



# Der Griff nach den Sternen

Internationales Symposium  
in Halle (Saale) 16.–21. Februar 2005

Herausgeber Harald Meller und François Bertemes



# Verfahrenstechniken und Arbeitsaufwand im frühbronzezeitlichen Metallhandwerk – Technologische Aspekte der Himmelsscheibe von Nebra – Ein Erfahrungsbericht

Claus-Stephan Holdermann und Frank Trommer

## Abstract

**Processing techniques and expenditure of work in Early Bronze Age metal craft – technological aspects of the Nebra Sky Disc – a report**

*The project group »Prehistoric Metal Technology« has dealt with experimental reconstructions of prehistoric and early historical bronze casting and bronze processing techniques for a considerable time, during which it has consistently laid special emphasis on archaeological finds.*

*In the course of various experiments we have been able to create a model image, which provides hints and answers related to different questions concerning the production process of the Nebra Sky Disc. Within this framework we did not only focus on the demand for materials but also on both time and work involved in the process and on logistical aspects. According to our model the production process essentially consists of four main steps: the production of a set of tools which were recreated as precisely as possible, the casting of a blank bronze disc model, the stretching and lengthening of this blank model until it had the same size as the original disc and finally the fixing of various gold motifs on the disc.*

*Keywords: prehistoric bronze casting, bronze tools, production model, experimental archaeology*

## Einführung

Die Verfasser beschäftigen sich seit geraumer Zeit intensiv mit prähistorischen Bronzeguss- und Bronzeverarbeitungstechniken, mit Prozessen der Herstellung von Bronzeerzeugnissen sowie deren Verwendung im Experiment. Im Vordergrund steht hierbei die Orientierung an prähistorischen Funden und Befunden, die Hinweise zu technologischen Verfahrensweisen geben können. Von der 1999 entdeckten Himmelsscheibe vom Mittelberg bei Nebra (Burgenlandkreis, Sachsen-Anhalt) ging für uns ein neuer, ganz besonderer Reiz aus. Im Kontext ihrer Fertigungsvorgänge kombinierten wir erstmals verschiedene, in getrennten Prozessen gewonnene Erfahrungen.

Im Hinblick auf den Guss des Scheibenrohlings, den Vorgang seines Ausschmiedens und Streckens, das Anbringen der verschiedenen Goldbleche, das Durchlöchen des Randbereichs sowie hinsichtlich der Werkzeugherstellung wurden jeweils mehrere Versuchsreihen durchgeführt. Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen konnten Modellvorstellungen erarbeitet werden, die Hinweise und Antworten auf verschiedene Fragestellungen rund um die Fertigungsprozesse

## Zusammenfassung

*Die Arbeitsgruppe »Prähistorische Metalltechnologie« befasst sich seit geraumer Zeit mit der experimentellen Rekonstruktion prähistorischer und früher historischer Bronzeguss- und Bronzeverarbeitungstechniken. Hierbei steht die Orientierung an archäologischen Bodenfunden immer im Vordergrund.*

*Im Zuge verschiedener Versuche konnten wir eine Modellvorstellung erarbeiten, die Hinweise und Antworten auf verschiedene Fragestellungen rund um den Fertigungsprozess der Himmelsscheibe von Nebra liefert. Hierbei wurden insbesondere der benötigte Materialbedarf, der Arbeits- und Zeitaufwand sowie Aspekte der Logistik berücksichtigt. Der Fertigungsprozess der Himmelsscheibe besteht in unserem Modell im Wesentlichen aus vier Hauptarbeitsschritten: Anfertigen möglichst originalgetreuer Bronzewerkzeuge, Gießen eines Bronzescheibenrohlings, Dehnen und Strecken dieses Rohlings auf die Maße der Originalscheibe sowie Anbringen der verschiedenen Goldmotive auf der Scheibe.*

*Schlüsselbegriffe: prähistorischer Bronzeguss, Bronzegeräte, Produktionsmodell, experimentelle Archäologie*

der Himmelsscheibe von Nebra liefern können. Die Basis hierfür bildete in erster Linie das gezielte und funktionsorientierte Einsetzen des Werkstoffes Bronze. Hierbei zeigte sich, dass für die bei der Fertigung der Himmelsscheibe benötigten Werkzeuge verschiedene Legierungen und Bearbeitungsvorgänge erforderlich waren.

Die folgenden Darstellungen beschränken sich im Wesentlichen auf die technologisch relevanten Aspekte der verschiedenen Fertigungsprozesse. Auf eine detaillierte Erläuterung der bezüglich der bronzezeitlichen Guss- und Metallverarbeitungstechniken immer noch äußerst lückenhaften archäologischen Datenbasis soll in diesem Rahmen weitgehend verzichtet werden.

## Technische Daten und Maße der Himmelsscheibe

Die technischen Daten und Maße der Himmelsscheibe sind schon an anderer Stelle ausführlich behandelt worden (Meller 2004a, 26; 29; Wunderlich 2004, 38). Sie sollen hier, zum besseren Verständnis des unten Dargestellten, als kurze Zusammenfassung genügen. Der Durchmesser der Scheibe

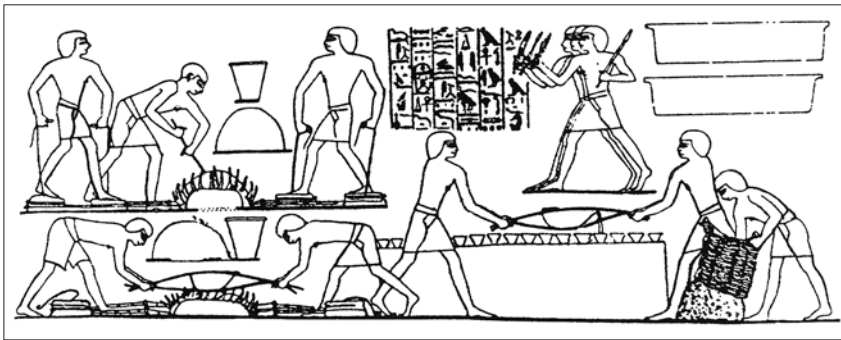


Abb. 1 Grabrelief des Rehmire, Ägypten, um 1450 v. Chr. Schmelzfeuerbetrieb mit Hilfe von Topfgebläsen.

schwankt zwischen 31 und 32 cm. Ihre Dicke nimmt von außen nach innen von etwa 1,5 auf ungefähr 4,5 mm zu. Das Gewicht der restaurierten Himmelscheibe liegt heute bei 2050 g. Auf ihr sind 37 Goldblechmotive mit einer Dicke von ca. 0,4 mm angebracht. Der Rand der Scheibe ist umlaufend mit mindestens 38 (Meller 2004a, 25) im Durchmesser etwa 2,5 mm messenden, von der Vorderseite her angebrachten Lochungen versehen. Die Scheibe wurde aus einer ungewöhnlich weichen Kupfer-Zinnlegierung mit einem Zinngehalt von ca. 2,5 % gefertigt.

