Lahusen und Edilberto Formigli.

Die Ermittlung der tatsächlichen Bleigehalte von Kupferlegierungen mit hohen Bleianteilen ist aus den unten weiter erläuterten Gründen bei der Analyse antiker Objekte immer schwierig. Es wird deshalb in der Publikation von 1994 auch der Effekt der Makroseigerungen von Bleibronzen und die Problematik der Probenmenge bei Großbronzen besprochen, wobei von den stark variierenden Bleigehalten der Herme auf Schwerkraftseigerung durch die Lage der Gussform in der Gießgrube gefolgert wird¹⁴. Diese Schlussfolgerung lässt sich bei neuerlicher Betrachtung nicht aufrecht erhalten, weil die Hauptlegierungsbestandteile irregulär verteilt sind und die Konzentrationsunterschiede bereits in geringen Abständen wahrnehmbar sind, wie sich auch am Beispiel des sogenannten Agon zeigen lässt.

Da das Zweistoffsystem von Kupfer und Zinn durch eine Reihe von peritektischen Reaktionen mit ausgedehnten Erstarrungsintervallen charakterisiert ist, treten infolge der starken Gleichgewichtsverzögerung Mischkristallseigerungen auf. Durch die Zugabe von Blei, welches das Fließvermögen der Bronze und damit die Abbildungsgenauigkeit des Gusses verbessert, werden zwar auch die Erstarrungstemperaturen modifiziert, die Erstarrungsvorgänge des Systems von Kupfer und Zinn werden jedoch praktisch nicht beeinflusst. In der Regel scheidet sich bei

Probe	Methode	Pb	s	Sn	s
Späne	RFA	12,1	0,9	13,3	1,0
Flachschliff 1	RFA	12,3	0,6	14,2	0,8
Flachschliff 2	RFA	15,1	0,5	14,8	0,7
Querschliff	EDX	12,5	0,4	13,8	0,5

Tabelle 2 Bestimmung von Blei- und Zinngehalt in verschiedenen Proben eines Reparaturflickens vom Agon von Mahdia. Die Elementangaben in Masseprozent entsprechen dem arithmetischen Mittelwert der mehrfach wiederholten Messungen mit der jeweiligen Standardabweichung σ . EDX = energiedispersives Röntgenspektrometer; RFA = Röntgenfluoreszenzanalyse.

auch der Zinngehalte auftreten können¹⁶. Im binären System von Kupfer und Blei existiert auch eine Mischungslücke im flüssigen Zustand, die durch den Zinnanteil noch erweitert wird und infolge des breiten Erstarrungsintervalls auch zur vollständigen Phasenseparation von Legierungen führen kann, deren Blei- und Zinngehalte außerhalb dieser Mischungslücke liegen (Abb. 4). Die Bleibronze entmischt sich dabei in eine Kupfer-Blei-(Zinn)-Legierung und eine Blei-(Zinn)-Kupfer-Legierung¹⁷ (Taf. 1, 4). Es kommt aber in den Gussstücken in der Regel nicht zur vertikalen Schichtbildung durch die Schwerkraftseigerung, sondern zur Blockseigerung, indem sich das Blei entsprechend der vorhandenen Wärmegradienten im Gussstück verteilt¹⁸. Der entscheidende Faktor für das Ausmaß jeder Form der Seigerung ist deshalb die Zeit, die das Gussmetall für die Erstarrung benötigt, welche bei einer Bronzefigur ganz wesentlich durch die Wandstärke, die Wärmeleitfähigkeit der Gussform sowie durch die Anzahl, Lage und Stärke der Anschnitte (Gusskanäle) beeinflusst wird¹⁹. Es ist deshalb mit einer lokalen Inhomogenität und nicht mit einem vertikalen Konzentrationsgradienten zu rechnen, wie bei den ersten Untersuchungen vor 1994 angenommen wurde.

Dies soll beispielhaft an der Figur des sogenannten Agon (Abb. 3) beziehungsweise an einem antiken Reparaturblech dieser Statue demonstriert werden²⁰. Diese Plastik besteht aus der gleichen Legierung wie die Herme, ist aber gusstechnisch anders, da sie im Stückgussverfahren aus einzelnen Teilen montiert und nicht in einem Arbeitsgang gegossen wurde²¹. Dadurch sind die Gießchargen kleiner, weshalb die Parameter wie Gießtemperatur und Vorwärmtemperatur anders

Bleibronzen neben dem kupferreichen Alpha-Mischkristall und den zinnreichen intermetallischen Phasen metallisches Blei in Form von irregulär geformten und verteilten Partikel aus, da Blei auch im festen Alpha-Mischkristall unlöslich ist¹⁵ (Taf. 1, 2 und 1, 3). Diese können besonders bei antiken Metallgüssen in ihrer Form und Verteilung so heterogen sein, das bei der Analyse solcher Legierungen erhebliche Abweichungen der Bleianteile, aber

¹³ Caley (vorige Anm.) 41; Lahusen/Formigli (vorige Anm.) 478; D. Haynes, *The technique of Greek bronze statuary* (Mainz 1992) 83.

¹⁴ Pernicka/Eggert, *Zusammensetzung* 1048. Während der Schwerkraftseigerung kann es bei Legierungen mit großen Dichteunterschieden der Komponenten zu einer Entmischung in der Schmelze kommen. Bei Kupferlegierungen findet sie nur in geringem Umfang statt und hat in der Regel wenig technische Bedeutung.

¹⁵ Die Inhomogenität der Blei- und Zinnverteilung zeigen metallographische Untersuchungen an mehreren antiken Großbronzen, unter anderem auch an der Herme im Getty-Museum. A. Steinberg in: W. J. Young (ed.), *Application of science in the examination of works of art* (Boston 1973) 129–134; Scott/Podany (Anm. 5) Abb. 13 c–d; D. A. Scott, *Metallography and microstructure*

of ancient and historic metals (Malibu 1991) Farbabb. 9 und 20.

¹⁶ M. Picon / S. Boucher / J. Condamin, *Gallia* 24, 1966, 198 f.; M. J. Hughes / J. P. Northover / B. E. P. Staniaszek, *Oxford Journal Arch.* 1, 1982, 359–364.

¹⁷ Bei besonderen spätlatènezeitlichen Legierungen fördern die hohen Antimongehalte die Bleiseigerung. Vgl. M. Picon / S. Boucher / J. Condamin, *Gallia* 26, 1968, 257–259.

¹⁸ D. Hanson / W. T. Pell-Walpole, *Chill-cast tin bronzes* (London 1951).

¹⁹ Picon/Boucher/Condamin (Anm. 16) 207; M. Ratka / P. R. Sahn in: G. Zimmer / N. Hackländer (Hrsg.), *Der betende Knabe. Original und Experiment. Begleith. zur Ausst. Bonn und Berlin 1997* (Berlin 1997) 67–80.

²⁰ Maße: 2,5 cm × 0,5 cm × 0,2–0,3 cm, Gewicht ca. 1,5 g.

²¹ Willer, *Herme* 969; Willer, *Agon*.

gewählt werden mussten. Da man aber anscheinend die Parameter durch das Anschnittsystem kompensieren konnte, gehen wir dennoch von gleichen Bedingungen aus²².

Das Reparaturblech war bei der Restaurierung nicht mehr einsetzbar und blieb daher als Probenmaterial verfügbar (Tabelle 2). Die Analyse bestätigt, dass dieser Flicker zur Kaschierung von Gussfehlern in der Herstellungsphase diente und nicht bei einer späteren Reparaturarbeit hinzugefügt wurde. Er wurde bei der Untersuchung in vier Teile zerteilt, so dass von einem Teilstück eine Bohrprobe (80 mg) entnommen und von den übrigen Teilen ein Querschleiff sowie zwei Flachsleiffe erstellt wurden. Die Bohrprobe wurde im Bereich des Flachsleiffs 1 entnommen, während der Querschleiff und der Flachsleiff 2 von der anderen Hälfte des Bleches stammen. Die Zusammensetzung der Bohrprobe und der Flachsleiffe wurde mit Röntgenfluoreszenzanalyse bestimmt. Bei dieser Untersuchung wird ein stets gleich großer Bereich gemessen, der durch die Wahl der Blende definiert ist, welche den Strahldurchmesser bestimmt. Im Falle des Querschleiffes (Taf. 1, 2) war der metallisch erhaltene Bereich in der Breite kleiner als der mögliche Strahldurchmesser, so dass die Korrosionsschichten unweigerlich erfasst wurden. Daraus resultierten drastisch höhere Messwerte für den Bleianteil und vor allem für den Zinngehalt. Die betreffenden Werte wurden daher nicht in Tabelle 2 aufgenommen. Die quantitative Elementverteilung von Blei und Zinn beim Querschleiff wurde deshalb durch die Röntgenmikrobereichsanalyse mit einem energiedispersiven Röntgenspektrometer im Rasterelektronenmikroskop als Flächenanalysen ermittelt.

Wenn man die Analyseergebnisse für die gesamte Figur des Agon in einem Histogramm aufträgt, erhält man für Blei zwei Maxima (Abb. 5), die sich auch in den Ergebnissen des Reparaturflickens widerspiegeln (Tabelle 2). Entsprechend ist der Mittelwert aller Messungen des Flickens mit demjenigen aller Ergebnisse der Gesamtfigur identisch. Die Schwankung der Legierungselemente Zinn und vor allem Blei sind also bereits in diesem Flicker annähernd so groß wie in der Statue, während die Spurenelemente im Bereich der Standardabweichung bleiben (Tabellen 1 und 3). Die Zusammensetzung des Flickens ist folglich chemisch identisch mit der Zusammensetzung der gesamten Figur. Das Reparaturmetall entspricht also dem Gussmetall und die Analyse des Flickens ist repräsentativ für die gesamte Plastik, während die Effekte der Makroseigerung horizontal und nicht vertikal verteilt auftreten. Dies kann zwar nicht zwangsläufig für alle Großplastiken postuliert werden, aber es zeigt, dass eine einzige Probe repräsentativ sein kann, wenn sie in ausreichender Menge genommen wird²³.

Ein weiteres Beispiel für die Abweichungen in der Konzentration der Hauptelemente sind die sechs Katapultspannbuchsen. Nach ihrer Morphologie gehören sie paarweise zu drei verschiedenen Geschützen²⁴. Diese Zuordnung spiegelt sich auch in der Zusammensetzung der Legierungs- und Spurenelemente der ersten Analysen wider. Es zeigt sich bei erneuter Untersuchung wiederum, dass tatsächlich jeweils zwei Buchsen völlig gussgleich sind, wobei die Unterschiede im Zinngehalt der Buchsen von Katapult 1 im Rahmen der Standardabweichung liegen, während die Bleigehalte von Katapult 3 inhomogene Güsse verraten²⁵. Die Zusammengehörigkeit der jeweiligen Spann-

²² Ratka/Sahm (Anm. 19) 71f.

²³ Vgl. E. Pernicka, *Jahrb. RGZM* 31, 1984, 517–531.

²⁴ Baatz, Katapultteile.

²⁵ Vgl. Pernicka/Eggert, *Zusammensetzung* 1051.

²⁶ Was auch dafür spricht, dass die Katapulte nicht zum Schiff gehörten, sondern die Buchsen eventuell als Altmetall mitgeführt wurden. Vgl. Baatz, *Katapultteile* 704.

