

Technische Keramik aus antiken Bronzeßwerkstätten in Olympia und Athen

GERWULF SCHNEIDER und GERHARD ZIMMER

Zusammenfassung

Technische Keramik aus Grabungen unter der Phidiaswerkstatt in Olympia und vom Kerameikos in Athen umfaßte Fragmente von großen Schmelztiegeln, Blasebalgdüsen und Gußformen für Großbronzen. Die zum Teil rekonstruierbaren Tiegel hatten Durchmesser zwischen 30 und 50 cm bei einer Tiefe von etwa 20 bis 30 cm. Tiegel und Düsen wurden aus am Ort vorhandenen kalkarmen Verwitterungsleimen hergestellt und in getrocknetem, ungebranntem Zustand verwendet. Tiegel und Düsen enthielten hohe Magerungsanteile aus groben, eckigen Quarzen und sind in mehreren Schichten aufgebaut. Die Tiegel waren wahrscheinlich durch eine Armierung aus Eisen verstärkt.

Die Blasebalgdüsen bliesen schräg von oben in die mit Holzkohle und Metall gefüllten Tiegel. Durch die Hitze verschlackten die Düsenmündungen und zum Teil auch die Tiegeleinnenseiten. Am oberen Rand blieben die Außenseiten der Tiegel durch die isolierende Wirkung des rohen Tons ungebrannt.

Die Formen waren ebenfalls aus Ton gefertigt. Für die auf das Wachsmodell aufgetragene, innere Schicht wurden feine, kalkreiche Lehme verwendet, wie sie in Olympia anstehen. Nach dem Antrocknen wurden darüber weitere Schichten gelegt, die aus Tiegelson oder einer Mischung der beiden Tonsorten bestanden. Durch das Brennen der Formen nahmen deren Außenseiten eine rote Farbe an. Die Temperaturen blieben jedoch im Inneren auch beim Eingießen der flüssigen Bronze unter 500 °C bis 600 °C.

Reste von nach dem Gebrauch zerschlagenen Tiegeln und Formen sind nicht immer leicht zu erkennen. Das liegt vor allem auch daran, daß es sich um schwach gebranntes, bei Tiegelrückseiten und Düsen um teilweise ungebranntes Material handelt und sich die einzelnen Tonschichten leicht voneinander trennen.

In den Gießwerkstätten wurden örtliche Tone verwendet, und die Materialien der verschiedenen Orte sind unterscheidbar. Da das auch für die Gußkerne von Bronzen gilt, ist durch die Untersuchung solcher Kerne in begrenztem Umfang eine Lokalisierung möglich.

→ Gußformen
zum Aufbau techn.
Keramik

Einführung

In den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts stieß der griechische Archäologe S. KOUMANOUDIS bei Grabungen am Südrand der Akropolis in Athen auf eine große Grube, deren Verfüllung unter anderem aus Bronzeresten, Schlacken und Tonbrocken verschiedener Form bestand. KOUMANOUDIS maß diesem Befund keine große Bedeutung bei und erwähnte die Ergebnisse nur kurz im Jahrgang 1878 der Zeitschrift *Praktika der Archäologischen Gesellschaft zu Athen*. Pläne oder eine genauere Beschreibung der Fundumstände und der geborgenen Materialien legte er nicht vor, doch erkannte er zu Recht, daß es sich um den Abfall einer Werkstatt handeln mußte, die Bronzestatuen goß.¹

Erst lange Zeit danach, im Jahre 1936, legte die amerikanische Grabung auf der Agora in Athen eine kleine Grube mit vergleichbarem Inhalt frei (Abb. 1). Sie enthielt zahlreiche Brocken aus gebranntem Ton.² Das sehr bröckelige, nicht hoch gebrannte Material ließ sich in mühevoller Kleinarbeit zusammensetzen und ergab etwa zwei Drittel einer Gußform aus Ton, in der die leicht unterlebensgroße Statue eines jungen Mannes, eines Kouros, gegossen worden war (Abb. 2). Die Form war nach dem Erkalten des Metalls zerschlagen worden, und nach Beendigung der Arbeiten gelangten die Fragmente in die Gießgrube. Der ganze Befund stammt aus der Mitte des 6. Jhs. v. Chr. und ist damit einer der frühesten uns faßbaren Hinweise auf Werkstätten für griechische Großplastik aus Bronze.

Seit diesem Befund haben Grabungen an verschiedenen Orten in Griechenland zahlreiche Überreste von Werkstätten erbracht, in denen große Bildwerke aus Bronze gefertigt wurden, so in Olympia, Nemea, Rhodos, Korfu, Korinth, Demetrias, im Kerameikos von Athen und in Kassope.³

In den letzten Jahren hat sich das Interesse der klassischen Archäologie an antiken Herstellungstechniken, insbesondere auch von Großbronzen verstärkt. Ein Grund ist darin zu sehen, daß glückliche Umstände hervorragende Werke griechischer Bronzegegesser ans Tageslicht brachten, wie die Statuen aus dem Hafen von Piräus oder dem Meer bei Porticello. Die beiden Kriegerfiguren von Riace haben unsere Vorstellung von griechischer Bronzeplastik des 5. Jhs. v. Chr. ganz entscheidend bereichert.

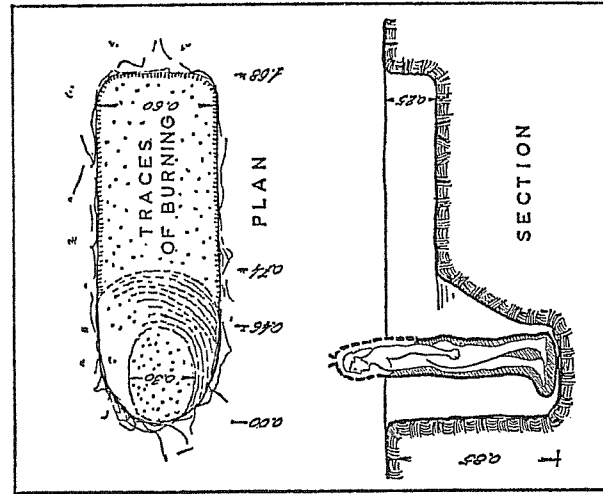


Abb. 1 Schema der archaischen Gießgrube. Athen, Agora

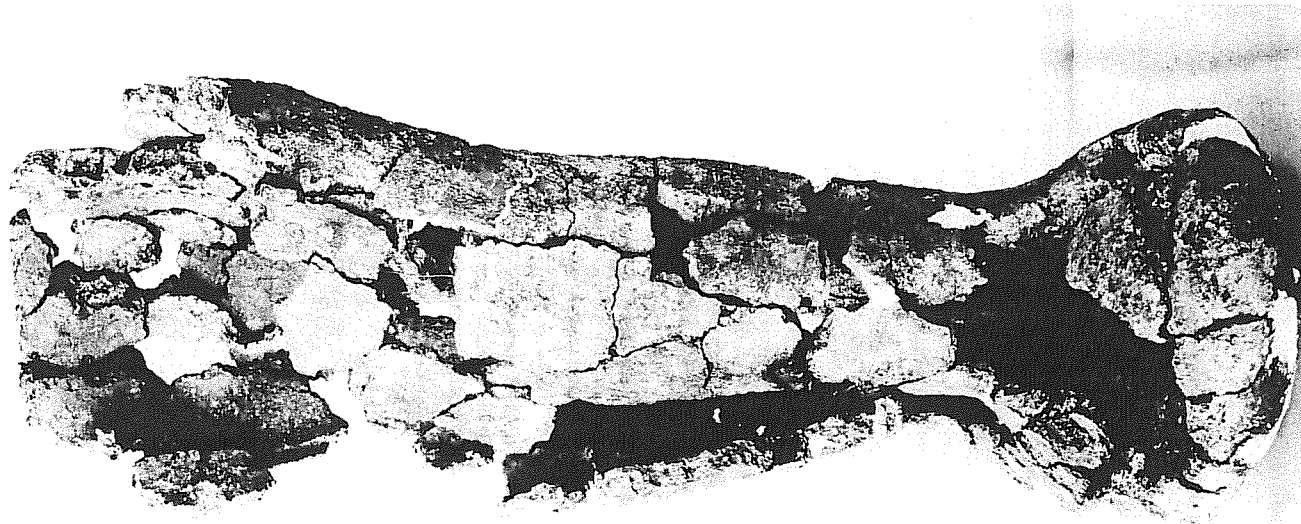


Abb. 2 Gußform für die Statue eines jungen Mannes. Athen, Agora

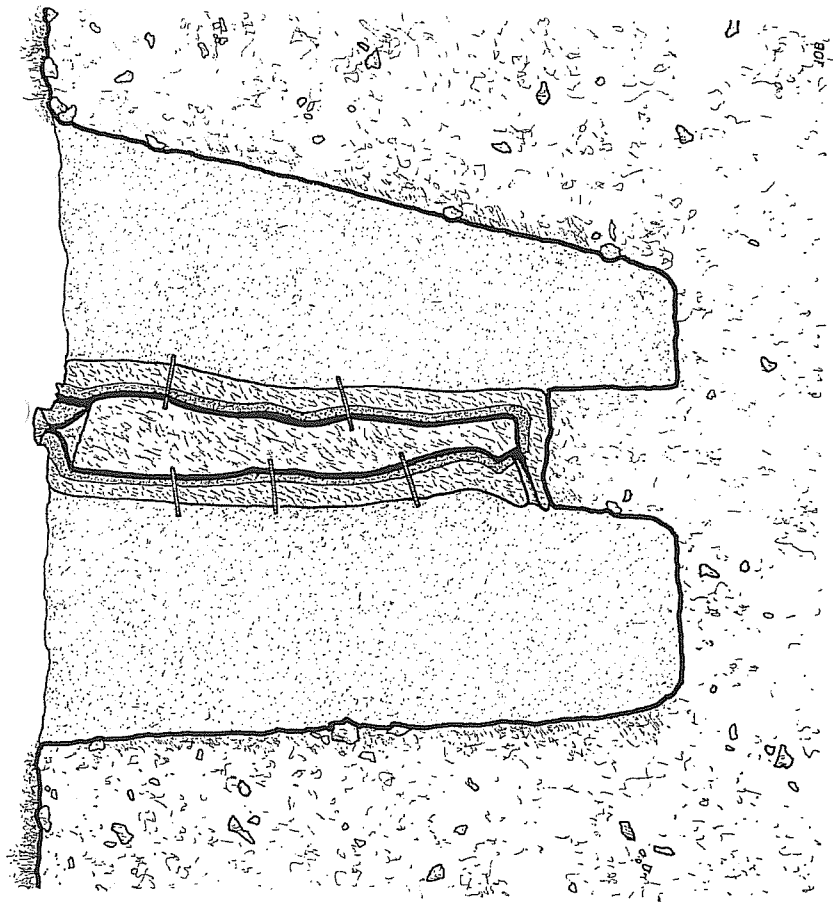


Abb. 3 Schema für den Guß eines Beines nach dem Wachsausschmelzverfahren

Daneben haben zunehmend Umweltprobleme die restauratorische Behandlung längst bekannter Bildwerke erforderlich gemacht. Die im Zusammenhang mit den Konservierungsarbeiten vorgenommenen Untersuchungen machten es dabei oft zum ersten Male möglich, Aussagen zu technischen Details der Kunstwerke zu treffen.

Dieser Erkenntnisstand traf sich mit einer Forschungsrichtung innerhalb der klassischen Archäologie, die der Frage nach dem Aussehen und der Wirkung eines Werkes auch die Frage nach seiner Entstehung und Herstellung hinzugefügt hat. In diesem Zusammenhang wird nun auch den Funden aus den Gießereibetrieben eine verstärkte Bedeutung zugemessen.

Die Herstellung von Bronzeplastiken erforderte ein kompliziertes und technisch aufwendiges Verfahren, das zwar im Prinzip bekannt ist, dessen technologische Einzelheiten jedoch noch weitgehend unerforscht sind. Die Antike kannte dafür ausschließlich den Guß nach dem Wachsausschmelzverfahren (Abb. 3). Auf einen Kern aus gemagertem Ton, der die Rohform der Statue wiedergab, wurde eine Wachsschicht aufgetragen, in der alle Einzelheiten der späteren Bronzeoberfläche ausgestaltet waren. Das Ganze umgab man mit einer dünnen Schicht aus fein geschlämmtem Ton und legte noch mindestens eine, grober gemagerte Tonschicht darüber. Um das Wachs auszuschmelzen, wurde nun die ganze Form – meist in Gruben – erhitzt. Kleine rechteckige Stifte, die vom Mantel bis in den Kern reichten, fixierten dabei den Kern in seiner Position (Abb. 3). War die Form gebrannt, umgaben sie die



Abb. 4 Eingußrichter. Athen, Agora

Arbeiter mit Erde, stampften sie fest und gossen dann von oben das flüssige Metall durch eine Öffnung ein. Bei größeren Statuen kam in der Regel der Stückguß zur Anwendung, d. h. einzelne Glieder wie Kopf, Hände und Füße wurden getrennt gegossen und zusammengelötet.

Die geschilderte 'direkte' Methode hatte den Nachteil, daß im Falle eines Gießungslücks auch das Modell verloren war, ein Risiko, das man schon am Beginn des 5. Jhs. v. Chr. durch die Einführung des 'indirekten' Verfahrens ausschaltete. Dabei wurden von einem Tonmodell (vgl. Abb. 38) Teilformen abgenommen. Diese wurden mit Wachs ausgepinselt und mit einer Kernmasse gefüllt. Nach dem Trocknen konnte das Hilfsnegativ entfernt werden. Der übrige Arbeitsablauf entsprach dem des direkten Verfahrens.

Die Mehrzahl der Funde aus antiken Gießwerkstätten stellen Fragmente der Formen aus Ton dar. Obwohl die Reste der Formmäntel oft reichlich sind und kistenweise in den Grabungsmagazinen der Bearbeitung harren, gelang es bisher nicht, größere Zusammenhänge ähnlich dem Kourios aus der archaischen Gießgrube der Agora zu rekonstruieren. Meist konnten nicht mehr als kleine Faltenpartien wiedergewonnen werden. Überwiegend liegt dies daran, daß die Formmäntel in winzige Partien zer schlagen sind, wobei das Material beim Verfüllen der Gruben noch weiter zerkleinert und zerrieben wurde. Eine größere Chance, erhalten zu bleiben, hatten dagegen absteigende Partien des Formmantels wie z. B. die Entlüftungspfeifen oder die Einfüllrichter, von denen auch mehrere Exemplare in den Fundzusammenhängen belegt sind (Abb. 4).

Daneben erbrachten die Grabungen in den Werkstattbereichen aber auch noch andere Fragmente, die z. T. durch große Hitzeeinwirkung an der Oberfläche blasig aufgetrieben und verglast sind. In ihnen fanden sich immer wieder kleine grüne Partien, die sich als Einschlüsse von Korrosionsprodukten der Bronze erwiesen. Mehrfach war auch Metall in kleine Risse eingedrungen.

Da diese Materialien unterschiedlicher Form und Konsistenz meist völlig vermischte als Grubenverfüllung aufgefunden wurden und sich oft nur schwer unterscheiden ließen, blieben sie von den Archäologen weitgehend unbeachtet. Es galt daher, nach Wegen zu suchen, dieses Fundmaterial von technischer Keramik der archäologischen Forschung zugänglich zu machen und seine Aussagemöglichkeiten zu überprüfen. Dies konnte nur durch eine Zusammenarbeit von Archäologen und Naturwissenschaftlern geschehen.

Einen Beginn der gemeinschaftlichen Bemühungen bildete die gemeinsame Reise zu Plätzen mit antiken Werkstättenfunden in Griechenland.⁴ Der Rahmen für die systematischen Untersuchungen war dann ein von der Stiftung Volkswagenwerk gefördertes Forschungsvorhaben, das am Antikenmuseum in Berlin durchgeführt wurde und sich mit den »Grundlagen der künstlerischen Bronzeherstellung« beschäftigte.

Die Grabung in Olympia

Ausgangspunkt für eine ausführliche Probenahme und deren systematische Analyse war die Phidiaswerkstatt in Olympia. Dort hatten die Grabungen von 1956 unter der eigentlichen Werkstatt Installationen

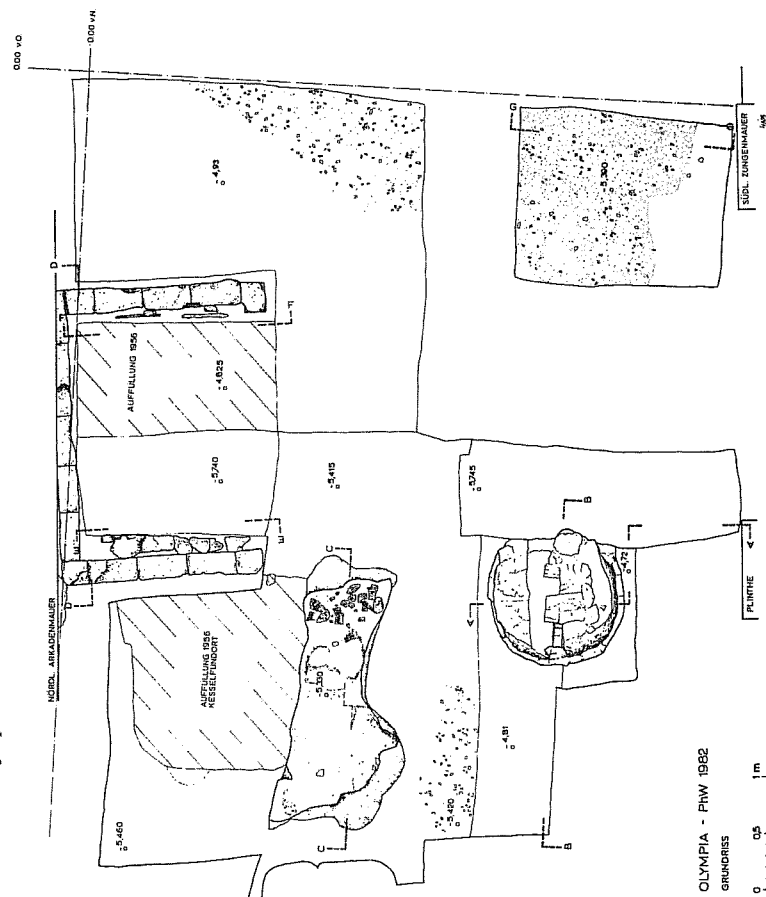


Abb. 5 Grundriß der Gießereinstalltionen der Phidiaswerkstatt in Olympia, oben rechts Lehmziegelkonstruktion, Mitte die nördliche, darunter die südliche Gießgrube

nen einer Bronzeherstellung erbracht. Dabei waren große Mengen von Keramikmaterial gesammelt worden und standen für Probenahmen zur Verfügung. Der damalige Ausgräber A. MALLWITZ hatte die Funde ausdrücklich einer späteren gründlichen Untersuchung vorbehalten.