### Der Fertigungsprozess

Die im Rahmen unserer Versuchsreihen entwickelten Modellvorstellungen verschiedener Fertigungsprozesse der Himmelscheibe bestehen aus fünf Hauptarbeitsschritten: dem Gießen eines Scheibenrohlings, dem Anfertigen der benötigten Werkzeuge, dem Dehnen und Strecken dieses Rohlings auf die Maße der Originalscheibe, dem Anbringen der Motive auf der Scheibe mittels Tauschierplattierung und dem Durchlöchen ihres Randbereichs. Auf die Fabrikation der goldenen Motive soll hier nicht eingegangen werden, da der Werkstoff Bronze im Vordergrund steht.

In Bezug auf die Vorgehensweise hielten es die Autoren grundsätzlich für ratsam, sich schrittweise an potentielle Arbeitstechniken eines bronzezeitlichen Metallhandwerkers anzunähern. So beinhaltete die erste Stufe der hier beschriebenen Verfahrensweisen im Allgemeinen die Verwendung moderner Produktionsmittel einer heutigen Schmiede (Lufthammer, moderne Esse etc.). Hierauf folgten Arbeitsschritte mit einfachen, selbst angefertigten Stahlwerkzeugen (z. B. Stichel) und Industriebronzen. Schließlich wurden an prähistorischen Bodenfunden orientierte und von den Verfassern selbst legierte Bronzewerkzeuge benutzt.

### Das Gießen eines Scheibenrohlings

Eine Bronzeschmelze von etwa 2,5 kg nimmt ein Volumen von ca. 340 cm<sup>3</sup> ein (die Dichte einer Bronze mit etwa 2,5 % Zinn beträgt ca. 8,85 g/cm<sup>3</sup>). Da durch unterschiedliche Arbeitsprozesse, z. B. das Abtrennen des Gusskanals oder das Ausrichten des Randes, Material verloren geht, ist davon auszugehen, dass ursprünglich die Masse der Schmelze und damit auch ihr Volumen das der fertigen Himmelscheibe

übertraf. Bei der Prozessfindung konnten keine verbindlichen Richtwerte zum Masseverlust erarbeitet werden. Dieser reduzierte sich mit dem Maße unseres Erfahrungszuwachses, ließ sich jedoch nie gänzlich vermeiden.

### Die Gusstiegel

Kupferzeitliche Schmelztiegel der Pfyner Kultur, z. B. mit einem Volumen von 125 cm<sup>3</sup> (Schreckensee, Kr. Ravensburg, Deutschland) oder 135 cm<sup>3</sup> (Bodmann, Kr. Konstanz, Deutschland), belegen, dass diese frühen Exemplare bereits 1,1 bzw. 1,2 kg Kupfer fassen können, wenn sie randvoll gefüllt worden wären (Schlichtherle/Rottländer 1982, 69)<sup>1</sup>. Unsere Versuche zeigten jedoch, dass das Volumen eines derartigen Schmelztiegels nicht komplett ausgenutzt werden kann, da ein sicheres Ausgießen eines randvollen Tiegels nicht möglich ist bzw. seine Handhabung mit einfachen Werkzeugen, z. B. Holzspannen und/oder Holzgriffen, dies nicht zulässt. Aufschmelz- und Gießversuche verdeutlichen, dass diese Gusstiegel maximal bis etwa zu <sup>3</sup>/<sub>4</sub> ihrer Höhe gefüllt werden sollten (Holdermann/Trommer in Vorbereitung).

Ein Gussvorgang mittels mehrerer kleiner Tiegel wäre bei einem eingespielten Werkstattteam durchaus denkbar. Er würde voraussetzen, dass der Gusskanal, der die flüssige Bronze in die eigentliche Form führt, entsprechend voluminös gestaltet ist. Die einfließende Bronze sollte in beiden Tiegeln identische Temperaturen aufweisen. Für erfahrene Gießer ist dieses bei Tiegeln aus identischem Material schon während des Hochfahrens des Schmelzofens und des langsamen Erhörens der Temperatur an deren Färbung und an der Färbung der Bronzeschmelze zu erkennen. Ägyptische Abbildungen belegen für das 15. Jh. v. Chr. Tiegelgrößen, die im Schmelzfeuerbetrieb von zwei Personen gehandhabt werden mussten (Abb. 1; z. B. Sonnenschein 1985, 12).

Auch wenn wir aus der Abbildung eines ägyptischen Grabreliefs keine wirklich exakte Wiedergabe der realen Situation annehmen können und das genaue Volumen dieser Tiegel unbekannt bleibt, kann für die Himmelscheibe aus der Darstellung gefolgert werden, dass die Masse des abgebildeten Gusses die der fertigen Scheibe deutlich überschritten hat. Obwohl unseres Wissens aus archäologischen Kontexten der frühen Bronzezeit Mitteleuropas bisher keine Schmelztiegel mit einem der Scheibe entsprechenden Volu-

<sup>1</sup> Reines Kupfer hat eine Dichte von 8,9 g/cm<sup>3</sup>.



men von etwa 400–450 cm<sup>3</sup> überliefert sind, gingen wir aufgrund der oben beschriebenen Darstellung davon aus, dass auch für den frühbronzezeitlichen Guss des Rohlings ein einzelner Tiegel Verwendung gefunden haben kann. Hier aufbauend benutzten wir Tiegel, die Bronzeschmelzen mit Massen zwischen 3 kg und 3,5 kg aufnehmen, deren Volumen jedoch nie komplett ausgenutzt wurde.

Schon im Rahmen anderer vorbereitender Untersuchungen wurden bei der Tiegelherstellung unterschiedliche Tonmischungen erprobt. Da sie nicht den primären Gegenstand dieser Abhandlung bilden, sollen sie an anderer Stelle vorgestellt werden (Holdermann/Trommer in Vorbereitung). Hervorzuheben ist hier jedoch die große Anfälligkeit dieser Tiegel gegenüber den Temperaturschwankungen während des Gusses, woraus sich unserer Meinung nach bestimmte Grundvoraussetzungen für einen geeigneten Gussort ableiten lassen. Die Anfälligkeit der Tiegel führte insbesondere während der experimentellen Orientierungsphase dazu, dass in erster Linie industriell hergestellte Graphittontiegel verwendet wurden.

Die Tiegelform scheint beim prähistorischen Bronze-guss kein bestimmender Faktor gewesen zu sein. So differenziert z. B. J. Waldhauser für Böhmen und Mähren fünf Tiegeltypen, die er für den Zeitraum Ha D–Lt D<sub>1</sub> eher chronologisch als funktional interpretiert (Waldhauser 1986, 202 f.) – eine Deutung, die sich mit unseren Erfahrungen in der praktischen Anwendung decken würde (Holdermann/Trommer in Vorbereitung).

#### *Der Schmelzofen und seine Belüftung*

Bei unseren Versuchsreihen standen die Optimierung des Gussformenmaterials und der erzielten Ausmaße der Scheibenrohlinge sowie die Weiterverarbeitung der Werkstücke mit Bronzewerkzeugen im Vordergrund. Aus diesem Grund griffen wir beim Aufschmelzen der Gussbronzen zuerst auf eine neuzeitliche Esse zurück. Nachdem bestimmte technologische Aspekte im Zusammenhang mit Gussformen und -tiegeln geklärt waren, verwendeten wir am Ende unserer Versuchsreihen einfache schüsselförmige Lehmöfen von etwa 50 cm Länge, 40 cm Breite und 30 cm Höhe mit auf Bodenniveau liegenden Belüftungsöffnungen (Abb. 2). Damit orientierten wir uns wiederum an der oben bereits behandelten ägyptischen Gabeliefdarstellung.