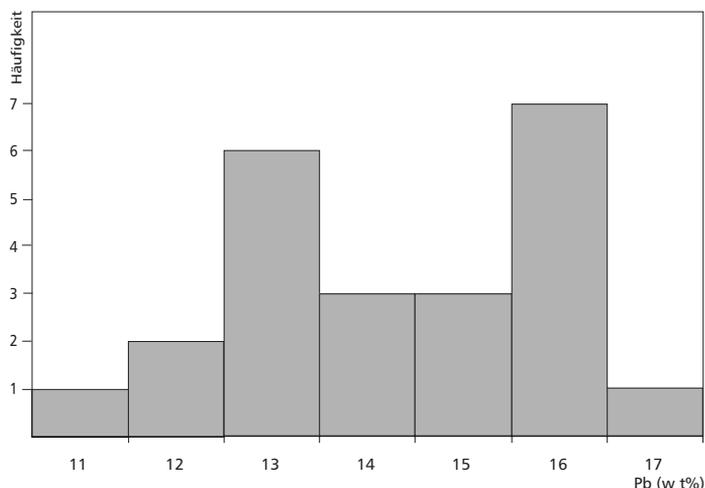
²⁷ Begemann/Schmitt-Strecker, *Blei*; Eck, *Bleibaren*.

²⁸ Vgl. C. J. Eisman, *MASCA Journal* 1, 1978, 18; P. R. Trinchieri u. a., *Archaeometry* 43, 2001, 393–406.

²⁹ *Grundlagen und Anwendungen bei Pernicka* (Anm. 10) 99–116.

³⁰ Für die Bleiabtrennung und Bestimmung der Isotopenverhältnisse danken wir Bernd Höppner und Sigrid Klaus, Mannheim. Diese Untersuchung wurde vollständig als Eigenleistung des Curt-Engelhorn-Zentrums Archäometrie erbracht. Aus Kostengründen wurde darauf verzichtet, alle vorhandenen Proben auf ihre bleiisotopische Zusammensetzung zu untersuchen, zumal sich nach anfänglichen Erfolgen offenbarte, dass diese Methode hier nur bedingt weiterführen würde.

5 Die Bleigehalte in den gemessenen Proben vom Agon von Mahdia mit den beiden Maxima von 12 bis 13 und 15 bis 16 Prozent. Der Mittelwert beträgt 13,7 Prozent.

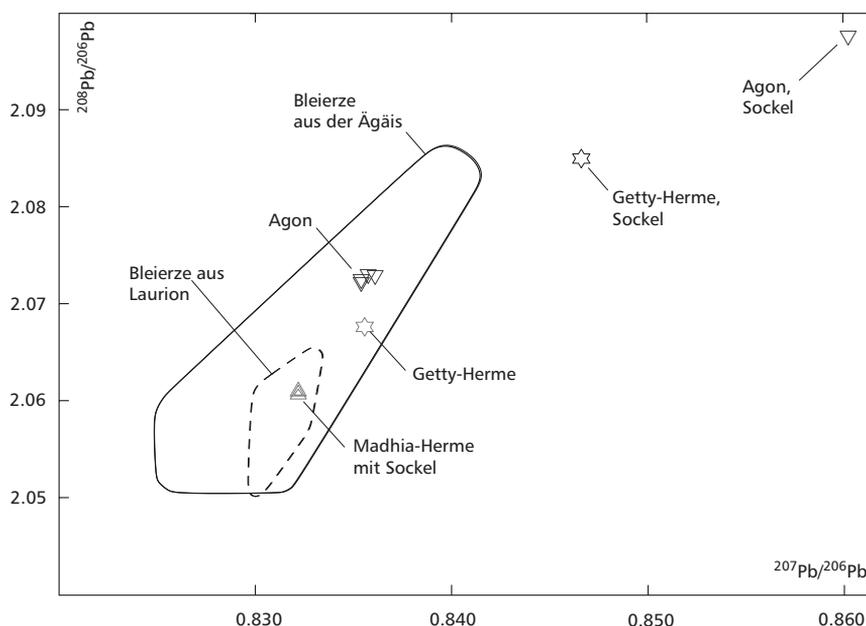


buchsen offenbart sich aber durch das paarweise gemeinsame Spurenelementcluster, während die unterschiedlichen Bleiisotopensignaturen gegen die Zusammengehörigkeit aller Spannbuchsen sprechen²⁶. Für die Zuordnung zu Objektgruppen sind also in erster Linie die Spurenelementmuster und in zweiter Hinsicht die Legierungselemente signifikant. Es zeigt sich aber auch, dass fast durchgehend gleiche Rezepturen für zusammengehörige Objekte verwendet wurden. Weiterhin stimmen die Ergebnisse der ersten Untersuchungen zu den Bleiisotopenverhältnissen durch Friedrich Begemann und Sigrid Schmitt-Strecker weitgehend mit den archäologischen Deutungen überein und auch die ersten Messungen an den beiden Hermen sind viel versprechend²⁷. Es war deshalb mit dieser Untersuchung die Hoffnung verbunden, darüber hinaus noch im Rahmen der Forschung zu antiken Schiffswracks Informationen über die Herkunft und damit über den Abbau und Handel von Blei im Hellenismus zu erlangen²⁸.

Notwendig ist hierfür die Untersuchung der stabilen Bleiisotopenverhältnisse²⁹. Mit dieser Methode kann man freilich keine Auskunft über den Herstellungsort der Objekte erhalten, sondern lediglich über die mögliche Herkunft des verwendeten Metalls, also über die Erzlagerstätten. Angesichts des vorwiegend hohen Bleigehaltes ist davon auszugehen, dass das Blei in der Regel keine Verunreinigung des Kupfers ist, sondern als gezieltes Legierungselement zugesetzt wurde. Daher sind Aussagen über die Herkunft des Kupfers nicht möglich, aber es sind Informationen über die möglichen Bleilagerstätten zu erhalten, sofern nicht unterschiedliche Bleisorten gemischt wurden, wie es bei der Verwendung von Altmetall die Regel ist und auch bei einigen Mahdiabronzen nachgewiesen wurde. Für die Zuordnung von Objekten zueinander ist deren isotopische Zusammensetzung jedoch auch in solchen Fällen verwertbar.

In einzelnen Fällen ist es in der Vergangenheit ganz offensichtlich zu Verwechslungen von Proben gekommen, weshalb die Bestimmung der Verhältnisse der stabilen Isotope des Bleis mit einem Multikollektormassenspektrometer mit induktiv gekoppelter Plasmaionisation als zusätzliches Kriterium für die Zuordnung der Einzelstücke sinnvoll ist³⁰.

Um der Frage der Echtheit der Herme im Getty-Museum nachzugehen, wurde zusätzlich eine Messung der Radioaktivität des instabilen Bleiisotops ²¹⁰Pb durchgeführt, einem Zerfallsprodukt des natürlich vorkommenden Urans (²³⁸U), das bei der Verhüttung im Metall gesammelt wird, während das Uran selbst vollständig in die Schlacke übergeht. Ohne Mutternuklid zerfällt das genannte Bleiisotop mit einer Halbwertszeit von 22,3 Jahren, so dass die Radioaktivität im Metall zwar sehr niedrig, aber zumeist messbar ist, wenn das Metall vor weniger als etwa hundert Jahren produziert wurde. Es ist allerdings zu beachten, dass die Abwesenheit von messbarer Radioaktivität des genannten Bleiisotops kein Beweis der Echtheit ist, wenn man altes Metall



wiederverwendet hat oder außergewöhnlich reine Ausgangsmaterialien bei der Metallproduktion eingesetzt wurden. Diese Analyse eignet sich auch nicht zur Altersbestimmung, da in der Regel die Konzentration des ^{210}Pb im Erz zum Zeitpunkt der Verhüttung nicht bekannt ist und in weiten Grenzen variiert³¹.

Die Hermen aus Mahdia und im Getty-Museum

Auf der Grundlage der höheren Präzision der neuen Analyseergebnisse lassen sich die Zuordnungen von Objekten und Einzelteilen anhand der Spuren- und Legierungselemente neu diskutieren und im Zweifelsfall anhand der Bleiisotopenverhältnisse bestätigen.

Bleiisotopenverhältnisse und Spurenelemente untermauern die im Rahmen der Neurestauration gewonnene Erkenntnis, dass die Figur des Agon und die Herme weder gleichzeitig hergestellt wurden, noch gemeinsam aufgestellt waren³². Während die Isotopenverhältnisse des Sockelungsbleis der Herme auch dem des Bleis in der Bronze entsprechen, beide von Laurion, weichen die Bleiisotopenverhältnisse des Flügelknaben davon ab³³ (Abb. 6). Sockelblei und Legierungsblei dieser Statue sind zudem nicht identisch. Es ist an dieser Stelle auch anzumerken, dass die Bleiisotopensignatur der Statuette des Satyrn F 209 (HDM 2180) ebenfalls nach Laurion weist und auch die gleiche Legierung wie für die Herme von Mahdia verwendet wurde (Abb. 7). Das Spurenelementmuster ist ebenfalls ähnlich.

³¹ Zu Grundlagen und Messtechnik s. E. Pernicka u. a. in: ders. / S. von Berswordt-Wallrabe / H. Wagner (Hrsg.), *Original – Copy – Fake? Examining the Authenticity of Ancient Works of Art. Focussing on African and Asian Bronzes and Terracottas* (Mainz 2008) 80–98.

³² G. Hellenkemper-Salies, *Bonner Jahrb.* 196, 1996, 199–219.

³³ Begemann/Schmitt-Strecker, Blei.

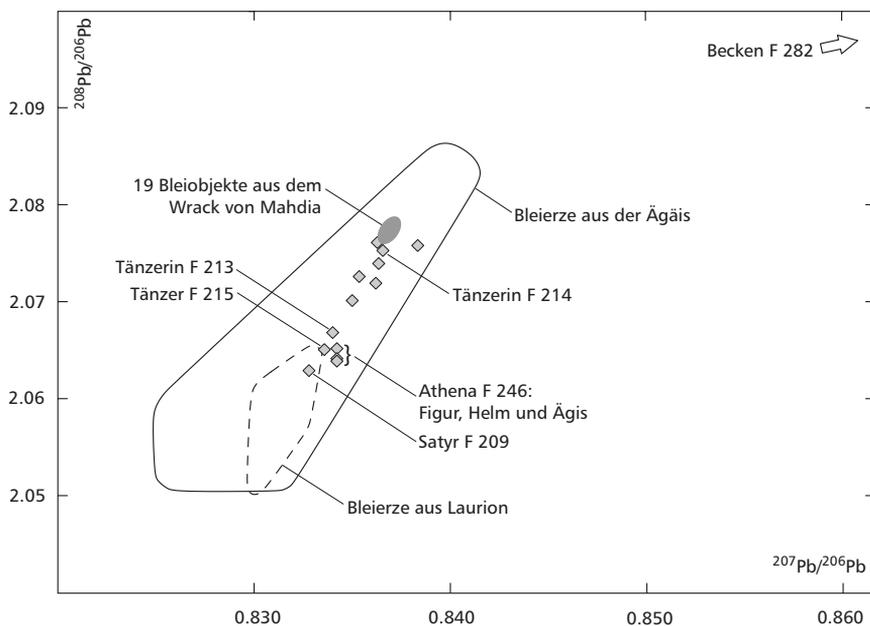
³⁴ F. Willer, *Bonner Jahrb.* 196, 1996, 342; G. Zimmer, *Griechische Bronzeuwerkstätten* (1990) 156–159.

³⁵ Begemann/Schmitt-Strecker, Blei; Hellenkemper-Salies (Anm. 32).

³⁶ Zimmer (vorletzte Anm.) 161.

³⁷ Vgl. Pernicka/Eggert, *Zusammensetzung* 1048; Scott/Podany (Anm. 5) 43.

³⁸ Solch geringe Aktivität kann verschieden interpretiert werden: Es könnte sich durchaus um Metall handeln, das erst Anfang des 20. Jhs. hergestellt wurde. Es könnte aber auch eine Verunreinigung der Probe durch Material von der Oberfläche vorliegen.