Eine Nachgrabung 1982 unter der Leitung von W.-D. HEILMEYER⁵ klärte die Zusammenhänge der Arbeitseinrichtungen (Abb. 5) und erbrachte noch weiteren Gießereischutt. Bei der Grabung von 1956 waren zwei Gießgruben entdeckt worden. Die nördliche ist langgestreckt und 1,20 m tief. Von ihr sind nur noch der leicht gebrannte Boden und darauf unkenntliche Bruchstücke eines gebrannten und zerfallenen Formmantels erhalten. Die ursprüngliche Ausdehnung der Grube ließ sich nicht mehr feststellen. Mit ihr verbunden war ein tief eingegrabener Bronzekessel, der wohl Wasser enthielt, das bei der Formarbeit in der Grube gebraucht wurde. Wichtigstes Detail war das Formunterteil, welches sich 1956 am Boden der Grube *in situ* befand. Zusammen mit Formfragmenten, die eindeutig Falten zeigen, ist dadurch der Guß von lebensgroßen Statuen für die Anlage belegt.

Eine zweite Gießgrube südlich davon ist kleiner und rundoval. Die Gleichzeitigkeit der Benutzung ist durch anpassende Formfragmente aus beiden Gruben gesichert. Ihr Charakteristikum ist eine Stütze, die aus zwei senkrecht gestellten Lehmziegeln besteht. Mehrere große Formfragmente zeigen an, daß zumindest in der letzten Phase in dieser Grube hohle Bronzeplatten gegossen wurden. Die Stütze diente wohl als Halterung für die aufrecht stehenden Gußformen.

Neben den beiden Gießgruben fand sich eine rechteckige Konstruktion aus längsgerichteten Lehmziegeln mit den Maßen 2,00 x 2,70 m, die acht Lagen hoch erhalten ist. Da sich im Innenraum Stützen aus Lehmziegeln fanden, war der Bau zum Tragen von schweren Lasten angelegt. Er wird am ehesten verständlich, wenn man ihn als Plattform mit einer Holzabdeckung interpretiert, auf der die in den Gruben gegossenen Teile einer Statue montiert und gelötet wurden. Diesen Arbeitsvorgang zeigt das Außenbild der bekannten Erzgießereischale in Berlin (Abb. 6).⁶



Abb. 6 Erzgießereischale. Berlin, Antikenmuseum

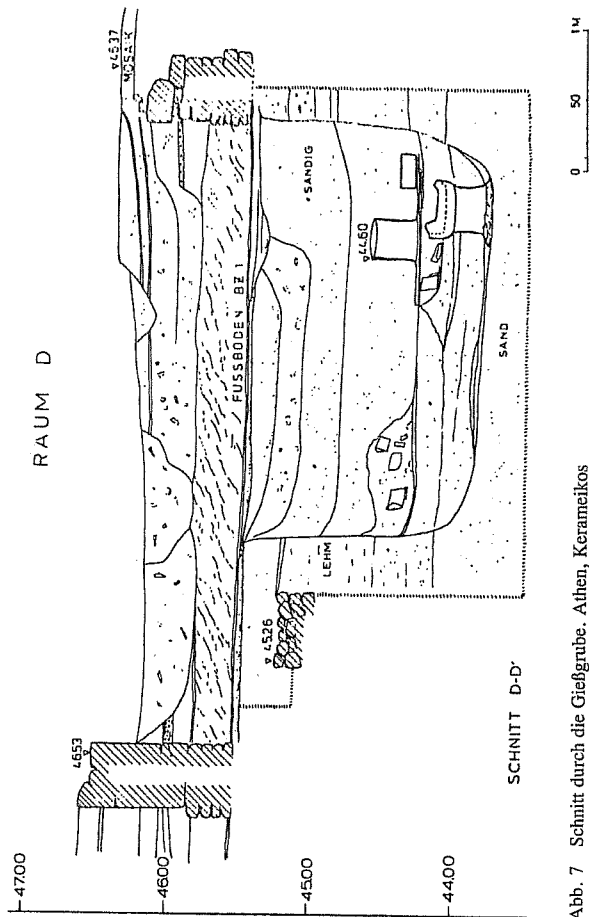


Abb. 7 Schnitt durch die Gießgrube. Athen, Kerameikos

Bei der Nachgrabung in Olympia wurde etwas östlich der Anlagen des 5. Jhs. v. Chr. unter dem Ambon der byzantinischen Kirche noch eine große Grube angeschnitten (im Folgenden als Ambon-schnitt bezeichnet), die den Abfall einer hellenistischen Gießerei enthielt und damit ein gutes Vergleichsmaterial bot.

Die Befunde vom Kerameikos in Athen

Eine weitere Probenreihe lieferte eine Werkstatt für statuarischen Bronzeuß, die 1981 von U. KNIGGE im Kerameikos in Athen entdeckt und ausgegraben wurde (Abb. 7). Im Bereich des Baues Z fand sich auf dem Niveau von 45,5 m ein festgetretener Werkstattboden mit deutlichen Brandspuren. In ihm war

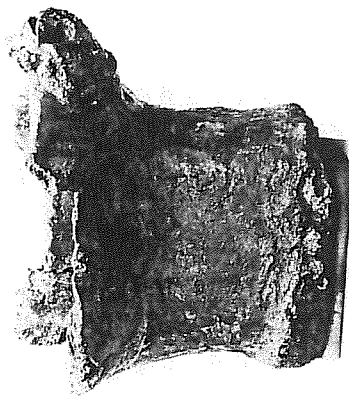


Abb. 8 Formunterteil. Athen, Kerameikos

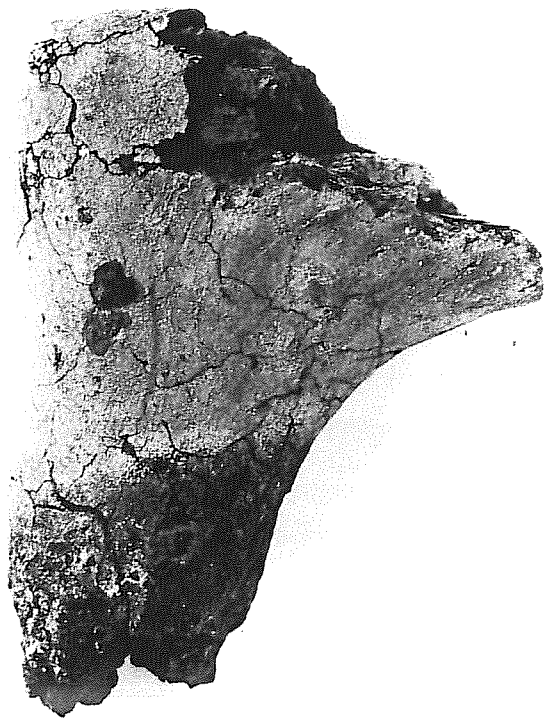


Abb. 9 Gewinkelte Blasebalgdüse. Olympia, Museum

eine Grube eingetieft, die bei einer Länge von 2,8 m eine Tiefe von 1,7 m erreichte und an den Wänden typische Brandspuren aufwies. Sie enthielt keramisches Material, wie es für Gießereien charakteristisch ist.

Drei Formunterteile (Abb. 8) auf zwei verschiedenen Niveaus belegen, daß in dieser Grube mehrere Gußvorgänge stattgefunden haben. Nach dem beobachteten Schichtenverlauf zu urteilen, wurde die Grube nach Abschluß des jeweiligen Gusses nicht mehr völlig freigeschaufelt, sondern die Arbeiter begnügten sich damit, die Form bis zum Unterteil freizulegen.

Von besonderer Bedeutung waren die zahlreichen handgeformten Tonsöpfel, die dazu dienten, die Einfülltrichter und Entlüftungöffnungen der Formen zu verschließen und so ein Eindringen von Erde oder Sand zu verhindern.

Die Bronzeßerei arbeitete kurz vor der Mitte des 5. Jhs. v. Chr. Die entnommenen Proben bilden somit eine gute Ergänzung zu dem Material aus der Werkstatt in Olympia.

Die Funde

Die Grabung in Olympia erfaßte mit der Nachgrabung, die auch den Aushub der alten Grabung noch einmal untersuchte, mit einiger Sicherheit den gesamten Schutt einer kurzzeitig arbeitenden Gießereiwerkstatt. Das Material bot daher die Chance, alle Arbeitsvorgänge in einer solchen Werkstatt zu rekonstruieren.

Die archäologische Sichtung und Bearbeitung der in Olympia gefundenen Keramikmaterialien erbrachte neben den schon bekannten gewinkelten Blasebalgdüsen (Abb. 9) und den Formfragmenten (Abb. 10) auch eine Reihe von Bruchstücken mit unterschiedlich starker Verschlackung an den leicht konkav-

ven Innenseiten (Abb. 11 und 12). Aus mehreren anpassenden Fragmenten ließ sich ein großer Gußtiegel mit einem Durchmesser von 48 cm und einer Tiefe von etwa 20 bis 30 cm rekonstruieren. Bruchstücke mit einem anderen Randprofil gehören zu einem etwas kleineren Tiegel. Die Fragmente aus dem Kerameikos stammten zwar nicht von einem so großen Tiegel, doch erreichte auch dieses Gefäß einen Durchmesser von 30 bis 40 cm und war auf jeden Fall für das Schmelzen einer größeren Metallmenge und damit für den Guß von Statuen geeignet, zumal wenn sie im Stückguß hergestellt wurden.⁸

Gußtiegel und Fragmente von solchen stellen unter Grabungsfunden nichts Ungewöhnliches dar, doch unterscheiden sich die Beispiele aus Olympia und dem Kerameikos durch ihre auffallende Größe. Sie übertreffen die bisher bekannten Beispiele beträchtlich. Vergleichbare Fragmente aus den Grabungen der Agora in Athen wurden bisher stets als »furnace linings«, also als Teile des Ofenausstrichs bezeichnet. Die Funde in Olympia und im Kerameikos weisen jedoch eindeutig Randprofile auf, die sich mit keiner Art von Ofenverstrich in Verbindung bringen lassen. Einschließlich der Fragmente aus der hellenistischen Grube in Olympia standen Proben von vier großen Gußtiegeln für die Untersuchungen zur Verfügung.

Für Tiegel dieser Größe stellt sich natürlich das Problem, wie sie den Beanspruchungen bei Temperaturen von über 1100 °C standhalten konnten und wie ihre Stabilität beim Transport bis zum Einfallstrichter der Gußform gesichert werden konnte. Für diese und ähnliche Fragen konnte nur eine genaue Untersuchung und Analyse der Fragmente Aufschluß bringen. Vergleichbare Untersuchungen bestehen bisher nur für kleine Schmelztiegel.⁹

Untersuchungsmethoden

Bei der Durchsicht sämtlicher Fundkisten sowohl der alten als auch der neuen Grabung in Olympia wurden über 70 Proben keramischen Materials für eine eingehendere Untersuchung ausgewählt. Es

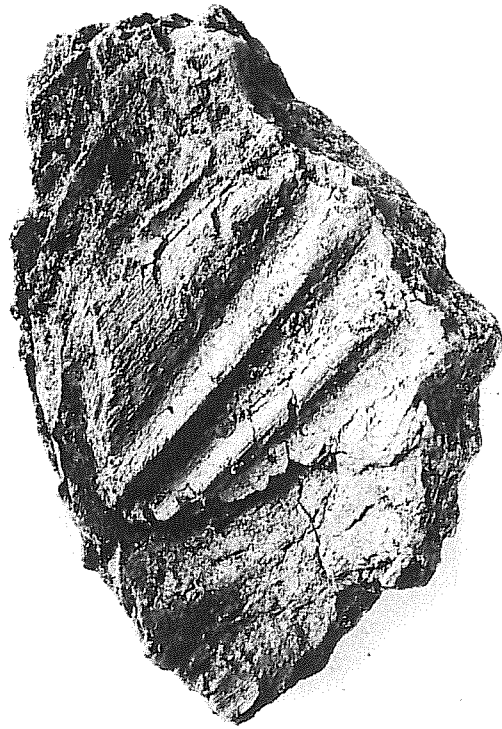


Abb. 10 Formfragment mit Faltenabdrücken. Olympia, Museum



Abb. 11 Tiegelfragment, verschlackte Innenseite. Olympia, Museum

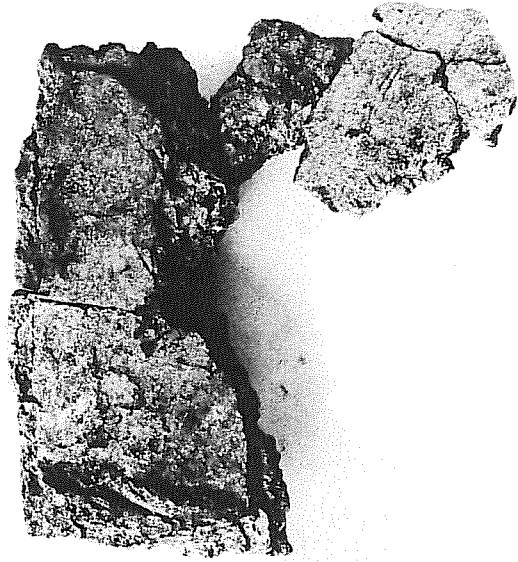


Abb. 12 Tiegelfragment, Außenseite mit Plattenabdrücken. Olympia, Museum

wurde Sorge getragen, daß für jedes makroskopisch unterscheidbare Material wenigstens zwei bis drei ausreichend große Proben (zwischen 10 und 200 g) zur Verfügung standen.

Als besonders aufschlußreich erwiesen sich Querschnitte der Fragmente, die mit einer Diamantsäge vorgenommen wurden. Diese lassen die grobkörnigen Anteile der Keramik, den Schichtenaufbau und die Tiefe der Verschlackung besser erkennen. Die untersuchten Materialien waren durchweg sehr bröckelig, und viele der Fragmente zerbrachen beim Sägen noch weiter. Für die Anfertigung von Dünnschliffen war eine vorherige Tränkung mit Araldit notwendig.

Für die Analyse der Elementzusammensetzung mit Röntgenfluoreszenz (RFA)¹⁰ und die Untersuchungen mit Röntgenbeugung (RD) und Differentialthermoanalyse (DTA) wurden repräsentative Proben von möglichst über 5 g in einer Achatmühle zu Pulver aufgemahlen.

Das Verhalten der verschiedenen Materialien bei höheren Temperaturen wurde in einem Elektroofen unter oxidierenden und reduzierenden Bedingungen untersucht. Letztere ergaben sich durch Erhitzen in verschlossenen Eisentiegeln oder in mit Holzkohle gefüllten, verschlossenen Tiegeln aus Sinterkorund. Die weiter unten beschriebenen Bronzeschmelzversuche mit kleinen Tiegeln aus örtlichem Ton und Schmelzversuche in größeren Tiegeln mit 11 kg Metall im Institut für Werkstoffwissenschaften in Erlangen¹¹ bildeten einen wichtigen Hintergrund für die Interpretation der Funde.

Tiegefragmente, Blasebalgdüsen und Schlacken

Verschlackung der Tiegefragmente

Die Tiegefragmente sind bis auf die Stücke vom oberen Rand durchgehend grau gebrannt. Sie sind einschließlich dieser Randstücke auf den Innenseiten zum Teil verschlackt. Die Schlackenschicht ist örtlich begrenzt, und ihre Dicke schwankt zwischen 1 mm und mehr als 20 mm (Taf. 1, 1 und Abb. 13 bis 15). Bei manchen Fragmenten fehlt sie ganz. Charakteristisch ist im Querschnitt der kontinuierliche Übergang von der unverschlackten, z. T. nur schwach gebrannten Keramik bis zur bläulichen Schlacke. Die Schlacke hat etwa dieselbe Zusammensetzung wie die Keramik und enthält unaufgeschmolzene Reste der Keramikmagerung. Die Verschlackung ist also durch Aufschmelzen des keramischen Tiegels als Folge örtlicher Überhitzung entstanden.¹²

Eine wesentliche Mitwirkung von Metalloxiden aus der Schmelze oder die mögliche Reaktion von Alkali aus der Holzkohlenasche mit dem Tiegelmaterial konnte aus der Analyse nicht bestätigt werden. Weder die Cu-, Sn- oder Pb-Gehalte noch die Na- oder K-Gehalte sind in der Schlacke so weit erhöht, daß eine merkliche Schmelzpunktniedrigung zu erwarten wäre. Bei Brennversuchen unter reduzierenden Bedingungen beginnt die Keramik zwischen 1050 °C und 1100 °C zu verglasen, bleibt aber bis mindestens 1170 °C formstabil. Die Erweichungstemperatur liegt also oberhalb der zum Schmelzen von Kupfer erforderlichen Temperatur.

Dieselben Beobachtungen ließen sich auch bei den in Erlangen durchgeführten Schmelzversuchen machen. Dort trat eine leichte Verschlackung der Innenseite des Tiegels lediglich in der Nähe der Blasebalgdüsen auf. Der übrige Tiegel, auch an der Ausgußstelle der Metallschmelze, blieb unverschlackt.

Außenseiten der Tiegefragmente

Die Außenseiten der Tiegefragmente sind nicht verschlackt. Sie zeigen manchmal Abdrücke von vier-eckigen Platten oder knopfartige Eindrücke (vgl. Abb. 12). Diese Strukturen könnten von einer Metallverstärkung der Schmelztiegel herrühren (vgl. Theophilus¹³).