Bereits an anderer Stelle wurde darauf hingewiesen, dass nach dem Auflassen eines Schmelzofens nur seine verschlackten Bereiche den Witterungsbedingungen standhalten (Fasnacht 1991, 3 f.). Diesen Befund möchten wir bestätigen. Die Überlieferungschancen eines bronzezeitlichen Schmelzofens der oben skizzierten Bauart, noch dazu in einem interpretierbaren Erhaltungszustand, sind somit äußerst gering. Des Weiteren nehmen wir an, dass die nicht durchgeglühten Bereiche dieser Öfen beim Bau neuer



Abb. 2 Rekonstruierter Bronzeschmelzofen in Funktion mit zwei Belüftungssystemen nach griechisch-römischen Vorbildern.

Schmelzanlagen recycelt bzw. gebrannte Zonen als Schamott-Zusatz für Gussformen und Gusstiegel verwendet wurden. Diese Vorgehensweise wäre nicht nur ökonomisch, sondern im letzteren Fall auch technologisch sinnvoll (Holdermann/Trommer in Vorbereitung). All dies könnte erklären, warum unser Wissen über Aufbau und Entwicklung bronzezeitlicher Schmelzöfen bislang allerhöchstens rudimentär ist.

Nicht wesentlich anders verhält es sich mit erhaltenen Relikten der Belüftungssysteme prähistorischer Schmelzöfen. Versuche mit Knickdüsen, wie sie aus verschiedenen früh- und spätbronzezeitlichen Fundzusammenhängen belegt sind<sup>2</sup>, wurden bereits an anderer Stelle beschrieben (Giese u. a. 2002, 94). Sie passen nicht zum hier verwendeten Ofensystem und wurden daher nicht verwendet. Bei unserem Versuchsaufbau ersetzten wir die am Boden liegenden Topfgebläse der ägyptischen Darstellung aus Gründen der Durchführbarkeit – es stand zur Bedienung des Gebläses nur eine Person zur Verfügung – durch zwei griechisch-römische Belüftungssysteme (Abb. 2). Diese konnten bei maximalem Auszug ein Luftfassungsvermögen von etwa 22,5 l pro Balg erreichen. Würde man diese moderneren Blasebälge durch einfache Schlauchgebläse (Tierbälge) ersetzen, an deren in den Ofen einmündenden Enden die von prähistorischen Bodenfunden bekannten Tondüsen<sup>3</sup> befestigt sind, so müsste nach unseren Erfahrungen für die gleiche Gebläseleistung etwa die vierfache Arbeitsleistung (Anzahl an Arbeitskräften) aufgewendet werden.

#### *Das Brennmaterial*

Im Hinblick auf das Brennmaterial stand für uns die optimale Ausnutzung der verfügbaren Energieressourcen im Vordergrund. Bei unseren Versuchsreihen verwendeten wir ausschließlich Holzkohlen. Hierbei gingen wir davon aus, dass der höhere Brennwert von Holzkohlen gegenüber Holz bekannt war. Diese Kohlen wären entweder durch wieder-

2 Z. B. Roden 1988, 73; Heilmann/Schunke 2004, 113; Leineweber/Wunderlich 2001, 200 f.

3 Z. B. Bertemes 2004, 149; Drescher 1962, 822 Abb. 14; Jockenhövel 1994, 37.



Abb. 3 a Guss eines Scheibenrohlings in eine aufrecht stehende Kokillenform (Speckstein) bei etwa 1200° C; b Offene Form mit Scheibenrohling.

holtes Auslesen aus erloschenen Feuerstellen oder durch spezielle Köhlertätigkeiten zu beschaffen gewesen. In diesem Zusammenhang soll darauf hingewiesen werden, dass in anderen Versuchsreihen das Aufschmelzen von Bronzen mit Feuerholz bei Temperaturen von 1170° C gelungen ist (Fasnacht 1991, 5). Gezieltes Experimentieren mit Holzkohlen verschiedener Baumarten und unterschiedlicher Größen führten zu einer Optimierung des oben beschriebenen Schmelzsystems: Optimal erwies sich Buchenholzkohle mit einer Stückgröße von 4–6 cm. Da die Schmelzversuche an verschiedenen Orten unter unterschiedlichen Bedingungen (Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit etc.) stattfanden, kann kein aussagekräftiger Durchschnittswert für den Holzkohleverbrauch angegeben werden. Um eine gussfähige Bronze von etwa 2,5 kg Masse zu erreichen, verbrauchten wir jedoch nie mehr als 10 kg Buchenholzkohle. Für einen versier-



Abb. 4 Oberflächen-detail eines im offenen Herdguss gefertigten Gusskuchens.

ten Handwerker wäre es also unnötig gewesen, für diesen Fertigungsschritt einen speziellen Holzkohlemeiler zu errichten. Hervorzuheben bleibt außerdem, dass wir bei unseren Versuchsreihen immer einen gut durchgetrockneten Ofen benutzten.

#### Gussformen und Formenmaterial

Mittig verlaufende Gussnähte an Bronzefunden der frühen Bronzezeit belegen bereits für diese einleitende Phase der Metallverarbeitung, dass die Technologie des Kokillengusses bekannt war. Beim Kokillenguss werden zwei Formhälften mit aufeinander passenden Negativhälften verwendet (Jockenhövel 1994, 38; Velten 1941, 48). Daneben fand auch der einseitige Kokillenguss Verwendung, bei dem das Negativ nur in eine Formhälfte gearbeitet ist und die zweite Hälfte plan verbleibt. Bei beiden Verfahrensweisen wird das flüssige Metall in die aufrecht stehende Kokille gegossen (Abb. 3a–b). Darin unterscheidet sich dieses Verfahren vom verdeckten Herdguss, bei dem das Negativ in nur eine Formhälfte eingearbeitet ist und mit der anderen Formhälfte, die wiederum glatt verbleibt, nach dem Guss abgedeckt oder abgezogen wird. Die beschriebenen Kokillentechniken haben den Vorteil, dass auftretende Lunker in der Regel im abzutrennenden oberen Eingussbereich des Gusszapfens liegen.

Gegenüber dem oft unreflektiert angenommenen Guss in einer offenen Form (offener Herdguss), bei dem die Gusspeise in eine Form gegossen wird, die nicht abgedeckt ist, liegt ein weiterer und entscheidender Vorteil der Kokillentechnik darin, dass glatte Oberflächen ohne störende Oxydschichten entstehen. In offenen Formen bildet sich an der dem Sauerstoff ausgesetzten Seite des Gusses eine Oxydschicht mit rauer »milchhautartiger« Oberfläche (Abb. 4). Diese Oxydschicht würde beim Ausschmieden der Scheibe deutliche Fehlstellen und Unreinheiten hervorrufen, da sie in das Werkstück hineingearbeitet würde. Derartige Oberflächenstrukturen sind am Original makroskopisch jedoch nicht erkennbar. Wenn also der Scheibenrohling mit der Methode des offenen Herdgusses hergestellt worden wäre, dann müsste die Oxydschicht vor dem Ausschmieden entfernt worden sein. Dies hätte jedoch einen unnötigen Zeitaufwand und Materialverlust bedeutet.