6 (Buchseite gegenüber) Isotopenverhältnisse des Bleis in den Legierungen und den verbleiten Sockeln des Agon und der Herme von Mahdia sowie der Getty-Herme im Vergleich mit Bleierzen aus dem ägäischen Raum.

7 (oben) Bleiisotopenverhältnisse der Kleinfiguren und der Bleiobjekte im Vergleich mit Bleierzen aus dem ägäischen Raum. Nicht namentlich gekennzeichnete Rauten stehen für weitere Statuetten (s. Tabelle 3).

Für die Herme von Mahdia lässt die gemeinsame Isotopensignatur der Lagerstätte von Laurion in Attika sowohl beim Sockelblei als auch in der Bronze der Plastik selbst vermuten, dass die Herstellung von derselben Werkstatt wie die Aufstellung vor Ort durchgeführt wurde³⁴. Im Falle des Agon und auch der Herme im Getty-Museum, bei welcher die Isotopenverhältnisse des Sockel- und Legierungsbleis unterschiedlich sind, können die Isotopensignaturen des Sockelbleis keiner bisher bekannten ägäischen Bleilagerstätte zugeordnet werden³⁵. Da die Versockelung ja erst vor Ort erfolgte, könnte ein Subunternehmer mit der Aufstellung der Figuren beauftragt worden sein³⁶, oder die für den Guss verwendete Bleicharge war zur Neige gegangen, und es war mit einem anderen Blei weitergearbeitet worden. All das bleibt aber im Bereich von Spekulationen.

Bereits in der Publikation von 1994 ist festgestellt, dass die gleiche Rezeptur und auch eine chemisch ähnliche, wenngleich nicht identische Kupfersorte für beide Hermen verwendet wurde. Dies kann nun bestätigt werden. Die von David Scott und Jerry Podany angegebenen Werte für Kobalt von 417 und 586 dürften richtig bestimmt sein, ihre Einheit muss jedoch nicht ›Teile pro Milliarde‹ sondern ›Teile pro Million‹ lauten³⁷ (s. Tabelle 3). Es gibt aber weder eine chemische noch eine isotopische Übereinstimmung zwischen der Herme im Getty-Museum und derjenigen aus dem Schiffswrack.

Im Rahmen der naturwissenschaftlichen Untersuchungen finden sich keine eindeutigen Belege für eine neuzeitliche Fälschung. Die erste Messung der Aktivität von ^{210}Pb ergab nur ein niedriges, aber immerhin noch messbares, alle folgenden kein ausreichendes Signal³⁸.

Die vordergründige Übereinstimmung der Legierung beider Hermen bestätigt sich jedenfalls anhand der Spurenelemente und Bleiisotopenverhältnisse nicht, wenngleich die Zusammensetzung vor allem hinsichtlich der hohen Kobaltgehalte auffällig ist. Bei der Herme von Mahdia stammt

das für die Legierung verwendete Blei ebenso wie das Gussmaterial für die Sockelung aus Laurion, während der entsprechende Legierungszusatz der Herme in Malibu Entsprechungen in Thasos findet³⁹. Die isotopische Signatur des aus dem Inneren der Herme stammenden Bleis entspricht aber weder den Verhältnissen bei der Mahdiaherme, noch denen ägäischer Erze im Allgemeinen.

Produktionstechnische Merkmale weisen jedoch auf eine aus der Antike nicht bekannte Vorgehensweise bei der Herstellung der Herme im Getty-Museum. Während der Untersuchungen zeigte sich schon 1991, dass beide Stücke völlig unterschiedlich hergestellt sind. So weist die Skulptur in Kalifornien anders als diejenige von Mahdia innen vier senkrecht montierte Gusskanäle auf, wie sie bislang bei keiner anderen antiken Bronze beobachtet wurden. Sie sitzen oben am Schaft und reichen bis zum Ansatz der Tänen. Vegetabile Strukturen an der Oberfläche dieser Kanäle sprechen dafür, dass sie aus Pflanzenhalmen geformt wurden, möglicherweise aus in Wachs getränkten Schilfstengeln⁴⁰, die größtenteils schon beim Brennen der Form zum Zweck des Wachausschmelzens verbrannten. Die Gusskanäle verstärken den Schaft und vor allem dessen Verbindung zum Kopf. Am Übergang zwischen Schulter und Kopfbedeckung wurden sie abgeschnitten und kaschiert⁴¹.

Typisch für antike Güsse nach dem Anschnittsystem sind dagegen außen liegende Kanäle, die nach dem Gießen entfernt wurden. Auch die Anfertigung des Kopfbereiches mit der turbanartigen Tänenverzierung unterscheidet sich bei beiden Skulpturen grundlegend. So scheint die Ausarbeitung des Stücks in Kalifornien in diesem Bereich anders als die Mahdiaherme ausschließlich nach dem indirekten Wachausschmelzverfahren ausgeführt, wodurch nur eine einfachere, weniger detaillierte Oberflächengestaltung möglich war.

Der starke Qualitätsabfall in der Ausarbeitung der Herme im Getty-Museum fällt besonders an der Rückseite des Kopfes auf⁴². Die Tänen erscheinen zum Teil willkürlich und ohne Rücksicht auf natürlichen Verlauf und Stofflichkeit angelegt, als ob man bei der Gestaltung nur auf eine unvollkommene Abgussform zurückgreifen konnte und keine qualitätvolle Vorlage zur Hand hatte. So würde sich auch erklären, dass die vier Lockenstränge am Oberkopf nicht ausgearbeitet sind. Erst unterhalb der Binden treten sie hervor und entsprechen dort genau denjenigen bei dem Stück aus dem Schiffsfund. Ähnlich unstimmig ist auch das Fehlen von Zöpfen und Tänienschlaufen auf der Vorderseite. Besonders im Bereich des Hinterkopfes sind relativ grobe Überarbeitungsspuren (Glättungen) mit einem Spachtel zu erkennen, die möglicherweise von der Kaschierung einer Montagenaht des Wachsmodells stammen. Diese Vorgehensweise ist für antike Bronzen unüblich, da Wachsnähte nur innen sichtbar belassen wurden. Außen wurden sie für den Betrachter immer unsichtbar gemacht und selbst feinste Oberflächenstrukturen wie Haare angeglichen.

Allein der Kopf der Mahdiaherme ist aus acht zusammengefügt Segmenten aufgebaut⁴³, wie es antiker Herstellungstechnik entspricht. Diese erlaubt keine starken Unterschneidungen, da die damals verfügbaren Abformmaterialien Ton und Gips nicht flexibel sind. Folglich wurden aufwendiger gestaltete Bereiche in einzeln abzuformende Abschnitte unterteilt. Ist hingegen, wie am Kopf der Herme im Getty-Museum, nur eine einzige Teilnaht erkennbar, so weist dies

³⁹ S. Chalkias u. a. in: A. Wagner / G. Weisgerber (Hrsg.), *Antike Edel- und Buntmetallgewinnung auf Thasos. Der Anschnitt Beih.* 6 (Bochum 1988) 59–74; Z. Stos-Gale / N. H. Gale / N. Annetts, *Archaeometry* 38, 1996, 381–390.

⁴⁰ Mattusch, *Herm* 447 Abb. 26, Scott/Podany (Anm. 5) sowie Willer, *Herme* 954 Taf. 34, 2. – Beim Seminar »Antiche officine del bronzo« im Juli 1991 in Murlo (Toskana) wurde die Gusstechnik der beiden Hermen

vergleichend vorgestellt. In der anschließenden Diskussion trug Edilberto Formigli vor, dass ihm die Verwendung solcher innen liegenden Gusskanäle nur für die Zeit seit der Renaissance bekannt ist. Der Bronzegießermeister Piero Bertelli aus Florenz ergänzte, dass eine Technik mit innen angebrachten, in Wachs getränkten Pflanzenhalmen noch in der Mitte des 20. Jh. in einigen italienischen Bronzegießereien angewendet wurde.

⁴¹ Willer, *Herme* 969; Scott/Podany (Anm. 5) 52.

auf die Verwendung einer flexiblen Abformmasse. (Heute wird in der Regel geschmeidiger Silikonkautschuk benutzt.) Eine solche ist aber bislang für das Altertum nicht belegt und auch kaum denkbar. Zwar wird in der antiken Literatur bezüglich der Herstellung von Kopien auf die Verwendung von Bitumen hingewiesen, der aber nur als Trennmittel zwischen dem Modell und der abzunehmenden Form diene. Eine abschließenden Klärung könnte vielleicht die Computertomographische Untersuchung der Skulptur in Kalifornien bringen.

Die Herme von Mahdia zeigt im Verhältnis zu dem Stück in Kalifornien eine wesentlich detailfreudigere, naturalistisch plastische Ausarbeitung mit starken Unterschneidungen, Durchbrüchen und zusätzlichen Applikationen, wie zum Beispiel Weinlaub, die durch die direkte Modellierung mit Wachs erreicht wurde⁴⁴. Trotz dieser Unterschiede stimmen die Maße der Gesichtsfelder beider Hermen unter Berücksichtigung der leichten Abweichungen durch das Nachmodellieren, die Erstarrungsschwindung und die Kaltarbeit tatsächlich überein. Bei dem Stück im Getty-Museum hatte man im Zuge der Montage des Wachsmodells den korrekten Sitz des Kopfs auf dem Schaft offensichtlich nicht ausreichend kontrolliert, weshalb das Haupt leicht nach links gekippt ist. Die Mahdiaherme wurde in wesentlichen Bereichen von Hand frei gestaltet, also nach der direkten Technik hergestellt. Folglich sind Überlegungen hinfällig, es könnte ein gemeinsames Modell beider Bronzen gegeben haben und die sehr hohe Formgleichheit dadurch bedingt sein. Vielmehr kann die Herme in Kalifornien nur als Kopie von der Mahdiaherme entstanden sein.

Weitere Fundstücke aus Mahdia

Die Ergebnisse unserer Analysen bestätigen die Zusammengehörigkeit der Paare von Spannbuchsen, des Hermes (F 208) mit seiner Basis sowie der Erosstatuette (F 210) mit der Kithara (F 210)⁴⁵. Soweit hier im Text nicht explizit besprochen, sind zusammengehörige Proben in Tabelle 3 aufeinanderfolgend dargestellt.

Bei den drei Zwergenfiguren steht die stilistische Zugehörigkeit der Tänzerin F 213 und dem Tänzer F 215 fest, während die Tänzerin F 214 von einem Teil der Forschung jünger eingestuft wird⁴⁶. Carol Mattusch hingegen sieht alle drei als Ergebnis einer Serie⁴⁷. Die Ergebnisse unserer Analysen legen es nahe, das Paar und die einzelne Tänzerin voneinander zu trennen. Tatsächlich sind die Figuren F 213 und F 215 mit Ausnahme der beschriebenen üblichen Abweichung im Bleigehalt gussgleich, die Zusammensetzung des Kupfers und auch der Legierung der Figur F 214 ist zwar abweichend, aber auch nicht deutlich anders. Die Herkunft dieses Figurenpaars beziehungsweise seiner Vorbilder wird in Alexandria vermutet, während für F 214 Athen als Herkunft angenommen wird⁴⁸. Das Blei des Tänzerpaares hat die beste Entsprechung in Erzen aus Nordwestanatolien, besonders TG 128, Avçilar am Golf von Edremit. Dasjenige der Tänzerin F 214 hingegen entspricht ebenso wie das der Anker, bleiernen Barren und Rohre auf dem Schiffswrack von Mahdia den Erzen der Sierra Cartagena, aber auch Bleierzen aus der Region um das toskanische Massa Marittima⁴⁹ (Abb. 7).