Besonders auffällig sind die oberen Randstücke aus der nördlichen und südlichen Gießgrube in Olympia. Sowohl die Fragmente mit flachem (Taf. 1, 2) als auch die mit spitz zulaufendem Rand (Abb. 14) bestehen auf der Außenseite aus ungebranntem, braunrotem Ton. Der Übergang von der ungebrannten Rückseite über nur wenige Zentimeter zur verschlackten Innenseite ist kontinuierlich. Die Rückseite

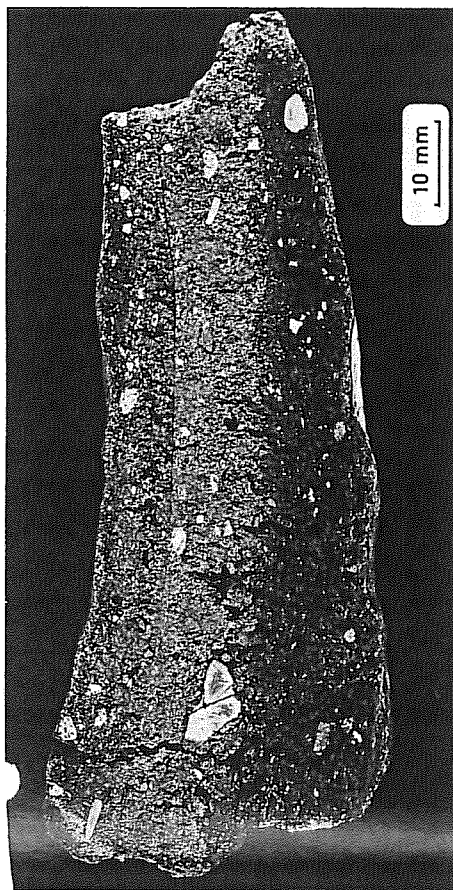


Abb. 13 Querschnitt eines Tiegefragments. Es zeigt grobe Magerungseinschlüsse aus Quarz und einen Aufbau in zwei Schichten. Die Innenseite (oben) ist etwa 1 mm tief verschlackt (Probe 1675, südliche Gießgrube)

enthält noch unzeretzte Tonminerale. Der Glühverlust von Proben der Rückseiten ist nahezu so hoch wie bei entsprechenden ungebrannten Tonen. Dies und Untersuchungen mit DTA (Abb. 16) zeigen, daß das Material nicht heißer als höchstens etwa 400 °C geworden sein kann.

Aus den Untersuchungen ergibt sich, daß beide Tiegel nicht vorgebrannt und nur von innen beheizt worden waren. Das ungebrannte Tiegelmaterial isolierte dabei so gut, daß ein Temperaturabfall von über 1000 °C im Innern des Tiegels bis auf einige 100 °C am oberen äußeren Rand während der für das Schmelzen benötigten Zeit möglich ist.¹⁴ Dies entspricht auch den Temperaturmessungen bei den Schmelzversuchen in Erlangen.

Gegen die Interpretation der gefundenen Fragmente als Ofenausstrich¹⁵ sprechen die oberen Randprofile und die rekonstruierbare Tiegelform. Die beschriebenen Fragmente, einschließlich der ungebrannten Rückseiten, haben eine andere Zusammensetzung als der in der Grabung anstehende Lehm und sind nirgends mit diesem verbacken. Das spricht gegen einen Ausstrich einer Grube und für einen freistehenden Tiegel.

Aufbau und Zusammensetzung der Tiegefragmente

Die Tiegefragmente aus den beiden Gießgruben unter der Phidiaswerkstatt in Olympia haben, wenn man eine gewisse Schwankungsbreite zuläßt, eine einheitliche Zusammensetzung. Sie entsprechen einem kalkarmen, durch hohe Quarzanteile SiO₂-reichen Ton (Tab. 1, Einzelanalysen vgl. Anhang). Die zu zwei verschiedenen Tiegeln gehörenden Fragmente mit unterschiedlichem Randprofil stimmen in der Zusammensetzung überein, weisen jedoch gegenüber den grau durchgebrannten Fragmenten höhere Al- und Fe-Gehalte auf, was durch geringere Anteile an Magerung (Si-Gehalt) bedingt ist. Unterschiedliche Ca-Gehalte der Tiegefragmente beruhen auf einer sekundären Verkalkung bei der Bodenlagerung in einer kalkreichen Umgebung, die makroskopisch und mikroskopisch sichtbar ist. Dies gilt auch für die Fragmente vom Ambonschnitt, die, abgesehen von einer etwas gröberen Magerung, die gleiche Zusammensetzung haben. Die auffälligen Unterschiede in den Mn-Gehalten sind dagegen sicher nicht nur auf Bodenlagerungseffekte zurückzuführen.¹⁶ Die Gehalte an Cu, Sn und Pb spiegeln Verunreinigungen durch die Bronze wider, die bei mehreren Fragmenten auch makroskopisch als metallische bzw. wegen der Korrosion als grüne Einschlüsse erkennbar sind (Taf. 1, 1).

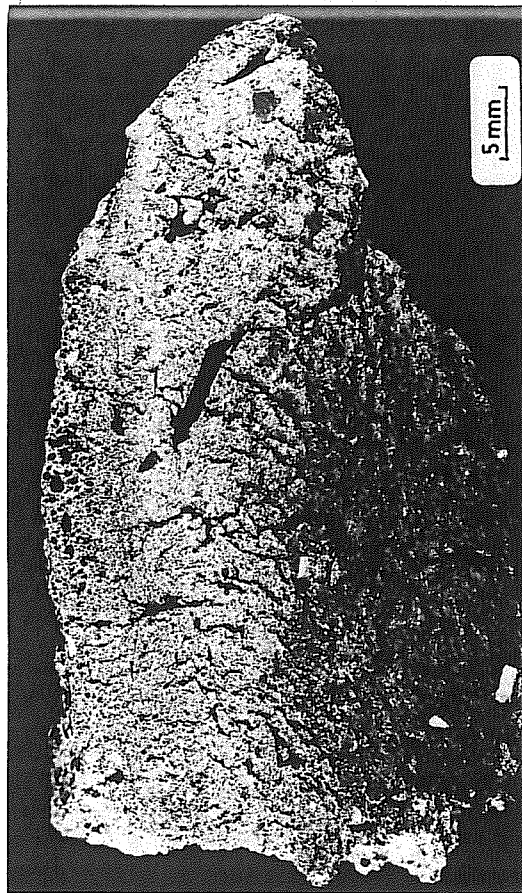


Abb. 14 Querschnitt eines Fragments des spitz zulaufenden oberen Randes. Die Innenseite (oben) ist verschlackt, die Außenseite besteht aus ungebranntem Ton. (Probe 1644, südliche Grube)

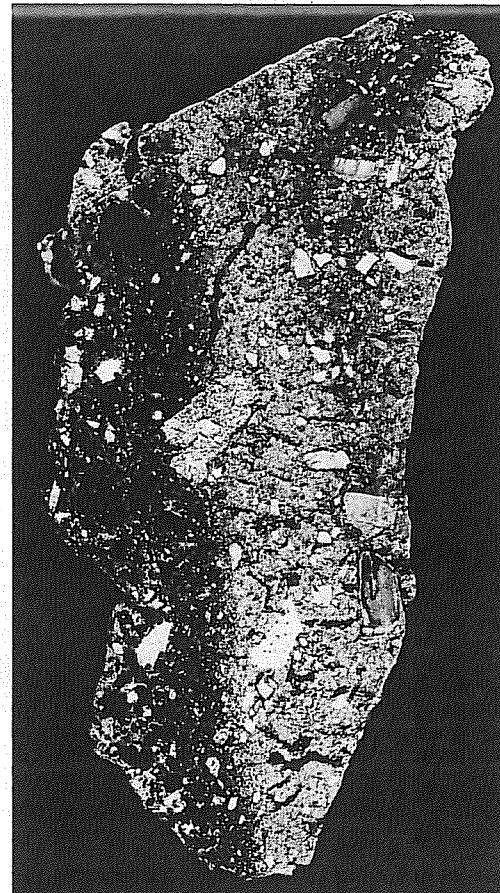


Abb. 15 Querschnitt eines stark verschlackten Fragments des oberen Tiegelandes. Die obere Innenseite des Tiegels ist im Bild rechts oben (Probe 1678, hellenistische Grube, Ambonschnitt)

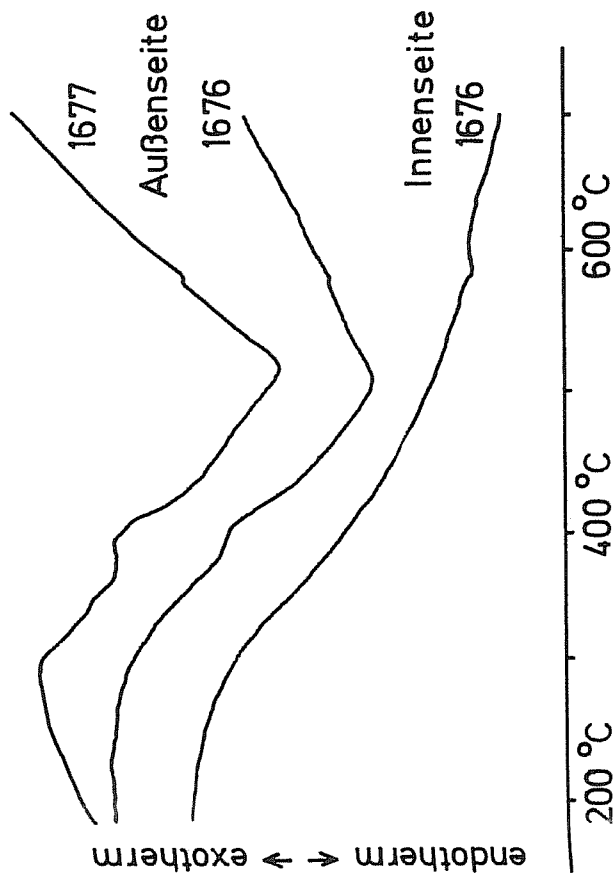


Abb. 16 Differentialthermoanalyse der Innen- und Außenseiten von Tiegelandstücken. Oberhalb etwa 380°C sind bei den ungebrannten Außenseiten die thermischen Effekte erhalten, die bei der Innenseite durch den Brand ausgelöscht sind

Tab. 1. Zusammensetzung eines typischen Schmelztiegelfragments aus Olympia (Probe 1675)

Chemische Analyse (RFA):		Phasenzusammensetzung (RD):	
SiO ₂	77,4 %	Quarz	
TiO ₂	0,58 %	(andere kristalline Bestandteile nicht nachgewiesen)	
Al ₂ O ₃	11,4 %	Korngrößenverteilung:	
Fe ₂ O ₃	4,99 %		
MnO	0,178 %		
MgO	1,20 %		
CaO	1,53 %	750 µm bis 10 mm	5 %
Na ₂ O	0,54 %	50 µm bis 750 µm	25 %
K ₂ O	1,53 %	<50 µm (Poren)	49 %
P ₂ O ₅	0,097 %		
Cu+Sn+Pb	0,07 %		
GV	0,8 %		

Die generelle Ähnlichkeit der Zusammensetzung aller Tiegelfragmente aus Olympia zeigt sich auch unter dem Mikroskop in der Art der nichtplastischen Bestandteile, die aus eckigen Bruchstücken von Quarz oder Quarzgesteinen (Kieselschiefer, Flint u. a.) bestehen (Abb. 17). Diese Magerung war wahrscheinlich schon zum größten Teil in den als Rohstoff dienenden Lehmen enthalten (Abb. 18). Möglicherweise wurde aber auch kleingehacktes Geröll zugemischt. Geröll fällt beim notwendigen Sieben bzw. Schlämmen des Lehms an. Einen deutlichen Hinweis auf einen Magerungszusatz liefert auch der Vergleich mit den Analysen der Tiegelandstücke und der Außenseiten der Formen, die wahr-

scheinlich aus dem gleichen grob gesiebten Ton bestanden und weniger Si (Quarz) und dafür mehr Al und Fe (Ton) enthalten (vgl. Anhang). Eine Wiederverwendung von alten Tiegeln, Schlacken, Formen oder Keramikabfall als Magerungszuschlag konnte nicht beobachtet werden. Die starke Magerung mit grobem eckigem Material ist zur Ableitung von auftretenden Spannungen für Gefäße erforderlich, die hohe Temperaturen und große Temperaturdifferenzen auszuhalten haben. Dies war lange bekannt und wurde von Töpfern bei der Herstellung von Kochgefäßen ausgenutzt.

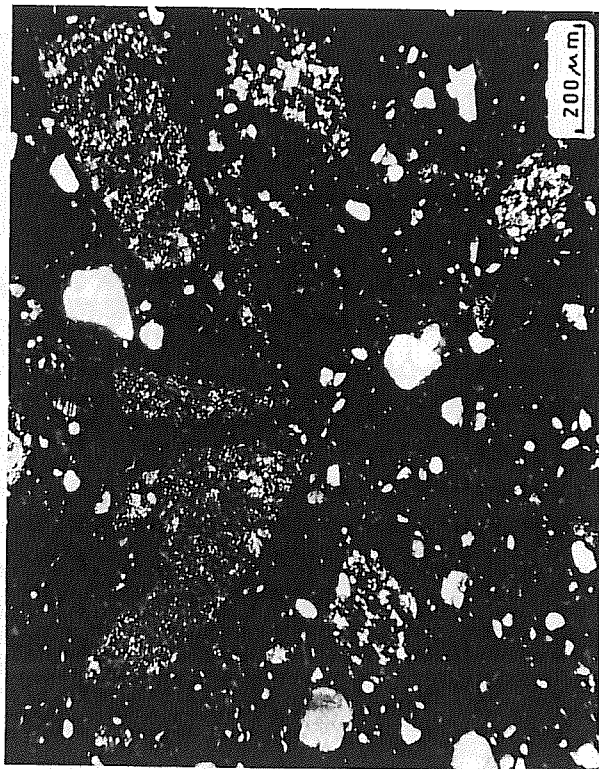
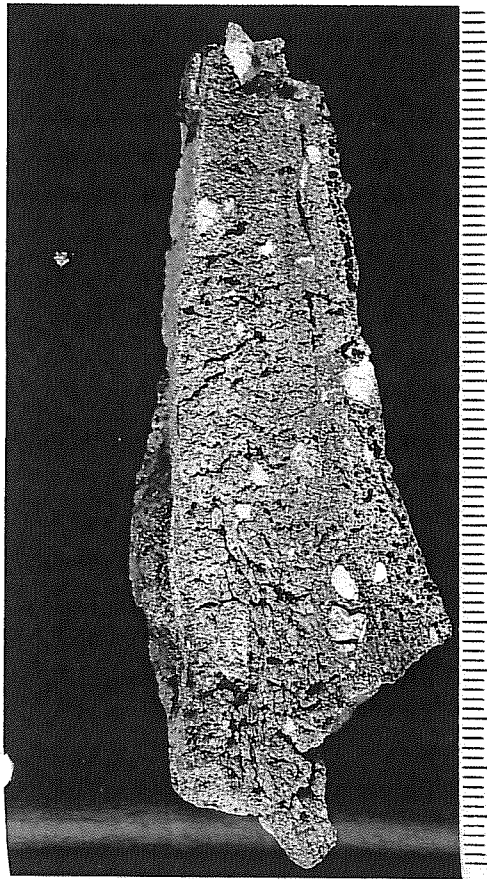


Abb. 17 Mikrofoto eines Tiegelfragments (gekreuzte Nicols). Die glasige Matrix ist schwarz, Quarz und Flintbruchstücke sind als helle eckige Körner erkennbar (Probe 1675)

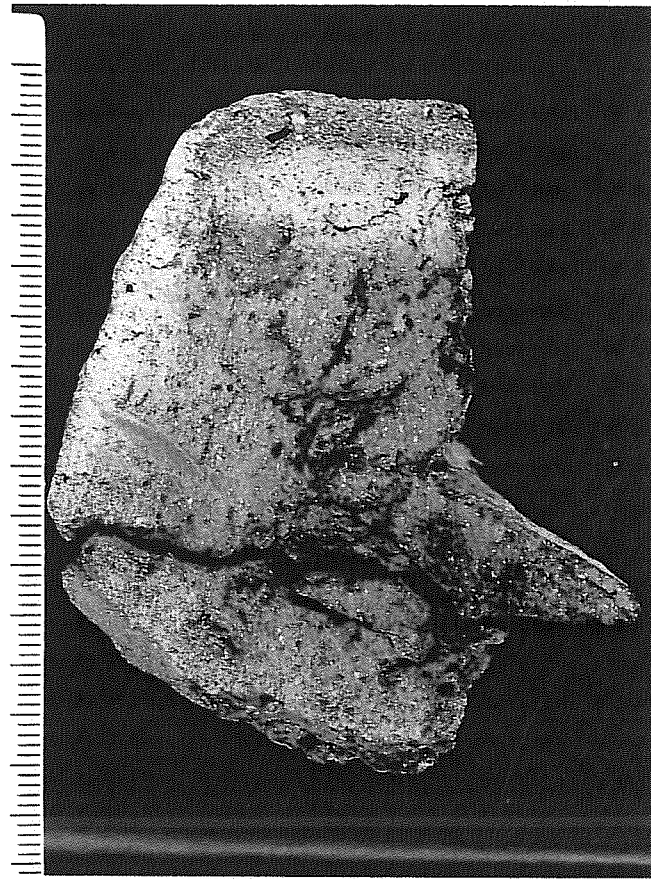
Für alle Beispiele technischer Keramik aus den Bronzezeiterwerkstätten ist eine Magerung aus faserigem Material, vermutlich von Haaren oder Wolle typisch. Quer- oder Längsschnitte der dadurch verursachten Poren sind in Tiegeln, Formen und Gußkernen zu finden (Abb. 19–20; 25). Sie wurden bei allen bisher untersuchten Rohtonen nicht gefunden, sind also von den Gießern bewußt zugemischt worden, um eine größere Porosität zu erreichen.