Plane Gussbronzewerkstücke entwickeln beim Erkalten aufgrund des Volumenverlustes des abkühlenden Metalls eine primär nach innen, in die Form gerichtete Wölbungstendenz. Beim Gussverfahren in einer offenen Form – ebenso wie bei der Fertigung in einer gedeckten offenen Form – zieht sich infolgedessen das Werkstück an der oben liegen-





Abb. 5 Auswahl rekonstruierter Werkzeuge des bronzezeitlichen Metallhandwerks. Tüllenhammer, Stichel, Meißel, Punzen und Bronzeamboss der späten Bronzezeit (Urnenfelderzeit) sowie Steinamboss.

den Fläche deutlich »ein«. Dieser Volumenverlust verläuft im aufrecht stehenden Kokillenguss (Abb. 3) innerhalb des Eingussbereichs und nicht im eigentlichen Zielprodukt. Er verursacht somit beim Ausschmieden der Rohform keinen zusätzlichen Arbeitsaufwand. Aus all diesen Gründen erscheint uns eine Anwendung des technologischen Konzepts des Kokillengusses plausibel, zumal Formen und Metallfunde diese Anwendung in Mitteleuropa bereits seit dem späten Neolithikum belegen (Drescher 1962, 817).

Im Allgemeinen wird angenommen, dass die Beständigkeit des Gussformenmaterials ein maßgeblich Faktor bei der Auswahl des Rohstoffs war (weiterführend dazu Holdermann/Trommer in Vorbereitung). Daneben wird auch der Aufwand, der nötig war, um die gewünschte Form herzustellen, eine Rolle bei der Materialauswahl gespielt haben. Wenn wir davon ausgehen, dass die Himmelscheibe ein Unikat ist, dürfte die Beständigkeit des Formenmaterials keinen allzu großen Einfluss auf die Materialauswahl gehabt haben. Da die Oberflächen des Gusses auf beiden Seiten intensiv bearbeitet wurden, wird die Oberflächenbeschaffenheit des Rohgusses ebenfalls keine wesentliche Rolle bei der Auswahl des Formenmaterials gespielt haben. Vom Planschleifen einer sehr unregelmäßigen Oberfläche sei hier abgesehen.

Gussformen aus Sandstein, Speckstein, Glimmerschiefer und anderen Gesteinen sind in Europa nachweislich vom ausgehenden Neolithikum an bis in die historischen Perioden benutzt worden<sup>4</sup>. Befunde wie die Gussform von Ludéřov bei Olomouc (Tschechien) belegen schon für das späte Neolithikum (Glockenbecherkultur) technologisches Wissen um die Eignung bestimmter Sandsteinvarietäten als Gussformenmaterial (Drescher 1962, 817). Hierauf aufbauend verwendeten wir für unsere Formen Varietäten spezieller Speck- und insbesondere Sandsteine (z. B. Paret 1952–1954, 35–39) mit hoher Beständigkeit, da im Rahmen verschiedener Versuchsreihen das wiederholte Gießen ein und derselben Form beabsichtigt war. Aus diesem Grunde wurden

keine Versuchsreihen mit keramischen Formenmaterialien (siehe Giese u. a. 2002, 93) durchgeführt, deren Haltbarkeit als bedeutend geringer zu beurteilen ist. Da aber bereits Befunde aus der frühbronzezeitlichen Aunjetitzer Kultur die Kenntnis des Wachs ausschmelzverfahrens belegen (z. B. Drescher 1962, 818), erscheint den Autoren auch die Anwendung einer einfachen zweischaligen Lehmform oder die Technik der »Verlorenen Form« im technologisch »entwickelten« Wachs ausschmelzverfahren (weiterführend dazu Büll 1959) für den Guss der Himmelscheibe plausibel. Auf die Anwendung des in der modernen Gießerei gängigen Formsandes verzichteten die Autoren, weil aus prähistorischen Fundzusammenhängen bisher keine gesicherten Belege für seine Verwendung als Gussformenmaterial vorliegen (vgl. Goldmann 1981, 109–116).

### Der Scheibenrohling

In den Versuchsreihen wurden schließlich Scheibenrohlinge (Abb. 3b) mit etwa der Masse der Originalscheibe (ca. 2,25 kg) und einem Maximaldurchmesser von 19 cm gegossen. Ihre Materialstärken lagen zwischen etwa 5 mm am Scheibenrand und ca. 10 mm im Zentrum. Flachere Rohlinge ließen sich mit den von uns benutzten Formenmaterialien nicht herstellen, da die Gussbronze in den entsprechenden Formen unvollständig auslief. Nach unseren Erfahrungen in anderen Zusammenhängen (Holdermann/Trommer in Vorbereitung) sollte ein erfolgreicher Bronzeguss eines dünnen, flachen Metallkörpers mit den oben beschriebenen Maßen auch in keramischem Formenmaterial möglich sein.

### Die Werkzeuge der Weiterverarbeitung

Bronzezeitliche Bronzewerkzeuge, die man ursächlich mit der Weiterverarbeitung von Metall, insbesondere von Bronzegegenständen, verbinden kann, sind sehr selten überliefert. Sie unterliegen, vor allem wenn es sich um nachzuschärfende Werkzeuge wie Meißel und Stichel handelt, einem starken Verschleiß. Somit erscheint ein zügiges Recycling dieser schnell abgearbeiteten Stücke wahrscheinlich, womit wir ihr seltenes Auftreten in archäologischen Kontexten, z. B. im Fürstengrab von Leubingen (Bertemes 2004, 145), erklären möchten.

Darüber hinaus sind diese Stücke Werkzeuge von Spezialisten und (abgesehen von Hämmern und Ambossen) auch schwer als Werkzeuge aus metallhandwerklichen Zusammenhängen zu identifizieren – genau genommen erst nach einer metallurgischen Untersuchung und dem Nachweis einer ausreichenden werkzeugtechnischen Materialeignung. Dies würde bedeuten, dass man einen erhöhten Zinnanteil und eventuell eine Härtung durch kaltes Überschmieden nachweisen müsste, um die funktionale Deutung eines archäologischen Fundobjekts als schneidendes, spanabhebendes oder verdrängendes Werkzeug zu untermauern.

Zudem müssen solche Werkzeuge so gestaltet sein, dass eine direkte Impulsübertragung zum bearbeiteten Werk-

<sup>4</sup> Z. B. Sölder 2005, 19; Bočkarjev/Leskov 1980; Born/Hansen 2001, 225 Abb. 167; Drescher

1962, 817–820; Drescher 1973, 48–62; Resi 1979, 58–67.