Bei der Neurestauration vor 1994 wurden der Lampe F III (HDM 2254) der Fuß MB 38 (HDM 2238) und die Maske F 258 (HDM 2255) zugeordnet, was sich analytisch vollkommen bestätigen lässt⁵⁰ (Tabelle 3). Die Erweiterung dieser Lampe entsprechend den Rekonstruktionsvor-

⁴² Vgl. Mattusch, Herm Abb. 3, 8, 20 und 24.

⁴³ Willer, Herme 961 Abb. 3.

⁴⁴ Willer, Herme 964 Abb. 8; Goebbels/Illerhaus/Meinel, Computertomographie.

⁴⁵ Pernicka/Eggert, Zusammensetzung.

⁴⁶ Pfisterer-Haas, Zwergentänzer.

⁴⁷ Mattusch, Statuary 795.

⁴⁸ Pfisterer-Haas, Zwergentänzer.

⁴⁹ So bereits Begemann/Schmitt-Strecker, Blei. Vgl. E. Pernicka u. a., Jahrb. RGZM 31, 1984, 533–599; Z. Stos-Gale / N. H. Gale / J. Houghton / R. Speakman, Archaeometry 37, 1995, 407–415.

⁵⁰ Vgl. Cüppers, Bronzelampe.

schlägen von Norbert Franken kann aus metallanalytischer Sicht nicht bestätigt werden⁵¹. Vom Greifenkessel (HDM 2203 und 2204) stand jedoch sehr wenig Material zur Verfügung, das zudem hohe Standardabweichungen zeigt, so dass keine eindeutig negative Aussage möglich ist. Eine Zugehörigkeit zu der betreffenden Lampe lässt sich jedoch nicht erschließen⁵².

Weiterhin wurden der Lampe MB 49 (HDM 2244–2245) der Fuß MB 9 (HDM 2242) und der Henkel MB 9 (HDM 2241) neu zugeordnet, wogegen auf der Grundlage der damaligen Daten keine Einwände zu erheben sind⁵³. Der Zuordnung von Fuß MB 9 und Korpus MB 49 ist aus heutiger Sicht zuzustimmen, während der Henkel nicht für diese Lampe hergestellt worden sein kann (Tabelle 3). Wenn bei der Restaurierung auf Grund der Passgenauigkeit der Lötstellen diese Zuordnung getroffen wurde, steht diese Beobachtung nicht zwangsläufig im Widerspruch zur analytischen Aussage. Es ist möglich, dass dieser Henkel bei einer sekundären antiken Reparatur hinzugefügt worden ist. Isotopisch und chemisch würde diese Handhabe zu der ebenfalls neu rekonstruierten Lampe aus Fuß F 306 (HDM 2250) und Korpus MB 9 (HDM 2240) passen⁵⁴. Für das Auftreten von Zink (5,9 Prozent) in der sonst so gut mit der übrigen Lampenteilen übereinstimmenden Probe HDM 2250 gibt es keine Erklärung. Eine Kontamination durch modernes Messinglot lässt sich derzeit nicht verifizieren. Für die Erweiterung der Lampen durch die Figur des Schauspielers F 225 (HDM 2261), wie Franken vorschlägt, findet sich durch die Analysen kein Ansatz⁵⁵.

Wie bereits in der Besprechung der Analysemethoden angemerkt, gibt es in einigen Proben einen erhöhten Zinkgehalt (HDM 2250, HDM 2228, HDM 2167), der nicht abschließend erklärt werden kann, wenngleich auch ein weiteres Probenpaar (HDM 2203 und HDM 2204) einen solchen aufweist. Einerseits können kleine Zinkkonzentrationen durchaus ein Zufallsprodukt bei der Kupferherstellung sein, worauf der geringfügige Gehalt beim zuletzt genannten Probenpaar hindeutet, andererseits war die Herstellung von Messing durch Zementation von Kupfer mit Zinkerzen zur vermuteten Herstellungszeit der Lampen um die Jahrhundertwende im ägäischen Raum wohl noch kein gängiges, aber ein sich zunehmend verbreitendes Verfahren⁵⁶. In unserem Zusammenhang lässt sich nicht eindeutig entscheiden, ob absichtlich Messing beigegeben wurde oder nicht. Ein Vergleich mit Messingprodukten des ersten vorchristlichen Jahrhunderts, deren Zinkwerte systematisch höher liegen, weist auf eine zufällige Reduzierung von Zink bei der Kupferverhüttung hin⁵⁷.

Es wurden Inkonsistenzen in einzelnen Analysenserien beobachtet, die sich nur durch die Vertauschung der Proben erklären lassen. So wurde die Probe HDM 2266 fälschlich als ›HDM 2272‹ etikettiert. Sie passt in der Zusammensetzung nicht zur angeblichen Entnahmestelle, dem Kohlenbecken F 281 mit sehr einheitlichen Werten für Metallzusammensetzung und Bleisotopenverhältnissen (Abb. 8), sondern genau zum Beschlagblech mit der Dionysosfigur F 108, wie die

⁵¹ N. Franken, *Bonner Jahrb.* 196, 1996, 295.

⁵² Entgegen der Aussagen Frankens (vorige Anm.) 295 Anm. 66, war diese auch durch die früheren Analysen nicht gegeben.

⁵³ Cüppers, *Bronzelampe 1010*.

⁵⁴ Cüppers, *Bronzelampe 1010*.

⁵⁵ Franken (Anm. 52) 311.

⁵⁶ Zur Zeitstellung der Lampen s. Barr-Sharrar, *Lamps*. Vgl. P.T. Craddock, *Journal Arch. Scien.* 5, 1978, 1–16; O. Werner, *Erzmetall* 23, 1970, 259–308. Eine aktuellere Übersicht über das frühe Auftreten von zinkhaltigen Legierungen bei C.P. Thornton / C.B. Ehlers, *Inst. Archaeo-Metallurgical Stud.* 23, 2003, 4.

⁵⁷ P.T. Craddock / A.M. Burnett / K. Preston in: W.A. Oddy (ed.), *Scientific Studies in Numismatics*. *British Mus. Occasional Papers* 18 (London 1980) 53–64.

⁵⁸ Vor allem da von der Wandunterkante des Kohlenbeckens eine weitere Probe (HDM 2267) vorliegt, die in ihrer Zusammensetzung dem gesamten Becken entspricht, kann HDM 2266 nicht zugehören. Die Daten in der Publikation von 1994 zeigen, dass die Vertauschung bereits vor den Analysen erfolgt ist: Pernicka/Eggert, *Zusammensetzung Tab. 8 a und 9*.

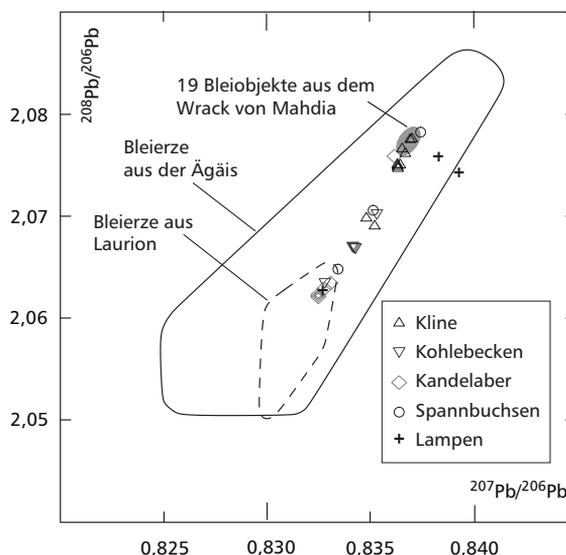
⁵⁹ A. Merlin / L. Poinssot, *Bronzes trouvés en mer près de Mahdia (Tunisie)*, *Mon. et Mém. Piot* 17 (Paris 1909) 50; dies. in: *Cinquième congrès international d'archéologie*, *Kongr. Algier 1930 (Algier 1933)* 228.

⁶⁰ Faust, *Klinen*; Sobottka-Braun, *Klinen*.

⁶¹ Vgl. Faust, *Klinen*.

⁶² Pernicka/Eggert, *Zusammensetzung 1049*.

8 Bleisotopenverhältnisse einiger Bronzen von Mahdia im Vergleich mit denen von Bleierzen aus dem ägäischen Raum.



Übereinstimmung mit einer anderen Probe dieses Dionysosbleches (HDM 2271) und einer vom dazugehörigen Stück mit Ariadne (HDM 2273) zeigt⁵⁸. Die fälschlich als HDM 2272 benannte Probe dagegen gehört ebenso wenig wie diejenige vom Rädchen (HDM 2265) zum Kohlenbecken.

Bei dem von Alfred Merlin und Louis Poinssot für eines der beiden Bleche angegebenen Antimongehalt von 1,25 Prozent kann es sich nur um eine Fehlanalyse handeln, da Antimon in solch hohen Gehalten weder in den Funden von Mahdia gemessen wurde, noch sonst von antiken Funden der mediterranen Kulturen bekannt ist⁵⁹.

Hinsichtlich der Zuordnung der Klinenteile sind die Probleme ähnlich wie für die archäologischen und restauratorischen Bearbeiter⁶⁰. Angesichts der rekonstruierten Zahl von ehemals mindestens zweiundzwanzig Klinen mit ursprünglich mehr als sechzig Einzelteilen ist das durch die Analysen erhaltene Bild entsprechend heterogen⁶¹. Erschwerend kommt dazu, dass nur die Analysen derjenigen Klinenteile ausgewertet werden können, die seinerzeit beprobt wurden. Wie bereits bei der ersten Untersuchung festgestellt, gibt es zwei verschiedene Legierungstypen für die Bronze der Klinen, die sich nun jedoch in drei beziehungsweise vier Kupfersorten untergliedern lassen (Tabelle 3). Es steht auch fest, dass diese Rezepturen mit den Zahlzeichen auf den Klinen korrelieren. In der Veröffentlichung von 1994 wird noch nicht angenommen, dass das Blei intentionell zugefügt wurde⁶². Da die Bleigehalte aber in den jeweiligen chemischen Gruppen immer gleich hoch sind, muss eine beabsichtigte Zugabe erfolgt sein, die einen technischen Hintergrund hat. Es war und ist in einer laufenden Produktion nicht üblich, Rezepturen, die sich bewährt haben, zu modifizieren, solange nicht technisch oder wirtschaftlich bedingte Veränderungen dies erfordern.

Allerdings ist nur die Gruppe der Klinenteile mit höherem Bleigehalt auch isotopisch homogen. Da die Zusammensetzung der Betten nicht auf polymetallische Erze hinweist, muss man deshalb davon ausgehen, dass dieses Blei zusätzlich zugesetzt wurde, wodurch es zur Überprägung der Signaturen des Kupfers kam. Dies gilt auch für einzelne Teile der Kandelaber, wo chemisch identische Stücke (HDM 2196 und HDM 2197) durch die Zugabe von Blei abweichende Isotopensignaturen aufweisen. Auch die Kandelaberteile bestehen aus mindestens vier verschiedenen chemischen Gruppen.

Alle Klinen wurden nach verbreiteter Forschungsmeinung in einer einzigen Werkstatt produziert. Dies wird auch für die Klinenteile aus dem Schiffswrack Fourmigue C im Golf Juan vor der südfranzösischen Küste angenommen. Die Metallanalyse liefert hierfür weder einen Beleg,

noch ist ein deutlicher Widerspruch möglich⁶³. Aus einem einfachen Variationsdiagramm mit Nickel und Silber (Abb. 9) ist zu ersehen, dass die durch die Clusteranalyse ermittelten drei bis vier Gruppen der Klinen von Mahdia sich hier bereits widerspiegeln, die Zusammensetzungen derjenigen von Formique C jedoch völlig unspezifisch sind. Diese Klinenteile scheinen also aus Material mit sehr vielen unterschiedlichen Provenienzen zu bestehen.