Die Tiegelfragmente sind aus mehreren Schichten aufgebaut. Die inneren, meist mehr oder weniger stark verschlackte Schicht ist etwa 1 bis 5 mm dick, die äußeren Schichten bis zu einigen Zentimetern. Die Schichten blättern leicht ab, was darauf zurückzuführen ist, daß die neue Schicht jeweils erst nach Antrocknen der alten Schicht aufgetragen wurde. Das Material der Tegel ist durch diesen Schichten-
aufbau, die grobe Magerung und die ungleichmäßige Erhitzung sehr bröckelig und zerfällt leicht, so daß die originale Wandstärke nicht sicher zu rekonstruieren ist. Wahrscheinlich betrug sie 3 bis 5 cm. Die Schichten sind gleich zusammengesetzt, wenn man von einem geringfügig höheren K-Gehalt der inneren Schicht absteht (Probe 1675 a und b, vgl. Anhang). Dies könnte auf die Reaktion mit der Holzkohlensche zurückzuführen sein.

Der Aufbau der Tegel in Schichten wurde von THEOPHILUS¹³ für den mittelalterlichen Glockenguß beschrieben. Er bringt wichtige technische Vorteile: Der Schichtenaufbau vermindert die auftretenden Spannungen und die Gefahr von durchgehenden Rissen. Geschmolzenes Metall kann nur zwischen die



Farbtafel 1.1 Querschnitt eines Tiegelfragments aus zwei Schichten. Zwischen die Schichten ist Bronze eingebracht. Die Innenseite des Fragments ist etwa 1 mm tief verschlackt (Probe 1682)



Farbtafel 1.2 Querschnitt eines Fragments des oberen Tiegelfrandes mit ungebrannter Rückseite (links). Die gerade, schräg nach oben verlaufende Kante im unteren Teil (Pfeil) ist wahrscheinlich als Abdruck einer den Tegel verstärkenden Eisenplatte zu deuten (Probe 1676)



Abb. 18 Mikrofoto eines kleinen Versuchstiegels aus örtlichem Ton (Probe 1669) nach Erhitzung auf 1050 °C



Abb. 19 Mikrofoto eines Tiegelfragments mit runden Poren von Haarquerschnitten (Probe 1677)

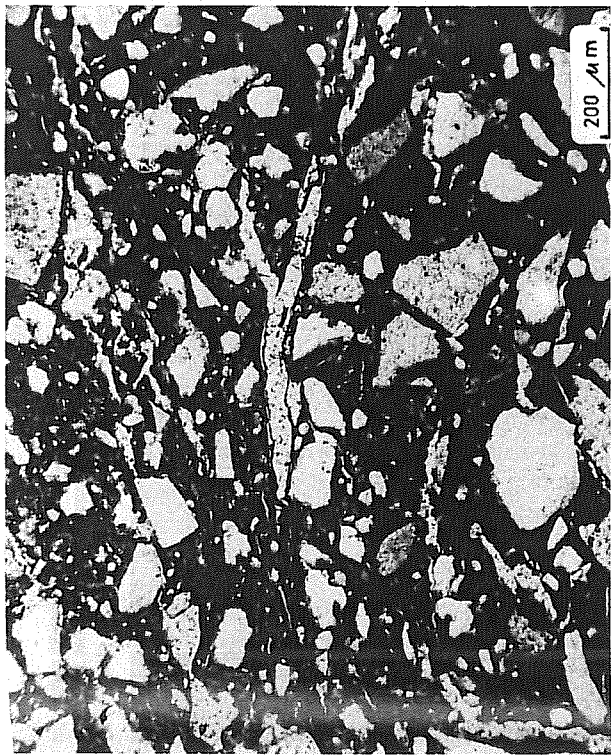


Abb. 20 Mikrofoto einer kleinen Probe der Ausgußfülle mit Poren von Haaren

Schichten fließen, wo es wieder erstarrt. Solche Metallreste in den Rissen und zwischen den Schichten ließen sich bei einigen der metallhaltigen Fragmente beobachten (Taf. 1, 1).

Ausgußfülle

Unter dem Gießereischutt war schon bei der älteren Grabung eine Rinne aus gebranntem Ton gefunden worden.¹⁷ Sie ist am hinteren Ende gebrochen und verengt sich dort zu einer nahezu runden Öffnung. Diese hat denselben Durchmesser wie das Loch in der Wand des großen Schmelztiegels und ließ sich von daher diesem Gefäß zuordnen. Da wegen der zu postulierenden Armierung zwischen der Ausgußfülle und der Tiegelfwand keine Anpassung Bruch an Bruch möglich war, bleibt eine gewisse Unsicherheit. Denkbar wäre auch, daß die Fülle am Formenblock ansaß und zur Ableitung des ausschmelzenden Wachses diente. Ein solcher Ansatz fand sich an dem großen Formenunterteil im Kerameikos (vgl. Abb. 8).

Die Ausgußfülle ist durchgehend oxidierend gebrannt und paßt in ihrer Brennfarbe eher zu den äußeren rotgebrannten Schichten von Formen als zu den grauen oder ungebrannten rotbraunen Außenseiten der Tiegel. Eine Verschlackung ist auch im Bereich des Auslaufs nicht zu erkennen, was nach den Erfahrungen aus den Schmelzversuchen in Erlangen allerdings kein Argument gegen die Zugehörigkeit zum Tiegel ist.

Um weitere Argumente für die Zugehörigkeit der Ausgußfülle zu finden, wurde eine kleine Probe entnommen. Die Untersuchung des Materials läßt jedoch die Frage offen. Die Zusammensetzung ist die eines kalkarmen, stark gemagerten Tons, wie er für die Außenseiten der Tiegel (Analysen der oberen Tiegelfränder, vgl. Anhang), aber auch für die äußeren Schichten der Formen verwendet wurde. Haare in der Magerung (Abb. 20) und Cu-, Sn- und Pb-Gehalte beweisen lediglich die Zugehörigkeit zur technischen Keramik der Bronzezeit.

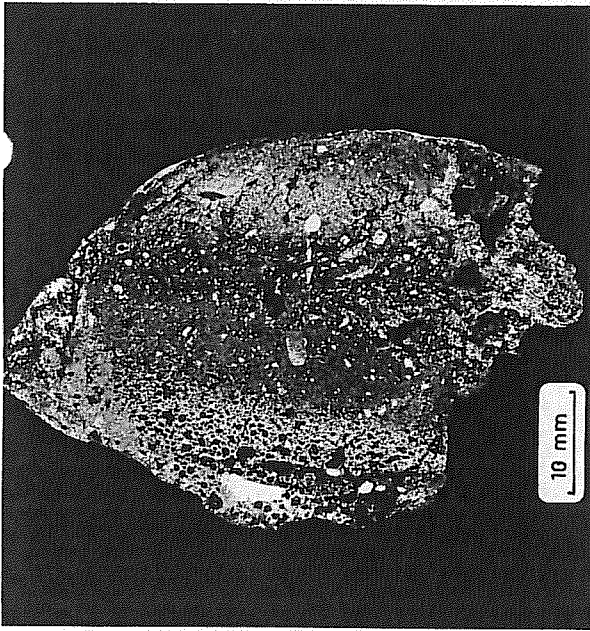


Abb. 21 Querschnitt eines Tiegelfragments vom Kerameikos (Probe 2926)

Tiegelfragmente vom Kerameikos und andere

Von den Funden im Kerameikos in Athen konnte ein zu einem großen Schmelzriegel gehörendes Fragment untersucht werden. Es ist ein durchgehend grau gebranntes und auf der Innenseite verschlacktes Stück vom oberen Rand (Abb. 21). Ein Schichtenaufbau wie bei den Fragmenten aus Olympia ist nicht zu erkennen. Das Material besteht aus einem kalkarmen Ton mit Magerungsanteilen aus groben eckigen Quarz- und Gesteinsbruchstücken und entspricht damit dem in Olympia für Tiegel verwendeten Material. Die andere Herkunft des Tons zeigt sich deutlich in der chemischen Zusammensetzung (vgl. Anhang) und unter dem Mikroskop. Im Gegensatz zu den Materialien aus Olympia enthalten alle Fragmente vom Kerameikos Glimmer und Bruchstücke von Glimmerschiefern.

Drei weitere Fragmente vom Kerameikos unterscheiden sich von diesem eindeutig einem Tiegel zuzuordnenden Fragment vor allem durch die rote Brennfarbe der Außenseite und geringere Dicken. Die Innenseiten sind verschlackt und grau verfärbt. Die Zusammensetzung der Fragmente entspricht der des oben beschriebenen Tiegelfragments. Eines der Fragmente besteht aus zwei scharf getrennten Schichten, wobei die äußere schwach gebrannt und kalkreich ist (Abb. 22).¹⁸ Da es sich bei allen Proben nur um kleine, wahrscheinlich auch in der Wandstärke unvollständig erhaltene Bruchstücke handelt, ist wegen der nicht rekonstruierbaren Form die Deutung als Tiegelmateriale nicht sicher.

Zusammensetzung und Aufbau der Blasebalgdüsen

Die in der Grabung unter der Phidiaswerkstatt gefundenen knieförmigen Blasebalgdüsen (vgl. Abb. 9) sind wie die Tiegel in Schichten aufgebaut. Der dafür verwendete Ton stellt eine Mischung des stark gemagerten kalkarmen Lehm mit einem feineren kalkreichen Lehm dar (Abb. 23). Auch ein Düsenfragment vom Ambonschnitt mit einem etwas größeren Durchmesser des Luftkanals¹⁹ besteht aus diesem Tongemisch. Die Düsen wurden für den Gebrauch wie die Tiegel lediglich vorgetrocknet. Im Innern der dicken knieförmigen Düsen ist noch ungebrannter Ton enthalten. Zur heißen gewordenen Spitze hin ist auch das Innere der Düse oxidierend rot gebrannt (Taf. 2,1). Diese rote Brennfarbe des Innern ist ein typisches Kennzeichen der Düsenfragmente.

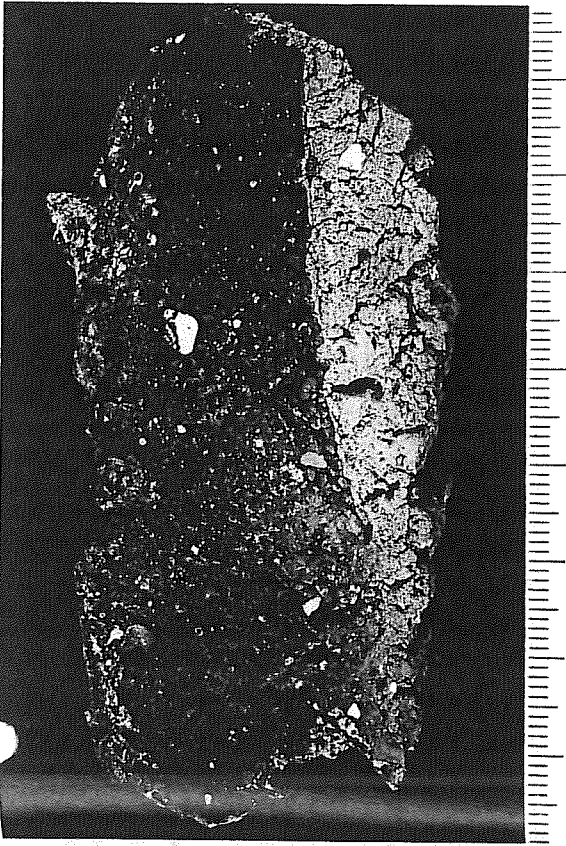


Abb. 22 Zweischichtiges fragiles Tiegelfragment vom Kerameikos (Probe 2923)

Außen sind die Düsen, an deren Mündung sich die heißesten Bereiche des Holzkohlefeuers befinden, meist stark verschlackt, z. T. sogar zugeschmolzen und damit unbrauchbar geworden. Die Schlacke hat etwa die gleiche Zusammensetzung wie die Keramik. In einem Fall (Probe 1645) wurden in der

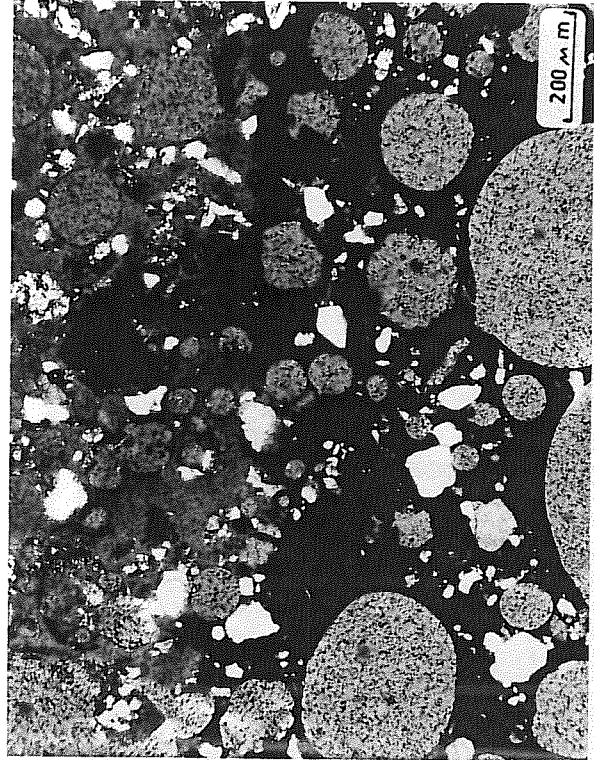


Abb. 23 Mikrofoto aus dem verschlackten Bereich eines Düsenfragments (schräggestellte Nicols) (Probe 1645)

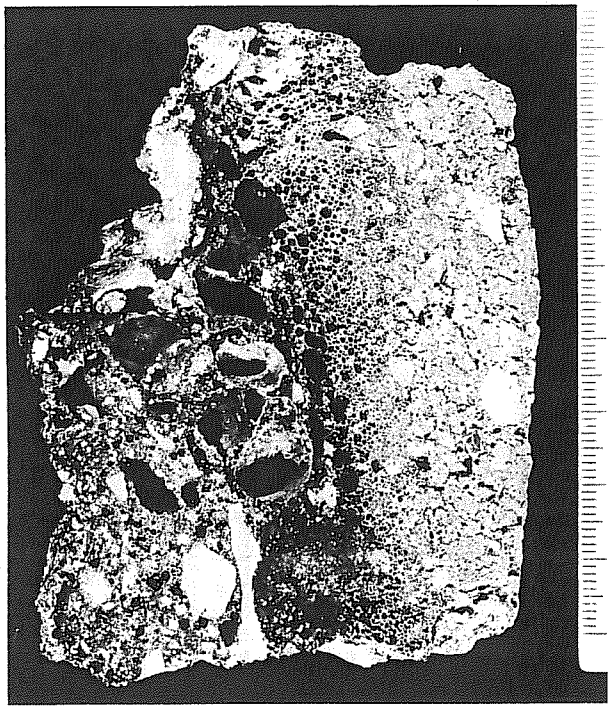


Abb. 24 Mit Tiegelfwand verbackene Tiegelschlacke (Probe 1628)

Schlacke hohe Pb-Gehalte gefunden. Die dadurch verursachte Schmelzpunktniedrigung ist eine weitere Ursache für die weitgehende Aufschmelzung der Keramik. Das Blei ist hier möglicherweise bei der Zugabe als Legierungsanteil auf die heiße, verschlackte Oberfläche der Düse gefallen. Die Schlacken der anderen untersuchten Düsenfragmente enthalten nur Spuren von Blei.



Abb. 25 Mikrofoto der Schlichteschicht der Gußformen mit Poren von Haaren (Probe 1684)

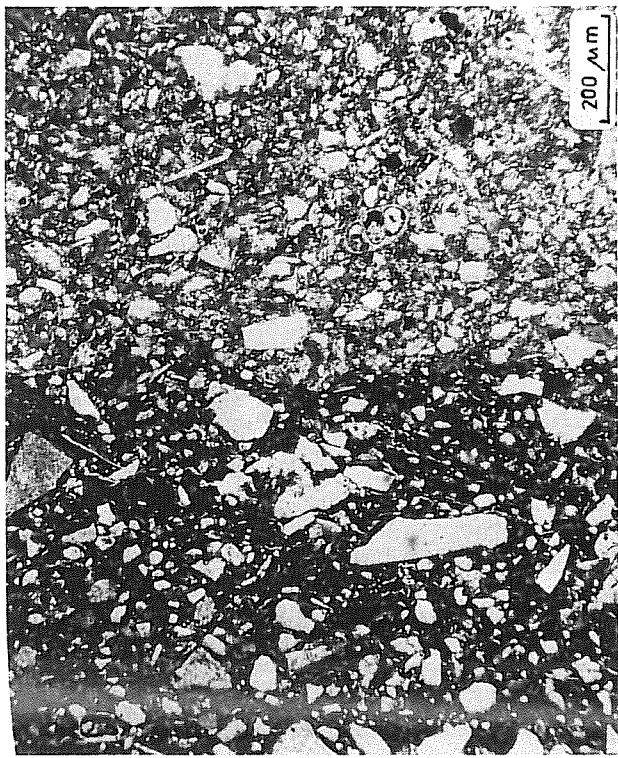


Abb. 26 Mikrofoto der Schlichteschicht (rechts), im linken Teil die mittlere Schicht aus gemischtem groben Material (Probe 1686)

Der Verlauf der Verschlackung schließt aus, daß die Düsen in einen Schachtofen eingebaut waren. Er erklärt sich nur, wenn die Düsen schräg von oben in einen mit Holzkohle angefüllten Tiegel bliesen.

Schlacken und andere Funde

Sowohl in den Gießgruben in Olympia als auch im Kerameikos wurden zahlreiche kleine korrodierte Metallspritzer und kleinere oder größere Schlackenbrocken gefunden. Einen mit Tiegelmaterial verbackenen Schlackenbrocken zeigt Abb. 24. Da im Tiegel bei sorgfältiger Abdeckung der Metallschmelze durch Holzkohle eine Oxidation des Metalls verhindert wird und dadurch keine Reaktion mit dem Keramikmaterial stattfindet, entsteht im Normalfall auch nahezu keine Schlacke. Dies bestätigen auch die Schmelzversuche in Erlangen. Größere Schlackenmengen wie im Fall dieser Probe sind also eher auf mißglückte Schmelzen oder andere Prozesse zurückzuführen.

Die Tafeln 3.1 und 3.2 geben Beispiele für Schlacken, wie sie in Bronzeußwerkstätten anzutreffen sind. Die eine stellt eine vielleicht beim Löten durch zusammengetropfte Metallreste entstandene inhomogene Bronzeschlacke dar. Die andere enthält vor allem Fe-Oxide und ist eine typische Eisenschmelzeschlacke mit dem in der Abbildung erkennbaren charakteristischen Querschnitt. Sie belegt, daß zu der Einrichtung der Bronzeießerei auch eine Schmiede gehörte, in der Kernstützen, Tiegelarmierungen u. ä. hergestellt werden konnten. Eine metallkundliche Untersuchung dieser beiden Schlacken wurde von ZWICKER²⁰ vorgenommen.