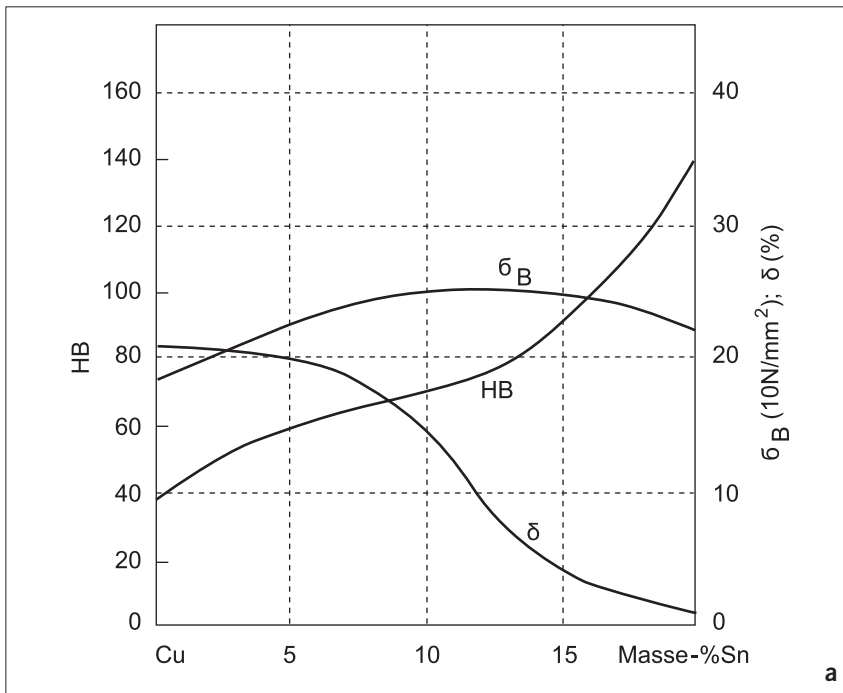
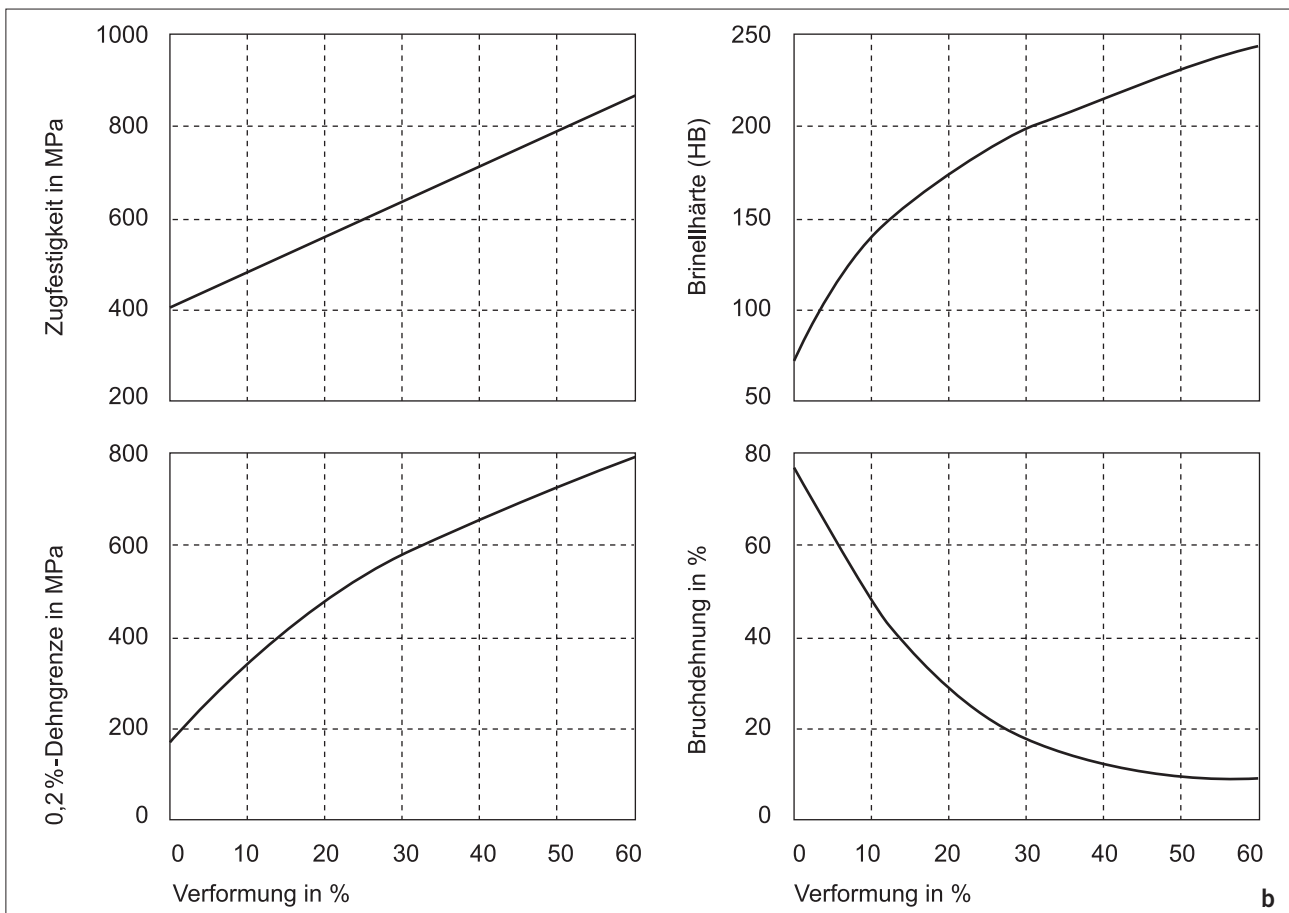


Abb. 6 a Zusammenhang von steigender Härte von Zinnbronzen und steigendem Zinngehalt (HB = Härte,  $\sigma_B$  = Zugfestigkeit,  $\delta$  = Dehnung einer Kupfer-Zinnbronze mit steigendem Zinngehalt); b Zusammenhang von steigender Verfestigung einer Kupfer-Zinnbronze mit etwa 10 % Zinn und Kaltverformung.



stück ohne ein dämpfendes Zwischenstück gewährleistet ist<sup>5</sup>. Nur so stehen bei der Bronzebearbeitung erforderlicher Kraftaufwand und sichere Führung des Geräts in einem

funktionalen Verhältnis. Werkzeuge, bei denen Randleisten, Tüllen o. ä. Hinweise auf Schäftungen liefern, dürften nach der Erfahrung der Autoren in Kontexten außerhalb der

<sup>5</sup> Vgl. z. B. den Depotfund von Crévic (Dépt. Meurthe-et-Moselle, Frankreich); Wiegmann 1997, 122.

Metallbearbeitung genutzt worden sein, z. B. als Beitel in der Holzverarbeitung.

Es gibt sehr wenige Fundstücke, die klar als Werkzeuge des frühbronzezeitlichen Metallhandwerks erkennbar sind. Aus der späten Bronzezeit hingegen sind eindeutige Ambosse, Hämmer, Meißel, Stichel und Punzen überliefert<sup>6</sup>. Für diese Zeitstellung belegen Werkzeugdepots wie der Befund von Génelard (Saône-et-Loire, Frankreich; Mohen 1988, 37) in der Metallverarbeitung einen hohen Spezialisierungsgrad. An diesen deutlich jünger als die Scheibe einzustufenden Werkzeugformen orientierten sich die Verfasser, um dem ursprünglichen »Werkzeugkasten« des frühbronzezeitlichen Handwerkers möglichst nahezukommen (Abb. 5).