Zu Korrosion und Schwarzfärbung beim sogenannten Agon

Das heutige Farbspektrum von Kupferlegierungen aus archäologischen Kontexten reicht von den allgemein bekannten Grüntönen über Rotbraun bis Schwarz. Das ursprüngliche Aussehen ist in der Regel nicht mehr ersichtlich, da die Veränderungen durch sekundäre Oxidationsvorgänge das Erscheinungsbild bestimmen, so dass nur selten die Farbgebung bei Metallen im Altertum diskutiert wird⁶⁴. Die heutige koloristische Wirkung von antiken Objekten aus solchem Material kann jedoch sehr verschieden zustande gekommen sein und ist nicht zwangsläufig das Resultat sekundärer Korrosionsvorgänge. Bei der Untersuchung der Bronzen von Mahdia wurde allerdings auch deren mögliche originale Buntheit erörtert⁶⁵. Man hatte bereits bei den ersten Untersuchungen an Bronzen aus dem Schiffswrack Kupfersulfide in den Korrosionsschichten entdeckt, die sich auch bei den Untersuchungen im Rahmen der Neurestauration von 1994 wiederfanden, und deshalb wurden auch Experimente zur Schwarzfärbung mit Schwefel durchgeführt⁶⁶.

Wie auch bei den vorausgegangenen Untersuchungen lässt sich durch die erneute Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop mit angeschlossenem energiedispersiven Röntgenspektrometersystem auf Grund der stöchiometrischen Zusammensetzung bestätigen, dass die äußerste Schicht des Agon, deren Dicke bis zu dreißig Mikrometer beträgt, aus schwarzem Kupfersulfid (Cu_{2-x}S) besteht, in die komplexe Zinnoxidverbindungen eingebaut sind (Taf. 1, 5). Die tatsächliche Zusammensetzung dieser Verbindungen lässt sich mit der angewandten Methode nicht bestimmen, da zum Beispiel Wasserstoff nicht gemessen werden kann. Wesentlich ist aber, dass die Korrosionsschicht unterhalb der Kupfersulfidschicht auch aus Zinnoxidverbindungen besteht (Taf. 1, 5, 6). Es handelt sich dabei in der Regel um hydratisierte Zinnoxidverbindungen, deren Farbspektrum im Lichtmikroskop unter polarisiertem Licht und Dunkelfeld je nach Kupferoxidanteil von Rot bis Gelb reicht und die sich durch das selektive Herauslösen der kupferreichen Alphaphase in der Patina anreichern⁶⁷ (Taf. 1, 6). Die oberflächliche Farbgebung solcher Patinaschichten reicht von dunklem Rotbraun bis tief schwarz glänzend und wurde insbesondere bei Spiegeln und anderen stark zinnhaltigen Legierungen mehrfach untersucht und beschrieben⁶⁸.

⁶³ Faust, Klinen 599 f.; C. Baudoin / B. Liou / L. Long, *Archaeonautica* 12, 1994, 54–56; M. Menu / L. Hurtel, ebd. 122–133.

⁶⁴ So z. B. H. Born in: ders. (Hrsg.), *Archäologische Bronzen, antike Kunst, moderne Technik*. Museum für Vor- und Frühgeschichte Berlin (Berlin 1985) 71–84; verschiedene Beiträge in S. La Niece / P. Craddock (Hrsg.), *Metal Plating and Patination* (Oxford 1993); R. Schwab / I. Ullén / C. H. Wunderlich, *Journal Nordic Arch. Sci.* 17, 2010, 27–35.

⁶⁵ Heilmeyer, *Großbronzen*; Willer, *Schwarzpatina*; Eggert, *Schwarzfärbung*.

⁶⁶ A. Lacroix, *Comptes Rendus hebdomadaires séances Acad. Sciences* 151, 1910, 278; Eggert, *Schwarzfärbung*; Willer, *Schwarzpatina*.

⁶⁷ P. Piccardo / B. Mille / L. Robbiola in: P. Dillmann u. a. (Hrsg.), *Corrosion of metallic heritage artefacts*.

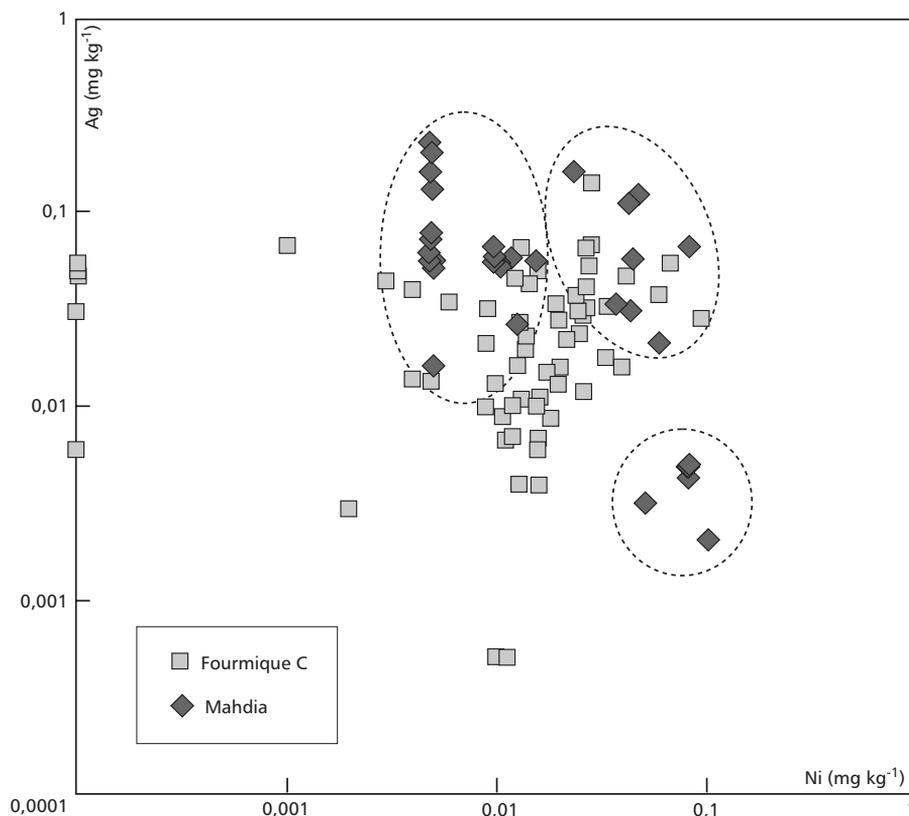
Investigation, conservation and prediction for long-term behaviour. European Federation of Corrosion, Publications 48 (Cambridge 2007) 239–262.

⁶⁸ Siehe etwa L. Robbiola / J.-M. Blengino / C. Fiaud, *Corrosion Science* 40, 1998, 2083–2111 mit Lit. Ferner z. B. G. M. Ingo u. a., *Surface and Interface Analysis* 34, 2002, 337–342; ders. u. a., *Surface and Interface Analysis* 36, 2004, 871–875; Piccardo u. a. (vorige Anm.).

⁶⁹ Vgl. I. D. MacLeod, *Studies in Conservation* 36, 1991, 222–234; A. Duval in: Baudoin/Liou/Long (Anm. 63) 133–138.

⁷⁰ Verschiedene Beiträge in La Niece/Craddock (Anm. 64); A. Giunlià-Mair, *Surface Engineering* 17, 2001, 217–223. – F. Mathis u. a. in: Dillmann u. a. (Anm. 67) 239–262.

⁷¹ Konträr zu den Ausführungen von Heilmeyer, *Großbronzen* 804.



9 Der Gehalt an Nickel und Silber bei den Klinen von Mahdia und Fourmiquie C nach den Daten von Loïc-Pierre Hurtel und Michel Menu (Anm. 62).

Die Oberfläche des Agon und sehr vieler anderer Bronzen von Mahdia wäre auf Grund ihres Zinngehalts auch ohne Kupfersulfide, die eben unter anaeroben Bedingungen entstehen und somit die häufigsten nachgewiesenen Verbindungen auf Meeresfunden sind, dunkelbraun bis schwarz⁶⁹. Die häufigste und in der Regel auch einzige nachgewiesene Verbindung auf intentionell schwarz gefärbten Kupferlegierungen ist hingegen Cuprit (Cu_2O), dessen antike Erzeugungsverfahren jedoch noch diskutiert werden⁷⁰. Hinsichtlich der im Zusammenhang mit den Mahdiafunden formulierten Überlegungen zur Farbgebung ist deshalb auch anzumerken, dass bei Patinaschichten nicht in erster Linie die gleichen Lagerungsbedingungen ausschlaggebend sind, sondern die Zusammensetzungen und der Zustand der Metalle⁷¹.

Weiterhin wurde bei der Untersuchung von 1994 auf den Flügeln des Agons ein silbrigweißer Korrosionsüberzug beobachtet. Die damaligen Analysen haben jedoch keinen eindeutigen Hinweis auf eine Verzinnung ergeben, und angesichts der Zusammensetzung der Flügel (Tabelle 3) kann dies als Rest einer umgekehrten Blockseigerung gedeutet werden. Ohne neue Proben lässt sich daher nicht klären, ob hier polychrome Effekte durch eine Zinnauflage oder eine wie auch immer geartete absichtliche Patinierung erreicht werden sollten.

Zum Bleihandel in hellenistischer Zeit

Das für die Mahdiaherme verwendete Blei entstammt sehr wahrscheinlich, wie bereits oben dargelegt, der Lagerstätte von Laurion. Die Bleiisotopenverhältnisse der anderen Bronzen entsprechen nur zum Teil ägäischen Erzen. Ein Großteil der Fragmente von der Kline, ein Spannbuchsenpaar