Formfragmente und Gußkerne

Aufbau und Zusammensetzung der Formfragmente aus Olympia

Die Formfragmente unterscheiden sich von den Tiegel- oder Düsenfragmenten durch die fehlende Verschlackung. Sie sind oft in mehreren Schichten aus verschiedenen Tonen aufgebaut. Das Material ist

In der Schicht sind reichlich Fossilien, vorwiegend Foraminiferen enthalten (Abb. 26). Die Fossilreste aus Kalk beweisen zusammen mit dem übrigen hohen primären Kalkanteil, daß trotz der Füllung der Form mit flüssiger Bronze im Innern der Form die Temperaturen 600 °C nur kurzzeitig überschritten haben können. Der Glühverlust der Schlichte bei 900 °C ist daher annähernd so hoch wie bei entsprechenden Rohtonen. Die Oberfläche der Schlichteschichten zeigt Strukturen (Abb. 27), die wahrscheinlich Spuren der Bearbeitung des Waxes oder – beim indirekten Verfahren – des Modells wiedergeben.

Verschiedene Proben der Schlichte haben eine in etwa übereinstimmende Zusammensetzung (Tab. 2, Einzelanalysen vgl. Anhang), die derjenigen der in Olympia und Umgebung anstehenden feinen Tonmergel entspricht.

Tab. 2. Zusammensetzung der Schlichteschicht der Gußformen in Olympia (Probe 1686 c)

Chemische Analyse (RFA):		Phasenzusammensetzung (RD):	
SiO ₂	53,8 %	Quarz	
TiO ₂	0,52 %	Calcit	
Al ₂ O ₃	9,33 %	Plagioklas	
Fe ₂ O ₃	3,97 %	Korngrößenverteilung:	
MnO	0,084 %	> 750 µm	0 %
MgO	2,09 %	50 µm bis 750 µm	25 %
CaO	13,8 %	< 50 µm	72 %
Na ₂ O	1,22 %	(Poren)	3 %
K ₂ O	1,50 %		
P ₂ O ₅	0,132 %		
Cu + Sn + Pb	0,66 %		
GV	12,9 %		

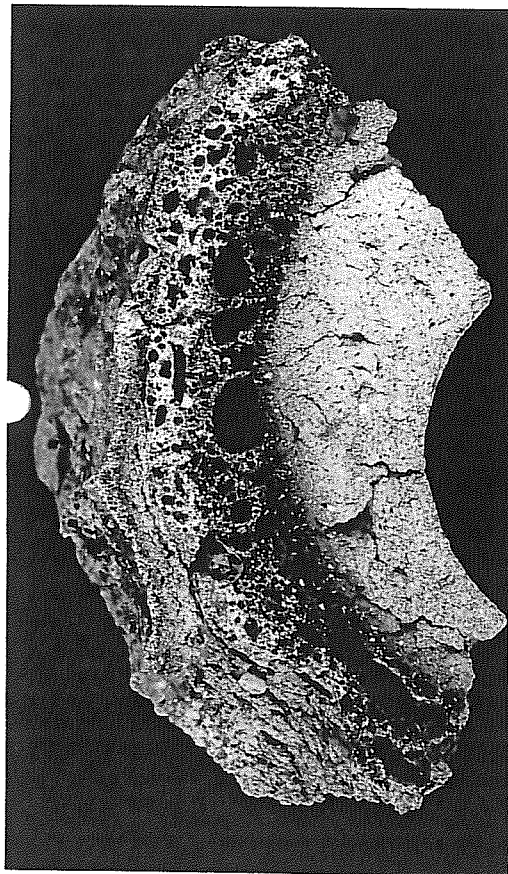
Die auf die Schlichteschicht aufgetragenen weiteren Tonschichten trennen sich leicht ab (Abb. 28), da man die feine, vielleicht in Form von dünnem Tonschlacker aufgetragene erste Schicht vorher antrocknen ließ. Die äußeren Schichten der Formen aus Olympia bestehen oft aus dem auch für die Tiegel verwendeten grobgenagerten Tonmaterial oder aus einer Mischung der beiden Tonsorten (Abb. 29). Das beweisen neben Fossilien, die aus dem kalkreichen Lehm stammen, auch noch kleine unvermischte Brocken der beiden Lehmarten (vgl. die mittlere Schicht auf Tafel 2,2).

Der Aufbau der Formen in Schichten ist technologisch sinnvoll, da auf das Wachmodell zunächst ein möglichst feiner Ton aufgebracht werden mußte, andererseits aber eine grobe Porosität und Magerung notwendig ist, um die auftretenden Spannungen aufzufangen.²¹ Der Schichtenaufbau hilft wie bei den Tiegeln, Durchbrüche des flüssigen Metalls zu verhindern.

Formfragmente vom Kerameikos und andere

Von den Funden vom Kerameikos wurden zwei typische Formfragmente untersucht. Sie gehören zu kleineren Formen und bestehen nur aus einer Schicht sehr feinen kalkreichen Tons. Sie sind außen durch einen stärkeren Brand beigefärbt und innen bis in 5 bis 15 mm Tiefe grau verfärbt. Die Zusammensetzung des Tons ist in den Hauptelementen der Schlichtetons in Olympia ähnlich. Sie unterscheidet sich dagegen von dem im Kerameikos für die Tiegel verwendeten Ton (Abb. 30). In den Spurenelementen, insbesondere in den Cr- und Ni-Gehalten und im Verhältnis von Sr zu Ca, manifestiert sich die verschiedene Herkunft der Rohstoffe (vgl. Anhang Analysentabelle).

Die Verwendung eines kalkreichen Tons für die Formen und grob gemagerten kalkarmen Tons für Düsen oder kleine Tiegel konnte auch an einigen kleinen Fragmenten aus einer Grabung in Kassope²² festgestellt werden. Die Benutzung verschiedener Tonsorten für die beim Bronze gießen benötigte technische Keramik basierte anscheinend auf einer allgemein verbreiteten technologischen Erfahrung.



Farbtafel 2,1 Querschnitt eines verschlackten Düsenfragments. Im linken Teil der Abbildung liegt über der Schlackenschicht – von einer Reparatur herrührend – unverschlackte rotgebrannte Keramik, die außen wieder neu verschlackt ist (Probe 1645)

durch einen schwachen Brand nur wenig verfestigt. Die Innenseiten der Formen sind bis in unterschiedliche Tiefe grau, die Außenseiten etwa 5 mm tief rot verfärbt. Dazwischen herrschen Brauntöne vor (Taf. 2,2). Auch die beim Aufheizen der Form zum Ausschmelzen des Waxes unter Luftzutritt oxidierend gebrannten Außenseiten sind nur schwach gebrannt und enthalten noch Reste von Tonmineralien. Die maximale Temperatur über eine längere Zeit war also höchstens 500 °C bis 600 °C.

Die innere, direkt auf das Wachmodell aufgetragene Schicht („Schlichte“) besteht aus einem feinen kalkreichen Ton. Sie enthält Poren, die von pflanzlichem Material und von Haaren stammen (Abb. 25).



Farbtafel 2,2 Querschnitt einer Form für Bronze (Plattengußform) aus drei Schichten von unterschiedlichem Ton. Die auf das Wachmodell aufgetragene erste Schlichteschicht ist unten

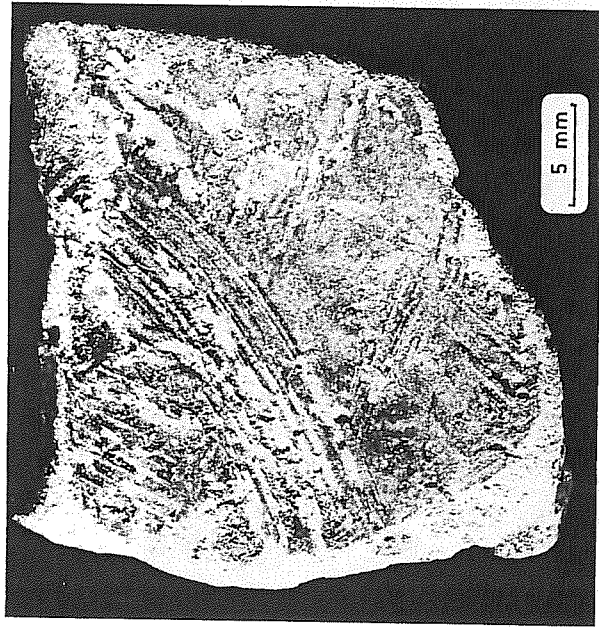


Abb. 27 Oberfläche der Schlichteschicht mit Bearbeitungsspuren (Probe 1647)

Gußkerne

Reste von Bronzeußkernen waren im Gießereischutt unter der Phidiaswerkstatt in Olympia nicht vorhanden oder wurden nicht als solche erkannt. Gußkerne sind nur dann eindeutig identifizierbar, wenn sie noch an der erhaltenen oder zerschlagenen Bronze haften. Aus Olympia stand für die Untersuchun-

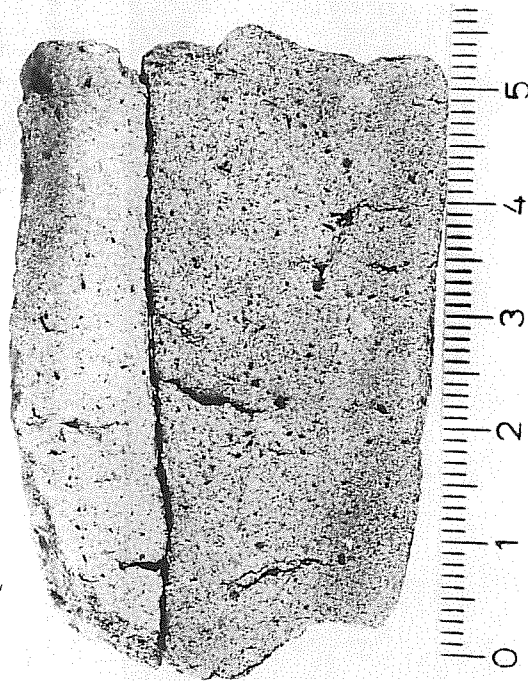


Abb. 28 Formfragment mit abplatzender Schlichteschicht (Probe 1684)

gen lediglich eine kleine Probe von einem Fragment einer Großbronze zur Verfügung (Probe 1674). Diese stammte aus der älteren Grabung von 1956, ist aber wegen der fehlenden Fundumstände zeitlich nicht exakt einzuordnen. Die Untersuchung zeigte auch hier die Verwendung eines kalkarmen Verwitterungslehms. Die Magerung enthält Haare und einen extrem hohen Anteil an eckigen Quarzbruchstücken (Abb. 31). Die Art und Menge der Magerung ebenso wie die Zusammensetzung in den Spurenelementen (vgl. Anhang) unterscheidet diesen Ton etwas von den bei den Formen und Tiegeln verwendeten kalkarmen Tonen. Seine Herkunft aus derselben näheren Umgebung erscheint jedoch wahrscheinlich.

Eine Untersuchungsreihe an Gußkernen verschiedener Herkunft, die z. Z. zusammen mit E. FORMIGLI durchgeführt wird, läßt die Ergebnisse etwas verallgemeinern. Danach ist die grobe Magerung ebenso typisch wie die vergrößerte Porosität, die durch Zumischen von organischem Material, insbesondere von Haaren, erreicht wurde. Auch die Verwendung verschiedener Tone beim Aufbau des Formmantels hat ihre Entsprechung bei den Gußkernen. Als Beispiel kann der Kopf einer Junglingsstaupe aus dem 6. Jh. v. Chr. dienen.²³ Der innere Gußkern ist grob genagert (Abb. 32) und deutlich getrennt von der am Metall anliegenden feineren Tonschicht (Abb. 33).

Die sehr verschiedene Art der Magerung und die großen Unterschiede in den Analysen spiegeln die Herkunft der Rohmaterialien wider. Es besteht daher Hoffnung, daß ebenso wie bei der Herkunftsbestimmung von Keramik²⁴ auch bei Bronzen mit Hilfe von mikroskopischen und chemischen Untersuchungen ihrer Gußkerne Zuordnungen zu Werkstätten möglich sein werden. Eine Einschränkung ergibt sich durch die Schwierigkeit der Aufstellung von Referenzgruppen, d. h. insbesondere der Beschaffung von Bronzeußkernen bekannter Herkunft oder vergleichbaren keramischen Materialien aus antiken Bronzeußwerkstätten. Über die weiteren Untersuchungen zu diesem Problem soll demnächst berichtet werden.²⁵

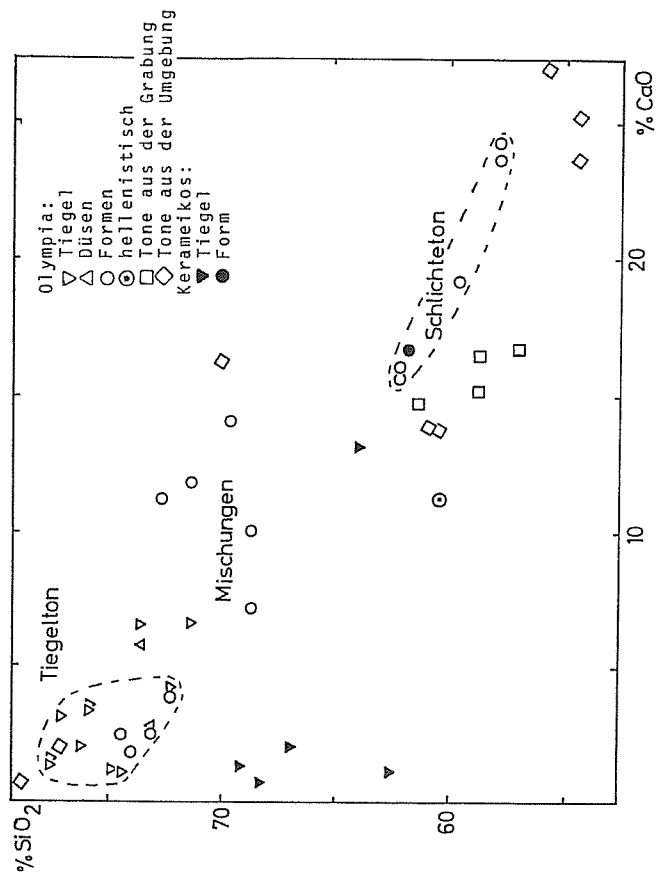


Abb. 29 Variationsdiagramm für die Hauptelemente Si und Ca

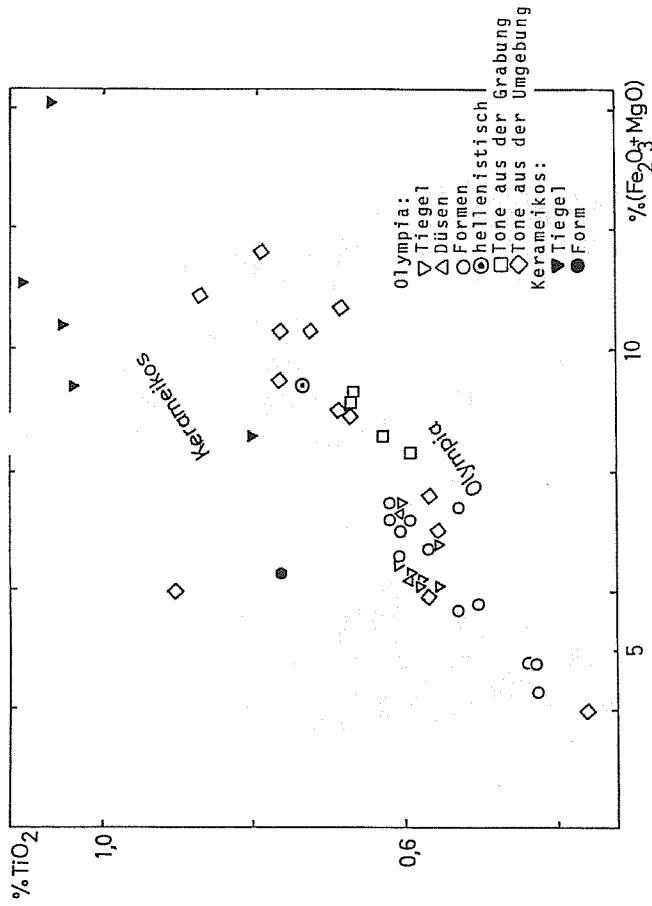


Abb. 30 Variationsdiagramm für die Nebenelemente Ti, Fe und Mg (Abszisse ist die Summe von Fe und Mg)

Rohmaterialien

Rohrone aus der Grabung in Olympia

In der südlichen Gießgrube in Olympia wurden sowohl bei der älteren Grabung als auch bei der neuen Grabung unter dem wahrscheinlich als Stütze für Formen dienenden Lehmziegeleinbau quadratische Stangen (3 bis 4 cm Kantenlänge, bis zu 30 cm lang) aus Rohron gefunden. Ein kleineres, ocker verfarbtes Stück einer solchen Stange ist leicht gebrannt. Des weiteren fand sich ein von Hand geformter Batzen desselben feinen Lehms. Es handelt sich dabei wohl um Tonvorräte der Gießer, die beim Einbau einer Stütze als Unterlage Verwendung fanden. Alle Proben hatten dieselbe kalkreiche Zusammensetzung. Sie ist auch etwa dieselbe wie die eines Lehmziegels aus dem Einbau in der südlichen Grube und wie die der Schichtschichten der Gießformen (vgl. Anhang). Gegenüber den Rohronstangen enthalten die Schichtschichten etwas höhere Anteile an Quarz und feinkörnigem Kalk (in der Analyse durch höhere Gehalte an Si und Ca charakterisiert, vgl. Abb. 29).