Der von uns nach einem Vorbild aus der Schweiz (Wollishofen, Kt. Zürich; Ohlhaver 1939, Taf. 4 oben) nachgearbeitete Bronzeamboss (Abb. 5 oben links) erwies sich aufgrund seiner geringen Masse für die hier durchgeführten Treibarbeiten als zu instabil. Er wurde durch einen Steinamboss (Abb. 5 Mitte) aus kompaktem Gestein, einem ausgewählten Amphibolitgeröll mit ca. 16 kg Masse, ersetzt. Da nicht in der Hocke auf dem Boden gearbeitet wurde, lagerte dieser zur besseren Handhabung auf einem Buchenholzklotz. Jedes andere kompakte und homogene Gestein (z. B. Basalt) wäre auch verwendbar gewesen, vorausgesetzt es entstand während des Ausschmiedevorgangs kein Gesteinsabrieb, da dieser sonst in die Scheibe eingearbeitet worden wäre. Gesteinspartikel sind im Zusammenhang mit den Untersuchungen des Originals bis zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung jedoch nicht beschrieben worden. Mit der Benutzung eines Steinambosses orientierten wir uns an den sogenannten »Kissensteinen«, kleinen, als Ambosse oder Arbeitsunterlagen gedeuteten zumeist kissenförmigen Gesteinen, die z. B. aus geschlossenen archäologischen Kontexten der Spätkupferzeit und frühen Bronzezeit bekannt sind (z. B. Bertemes 2004, 144–147).

Die Annahme, dass bronzene Werkzeuge zur Bearbeitung von Bronzegegenständen benutzt worden sind, wurde schon vielfach erörtert und durch Versuche gestützt. Nachdem die Originalscheibe aus einer Bronze mit einem Zinngehalt von etwa 2,5 % gefertigt wurde, war es von Vorteil, für die Bronzen der härteren, spanabhebenden, schneidenden und verdrängenden Werkzeuge (Punzen, Stichel und Meißel) einen höheren Zinnanteil zu verwenden. Hierbei werden bestimmte Eigenschaften von Kupfer-Zinnbronzen genutzt, mit denen sich durch Veränderungen des Zinngehalts bestimmte Materialeigenschaften (Härte, Zugfestigkeit, Dehnung) bewusst steuern lassen (weiterführend dazu Dies 1967; Deutsches Kupferinstitut 2004) (Abb. 6a). Mit Bezug auf eigene Versuchsreihen schlug H. Drescher für die Fertigung von Punzen Bronzen mit 6–15 % Zinn vor, deren Schneiden durch Hämmern gehärtet und dann nachgeschliffen wurden (Drescher 1957, 25). Die Bandbreite der Mischungsverhältnisse unserer Punzen-, Stichel- und Meißelbronzen lag zwischen 8–17 % Zinn und 83–92 % Kupfer. Unterschritten wir diesen Varianzbereich des zugefügten Zinns, so verloren die Werkzeuge sehr schnell an Standzeit



Abb. 7 Von den Verfassern gefertigte Punzen. Gussrohling und fertig überarbeitetes Stück auf der zugehörigen Sandsteinform.

ihrer Schneiden; überschritten wir ihn, wurden die schneidenden Kanten deutlich spröder. Die Gefahr eines ausbrechenden Schneidbereichs, insbesondere bei den Sticheln, erhöhte sich deutlich.

Die Verwendung reiner Zinnbronzen mit einem Zinngehalt von über 8–15 % ist nicht unproblematisch. Diese Bronzen neigen zu starken Seigerungserscheinungen bei der Erstarrung. Dies bedeutet im Prinzip eine Entmischung der in flüssigem Zustand gleichmäßig verteilten Legierungsbestandteile. Um diesen Zustand wieder auszugleichen, d. h. eine Homogenisierung der Bronzelegierung herbeizuführen, muss das Werkstück nach einer starken Kaltumformung bei Temperaturen von mehr als 550°C über einen sehr langen Zeitraum geglüht werden. Dadurch wird ein gleichmäßigeres Gefüge der Substitutionsmischkristalle erreicht und die Werkstoffeigenschaften werden optimiert. Ansonsten neigen die Bronzen mit starken Seigerungen bei der notwendigen Kaltverformung bzw. spätestens bei der Anwendung als Werkzeug verstärkt zum Bruch (Schumann 1989, 508–513; Dies 1967, 504–507).

Auch in unseren Versuchsreihen wurden die Meißel und Stichel nach dem Guss überschliffen und die Stichel mit Arbeitsbereichen mit Winkeln zwischen 55 und 70° versehen (Abb. 7; vgl. Drescher 1957, 25). Danach wurden die Schneidbereiche vor dem Schärfen kalt schmiedend verfestigt, ein Prozess, bei dem die Kaltverformung der Kupfer-Zinnbronzen durch Veränderungen der Metallstruktur für die hier beabsichtigten Arbeitsvorgänge günstigere Materialeigenschaften bewirkt (Abb. 6b; weiterführend dazu Dies 1967; Deutsches Kupferinstitut 2004).

### Dehnen und Strecken dieses Scheibenrohlings

Für die auf den Guss folgenden Treibarbeiten verwendeten wir den oben erwähnten Steinamboss und verschiedene Bronzehämmer (Abb. 5; Abb. 8). Steinhämmer im Sinne der bekannten Rillenschlägel (z. B. Rieser/Schrattenthaler 2002, 69–86; Weisgerber 1993, 27 Abb. 19–20) wurden bei den

<sup>6</sup> Z. B. Born/Hansen 2001, 229 Abb. 174–175; Jockenhövel 1986, 566 Abb. 1,4–5; Ohlhaver 1939, 103–111; Taf. 1–6.





Abb. 8 Dehnen und Strecken der Rohform durch Ausschmieden mit einem Bronzehammer auf einem Steinamboss.



Abb. 9 Verschiedene Fertigungsstadien des Scheibenrohlings.



Abb. 10 Fertigungsfehler bei einer Scheibe, die aus einem im offenen Herdguss hergestellten Gusskuchen gefertigt worden und in einem frühen Stadium des Ausschmiedens randlich eingerissen ist.

beschriebenen Versuchsreihen aufgrund ihres schlechten Masse/Volumen-Verhältnisses und ihrer schlechten Standhaftigkeit nicht benutzt. Sie erschienen den Autoren für die zu rekonstruierenden Arbeitsvorgänge gänzlich ungeeignet.

Ein Großteil der Treiarbeiten wurde mit einem Tüllenhammer von etwa 2 kg Gesamtmasse durchgeführt, wovon etwa 1,1 kg auf den bronzenen Hammerkopf entfielen (Abb. 8). In unseren Versuchsreihen fand die Verdrängung des Metalls von der Scheibenunterseite her durch die gewölbte Ober-

fläche des Steinambosses statt. Hierbei arbeiteten wir mit relativ planen Hammerbahnen. Diese Arbeitsweise war durch die Form unseres Steinambosses (Geröll) bestimmt. Arbeitsgänge auf einem planen Amboss würden geballte Hammerbahnen voraussetzen. Ein von uns nach einem Vorbild vom Mitterberg bei Mühlbach-Bischofshofen (Österreich; Probst 1996, 389) nachgearbeiteter Bronzehammer mit einer Masse von annähernd 9 kg kam nicht zur Anwendung. Unter seinen Schlägen waren die Abnutzungserscheinungen des sonst stabilen Steinambosses zu umfangreich.