Entnahmestelle	Probe	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Ag	Sn	Sb	Te	Pb	Bi	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	
Agon / Eros																		
Flügel rechts	HDM 2155	0,38	0,02	0,04	71	0,1	<0,01	<0,01	0,035	11	0,048	<0,005	17	<0,01				
Flügel links	HDM 2156	0,31	0,03	0,04	73	0,1	<0,01	<0,01	0,030	12	0,064	<0,005	15	<0,01	2,076	0,836	18,75	
Ferse rechts	HDM 2157	0,54	0,02	0,05	75	0,1	0,05	0,01	0,048	9	0,054	<0,005	15	<0,01	2,076	0,836	18,75	
Rücken, rechts	HDM 2158	0,24	0,02	0,06	75	0,1	<0,01	0,01	0,049	9,7	0,048	<0,005	15	<0,01	2,075	0,836	18,76	
Ohr rechts oberhalb	HDM 2159	0,26	0,02	0,06	75	0,1	0,03	0,01	0,054	9,5	0,053	<0,005	15	<0,01	2,076	0,836	18,77	
Ohr rechts Rückseite	HDM 2287	0,25	0,02	0,06	78	0,1	<0,01	0,01	0,048	9,2	0,051	<0,005	12	<0,01				
Rücken links Arm/Flügel	HDM 2290	0,38	0,02	0,05	79	0,1	<0,01	0,01	0,053	8,6	0,046	<0,005	12	<0,01				
Kalotte, links neben Zopf	HDM 2288	0,33	0,02	0,05	77	0,1	<0,01	0,01	0,051	9,8	0,053	0,005	12	<0,01				
Schulter Flügelansatz	HDM 2289	0,26	0,02	0,06	74	0,1	<0,01	0,01	0,052	10	0,055	0,006	15	0,01				
Spielbein, Bruchkante	HDM 2298	0,11	0,01	0,06	76	0,1	<0,01	<0,01	0,052	12	0,047	<0,005	12	0,01				
Torso Bruchkante Spielbein	HDM 2291	0,12	0,01	0,06	76	0,1	<0,01	<0,01	0,051	14	0,045	0,007	10	0,01				
Standbein Bruchkante Knie	HDM 2297	0,21	0,02	0,08	77	0,1	<0,01	<0,01	0,051	9,9	0,056	0,007	12	0,01				
Torso Bruchkante	HDM 2299	0,13	0,01	0,06	76	0,1	<0,01	<0,01	0,053	12	0,048	0,007	12	0,01				
Torso Übergang Hals Kopf	HDM 2300	0,27	0,02	0,04	73	0,1	<0,01	0,01	0,033	11	0,055	<0,005	15	0,01				
Spielbein, Bruchkante/Torso	HDM 2292				74,2								14	0,004				
Spielbein, Oberschenkel	HDM 2293				73,9								13,4	0,003				
Spielbein, Wade	HDM 2294				73,7								14,2	0,004				
Spielbein, großer Zeh	HDM 2295				74,3								13,3	0,004				
Spielbein, Ferse	HDM 2296				74,6								14,2	0,002				
Flickung Späne	ohne Nr.	0,13	0,01	0,05	74	0,1	<0,01	<0,01	0,058	13	0,047	<0,005	12	0,01				
Flickung Anschliff 1	ohne Nr.	0,10	0,01	0,07	73	0,1	<0,01	<0,01	0,050	14	0,046	<0,005	12	0,03				
Flickung Anschliff 2	ohne Nr.	0,24	0,02	0,07	70	<0,1	<0,01	<0,01	0,052	15	0,040	0,006	15	0,06				
Hermie Mabdia																		
Bart, Unterseite	HDM 2151	0,29	0,23	0,02	76	0,2	0,39	0,02	0,019	6,6	0,030	<0,005	16	<0,01	2,061	0,832	18,82	
Sockel, Bruchkante	HDM 2152				77,1								9,3	0,009				
Haarlocke, rechte Schulter	HDM 2153				72,8								15,5	0,002				
linke Schulter	HDM 2182				70,3								10,7	0,002				
Band linke Schulter	HDM 2190				70,8								16,9	0,003				
Hermie Getty																		
Innenwand unten	FG 050587	0,26	0,16	0,04	74	0,1	0,22	0,01	0,039	8,8	0,164	<0,005	17	0,02	2,070	0,836	18,76	
Bleirest innen	FG 050589	0,3	<0,01	<0,01	0,7	<0,1	<0,5	<0,01	0,03	39	0,02	0,02	60	<0,1	2,091	0,847	18,47	
Statuetten																		
Hermes F 208	HDM 2171	0,29	0,01	0,02	84	0,1	0,05	<0,01	0,168	11	0,159	0,005	4,4	<0,01				
Hermes Einsatz Rücken	HDM 2172	0,19	0,01	0,03	86	0,1	<0,01	<0,01	0,163	9,9	0,153	<0,005	3,8	0,01	2,075	0,836	18,75	
Basis F 208	HDM 2173	0,24	0,01	0,02	85	0,1	0,02	<0,01	0,166	10	0,150	<0,005	3,9	0,01				
Zwerg F 215	HDM 2178	0,13	0,08	0,02	85	0,1	0,17	0,01	0,022	6,5	0,033	<0,005	7,7	0,01	2,067	0,834	18,78	

Zwergin F 213	HDM 2179	0,15	0,07	0,03	80	0,8	0,11	<0,01	0,022	6,8	0,028	0,005	I2	<0,01	2,069	0,834	18,79
Zwergin F 214	HDM 2170	0,21	0,09	0,06	76	0,1	0,08	<0,01	0,055	9,9	0,141	<0,005	I3	<0,01	2,079	0,837	18,75
Fackelträger F 216	HDM 2176	0,20	<0,01	0,05	68	<0,1	0,11	0,01	0,049	8,0	0,064	<0,005	24	0,01	2,076	0,836	18,78
Lampenträger F 109	HDM 2177	0,18	0,02	0,04	77	0,1	0,17	0,01	0,057	5,7	0,084	0,007	I7	0,01	2,073	0,835	18,77
Satyr F 209	HDM 2180	0,19	0,16	0,04	73	0,1	0,02	0,01	0,016	8,4	0,012	<0,005	I8	<0,01	2,059	0,832	18,84
Kithara F 210	HDM 2175	0,05	0,02	0,05	82	0,1	0,20	0,01	0,060	9,7	0,304	<0,005	7,8	<0,01			
Eros F 210	HDM 2174	0,10	0,01	0,04	82	0,1	0,19	<0,01	0,060	9,6	0,303	<0,005	7,6	<0,01	2,078	0,837	18,74
Schauspieler F 225	HDM 2261	0,25	0,02	0,02	88	0,1	<0,01	<0,01	0,165	10	0,048	<0,005	0,9	0,01	2,080	0,839	18,68
Bronzelampen																	
Bronzelampe F 111, Korpus	HDM 2254	0,22	<0,01	<0,01	88	0,1	<0,01	0,02	0,037	10	<0,005	<0,005	0,8	<0,01			
Bronzelampe MB 38, Fuß	HDM 2238	0,38	<0,01	<0,01	88	0,2	<0,01	<0,01	0,036	11	<0,005	0,006	1,2	<0,01			
Maske F 258	HDM 2255	0,12	<0,01	<0,01	86	0,1	<0,01	0,01	0,047	11	0,005	<0,005	1,3	<0,01			
Bronzelampe MB 9, Fuß	HDM 2242	0,22	<0,01	<0,01	90	0,2	<0,01	0,01	0,218	7,9	0,081	<0,005	1,2	<0,01	2,078	0,840	18,64
Lampe MB 49, Korpus	HDM 2245	0,35	0,02	0,01	90	0,1	0,01	<0,01	0,170	8,1	0,075	<0,005	1,2	<0,01			
Lampe MB 49, Korpus	HDM 2244	0,26	0,01	<0,01	90	0,3	0,01	0,01	0,186	7,8	0,089	0,018	1,7	<0,01			
Lampe MB 9, Henkel	HDM 2241	0,08	0,08	0,05	86	0,1	0,06	<0,01	0,021	10	0,034	<0,005	3,1	0,01	2,063	0,833	18,84
Lampe MB 9, Korpus Lot	HDM 2280	0,08	0,08	0,04	87	0,1	0,07	<0,01	0,023	9,1	0,028	<0,005	3,1	<0,01			
Bronzelampe MB 9, Korpus	HDM 2240	0,11	0,08	0,02	88	0,1	0,12	0,01	0,022	8,7	0,024	<0,005	2,8	<0,01	2,064	0,833	18,83
Bronzelampe F 306, Fuß	HDM 2250	0,23	0,06	0,02	81	5,9	0,15	<0,01	0,023	8,9	0,023	0,006	3,3	<0,01			
Bronzelampe F 306, Henkel	HDM 2251	0,11	0,08	0,03	88	0,1	0,09	<0,01	0,023	8,9	0,025	0,005	2,9	<0,01	2,064	0,833	18,84
Bronzelampe F 306, Deckel	HDM 2252	0,11	0,08	0,02	88	0,2	0,11	0,01	0,020	8,1	0,024	0,006	3,3	<0,01			
Bronzelampe F 306, Korpus	HDM 2253	0,08	0,08	0,03	87	0,1	0,11	<0,01	0,020	9,6	0,024	<0,005	3,4	<0,01			
Bronzelampe F 305, Korpus	HDM 2246	0,19	0,14	0,04	83	0,1	0,09	0,01	0,021	12	0,023	<0,005	4,2	0,01	2,063	0,833	18,83
Bronzelampe F 305, Fuß	HDM 2247	0,15	0,14	0,01	86	0,2	0,11	0,01	0,026	10	0,020	0,010	3,9	<0,01			
Zierbesläge																	
Dionysos F 108, links Mirtre	HDM 2271	0,70	0,10	0,02	87	0,1	0,26	<0,01	0,023	8,5	0,027	0,006	3,5	0,01	2,062	0,832	18,84
Dionysos F 108, rechts o.*	HDM 2272	0,31	0,11	0,03	87	0,1	0,10	<0,01	0,025	8,1	0,028	<0,005	4,1	0,02	2,062	0,832	18,85
Ariadne, Rand rechts unten	HDM 2273	0,28	0,11	0,03	86	0,1	0,14	<0,01	0,024	9,3	0,027	<0,005	3,9	0,02	2,062	0,832	18,85
Kohlebecken																	
Haltering Unterseite	HDM 2262	0,18	0,04	0,05	85	0,1	0,01	<0,01	0,064	11	0,083	<0,005	3,9	0,01			
Fußbereich	HDM 2263	0,21	0,04	0,06	85	0,1	0,03	<0,01	0,062	11	0,069	<0,005	3,9	<0,01	2,069	0,834	18,8
Längsseite oben	HDM 2264	0,23	0,04	0,06	85	0,1	0,04	<0,01	0,062	11	0,080	0,005	3,5	0,01	2,069	0,834	18,81
Löwe 2	HDM 2256	0,21	0,03	0,06	85	0,1	0,02	<0,01	0,067	10	0,079	0,006	4,1	<0,01			
Satyr 1	HDM 2259	0,15	0,03	0,05	85	0,1	0,02	<0,01	0,062	11	0,082	<0,005	4,2	<0,01			
Satyr 2	HDM 2258	0,24	0,03	0,07	84	<0,1	0,02	<0,01	0,074	11	0,085	<0,005	4,4	0,01			
Wandunterkante	HDM 2267	0,20	0,03	0,06	84	<0,1	0,01	<0,01	0,065	12	0,078	0,007	3,8	0,01	2,069	0,834	18,81
Wandunterkante*	HDM 2266	0,06	0,04	0,04	83	<0,1	0,03	<0,01	0,038	7,3	0,032	<0,005	9,6	0,01	2,065	0,833	18,83
Löwe 1	HDM 2257	0,14	0,03	0,06	86	0,1	0,02	0,01	0,060	9,6	0,075	<0,005	3,9	0,01			
Rad	HDM 2265	0,16	0,02	0,06	76	0,1	0,17	0,01	0,050	7,4	0,100	0,005	16	0,02	2,073	0,835	18,79