In einer Untersuchung von Tonmatrizen für die Glasformgebung aus der Phidiaswerkstatt in Olympia durch LERSCH et al.²⁶ sind vier Analysen angegeben. Diese stimmen gut überein mit den Analysen der Rohronstangen (Tab. 3) und damit mit denen der Schichtschichten der Bronze gießerformen. Die Gießer verwendeten also z. T. dieselben Tone wie andere Handwerker (Phidiaswerkstatt) und wie die antiken Töpfer, die ganz allgemein vorzugsweise solche kalkreichen Tone als Rohstoffe für ihre Keramik benutzten.



Abb. 31 Mikrofoto eines Gußkerns aus Olympia (Probe 1674)



Abb. 32 Mikrofoto eines Gußkerns aus Kythera, grober innerer Kern (Probe 2511) mit Bruchstücken von vulkanischem Gestein

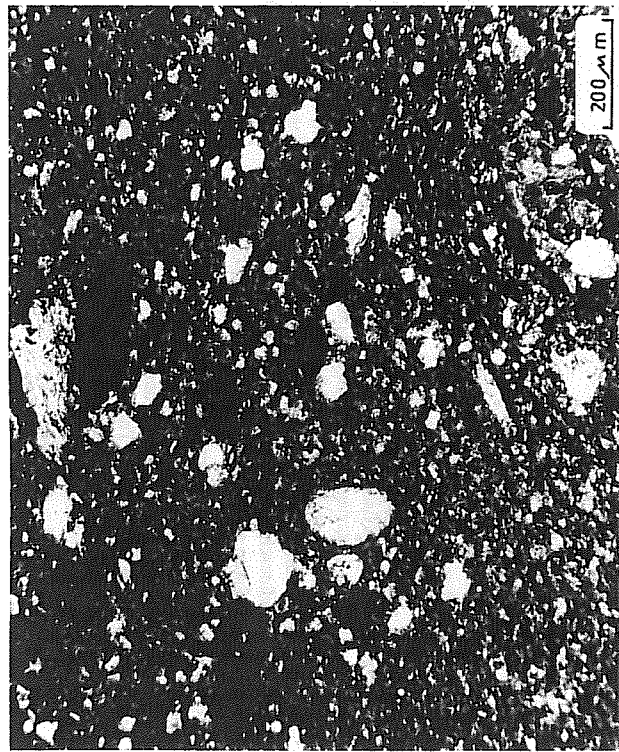


Abb. 33 Mikrofoto desselben Gußkerns, am Metall anliegende Schicht (Probe 2510)



Abb. 34 Mikrofoto einer Foraminifere in einem Tonmergel aus Olympia (Probe 1659)

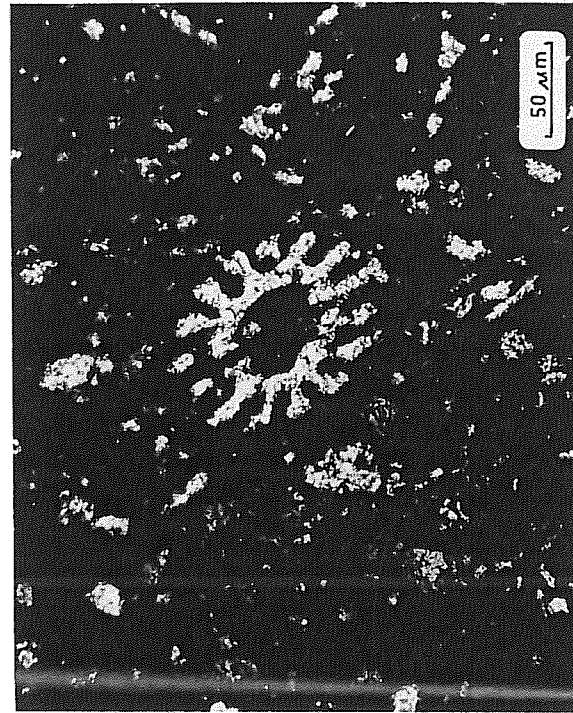


Abb. 35 Mikrofoto des Querschnitts eines Seeigelstachels in einem Tonmergel aus Olympia (Probe 1660)

Tab. 3. Zusammensetzung von Roh-tonen und Tonmatrizen aus Olympia

	1. Roh-tone	2. Tonmatrizen
SiO ₂	58,8	62,1
TiO ₂	0,65	0,59
Al ₂ O ₃	12,6	12,3
Fe ₂ O ₃	5,88	5,26
MnO	0,13	0,10
MgO	2,99	2,41
CaO	15,6	14,1
Na ₂ O	0,88	1,00
K ₂ O	2,29	2,02
P ₂ O ₅	0,19	0,16
GV	13,6	11,9

1. Roh-tone: Mittelwert von Tonstangen und -batzen aus der Grabung, gegläht, n=3
 2. Tonmatrizen: Mittelwert, gegläht, n=4, LETSCH et al. 1983²⁷

Gelände-proben aus Olympia und Umgebung

An verschiedenen Stellen in Olympia und Umgebung wurden 22 Ton- bzw. Lehmproben gesammelt, z. T. analysiert und Brennpfoten unter dem Mikroskop untersucht. Die Mehrzahl der Proben sind feine helle Lehme, wie sie auch unter der Phidiaswerkstatt und in der näheren Umgebung anstehen. Es handelt sich um kalkreiche, mehr oder weniger sandige Auelehne. Diese feinen Mergeltonne und Tonmergel bilden den Rahmen, in dem die von den Gießern verwendeten Rohmaterialien für die feinen Schichten der Gußformen liegen (vgl. Abb. 29). Sie enthalten dieselben Fossilienreste (Abb. 34 und 35), wie sie in der Schichte der Bronze-gußformen (Abb. 36) und auch von LETSCH et al.²⁸ in den Tonmatrizen für die Glasformgebung gefunden wurden. Daß die Analysen der einzelnen Proben mit denen der Roh-tonstangen aus der Grabung nicht genau übereinstimmen, bedeutet, daß sich die Ton- oder

Lehmschicht... noch nicht genau lokalisieren lassen, aus denen die antiken Handwerker ihre Rohstoffe geholt oder wie sie diese gemischt haben. Sicher spricht nichts gegen die Herkunft aus der unmittelbaren Umgebung der Altis.

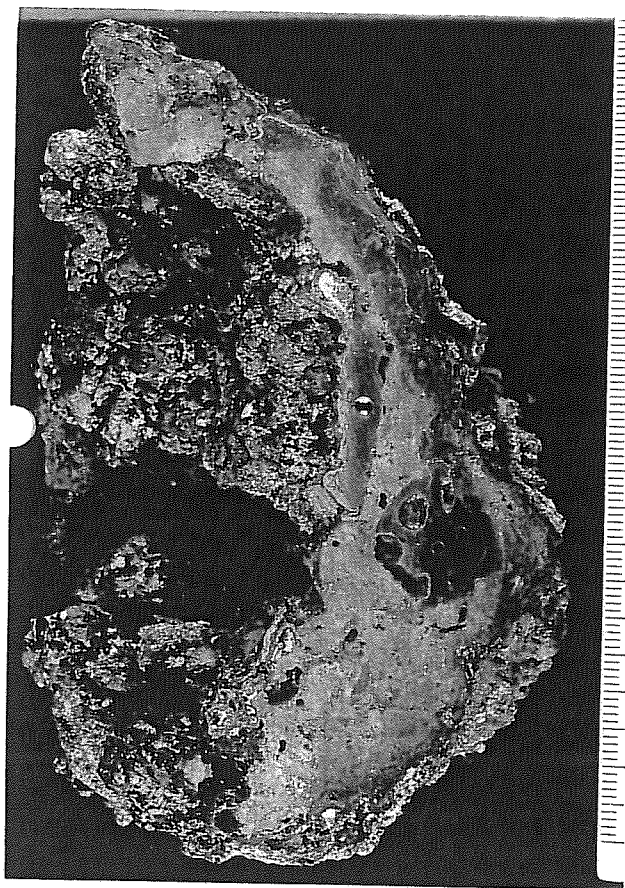
In den Analysen bleiben trotz der großen Schwankungen die Gehalte der Neben- und Spurenelemente bei den Tönen aus dem Gelände, aus der Grabung und bei den Fragmenten der technischen Keramik innerhalb eines begrenzten Bereichs, der alle diese Proben von denen des Kerameikos unterscheidet (vgl. Anhang). Auffällig ist, daß alle Materialien aus der Grabung, einschließlich der Röhre und Lehmziegel, gegenüber den Geländeproben erhöhte Cu-, Sn- und Pb-Gehalte aufweisen. Die Ursache dafür ist in Tiegeln oder Formen beim Schmelzen bzw. Gießen eingedrungene Bronze und sind Verunreinigungen bei der Bodenlagerung zusammen mit Metallresten. Wegen der Zusammen mit Cu und Sn vorhandenen Pb-Gehalte müssen die verarbeiteten Bronzen zumindest zum Teil bleihaltig gewesen sein.

Töpfertone aus der Umgebung

Als Ergänzung zu den Geländeproben wurden Tonproben von Töpfern bzw. Ziegeleien der weiteren Umgebung analysiert (vgl. Anhang). Sie sind durchweg ebenfalls kalkreich, unterscheiden sich jedoch in einzelnen Elementen mehr oder weniger deutlich von den Geländeproben aus Olympia. Ihrem Verwendungszweck entsprechend ist insbesondere der Tonanteil (Al-Gehalt) höher als bei den in der Gießwerkstatt verwendeten Rohstoffen. Dasselbe gilt auch für die Zusammensetzung zweier antiker Grobkeramikproben aus Olympia. Dabei handelt es sich um einen Ziegel aus einem römischen Keramikofen und um wahrscheinlich aus einem Keramikofen stammende grobe rote Tonstangen, die dort als Brennhilfen gedient haben könnten.

Kalkarme Verwitterungslehme als Rohstoffe für die Tiegeln

Die Geländeproben schlossen drei rote, grobe Kiesel enthaltende Verwitterungslehme ein. Nach Aus sieben der groben Bestandteile ($> 6 \text{ mm}$) wurden Analysen und Brennproben für die mikroskopische



Farbtafel 3.1 Querschnitt einer inhomogenen Bronzeschlacke (Probe 30/82, FO: nördliche Gießgrube, Phidiaswerkstatt, Olympia)



Farbtafel 3.2 Querschnitt einer Eisenschmiedeschlacke (Probe 19/82, FO: erster Abhub der Grabung, Phidiaswerkstatt, Olympia)



Abb. 36 Mikrofoto einer Foraminifere in der mittleren gemischten Schicht einer Plattengußform (Probe 1686)

Untersuchung angefertigt. Trotz der entstehungsbedingt großen Inhomogenität dieser Lehme besteht in den Hauptelementen eine gute Übereinstimmung mit dem Material der Tiegel und der Außenschichten der Formen. In den Spurenelementen treten größere Abweichungen auf (vgl. Anhang).

Unter dem Mikroskop ist in der Korngrößenverteilung nur eine der drei Proben mit dem Tiegelmateriale vergleichbar (Abb. 18). Um die Verteilung der Magerung in dieser Probe dem Tiegelmateriale noch weiter anzugleichen, müßte man die groben Bestandteile dieses Lehms auf eine mittlere Korngröße von etwa 150 µm zerkleinern und danach wieder zusetzen. Möglicherweise finden sich in der Umgebung von Olympia aber auch Lehme mit einer passenden Kornverteilung.

Der ungebrannte Lehm hat durch die Anteile an dreiwertigem Fe (Hämatit) eine rote Farbe und entspricht damit den ungebrannten Außenseiten der oberen Randstücke. Bei oxidierendem Brand ändert sich die Farbe ab etwa 600 °C zu einem helleren Rot. Bei reduzierendem Brand entspricht die Brennpolprobe den grauen durchgebrannten Stücken der antiken Tiegel. Eine Verglasung tritt erst oberhalb etwa 1050 °C ein.

Um zu prüfen, ob es möglich ist, Bronze in Tiegeln aus einem solchen im modernen Sinn nicht feuerfesten Material zu schmelzen, wurden aus dem kalkarmen Lehm aus Olympia kleine Tiegelnchen geformt und getrocknet. Ohne Vorbrennen wurden diese dann mit einem 17 g schweren Bronzestückchen beladen, zusammen mit Holzkohle in einem verschlossenen größeren Korundtiegel im Elektroofen bei 1000 °C bis 1150 °C bis zu drei Stunden erhitzt und die geschmolzene Bronze dann ausgegossen. Bei den höheren Temperaturen waren die Tiegelnchen stark verglast, hatten aber ihre Form behalten und damit ihre Brauchbarkeit bewiesen (Abb. 37).

Mit diesen Erfahrungen wurden danach am Institut für Werkstoffwissenschaften in Erlangen zwei große flache Tiegel geformt. In zwei Versuchen zeigte es sich, daß das Schmelzen größerer Bronzemengen in ungebrannten Tontiegeln mit Holzkohle gelingt.²⁹ Die getrockneten Tiegel waren ausreichend stabil, sie hielten die thermischen und mechanischen Belastungen beim Aufheizen mittels dreier Blasebalgen und der in den Tiegel gefüllten Holzkohle aus und ließen sich auch beim Ausgießen von 11 kg Bronze gut handhaben.

Arbeitsablauf in einer Bronze gießerei des 5. Jhs. v. Chr.

Die aus den beiden Werkstattbefunden in Olympia und Athen gewonnenen Erkenntnisse lassen nun mit einiger Sicherheit den Arbeitsablauf in einer griechischen Werkstatt für den Guß von Bronzeplastiken rekonstruieren.

Beide Werkstätten arbeiteten nur temporär. Die Gießer in Olympia waren dabei sicher nicht ortsansässig, sondern waren zu dem Heiligtum gekommen, um einen bestimmten Auftrag auszuführen. Dabei haben wir keinen Anlaß zu glauben, daß sie außer dem eigentlichen Handwerksgerät wie Hammer, Zange oder Hacke weiteres Material mitbrachten. Ihre reiche Erfahrung mit keramischen Rohmaterialien ermöglichte es ihnen, geeigneten Ton in der Nähe Olympias zu finden und für ihre Zwecke aufzubereiten. Sie benutzten dabei zwei unterschiedliche Tonsorten mit verschiedener Magerung, die sie je nach dem Verwendungszweck für Tiegel, Blasebalgdüsen und Formen einsetzten.

In einer ebenfalls kurzfristig angelegten Schmiede mit Feuerstelle und Anboß mußten daneben auch die Metallteile hergestellt werden, wie z. B. die Kernstützen und die Distanzhalter, aber auch Verstärkungen für die Tiegel und Formen. Die Funde zeigen, daß die Gießer dabei von ortsansässigen Handwerkern weitgehend unabhängig waren. Parallel zu diesen Arbeiten wurde die eigentliche Werkstatt angelegt, der Schmelzplatz – möglicherweise in einer dafür vorgesehenen flachen Grube³⁰ –, die Gießgrube und die Arbeitsfläche für die Montage der Bildwerke.

Kein ganz klares Bild können wir uns von der Herstellung des Modells machen, doch müssen wir annehmen, daß es ebenfalls an Ort und Stelle aus Ton gefertigt wurde, da ein Transport über weite Strecken nicht in Frage kam. Ein Bild vom Aussehen eines solchen Modells vermittelt uns die Athenakanne im Berliner Antikenmuseum (Abb. 38).

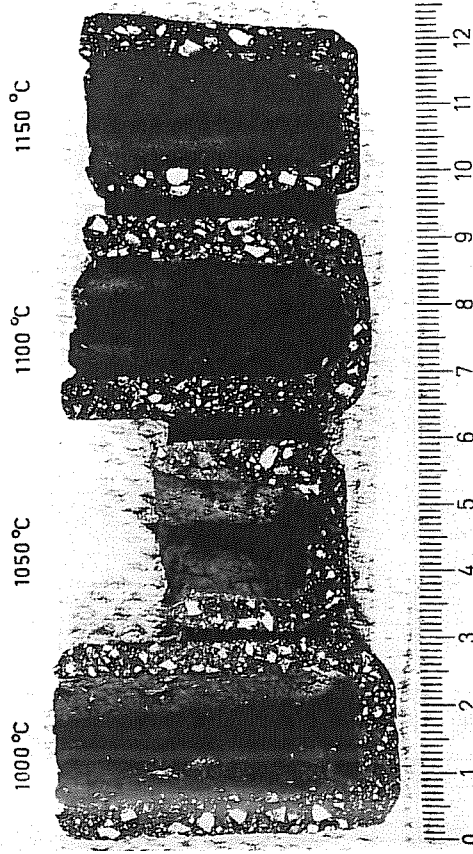


Abb. 37 Versuchstiegel nach dem Erschmelzen von Bronze bei verschiedenen Temperaturen

War das Modell vom Künstler vollendet, begann das Abformen und die Vorbereitung der einzelnen zu gießenden Teile. Hierzu wurden die Formen auf ein Unterteil auf dem Grubenboden abgesenkt und dort mit weiteren Tonschichten ummantelt und mit Stützen festgehalten. Nach dem völligen Austrocknen wurde die Form mit Hilfe eines Feuers in der Grube gebrannt. In der Phase des langsamen Anheizens



Abb. 38 Athenakanne. Berlin, Antikenmuseum

zens war es sicher möglich, einen Teil des ausfließenden Waxes aufzufangen und es so für eine weitere Verwendung aufzubewahren. Die Formen mußten recht lange gebrannt werden. Dazu waren große Mengen von Holz nötig. Trotzdem wurden dabei keine sehr hohen Temperaturen erreicht.

In der Endphase des Formenbrandes begann man gleichzeitig Kupfer in einem oder mehreren großen flachen Tiegeln nahe der Grube zu schmelzen. Dazu wurde zusammen mit dem Metall viel Holzkohle in den Tiegel gefüllt und mit Blasebälgen mit Hilfe von mehreren Düsen im Tiegel eine Temperatur von nahe 1100 °C erzeugt. Die Vorgänge mußten aufeinander abgestimmt werden, denn während die Gießgrube mit Erde gefüllt und die Form so festgestampft wurde, sollte sie nach Möglichkeit nicht ganz abkühlen. Wenn die Form fertig war und das Kupfer anfang zu schmelzen – was sich durch eine grünliche Flamme zu erkennen gibt³¹ –, wurde in den Tiegel das Zinn oder Zinnstein zugegeben. Nach kurzer Zeit konnte die oben schwimmende Holzkohle und eventuell vorhandene Schlackenschicht abgezogen und das flüssige Metall in den oben an der Form angesetzten Trichter eingefüllt werden, während die eingeschlossene Luft durch Entlüftungspfeifen entweichen konnte. Nach einer kurzen Phase der Abkühlung konnten die Arbeiter darangehen, die Grube so weit auszuschaufeln, daß die Form zer schlagen und der Rohguß geborgen werden konnte.