Während des Ausschmiedens ließ sich nicht vermeiden, dass die Werkstücke in ihren Randbereichen durch ungleichmäßige Hammerschläge »verliefen« und somit nach einigen wenigen Arbeitsgängen einen leicht unregelmäßigen, geringfügig gewellten Rand aufwiesen. Um ein völliges Ausbrechen des beabsichtigten runden Umrisses zu verhindern, mussten die Konturen wiederholt rund geschliffen werden, wobei ein Masseverlust eintrat. Mit zunehmender Erfahrung konnte die Formgebung jedoch exakter gesteuert und somit der Materialverlust deutlich verringert werden. Da der Randbereich der fertigen Himmelscheibe keine geschweifte Außenlinie aufweist (Meller 2004a, 24 f.), sich die Entstehung eines geschweiften Randes durch die Arbeitsschritte des Ausschmiedens jedoch nicht gänzlich vermeiden lässt, ist auch für das Original zumindest ein finales Überarbeiten des Umrisses vorauszusetzen.

Bisher sind aus archäologischen Fundzusammenhängen keine frühbronzezeitlichen Metallzangen bekannt. Nach unseren Erfahrungen mit organischen Zangen aus Holz, Knochen und Geweih ist es kaum möglich, eine heiße Rohscheibe während des mit großem Kraftaufwand ausgeführten Schmiedevorganges exakt und sicher zu führen. Wir gehen in unserem Fertigungsmodell auch aus diesen beiden Gründen davon aus, dass der Scheibenrohling kalt ausgeschmiedet wurde.

Eine Versuchsreihe beinhaltete jeweils etwa 30 Ausschmiedevorgänge, bei denen die gesamte Oberfläche des Rohlings mit dem Bronzehammer einseitig überformt wurde. Daneben führten die Autoren den jeweiligen Arbeits-

**Abb. 11** Anreißen der Konturlinie für eine Goldauflage. a Anreißen mit einem Bronze-meißel; b Praktische Umsetzung durch zwei Personen.



zyklus aus Zeitgründen auch mit modernen Werkzeugen durch. Ziel war immer das Erreichen der Maße des Originals. Wir legten Wert darauf, dass die Arbeitsschritte mit den beschriebenen Bronzewerkzeugen in unterschiedlichen Phasen des Ausschmiedevorganges durchgeführt wurden, um auftretende Arbeitsspuren im Gesamtverlauf des Streckungsvorganges beobachten und dokumentieren zu können (Abb. 9).

Um dem Werkstück die bei der Treiarbeit (Kaltverformung) entstehenden Spannungen zu nehmen, muss das Material nach jeder kompletten flächigen Überarbeitung der Scheibe auf etwa 500–700°C erhitzt werden. Dieser Vorgang des Zwischenglühens lässt sich auch am Original durch sein metallographisches Gefügebild nachweisen (Wunderlich 2004, 38). Der Prozess des Zwischenglühens und Abschrecken des Scheibenrohlings führt zu einem erneuten »Weichwerden« des Werkstücks. Die hierfür benötigte Zeit ist individuell von der Dicke des Rohlings abhängig, d. h. in einem frühen Stadium des Ausschmiedens muss der (dickere) Rohling somit länger ausgeglüht werden als eine flachere Scheibe in einem späteren Stadium. Die erreichten Temperaturen sind an der Färbung des heißen Metalls erkennbar. Um den oben dargestellten Temperaturrahmen zu erreichen, benötigt man durchschnittlich etwa 40–60 Minuten. Der Glühvorgang kann in einem einfachen Holzfeuer durchgeführt werden. Ferner muss man in den späten Stadien der Bearbeitung – auch wenn die flächige Überarbeitung noch nicht abgeschlossen ist – wiederholt Glühvorgänge zwischen-schalten, um verzogene Scheiben auszurichten. Bei sorgfältiger Hammerführung kann jedoch in der Regel bis zu einem Arbeitsstand fortgefahren werden, bei dem der Klang und die Federeigenschaften des Werkstückes die Notwendigkeit des Glühvorgangs signalisieren. Wird dieses Stadium verpasst, reißt die Scheibe randlich ein. Ein Materialfehler entsteht, der mit prähistorischen Mitteln nur durch Ausschleifen des gesamten Randbereiches zu beseitigen wäre (Abb. 10).

Bei den mit Bronzewerkzeugen durchgeführten Arbeitsgängen lag die durchschnittliche Vergrößerung des Durchmessers der Scheibe bei etwa 0,2 cm pro Ausschmiedevorgang. Hierbei war der Zuwachs von der Größe der bereits vorliegenden Oberfläche des Werkstückes abhängig. Um in unserem Fertigungsmodell einen unserer Rohgüsse von etwa 19 cm Durchmesser auf die Maße der Originalscheibe (ca. 32 cm) zu strecken, dürften nach unseren Hochrechnungen etwa 60–70 Arbeitszyklen nötig gewesen sein, wobei ein Zyklus jeweils das einseitige Ausschmieden der kompletten

Oberfläche der Scheibe sowie ein mindestens halbstündiges Zwischenglühen beinhaltet. Der eigentliche Schmiedeprozess, ohne Glühphasen, würde nach unseren Hochrechnungen etwa 20–25 Stunden dauern. Dabei können bei sorgfältiger Führung des Hammers glatte Oberflächen geschaffen werden, wodurch ein abschließendes Überschleifen der Oberfläche überflüssig wird.

#### Die Tauschierplattierung der Goldbleche auf der Scheibe

Kombinationen verschiedener Metalle an einem Werkstück müssen in der frühen Bronzezeit nicht zwingend unüblich gewesen sein, auch wenn sie selten durch Bodenfunde belegt sind. So wurden z. B. in das frühbronzezeitliche (Bz A2) Bronzebeil aus Thun-Renzenbühl (Schweiz) zwei kupferne Bänder eingelegt, in die wiederum zahlreiche Goldstifte eingelassen wurden (Strahm 1972; Furger/Müller 1991, 107). Für Mittel- und Westeuropa belegen Gravierungen, Zierlinien und Bohrungen an frühbronzezeitlichen Bronzefunden geographisch weiter verbreitete werkzeugtechnische Kenntnisse, die als Voraussetzungen für die an der Himmelsscheibe durchgeführte Technik der Tauschierplattierung gewertet werden können. Im Gegensatz zur Tauschierplattierung wird bei dieser Technik ein aufliegendes Material nicht in eine Vertiefung eingehämmert, sondern unter einer leicht unterschrittenen Wulst des Grundmaterials eingeklemmt.

Um Bronze in der ausgeschmiedeten Rohscheibe so zu verdrängen, dass Rillen entstehen, diese für »Einlegearbeiten« vorzubereiten und schließlich die Goldmotive einzuklemmen, wurden Meißel, Stichel und Punzen zusammen mit Hämmern unterschiedlichen Gewichts verwendet. In der Experimentierphase benutzten wir hierbei an Stelle des Goldes ein Tiefzieh-Messing, das in seiner Färbung und seinen Verarbeitungseigenschaften dem Gold sehr nahe kommt.