Tabelle 3 s. Fortsetzung nächste Doppelseite

Entnahmestelle	Probe	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Ag	Sn	Sb	Te	Pb	Bi	²⁰⁸ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	
Katapultspannbuchsen																		
Katapult-Spannbuchse Nr. 1	HDM 2274	0,26	0,06	0,05	85	0,1	0,11	<0,01	0,035	9,3	0,055	<0,005	5,6	<0,01				
Katapult-Spannbuchse Nr. 2	HDM 2275	0,56	0,06	0,05	83	0,1	0,11	<0,01	0,038	10	0,060	<0,005	5,6	<0,01	2,073	0,835	18,77	
Katapult-Spannbuchse Nr. 3	HDM 2276	0,27	0,60	0,07	81	0,1	<0,01	<0,01	0,028	7,5	0,039	<0,005	10	0,01	2,066	0,834	18,82	
Katapult-Spannbuchse Nr. 4	HDM 2277	0,28	0,59	0,06	82	0,1	<0,01	<0,01	0,027	7,2	0,042	<0,005	10	0,01				
Katapult-Spannbuchse Nr. 5	HDM 2278	0,08	<0,01	0,12	78	0,1	<0,01	<0,01	0,137	4,4	0,780	<0,005	16	0,02				
Katapult-Spannbuchse Nr. 6	HDM 2279	0,08	<0,01	0,13	81	0,1	<0,01	<0,01	0,143	4,5	0,801	<0,005	13	0,02	2,083	0,838	18,72	
Kandelaberenteile																		
Fuß R 4, Keilbeschlag	HDM 2191	0,05	0,04	0,05	89	0,1	0,09	0,01	0,095	5,4	0,071	0,005	5	0,05				
Fuß R 4, Reparaturblech	HDM 2193	0,05	0,04	0,06	90	0,1	0,10	<0,01	0,105	4,8	0,084	<0,005	5,1	0,06				
Fuß R 4	HDM 2194	0,04	0,04	0,04	90	0,1	0,13	<0,01	0,098	4,2	0,078	0,005	5,1	0,06				
Stange R 1, Befestigung	HDM 2185	0,25	0,07	0,04	87	0,1	0,10	<0,01	0,243	10	0,032	<0,005	2,4	<0,01	2,064	0,833	18,82	
Stange R 1, Paar 1beweglich	HDM 2186	0,16	0,08	0,05	85	0,1	0,14	0,01	0,021	12	0,029	0,013	2,9	<0,01	2,064	0,833	18,84	
Fuß R 4	HDM 2192	0,19	0,13	0,03	84	0,1	0,15	0,01	0,019	11	0,026	0,005	4,1	<0,01				
Fuß R 4, Keilbeschlag Mitte	HDM 2195	0,15	0,14	0,04	83	0,1	0,09	<0,01	0,025	13	0,022	0,005	3,5	<0,01	2,063	0,833	18,84	
Kandelaberstange R 8	HDM 2198	0,72	0,14	0,03	83	0,1	0,10	0,01	0,023	12	0,025	<0,005	3,5	<0,01	2,063	0,833	18,84	
Kapitell R 9 Manschette	HDM 2196	0,44	<0,01	0,01	83	0,1	0,03	0,01	0,045	11	0,007	<0,005	5,9	<0,01	2,08	0,836	18,75	
Kapitell R 9	HDM 2197	0,14	<0,01	0,01	88	0,1	<0,01	0,01	0,044	11	<0,005	0,006	0,6	<0,01	2,063	0,833	18,84	
Fuß R 3	HDM 2189	0,94	<0,01	<0,01	88	0,1	0,01	0,01	0,057	9,8	0,005	<0,005	0,8	<0,01				
Fuß R 3 Lot	HDM 2188	0,40	<0,01	<0,01	89	0,1	<0,01	0,01	0,045	7,5	0,008	<0,005	2,6	<0,01				
Klimenteile																		
Kline Diana K1	HDM 2202	0,08	<0,01	<0,01	90	0,2	<0,01	0,01	0,166	8,5	0,006	0,006	0,8	<0,01				
Kline Fulcrum 1 Mittelpl.	HDM 2270	0,23	<0,01	<0,01	89	0,2	<0,01	0,01	0,132	9,6	0,006	<0,005	1,2	<0,01	2,072	0,835	18,78	
Seitenbein Kante in Kr	HDM 2268	0,15	<0,01	<0,01	90	0,1	<0,01	0,01	0,210	8,7	0,005	<0,005	0,8	<0,01				
Seitenbein tauschiertes Blech	HDM 2269	0,10	<0,01	<0,01	90	0,1	<0,01	0,01	0,233	9,2	0,005	<0,005	0,7	<0,01	2,071	0,835	18,76	
Beine der Kline III																		
2 B Bleilot Innenaht	HDM 2227	0,39	<0,01	<0,01	12	0,1	<0,10	0,01	0,016	41	<0,005	0,014	33	<0,01				
2 B unten Rand	HDM 2229	0,11	0,02	0,05	89	0,1	0,04	<0,01	0,003	9,6	0,005	<0,005	0,6	<0,01				
2 C unten Rand	HDM 2231	0,08	0,02	0,08	87	0,1	0,05	0,01	0,004	12	<0,005	<0,005	0,4	<0,01	2,082	0,837	18,73	
2 C Unterseite, Rand außen	HDM 2230	0,08	0,03	0,09	88	0,1	0,05	<0,01	0,005	12	<0,005	0,005	0,4	<0,01	2,082	0,837	18,73	
3 A Unterseite Innenseite	HDM 2165	0,10	0,01	0,08	86	0,2	0,06	0,01	0,005	13	<0,005	0,008	0,1	<0,01	2,081	0,837	18,75	
3 A Oberseite Innenseite	HDM 2164	0,09	0,03	0,10	87	0,1	0,05	<0,01	<0,003	13	<0,005	0,006	0,4	<0,01				
2B Oberseite Rand unten	HDM 2228	0,13	0,03	0,08	86	1,5	0,05	<0,01	0,004	11	<0,005	<0,005	0,6	<0,01				
2D 1 oberer Rand	HDM 2215	0,13	0,02	0,14	91	0,2	<0,01	0,01	0,005	8,2	0,009	<0,005	0,6	<0,01				
2F 1 unterer Rand	HDM 2237	1,02	<0,01	0,04	86	0,1	<0,01	0,01	0,113	12	0,052	0,006	0,7	<0,01				
2 A Unterseite 3 unten Rand	HDM 2224	0,16	<0,01	0,05	88	0,1	<0,01	0,01	0,119	11	0,047	0,007	0,6	<0,01				
2E Mittelteil 2	HDM 2235	0,08	0,01	0,01	89	0,1	0,04	0,02	0,027	10	0,007	<0,005	0,5	<0,01				

2E Oberteil 1 Rand	HDM 2234	0,29	<0,01	0,06	87	0,1	0,02	<0,01	0,022	12	0,011	<0,005	0,7	<0,01
3F Rand oben	HDM 2163	0,10	<0,01	0,04	88	0,1	0,02	0,01	0,033	12	0,008	<0,005	0,6	<0,01
2E Unterteil 5	HDM 2236	0,16	<0,01	0,04	87	0,1	0,01	0,01	0,031	12	0,005	0,006	0,5	<0,01
1F Unterteil Rand außen	HDM 2219	0,10	<0,01	0,06	90	0,1	<0,01	<0,01	0,051	9,4	<0,005	<0,005	0,5	<0,01
1E Unterteil 4 unten Rand	HDM 2218	0,51	<0,01	0,05	88	0,1	<0,01	<0,01	0,057	10	0,026	<0,005	0,6	<0,01
1F oben Rand	HDM 2221	0,64	<0,01	0,09	85	0,1	<0,01	<0,01	0,066	13	0,035	<0,005	0,7	<0,01
2A Unterteil 4 unten Rand	HDM 2225	0,44	<0,01	0,01	83	0,1	<0,01	0,01	0,063	13	0,019	<0,005	3,2	0,01
3C Innenseite	HDM 2162	0,47	<0,01	<0,01	82	0,1	<0,01	0,01	0,073	14	0,019	<0,005	3,3	<0,01
3D Mittelring oben	HDM 2160	0,29	<0,01	0,02	85	0,1	<0,01	<0,01	0,056	12	0,018	<0,005	2,5	<0,01
2D 3 innerer Rand	HDM 2233	0,61	<0,01	<0,01	81	0,1	<0,01	0,01	0,076	15	0,019	<0,005	3,2	<0,01
1E Mittelteil unten Rand	HDM 2217	0,42	<0,01	<0,01	86	0,2	<0,01	0,01	0,057	11	0,014	<0,005	2,7	<0,01
1A Oberteil 1 Rand	HDM 2371	0,32	<0,01	0,01	82	0,1	<0,01	<0,01	0,055	14	0,013	<0,005	3,3	0,01
2D 2 äußerer Rand	HDM 2232	0,51	<0,01	<0,01	83	0,1	<0,01	0,01	0,063	13	0,014	0,005	3,3	<0,01
1E 1 oberer Rand	HDM 2216	0,40	<0,01	<0,01	86	0,1	<0,01	0,01	0,055	11	0,013	<0,005	2,3	<0,01
2A Oberteil 1 äußerer Rand	HDM 2222	0,31	<0,01	0,01	85	0,1	<0,01	0,01	0,059	13	0,020	<0,005	2,2	<0,01
2A Unterteil 2 oben Rand	HDM 2223	0,33	<0,01	0,01	84	0,1	<0,01	0,01	0,058	13	0,016	<0,005	2,5	<0,01
E3 Glocke Innenseite	HDM 2167	0,21	<0,01	0,01	84	0,9	<0,01	<0,01	0,058	13	0,020	<0,005	2,5	0,01
3B Fragment eben	HDM 2166	0,31	<0,01	<0,01	85	0,1	<0,01	0,01	0,059	12	0,020	<0,005	2,5	<0,01
3E Rand oben	HDM 2168	0,30	<0,01	0,01	85	0,1	<0,01	<0,01	0,052	12	0,022	<0,005	2,4	0,01
1C oben Rand	HDM 2214	0,61	<0,01	0,02	87	0,3	<0,01	0,01	0,055	9,1	0,012	<0,005	3,3	<0,01
Sonstiges														
Spiegelhalter MB 5 Nr. 1	HDM 2284	0,19	<0,01	0,01	89	0,1	<0,01	<0,01	0,053	10	0,034	<0,005	0,5	<0,01
Spiegelhalter MB 6 Nr. 2	HDM 2285	0,15	<0,01	0,02	90	0,1	<0,01	0,01	0,051	9,1	0,026	<0,005	0,5	<0,01
Athens F 245 Rand unten	HDM 2281	0,09	<0,01	<0,01	90	0,2	0,03	0,01	0,226	7,7	0,116	0,007	1,4	<0,01
Athens F 245 Rand oben	HDM 2280	0,12	<0,01	0,01	88	0,1	<0,01	0,01	0,252	9,7	0,150	<0,005	1,2	<0,01
Silensmaske F 256	HDM 2205	0,33	<0,01	<0,01	88	0,2	<0,01	0,01	0,262	9,3	0,165	0,007	1,9	<0,01
Silensmaske F 257	HDM 2206	0,42	<0,01	<0,01	89	0,2	0,02	0,01	0,233	8,5	0,168	0,005	1,5	0,01
Becken F 282	HDM 2283	0,10	<0,01	0,07	90	0,1	0,01	<0,01	0,076	9,2	0,043	0,009	0,6	<0,01
Athens F 246	HDM 2199	0,24	<0,01	0,03	87	0,1	0,01	0,01	0,061	11	0,038	0,005	0,7	<0,01
Helmfragment F 246	HDM 2200	0,36	<0,01	0,02	87	0,1	0,01	0,01	0,094	11	0,038	<0,005	0,7	<0,01
Aegisfragment F 246	HDM 2201	0,28	<0,01	0,02	88	0,1	0,01	0,01	0,061	11	0,033	<0,005	0,6	<0,01
Nike F 249	HDM 2282	0,21	<0,01	0,01	88	0,1	<0,01	<0,01	0,054	10	0,036	<0,005	1,1	<0,01
Greifenplatte, F 260	HDM 2260	0,32	0,08	0,06	87	0,1	0,09	<0,01	0,018	10	0,024	<0,005	1,6	<0,01
Gefäß MB 41	HDM 2203	0,50	<0,01	0,07	86	0,5	<0,01	0,02	0,049	11	0,018	<0,005	1,7	<0,01
Deckel MB 41	HDM 2204	0,12	<0,01	0,03	91	0,3	<0,01	0,01	0,031	8,2	0,005	<0,005	0,7	<0,01

Tabelle 3 Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalysen an den Bronzefunden von Mahdia.

Die Angaben zum Agon und zur Herme, wo nur die Werte für Kupfer, Blei und Bismut angegeben sind, beruhen auf Analysen mit Atomabsorptionsspektrometrie am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg. * = nach korrigierter Zuordnung (s. Anm. 58).

und ein Kandelaberteil sind mit toskanischem Blei versetzt, was nach den bekannten historischen Quellen unwahrscheinlich ist⁷².