Die personelle Besetzung der Werkstatt läßt sich in etwa angeben. Sicher war ein Mann für die künstlerische Gestaltung des Gußmodells verantwortlich, ein zweiter für die technischen Vorbereitungen und die Koordination der Arbeitsabläufe. In der Archaische und Klassik werden häufig im Zusammenhang mit Bronzezeug Namenspaare von Künstlern genannt. Die schon mehrfach geäußerte Meinung, es handle sich dabei um den gestaltenden Künstler und den Gießermeister, hat wohl ihre Berechtigung.

Für das Schmelzen einer größeren Menge Bronze waren mindestens drei Blasebälge nötig, die leicht von jeweils zwei Mann bedient wurden. Rechnet man für das Füllen der Gießgrube mit Erde oder Sand etwa vier Mann, so waren in den entscheidenden Augenblicken des Gießvorgangs zehn bis zwölf Mann nötig, wobei freilich die Leute für die Blasebälge und die Erdarbeiten auch in der Umgebung angeworben werden konnten und wohl auch nicht dauernd beschäftigt waren. Die Stammbesetzung, die sich auf den Weg nach Olympia machte, brauchte nur aus vier bis fünf Fachkräften bestanden zu haben.

Danksagung

Wir danken der Stiftung VOLKSWAGENWERK, die mit der Finanzierung des Projekts und der Unterstützung der Arbeitsgruppe Archäometrie an der Freien Universität Berlin diese Untersuchungen ermöglichte. W.-D. HEILMEYER und U. ZWICKER sind wir für anregende Diskussionen und Hinweise dankbar. Der griechischen Antikenverwaltung sei für die großzügige Überlassung der Proben gedankt.

Abbildungsnachweise

- Abb. 1: Agora Excavations
Abb. 2: H. THOMPSON & R. WYCHERLY, *The Athenian Agora* 14, Abb. 47
Abb. 3-5: 9-12: G. ZIMMER
Abb. 6: 38: J. GESKE
Abb. 7: AA 1984, 66, Abb. 4 (vgl. Anm. 3)
Abb. 8: G. HELLNER
Abb. 13-37: Farbatf. 1, 1-3, 2: U. ECKERTZ-POPF, G. SCHNEIDER

Anmerkungen

- 1 S. KOUMANOUDES, *Praktika* 1878, 8 f.
- 2 T. L. SHEAR, *The American Excavations in the Athenian Agora. The Campaign of 1936*, *Hesperia* 6, 1937, 343 f. – C. C. MATTUSCH, *Bronze- and Ironworking in the Area of the Athenian Agora*, *Hesperia* 46, 1977, 343-347.
- 3 Olympia: A. MALLWITZ & W. SCHIERING, *Die Werkstatt des Pheidias*, 1964, 42-46. – W.-D. HEILMEYER & G. ZIMMER, *Die Gießerei unter der Werkstatt des Phidias in Olympia*, *Archäologischer Anzeiger*, 1987 (im Druck).

S. 6.

- Nemea: J. G. MILLER, *Hesperia* 46, 1977, 17 ff.; 47, 1978, 72 ff.; 48, 1979, 86 ff.
Rhodos: *Archäologikon Deltion* 30 (1975) 1983, *Chronika* 363 ff.
Korinth: C. C. MATTUSCH, *Hesperia* 46, 1977, 380 ff.
Demetrias: *Archaeological Reports* 1971/72, 15; 1973/74, 22. Bulletin de correspondance hellénique 98, 1974, 661; 101, 1977, 589 ff.
Keramikos: G. ZIMMER, *Gießereianrichtungen im Kerameikos*, *Archäologischer Anzeiger* 1984, 63-83.
Kassope: E.-L. SCHWANDNER & G. ZIMMER, *Zum Problem der Öfen griechischer Bronzeziegel*, *Archäologischer Anzeiger* 1983, 57-80.
4 W.-D. HEILMEYER, *Antike Werkstättenfunde in Griechenland*, *Archäologischer Anzeiger* 1981, 440-453.
5 W.-D. HEILMEYER & G. ZIMMER, 1986, s. Anm. 3.
6 Berlin, Antikenmuseum, Inv. F 2294. – Bezzy, *ARV* 2 400, 1.
7 Zur archaischen Bearbeitung: G. ZIMMER, 1984, s. Anm. 3.
8 Für den Torso reicht die Materialmenge von 5 bis 6 Liter Bronze. Diese Menge konnte in dem großen Tiegel von Olympia geschmolzen werden.
9 R. F. TYLECOTE, *Metallurgical Crucibles and Crucible Slags*, in: *Archaeological Ceramics*, J. S. OLIN & A. D. FRANKLIN (ed.), Smithsonian Inst. Press, Washington 1982, 231-243. – R. F. TYLECOTE, *Furnaces, Crucibles, and Slags*, in: *The Coming of the Age of Iron*, T. A. WERTIME & J. D. MUHLY (ed.), Yale Univ. Press, New Haven/London, 1980, 183-228. – R. F. TYLECOTE, *A History of Metallurgy*, The Metals Society, London, 1976.
10 Zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung werden Proben von einigen Gramm von allen Oberflächenverunreinigungen und sichtbaren Bronzeanteilen befreit und in einer Achtmühle aufgemahlen. Die Analyse mit einem wellenlängendispersiven automatischen Röntgenfluoreszenz-Spektrometer (Philips PW1400) erfolgt an Schmelzpräparaten, wie sie für silikatische Materialien üblich sind. Dafür werden 1 g der bei 900 °C geglähten und feingepulverten Substanz mit 4 g eines wasserfreien Lithiumtetraborat-metaborat-Gemisches (Merck Spektronet A 12) in einem Pt/Au-Tiegel bei 1150 °C geschmolzen und in einer Pt/Au-Kokille zu Glasplättchen mit 32 mm Durchmesser gegossen.
Die gemessenen Intensitäten werden nach DE JONGH korrigiert. Die Reproduzierbarkeit der Analysen liegt zwischen 1 und 5 Rel.-%, für Ba, Cu, Y, Nb, Ce und Pb zwischen 10 und 20 Rel.-%. Die Eichung beruht auf synthetischen Standards und etwa 40 internationalen geochemischen Referenzproben. Die Richtigkeit der Analysen wurde darüber hinaus in Ringversuchen überprüft.
11 U. ZWICKER, *Metallographische und analytische Untersuchungen an Proben aus den Grabungen der Bronzezeit in der Phidiaswerkstatt von Olympia und Versuche zum Schmelzen von Bronze in flachen Tiegeln*, dieses Heft, S. 61.
Der für den Schmelzversuch verwendete Tontiegel hatte eine von den antiken Tiegeln etwas abweichende Zusammensetzung (Analyse der geglähten Probe mit RFA):
- | | | | | | |
|--------------------------------|-------|-------------------|-------|-------------------------------|-------|
| SiO ₂ | 73,1 | MnO | 0,023 | K ₂ O | 1,78 |
| TiO ₂ | 0,839 | MgO | 0,35 | P ₂ O ₅ | 0,082 |
| Al ₂ O ₃ | 17,8 | CaO | 3,77 | (GV) | 10,6 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,70 | Na ₂ O | 0,05 | | |
- 12 Die Analysen fallen in den von TYLECOTE (s. Anm. 9) angegebenen Zusammensetzungsbereich für Tiegelschlacken („crucible slags“). Verflüchtungsschlacken unterscheiden sich signifikant durch höhere Fe- oder Mn-Gehalte (35 bis 66 % FeO).
13 Technik des Kunsthandwerks im zwölften Jahrhundert. Des Theophilus Presbyter *Diversarum artium Schedula*. In der Auswahl übersetzt und erläutert von W. THEOBALD (1984) Kap. 84 (S. 156).
Danach wird der Gußtiegel für den Glockenguß folgendermaßen vorbereitet: „Inzwischen nimm eine eiserne Pfanne mit gewölbtem Boden, lediglich für diese Arbeit bestimmt, die beiderseits (je) zwei eiserne Henkel hat, oder, wenn es eine ganz große Glocke werden soll, zwei oder drei (Pfannen). Schmiere sie innen und außen mit tüchtig durchgeknetetem Ton aus, einmal, zweimal und zum drittenmal, bis er zwei Finger dick ist, . . .“
14 Berechnungen des Temperaturgradienten in der Auskleidung eines bronzezeitlichen Schmelzofens bei:
W. D. KINGERY & W. H. GOURDIN, *Examination of Furnace Linings from Rothenberg Site 590 in Wadi Zaghra*, *Journal of Field Archaeology* 3, 1976, 351-353.
Bei der beschriebenen Auskleidung handelt es sich um einen Sandstein. Nach 4 Stunden erreicht die Temperatur in 1 cm Tiefe 1050 °C (bei 1100 °C an der Grenze zum Metall). Der ungebrannte Ton der Tiegeln in Olympia isoliert durch die langsame Entwässerung der Tonminerale sicher noch stärker. Vgl. auch M. S. TITTE, Y. MANIATIS, N. D. MEERKS, M. BMSON, M. J. HUGHES, S. C. LEPPARD, *Technological Studies of Ancient Ceramics from the Near East, Aegean, and Southeast Europe*, in: *Early Pyrotechnology*, P. A. WERTIME, S. F. WERTIME (eds.), 1982, 61-71.

- 15 Vgl. z. B. die Deutung eines Befundes von Enkomi auf Zypern durch R. F. TYLCOATE (Observations on Cypriot Copper Smelting, Reports of the Department of Antiquities, Cyprus 1971, 53–58).
- 16 Bei metallurgischen Prozessen geht Mn bevorzugt in die Schlacken. Das zeigt sich beim Vergleich der Analysen von Schlacken und Keramik (vgl. Anhang, Proben 1675 und 1640). Das könnte die niedrigen Mn-Gehalte der wenig verschlackten Randstücke wie auch die höheren Gehalte der stärker verschlackten Tiegelfragmente vom Ambonschnitt erklären. Die Herkunft des Mn bleibt jedoch ungeklärt.
- 17 Vgl. MALLWITZ & SCHIERING 1964 und HEILMEYER & ZIMMER 1985, s. Anm. 3.
- 18 Eine technologische Erklärung des Sinns dieser kalkreichen äußeren Schicht steht noch aus. Daß auch kalkreiche Tone für Schmelztiegel benutzt wurden, zeigen zwei 1979 in Olympia gefundene Tiegel, von denen Proben (1689 und 1690, vgl. Anhang) für die Untersuchung entnommen werden konnten. Dafür sei dem Grabungsleiter A. MALLWITZ an dieser Stelle gedankt. Sie waren sekundär in einer Steinsetzung aus dem 5. Jh. v. Chr. verbaut, und ein Werkstattzusammenhang ließ sich nicht herstellen. Nach dem Entfernen der aus Sand mit Holzkohleresten und Knochenstümpfen bestehenden Füllung zeigten sie die Form von Tiegeln, ähnlich denen unter der Phidiaswerkstatt. Im Inneren waren sie allerdings durchgehend und wesentlich dicker verschlackt. Die Tiegel von 30 bis 40 cm Durchmesser waren in Schichten zu einer Dicke von etwa 7 cm aufgebaut.
- Die Keramik hat die Zusammensetzung des in der Altis anstehenden kalkreichen Lehm und ist wenig genagert. Die Schlacke bildet einen nur kurzen, aber kontinuierlichen Übergangsbereich zur unverschlackten Keramik. Die Temperatur am Kontakt muß mindestens 1150 °C betragen haben und in 1 cm Tiefe noch 1000 °C (Gelbfärbung der Keramik). Das Innere der beiden Gefäße war also auf Temperaturen erhitzt worden, wie sie zum Schmelzen von Bronze erforderlich sind. Das kalkreiche Material erscheint zunächst für einen Schmelztiegel weniger geeignet, da es im Versuch spätestens bei 1170 °C zerfließt. Infolge der stark isolierenden Wirkung der Keramik und der Erhitzung von innen beschränkt sich die Aufschmelzung jedoch auf die innerste Schicht, und die Tiegel bleiben stabil.
- 19 Der Durchmesser der Luftkanäle der Blasebalglösen, sowohl der aus den beiden Gießgruben in Olympia als auch der vom Kerameikos in Athen, liegt immer zwischen 30 und 35 mm. Der Luftkanal der Düse aus hellenistischer Zeit aus dem Ambonschnitt hat etwa 50 bis 60 mm Durchmesser.
- 20 U. ZWICKER, s. Anm. 11.
- 21 Wie weit auch der feinkörnige Kalk in der Schlichte technologisch vorteilhaft ist, bleibt noch zu überprüfen. Vielleicht ist die beim Einfüllen des flüssigen Metalls einsetzende Gasentwicklung durch die Dissoziation des Karbonats in der obersten Schicht günstig für das Erstarrungsverhalten des Metalls und dessen Ablösung von der Form.
- 22 In den Grabungskampagnen 1982 und 1983 wurde in zwei Räumen von Haus 8 die Werkstatt eines Bronzeschmiedes freigelegt, der am Beginn des 3. Jhs. v. Chr. Kleinbronzen herstellte. Für die Überlassung der Proben danken wir den Ausgräbern S. DAKARIS, W. HOEFFNER und E.-L. SCHWANDNER.
- 23 Die Proben 2510 und 2511 stammen von der am Metall anliegenden bzw. der inneren Schicht des Kerns eines Junglingskopfes aus Bronze. Dieser wurde auf der Insel Kythera gefunden und befindet sich im Antikenmuseum Berlin (Inv. Misc. 6324).
- 24 Zum Beispiel G. SCHNEIDER, Anwendung quantitativer Materialanalysen auf Herkunftsbestimmungen antiker Keramik, Berliner Beiträge zur Archäometrie 3, 1978, 63–122.
- 25 E. FORMIGLI, G. SCHNEIDER, Boll. d'Arte, in Vorbereitung.
- 26 J. LETSCH & W. NOLL & W. SCHIERING, Glasformgebung in Tonmatrizen: Eine meisterliche Technologie der Werkstatt des Phidias in Olympia, Glastechnische Berichte 56, 1983, 96–105.
- 27 Ebenda 98.
- 28 Ebenda 99.
- 29 U. ZWICKER, s. Anm. 11.
- 30 Ein solcher Tiegelofen war z. B. in Kassope gefunden worden, s. Anm. 3.
- 31 Theophrastus, s. Anm. 1, 156.

Adresse der Autoren:

Dr. GERVULF SCHNEIDER, Arbeitsgruppe Archäometrie, Institut für Anorganische und Analytische Chemie, Freie Universität Berlin, Fabeckstr. 34/36, 1000 Berlin 33
 Dr. GERHARD ZIMMER, Antikenmuseum, Schlossstr. 1, 1000 Berlin 19

Anhang

Liste der untersuchten Proben

A. Proben aus den Grabungen in Olympia und Geländeproben

Ein Teil der Proben und die Fundumstände sind eingehender beschrieben bei HEILMEYER & ZIMMER 1985 (s. Anm. 3)

Tiegelfragmente	
1675 (76/82)	a Innere, verschlackte Schicht eines grau durchgebrannten Fragments aus zwei Schichten, FO: südliche Grube (Abb. 13)
	b äußere Schicht desselben Fragments
1682 (85/82)	Verschlacktes graues Fragment mit Bronzeresten, FO: südliche Grube (Tafel 1,1)
1628 (4/82)	Graues Tiegelfragment mit Tiegelschlacke (die angegebene Analyse ist die der unverschlackten Keramik), FO: Osterweiterung, Aufschüttung (Abb. 24)
1644 (27/82)	Fragment des oberen Randes mit spitz zulaufendem Profil, FO: südliche Grube (Abb. 14)
1677 (78/82)	a Fragment des oberen Randes mit eckigem Profil, FO: südliche Grube
	b Innenseite bis etwa 5 mm Tiefe
	c wenig gebrannte Außenseite
1676 (77/82)	Fragment des oberen Randes mit eckigem Profil, FO: nördliche Grube (Tafel 1,2)
1678 (80/82)	Fragment des oberen Randes des Tiegels aus der hellenistischen Grube, stark verschlackt, FO: Ambonschnitt (Abb. 15)
1657 (44/82)	Verschlacktes graues Fragment, stark sekundär verkalkt, FO: Ambonschnitt
1681 (84/82)	Etwa 2 cm dickes graues Fragment, FO: Ambonschnitt
2590 (103/82)	Kleine Probe aus dem Innern der Ausgüßkühle, FO: nördliche Grube
1689 (91/82)	Fragment eines sekundär in einer Steinsetzung verbauten Schmelztiegels (5. Jh. v. Chr.), FO: Altis, Grabung 1979
	a rötlich bis gelb gebrannte Keramik
	b an dem Fragment anhaftende Schlacke
	c wenig gebrannte Außenseite der Keramik
1690 (92/82)	Fragment eines zweiten Schmelztiegels aus derselben Steinsetzung
Fragmente von Blasebalglösen	
1640 (18/82)	Verschlacktes Fragment vom vorderen Teil einer Düse, FO: Abraum der Grabung 1956
	a rot gebrannte Keramik
	b Schlacke
1645 (28/82)	Verschlacktes Fragment vom vorderen Teil einer Düse, FO: nördliche Grube (Tafel 2,1)
2589 (39/82)	Fragment vom vorderen Teil einer Düse mit größerem Durchmesser des Luftkanals, FO: hellenistische Grube, Ambonschnitt (nur Dünnschliffuntersuchung)
Fragmente von Gußformen	
1649 (33/82)	Kleines Fragment aus dem Formenblock, FO: nördliche Grube
1638 (16/82)	3,5 cm dickes Formfragment aus zwei Schichten (Schlichte fehlt), FO: südliche Grube
	a äußerer rotgebrannter Teil der groben Außenschicht
	b grauer Teil der Außenschicht
	c feinere innere Schicht
1639 (17/82)	Plattengußformfragment, FO: südliche Grube
	a rote äußere Seite
	b graue innere Seite (Schlichteschicht fehlt)
1647 (31/82)	Mehrere Stücken von abgeplatzten grauen Schlichteschichten, FO: südliche Grube
1684 (86/82)	Kleines beige-rotes zweischichtiges Fragment, FO: südliche Grube (Abb. 25)
	a äußere grobe Schicht
	b innere feine Schicht
1685 (87/82)	Fragment einer Kymaform aus drei Schichten, FO: südliche Grube
	a äußere grobere Schicht
	b mittlere Schicht (etwas feiner als Schicht c)
	c innere Schicht, mit grauer Oberfläche