Die Diskussion um den Fernhandel mit Blei gestaltet sich schwierig, weil die naturwissenschaftlichen Untersuchungen teilweise auf Herkunftsgebiete deuten, für die es laut der historischen und archäologischen Forschung keine Quellengrundlage gibt. Auf den Kolloquien von 1992 und 1995 wurde die Provenienz und die Verwendung der Bleibarren von Mahdia daher kontrovers diskutiert⁷³.

Die Isotopensignatur und die Inschriften der Barren sprechen für eine Herkunft aus Spanien, genauer aus der Sierra Cartagena⁷⁴, deren große Bedeutung für den römischen Metallbedarf in republikanischer Zeit bekannt ist⁷⁵. Dieselbe Isotopensignatur weisen alle schiffseigenen Bleiteile auf; die Barren gehörten also zum Fahrzeug⁷⁶. Auch das Holz stammt vermutlich aus dem westlichen Mittelmeer⁷⁷. Die Werft des Schiffes muss also dort gelegen haben.

Weniger einleuchtend ist zunächst die Entsprechung zwischen dem Sockelblei des Agons und sardischen Erzen⁷⁸. Deren Bedeutung für den mediterranen Handel im Wandel der Zeiten ist noch unklar. Dortige Kupfererze wurden seit der Bronzezeit genutzt und die Bleilagerstätten spätestens seit der fortgeschrittenen Kaiserzeit intensiv ausgebeutet⁷⁹. Ihre Isotopensignaturen zeigen jedoch auch frühere römische Bleiartefakte⁸⁰. Demnach kommt Sardinien als Lieferant für den antiken mediterranen Bleihandel in Betracht⁸¹, sofern es im Mittelmeerraum nicht noch eine bisher unbekannte Lagerstätte mit derselben Bleiisotopensignatur gibt.

Die Quantität des Bleihandels in der Kaiserzeit belegen zahlreiche Barren auf Schiffswracks⁸². Neuere naturwissenschaftliche und epigraphische Untersuchungen solcher Stücke geben zudem detaillierte Informationen. So werden auch literarisch nicht erwähnte Abbaugelände mit oft zeitlich eingrenzbarer Bedeutung erfasst⁸³.

Angesichts der großen Bleimengen, die in der Kaiserzeit umgeschlagen wurden, erscheint der hellenistische Handel mit diesem Metall wenig bedeutend. Darauf verweist die geringe Menge an entsprechenden Barren auf den relativ vielen gefundenen Wracks⁸⁴. Blei fiel in erster Linie als Nebenprodukt der Silbergewinnung an, und Laurion als eine der wichtigsten Silberminen Griechenlands hatte im späten Hellenismus den Zenit seiner Produktion bereits überschritten. Deshalb wurde vermutlich bereits in der griechischen Welt auch Blei aus dem westlichen Mittelmeer verwendet⁸⁵. Aus unserer Sicht stehen die naturwissenschaftlich gewonnenen Erkenntnisse deshalb nicht im Widerspruch zur historischen Quellenlage, sondern bieten Informationen und Impulse für die archäologische Forschung.

⁷² Meier, Fernhandel.

⁷³ G. Hellenkemper-Salies, *Bonner Jahrb.* 192, 1992, 530; dies. (Anm. 32) 199–219.

⁷⁴ Ebd.; Begemann/Schmitt-Strecker, Blei; Eck, Bleibarren; Meier, Fernhandel.

⁷⁵ Meier, Fernhandel; ders., *Helvetia arch.* 28, 1997, 2–14; Trincherini u. a. (Anm. 28); A. Alessandrello u. a., *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B* 61, 1991, 106–117.

⁷⁶ Hellenkemper-Salies, *Schiffsfund*, 23; dies. (Anm. 73).

⁷⁷ C. Börker, *Bonner Jahrb.* 196, 1996, 229 f.

⁷⁸ Begemann/Schmitt-Strecker, Blei; Hellenkemper-Salies (Anm. 32).

⁷⁹ Meier, Fernhandel; F. Begemann u. a., *European Journal Arch.* 4, 43–85; M. Bode u. a. in: W. Melzer / T. Capelle (Hrsg.), *Bleibergbau und Bleiverarbeitung während der römischen Kaiserzeit im rechtsrheinischen Barbaricum* (Soest 2007) 105–123.

⁸⁰ B. Guénette-Beck / A. R. Furger, *Jahresber. Augst und Kaiseraugst*, 25, 2004, 245–272; M. Bode u. a., *Arch. and Anthropological Scien.* 3, 2009, 177–194.

⁸¹ So bereits O. Davies, *Roman Mines in Europe* (Oxford 1935) 69.

⁸² Meier, Fernhandel; ders. (Anm. 75).

⁸³ Guénette-Beck/Furger (Anm. 80); Bode u. a. (Anm. 80); S. Durali-Mueller u. a., *Journal Arch. Scien.* 34, 2007, 1555–1567.

⁸⁴ Meier, Fernhandel; ders. (Anm. 75); M. J. Trejster, *The role of metals in ancient Greek history* (Leiden 1996) 347–350; D. Gibbins in: Z. H. Archibald u. a. (Hrsg.), *Hellenistic Economies* (London 2001) 275 Tab. 10.A1.

⁸⁵ Davies (Anm. 80); J. F. Healy, *Mining and Metallurgy in the Greek and Roman World* (London 1978) 52–62; M. Bartelheim, *Die Rolle der Metallurgie in vorgeschichtlichen Gesellschaften* (Rahden/Westf. 2007) 22–26.

Dr. Roland Schwab, Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie, C 5, Zeughaus, 68159 Mannheim, roland.schwab@cez-archaeometrie.de. – Dr. Gerhard Eggert, Staatliche Akademie der Bildenden Künste, Am Weißenhof 1, 70191 Stuttgart, gerhard.eggert@abk-stuttgart.de. – Prof. Dr. Ernst Pernicka, Institut für Ur- und Frühgeschichte und Archäologie des Mittelalters, Eberhard-Karls-Universität, Schloß Hohentübingen, 72070 Tübingen, ernst.pernicka@uni-tuebingen.de. – Frank Willer, Rheinisches Landesmuseum, Bachstraße 9, 53115 Bonn, Frank.Willer@lvr.de

Abkürzungen

Wie folgt verkürzt zitiert werden die Beiträge des Sammelbandes G. Hellenkemper Salies / H.-H. von Prittwitz und Gaffron / G. Bauchhenß (Hrsg.), *Das Wrack. Der antike Schiffsfund von Mahdia*, Kat. Rhein. Landesmus. Bonn 1 (Köln 1994).

Baatz, Katapultteile	D. Baatz, Die Katapultteile, S. 701–707.
Barr-Sharrar, Lamps	B. Barr-Sharrar, The Bronze Lamps, S. 639–655.
Begemann/Schmitt-Strecker, Blei	F. Begemann / S. Schmitt-Strecker, Das Blei von Schiff und Ladung. Seine Isotopie und mögliche Herkunft, S. 1073–1076.
Cüppers, Bronzelampe	B. Cüppers, Zur Herstellungstechnik der dreiarmligen Bronzelampe, S. 1009–1011.
Eck, Bleibarren	W. Eck, Die Bleibarren, S. 89–95.
Eggert, Schwarzfärbung	G. Eggert, Schwarzfärbung oder Korrosion? S. 1033–1039.
Faust, Klinen	S. Faust, Die Klinen, S. 573–606.
Goebbels/Illerhaus/Meinel, Computertomographie	J. Goebbels / B. Illerhaus / D. Meinel, Computertomographie an Agon und Herme, S. 985–990.
Heilmeyer, Großbronzen	W. D. Heilmeyer, Zur Oberfläche antiker Großbronzen, S. 801–807.
Hellenkemper-Salies, Schiffsfund	Hellenkemper-Salies <i>Der antike Schiffsfund von Mahdia. Entdeckung und Erforschung</i> , S. 5–29.
Mattusch, Herm	C. C. Mattusch, Bronze Herm of Dionysos, S. 431–450.
Mattusch, Statuary	C. C. Mattusch, The Production of Bronze Statuary in the Greek World, S. 789–800.
Meier, Fernhandel	St. W. Meier, Der Blei-Fernhandel in republikanischer Zeit, S. 767–787.
Pernicka/Eggert, Zusammensetzung	E. Pernicka / G. Eggert, Die Zusammensetzung der Bronzeobjekte von Mahdia, S. 1041–1061.
Pfisterer-Haas, Zwergentänzer	S. Pfisterer-Haas, Die bronzenen Zwergentänzer, S. 483–504.
Sobottka-Braun, Klinen	U. Sobottka-Braun, Rekonstruktion der Klinen, S. 999–1006.
Willer, Agon	F. Willer, Die Restaurierung des Agon, S. 971–984.
Willer, Herme	F. Willer, Zur Herstellungstechnik der Herme, S. 959–970.
Willer, Schwarzpatina	F. Willer, Fragen zur intentionellen Schwarzpatina an den Mahdiabronzen, S. 1023–1031.

Conclusion. Samples from a bronze herm of Dionysos in the J. Paul Getty Museum were investigated together with a similar herm from the Roman shipwreck found near Mahdia off the coast of Tunisia, as well as those from other bronze objects of the wreck. It can be shown by trace element concentrations and lead isotope ratios that the two herms are not made of the same material, despite the similarities in aspect, dimensions, style and alloy composition. The investigation of the other bronzes from the shipwreck yielded new information concerning their correlation and the provenance of the metals. Some general aspects of casting effects and the analysis of leaded bronze alloys of large statuary are reviewed and the appearance of original surfaces is briefly discussed.

Résumé. Le buste en hermès de Dionysos dans le musée J. Paul Getty ainsi qu'une pièce très similaire provenant de l'épave de Mahdia sur la côte tunisienne furent analysés avec de nombreux autres objets de cette épave à partir des concentrations en éléments sous forme de traces et en isotopes de plomb. D'après cette analyse, les deux hermès ne proviennent pas du même métal, bien que la forme et les dimensions correspondent de manière étonnante et que même l'alliage se ressemble. En outre la technique de fonte est complètement différente. – Les recherches sur les autres bronzes de Mahdia se concentraient sur l'origine des métaux utilisés. Elles ont donné des informations sur l'assemblage des différentes pièces. On met également en discussion les techniques de fonte et l'analyse des grandes sculptures en bronze, ainsi que la question de l'apparence originelle de ces œuvres, dont la surface était peut-être accentuée par des couleurs.

Résumé. L'indagine sulla concentrazione di alcuni elementi presenti in tracce e sugli isotopi di piombo contenuti rispettivamente nell'erma bronzea di Dioniso proveniente dal relitto di Mahdia (Tunisia) ed in una scultura quasi gemellata conservata nel Museo J. Paul Getty dimostra la disuguaglianza delle sostanze metalliche delle due sculture, contraddistinte tra di loro anche dalle diverse tecniche di fusione. Queste diversità sorprendono tenendo conto delle strettissime somiglianze esterne di forma e dimensione e delle similitudini delle leghe stesse. – L'analisi degli altri oggetti del relitto tunisino, condotta seguendo le stesse metodologie, risponde alla richiesta di determinare l'origine dei metalli impiegati e fornisce indicazioni sull'appartenenza di singoli pezzi a dei complessi comuni. Vengono infine discusse le tecniche di fusione e l'analisi di grandi sculture di bronzo piombato, nonché l'aspetto superficiale di queste, possibilmente accentuato da colori distinti.

Bildrechte. Abb. 1 Malibu, Museum J. Paul Getty. – Abb. 2 Forschungsarchiv für römische Plastik, Köln, Ausführung Gisela Detloff. – Abb. 3 Rheinisches Landesmuseum Bonn, Ausführung Hermann Lilienthal. – Abb. 4, 5 und 9 sowie Taf. 1 Roland Schwab. – Abb. 6, 7 und 8 Ernst Pernicka.