1686 (88/82)

Plattengußformfragment aus verschiedenen Tonschichten, FO: südliche Grube (Tafel 2,2)
a rot gebrannte Außenseite
b mittlere Schicht
c innere Schichteschild
Kleines einschichtiges Formfragment, innen etwa bis 1 mm Tiefe grau verfärbt
Kleine Probe von an Bronzebruchstück anhaftendem Gußkern, FO: Olympia o. Nr. (wegen geringer Probenmenge keine Spurenelementbestimmung)

1648 (32/82)
1674 (68/82)

Rohmaterialien und Grobkeramik aus Olympia und Umgebung
1636 (12/82) Rohtonstangenstück, FO: südliche Grube, 1956
1696 (108/82) Rohtonstangenstück, FO: in der Fundamentierung der südlichen Grube, 1982
1625 (1/82) Etwa 400 g schwerer Rohtonbatzen, FO: südliche Grube
1658 (45/82) Lehmziegel aus der Fundamentierung der südlichen Grube
1651 (35/82) Sandiger Lehm aus der Seitenwand der südlichen Grube
1695 (105/82) Tonschicht im Sand östlich des Lehmziegelbaus
1659 (46/82) Anstehender sandiger Lehm am Kronshügel, FO: Straße nach Linaria, gegenüber dem Stadion

1660 (47/82) Anstehender Lehm, gleicher FO wie 1659
1668 (57/82) Gelber feiner Lehm, FO: nordöstlich der Olympischen Akademie
1694 (96/82) Lehmprobe, FO: Westufer des Kladeos gegenüber der Altis
1634 (10/82) Roter sandiger Verwitterungslehm, FO: Pelopion, Ortsausgang in Richtung Olympia
1669 (58/82) Rotbrauner, kiesiger Verwitterungslehm, gleicher FO wie Probe 1668
3315 Stark kieshaltiger rotbrauner Verwitterungslehm, FO: Straße nach Druva
1635 (11/82) Rotgebrannte grobe Tonscheibe, FO: Werkstatbereich, Phidiaswerkstatt
1663 (50/82) Gelbebrannter Flachziegel, FO: Keramikofen südlich der Palästra
1633 (9/82) Ton von Töpfen in Krestena
1673 (62/82) Ton aus Katakalon (Töpferei in Pyrgos)
1671 (60/82) Ton von Ziegelei in Kerameikos

B. Proben vom Kerameikos in Athen

Eine Beschreibung der Proben und der Fundumstände findet sich bei Zimmer 1984 (s. Anm. 3)
2926 (Gg4.9) Grau durchgebranntes, verschlacktes Gußtiegelfragment (Abb. 21)
2591 (Gg4.49) Rotgebranntes Gefäßfragment, auf der Innenseite verschlackt
2928 (Gg4.46) dto.
2923 (Gg4.12) Zweischichtiges Fragment mit starker Verschlackung (Abb. 22)

a äußere rote Schicht
b verschlackte innere Schicht
2924 (Gg4.B1) Kleines Formfragment, innen grau gefärbt (nur Dünnstufuntersuchung)
2925 (Gg4.B0) Formfragment, innen grau, außen beige rot gefärbt
2929 (BZ.79) Fragment von rotem, schwach gebranntem Gefäß aus dem Gieflereibereich
3300 Roter Ton aus Schicht des 3. Jh.s v. Chr.

Analysen...ile: Hauptelemente

Alle Analysen für gegläutete Substanz mit RFA (s. Anm. 10), Gesamtisen als Fe₂O₃, GV = Glühverlust bei 900 °C, Angaben in Gewichtsprozent

Probe	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	GV
Grau durchgebrannte Tiegelfragmente aus der südlichen Gießgrube											
1675 a	77,65	0,579	11,54	5,06	0,174	1,17	1,57	0,55	1,63	0,084	0,6
1675 b	77,40	0,588	11,49	5,00	0,185	1,24	1,51	0,55	1,45	0,111	1,0
1682	76,53	0,607	12,02	5,22	0,189	1,29	1,97	0,55	1,51	0,115	1,2
1628	71,72	0,552	11,95	5,64	0,201	1,14	6,79	0,27	1,53	0,206	2,2
Fragmente vom oberen Rand, südliche und nördliche Grube											
1644	72,40	0,608	13,24	5,84	0,056	1,35	4,16	0,53	1,56	0,249	4,2
1677 a	74,62	0,606	14,07	6,53	0,011	0,55	1,85	0,20	1,20	0,364	5,6
1677 b	74,68	0,596	14,15	6,84	0,025	0,96	1,02	0,14	1,44	0,150	5,1
1676	75,11	0,603	13,77	6,36	0,028	1,02	1,27	0,19	1,49	0,108	4,8
Tiegelfragmente aus der hellenistischen Grube (Ambonschnitt)											
1678	77,29	0,556	10,72	5,04	0,240	1,03	3,23	0,30	1,44	0,167	1,7
1657	76,14	0,586	11,16	5,14	0,240	1,04	3,57	0,32	1,55	0,192	2,7
1681	73,86	0,572	10,46	4,75	0,195	1,39	6,40	0,75	1,40	0,227	4,8
Ausgußfülle											
2590	75,45	0,519	14,18	6,37	0,029	1,02	0,75	0,18	1,42	0,097	5,0
Fragmente zweier Schmelzriegel aus der Altis											
1689 c	58,60	0,533	10,41	4,74	0,152	1,73	20,82	0,57	1,67	0,225	15,2
1689 a	63,88	0,560	11,22	4,90	0,158	1,66	14,41	0,98	1,75	0,482	6,3
1689 b	75,67	0,457	9,82	4,46	0,428	1,43	4,75	0,99	1,76	0,232	-0,2
1690	60,01	0,565	11,29	5,12	0,169	1,89	17,78	0,83	1,86	0,481	7,4
Tiegelfragmente und andere vom Kerameikos in Athen											
2926	67,19	1,057	17,59	8,40	0,056	1,04	1,97	0,43	2,10	0,171	0,4
2591	68,32	1,118	15,93	9,91	0,088	1,17	0,84	0,18	2,19	0,271	1,9
2928	69,30	1,065	14,80	9,22	0,076	1,22	0,37	0,37	2,24	0,215	2,5
2923 a	64,08	0,806	12,16	7,07	0,054	1,52	11,80	0,15	2,15	0,214	6,6
2923 b	62,79	1,083	17,94	13,13	0,148	1,00	1,22	0,43	2,10	0,178	0,4
Fragmente von Blasebalgläsen											
1640 a	74,04	0,597	10,82	4,76	0,220	1,38	5,77	0,59	1,56	0,259	3,5
1640 b	75,07	0,535	10,36	4,27	0,312	1,47	5,76	0,54	1,53	0,166	0,3
1645	73,62	0,610	13,31	5,97	0,129	1,28	2,79	0,49	1,67	0,128	1,4
Fragmente von Gußformen (äußere kalkarme Schichten)											
1638 a	74,23	0,615	13,92	6,37	0,026	0,81	1,90	0,26	1,42	0,447	4,4
1638 b	73,56	0,615	13,66	6,41	0,030	1,00	2,63	0,22	1,41	0,465	5,7
1639 a	73,57	0,621	13,95	6,28	0,030	0,87	2,57	0,23	1,41	0,489	4,3
1686 a	74,71	0,608	13,33	6,19	0,025	0,93	2,56	0,19	1,30	0,168	4,8
Fragmente von Gußformen (mittlere gemischte Schichten)											
1649	69,86	0,420	8,20	3,52	0,113	1,23	14,07	0,95	1,40	0,227	11,0
1638 c	68,93	0,614	13,06	5,71	0,068	1,79	7,24	0,75	1,62	0,219	11,5
1639 b	72,57	0,606	13,50	6,05	0,045	1,14	3,94	0,32	1,43	0,400	6,6
1684 a	73,06	0,413	8,35	3,32	0,098	1,00	11,09	0,92	1,26	0,498	8,4
1685 a	71,67	0,434	8,63	3,52	0,106	1,24	11,80	0,95	1,25	0,392	8,5
1686 b	68,90	0,559	11,50	5,09	0,066	1,55	9,95	0,68	1,59	0,112	10,2
Fragmente von Gußformen (Schichteschilden)											
1647	62,13	0,594	11,01	4,65	0,106	2,51	15,66	1,43	1,74	0,180	12,7
1684 b	57,57	0,499	9,19	3,89	0,113	1,84	24,28	0,98	1,46	0,181	7,1
1685 b	57,53	0,522	9,75	4,11	0,115	1,56	23,58	0,95	1,36	0,525	16,5
1685 c	59,27	0,608	11,16	4,86	0,101	1,72	19,15	1,06	1,66	0,407	14,2
1686 c	62,26	0,599	10,80	4,60	0,098	2,42	15,93	1,42	1,74	0,153	12,9

Analyseentabelle: Hauptelemente (Fortsetzung)

Probe	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	GV
Formfragment aus der hellenistischen Gießgrube											
1648	60,54	0,744	14,01	6,62	0,098	2,79	11,25	1,21	2,19	0,546	9,7
Formfragment, Keramik und Ton vom Kerameikos in Athen											
2925	61,63	0,761	11,94	4,71	0,045	1,58	16,78	0,22	2,10	0,235	12,4
2929	59,56	0,640	11,59	6,05	0,124	2,05	17,98	0,14	1,68	0,187	17,7
3300	49,38	0,870	17,48	8,19	0,111	2,77	17,93	0,11	2,26	0,642	16,9
Gußkernfragmente											
1674	79,24	0,656	9,40	5,01	0,086	0,66	1,74	1,31	0,92	0,980	4,0
2310	60,48	1,066	20,66	7,94	0,104	2,78	2,29	1,30	3,22	0,157	2,3
2511	60,27	0,750	18,86	6,32	0,111	2,60	6,66	1,98	2,31	0,143	4,8
Rohmaterialien aus der Grabung in Olympia											
1636	58,56	0,670	13,00	5,99	0,119	3,06	15,23	0,87	2,32	0,185	13,7
1696	56,63	0,678	13,10	6,11	0,143	3,14	16,65	0,96	2,40	0,198	14,3
1625	61,27	0,598	11,77	5,54	0,135	2,77	14,78	0,80	2,15	0,183	12,7
1658	58,51	0,626	12,35	5,74	0,124	2,89	16,55	0,82	2,20	0,195	13,7
Kalkreiche Lehne aus Olympia und Umgebung											
1651	62,97	0,248	4,75	1,81	0,125	0,99	27,31	0,58	0,98	0,243	17,3
1659	70,26	0,343	6,93	2,63	0,093	1,33	16,17	0,89	1,27	0,085	12,4
1695	55,57	0,457	8,52	4,06	0,182	1,84	26,83	0,68	1,58	0,284	19,4
1660	60,73	0,678	12,59	5,64	0,098	3,30	13,75	1,20	2,16	0,127	12,5
1668	54,02	0,565	11,23	5,07	0,131	2,52	23,65	0,78	1,91	0,121	18,1
1694	53,86	0,554	10,85	4,86	0,178	2,15	25,04	0,37	1,99	0,152	19,4
Kalkarme Lehne aus der Umgebung von Olympia											
1634	77,47	0,561	11,48	4,87	0,082	1,04	2,00	1,02	1,45	0,041	4,0
1669	79,10	0,907	11,59	5,26	0,215	0,74	0,75	0,20	1,14	0,101	6,0
3315	77,56	0,426	12,81	6,09	0,122	0,76	0,53	0,12	1,34	0,093	4,8
Keramik aus Olympia und Tone von Töpfern der Umgebung											
1635	61,66	0,726	17,96	7,88	0,185	2,45	6,45	0,19	2,24	0,269	8,0
1663	50,16	0,690	15,03	6,93	0,189	3,80	19,89	1,36	1,80	0,159	5,6
1633	56,11	0,798	15,45	7,31	0,147	4,30	11,77	1,23	2,77	0,120	12,1
1673	58,27	0,764	14,53	6,67	0,106	3,58	12,11	1,25	2,58	0,126	13,0
1671	61,39	0,770	14,18	6,22	0,120	3,24	9,88	1,83	2,25	0,136	10,5

Analyseentabelle: Spurenelemente

Alle Analysen mit RFA (s. Anm. 10), Angaben in ppm

Probe	V	Cr	Ni	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	Ce	Cu	Sn	Pb
Grau durchgebrannte Tiegelfragmente aus der südlichen Gießgrube												
1675 a	100	240	119	73	83	63	159	180	54	418	203	185
1675 b	88	218	121	91	78	62	158	231	54	365	25	109
1682	98	238	130	89	83	65	167	248	63	2020	56	84
1628	108	203	142	57	90	93	129	240	60	559	69	17
Fragmente vom oberen Rand, südliche und nördliche Grube												
1644	115	265	141	90	84	116	153	151	45	242	41	209
1677 a	119	285	145	85	65	93	154	271	49	773	27	84
1677 b	119	281	149	83	89	60	147	246	35	1320	12	37
1676	118	259	147	82	95	56	143	206	37	1600	15	20
Tiegelfragmente aus der hellenistischen Grube (Ambonschnitt)												
1678	93	204	128	79	84	70	139	239	51	143	79	53
1657	90	195	123	71	86	86	138	233	59	290	27	40
1681	87	212	117	71	78	131	144	270	50	132	37	51
Ausgussfülle												
2590	110	234	216	106	109	52	133	190	40	2660	12	21
Fragmente zweier Schmelztiegel aus der Altis												
1689 c	87	236	158	86	78	332	141	286	45	3430	47	66
1689 a	85	258	128	86	77	295	142	294	40	781	85	338
1689 b	75	226	99	39	76	133	132	259	46	5130	587	203
1690	80	244	140	84	78	327	142	271	42	1,2 %	596	378
Tiegelfragmente und andere vom Kerameikos in Athen												
2926	185	339	122	87	113	233	214	270	42	1220	162	213
2591	177	413	168	95	109	76	209	318	57	724	24	99
2928	152	428	151	83	100	66	194	294	48	1400	121	117
2923 a	109	293	154	122	106	131	218	261	53	1300	120	164
2923 b	204	306	134	460	108	214	201	234	n. b.	5950	3490	2710
Fragmente von Blasbalgdisen												
1640 a	89	229	127	74	87	117	149	226	63	233	19	20
1640 b	70	170	178	101	92	112	196	146	n. b.	4020	1910	4,7 %
1645	107	265	140	73	95	78	154	216	50	3540	926	24
Fragmente von Gußformen (äußere kalkarme Schichten)												
1638 a	102	265	142	71	72	98	156	327	48	2600	32	42
1638 b	107	274	154	86	84	109	149	316	27	2010	11	12
1639 a	115	281	149	71	72	109	147	256	38	455	11	23
1686 a	96	251	170	70	83	79	150	229	41	4360	5	39
Fragmente von Gußformen (mittlere gemischte Schichten)												
1649	63	183	84	50	60	184	118	223	18	102	19	9
1638 c	99	250	153	83	93	140	154	253	40	4900	22	133
1639 b	117	281	134	71	75	118	150	269	44	532	28	19
1684 a	47	183	87	47	51	153	116	180	40	42	25	6
1685 a	56	184	81	46	50	152	117	238	35	97	9	7
1686 b	104	248	110	79	86	155	136	157	32	1360	31	22
Fragmente von Gußformen (Schlichteschichten)												
1647	86	256	123	67	80	226	153	195	25	6600	74	61
1684 b	64	208	106	61	64	284	119	174	26	71	15	9
1685 b	60	207	98	56	53	264	124	281	35	189	24	4
1685 c	77	232	118	73	68	234	142	291	31	348	88	21
1686 c	87	237	133	78	79	226	149	201	29	5700	40	83

Analysentabelle: Spurenelemente (Fortsetzung)

Probe	V	Cr	Ni	Zn	Rb	Sr	Zr	Ba	Ce	Cu	Sn	Pb
Formfragment aus der hellenistischen Gießgrube												
1648	108	270	168	106	108	197	157	390	n. b.	8690	142	890
Formfragment, Keramik und Ton vom Kerameikos in Athen												
2925	104	287	146	73	80	133	208	306	57	677	46	25
2929	110	327	190	91	95	127	150	281	44	179	60	151
3300	167	330	194	125	126	332	162	267	54	110	25	113
Gußkernfragmente												
2510	157	184	61	145	118	126	210	356	63	6,8 %	1,0 %	132
2511	150	203	76	88	105	305	136	425	42	4010	813	107
Rohmaterialien aus der Grabung in Olympia												
1636	124	225	151	88	116	232	117	163	52	1400	18	14
1696	132	255	149	85	120	256	117	185	57	107	25	17
1625	120	224	138	80	108	233	111	178	38	52	18	10
1658	125	235	139	82	112	241	115	176	62	60	8	8
Kalkreiche Lehme aus Olympia und Umgebung												
1651	37	152	50	35	43	346	97	53	19	88	28	6
1695	69	174	106	64	75	330	117	138	35	36	17	6
1659	60	171	67	37	55	210	107	170	28	12	11	1
1660	115	253	131	79	109	226	145	205	58	34	11	11
1668	104	210	124	72	94	398	122	262	28	35	16	9
1694	97	187	123	78	92	292	117	249	47	49	8	11
Kalkarme Lehme aus der Umgebung von Olympia												
1634	100	352	103	51	76	66	204	158	41	18	4	12
1669	110	115	43	66	91	70	272	276	113	38	13	16
3315	106	177	97	56	88	35	103	165	67	78	8	78
Keramik aus Olympia und Tone von Töpfern der Umgebung												
1635	141	253	270	136	119	168	132	439	81	231	15	22
1663	126	222	184	105	166	291	109	247	62	146	21	46
1633	146	280	182	100	134	249	138	230	66	48	5	14
1673	142	257	157	93	129	218	138	212	61	37	14	6
1671	128	250	129	93	112	208	170	248	59	32	15	13