In unserem Fertigungsmodell wird der Umriss der jeweiligen Blecheinlage auf die ausgeschmiedete und durchgeglühte Scheibe mit einem etwa 1–2 mm geringeren Durchmesser übertragen. Die ersten »Schnitte« sind mit meißelartigen Werkzeugen, welche Schneidenbreiten von 2–4 mm aufweisen, senkrecht in dieser Konturlinie zu führen (Abb. 11a–b). Die so entstandene senkrechte Vertiefung dient an der Außenseite der Kontur als Widerlager für stichelartige Werkzeuge, mit Schneidenbreiten von 2–3 mm und einem Schneidenwinkel von etwa 55–70°. Diese Stichel werden nicht spanablösend benutzt, sondern unterschneiden lediglich das Oberflächenmaterial, wobei dies so nach außen





**Abb. 12** Unterschneiden der Oberfläche mit einem Bronzestichel.



**Abb. 13** Einarbeiten der Goldauflage mit einem stumpfen Bronzestichel.



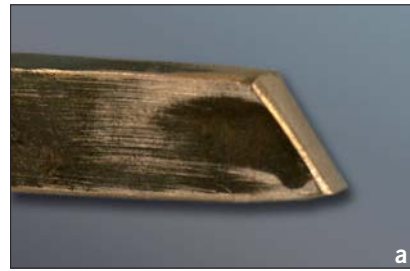
**Abb. 14** Brechen der Kante der inneren Konturlinie mit einer Bronzezunze.

verdrängt wird (Abb. 12), dass sich die Kontur unter der Oberfläche vergrößert. In diese Unterschneidung wird die Einlage mit einem leicht stumpfen Stichel hineingetrieben (Abb. 13). Es hat sich gezeigt, dass es von Vorteil ist, die verbliebene innere Konturlinie vorher mit einem punzenartigen, stumpfen Werkzeug zu brechen (Abb. 14), damit das eingelegte Blech beim Einklemmen nicht abgeschert wird.

Für das Festklemmen der Motiveinlagen benutzen wir ebenfalls eine flache Punze, wobei das Festklemmen größerer Einlagen auch mit gezielten Schlägen eines kleinen Hammers erfolgen kann. Das Einklemmen vollzogen wir in mehreren vorsichtigen Arbeitsgängen, um das Grundmaterial des aufgestauchten Grates wieder eben zur Oberfläche zu bringen. Auch bei diesem Vorgang kam es darauf an, die bearbeitete Einlage nicht abzuscheren. Entscheidend ist, dass während des gesamten Arbeitsvorgangs das eingelegte Blech fest fixiert bleibt, damit es nicht aus den schon geschlossenen und klemmenden Bereichen herausgerissen wird.

Die unterschneidenden stichelartigen Werkzeuge behalten ihre Schnitthaltigkeit für Arbeitsvorgänge von maximal 3–4 cm Länge und müssen anschließend nachgeschärft werden. Hieraus resultiert ein hoher Arbeitsaufwand zur Wiederherstellung der Arbeitskanten der schneidenden und verdrängenden Werkzeuge, der parallel zu den eigentlichen Arbeitsprozessen der Himmelscheibe bewältigt werden muss (Abb. 15a–d).

Der Arbeitsvorgang des Unterschneidens muss in der gesamten Konturlinie der Blecheinlagen mehrmals wiederholt werden, um eine Unterschneidung mit der nötigen



**Abb. 15** Verschiedene Abnutzungsstadien eines Bronzestichels. a Stichel neu angeschliffen; b Stichel nach ca. 2 cm Arbeit beim Unterschneiden der Bronze; c Stichel nach ca. 5 cm Arbeit beim Unterschneiden der Bronze; d Anschleifen des Stichels auf einer alten Sandsteinform (Sekundärnutzung von Gussformen).

funktionalen Tiefe von etwa 2–3 mm zu erreichen. Hierbei wird durch den Verdrängungsvorgang die Bronze der Scheibe im Arbeitsbereich erneut gehärtet und ist somit schwieriger zu bearbeiten. Bei großen Ornamenten entstehen so Spannungen in der Bearbeitungszone, die dazu führen können, dass sich die Scheibe insgesamt erneut verwerfen kann. Infolgedessen müsste dieser Bereich nochmals erhitzt werden, um dem Werkstück die Spannung zu nehmen und es ausrichten zu können. Es hat sich gezeigt, dass es nicht sinnvoll ist, diesen Arbeitsschritt durchzuführen, wenn bereits Applikationen auf der Scheibe angebracht sind. Diese werden sonst teilweise wieder aus ihren Führungen gezogen. Daher führten wir die Vorarbeiten – das Unterschneiden und Aufwerfen des später klemmenden Grates – für alle Einlagen in einem Zug durch, dann nahmen wir der Scheibe durch ein finales Erhitzen die Spannungen und richteten sie wieder aus, um zuletzt – wiederum in einem Zug – alle Applikationen anzubringen. Für die größeren, in den Nutzungsphasen II–V (Meller 2004a, 29) nachträglich einzeln angebrachten Motiveinlagen ist ein partielles Ausglühen durch das gezielte Auflegen glühender Kohlen zu erwägen.



### Das Durchlochen des Scheibenrandes

Betrachtet man die randlichen Durchlochungen der Scheibe (z. B. Meller 2004a, 24 f.) von der Vorderseite, so ist auffällig, dass sich deren Innenbereiche trichterförmig einziehen. Dies weist darauf hin, dass von der Vorderseite ein Impuls ausgeführt wurde. Die Löcher sind somit geschlagen oder gedrückt und nicht gebohrt worden. Von der Rückseite betrachtet deutet bei den erhaltenen Lochungen jeweils ein kreisrunder Abdruck der gestauchten Bronze darauf hin, dass der Impuls in eine gelochte Unterlage hinein ausgeführt wurde. Bei den vollständig erhaltenen Durchbrüchen ist der Abstand der einzelnen Lochungen zur Randkante nahezu identisch. Dies könnte auf die Verwendung einer Auflage mit einer fest definierten Anschlagkante hindeuten, auf der das Durchschlagen der Himmelscheibe ausgeführt wurde. So konnte ihr Verrutschen während dieses Prozesses vermieden werden.

Hierauf aufbauend haben die Verfasser verschiedene Versuche zur Rekonstruktion der Fertigung der Durchbrüche durchgeführt. Zuerst lochten wir mit Hilfe einer spitzen runden Punze durch eine durchbohrte Hartholzunterlage hindurch. Hierbei konnten jedoch nur trichterförmige Durchbrüche mit ungleichmäßigen Rändern erzielt werden. Der kreisrunde Abdruck der gestauchten Bronze an der Rückseite der Himmelscheibe fehlte bei diesen Versuchsreihen.

In den folgenden Versuchsreihen wurde auf eine hölzerne Unterlage ein einfach gelochtes Bronzeblech mit einer Stärke von 1,5–2 mm gelegt, das mit einem Anschlag versehen war. Die Himmelscheibe wurde auf diesem Lochblech zurechtgelegt und mit einer spitzen Punze durchschlagen, die wiederum in das Loch des Lochblechs und weiter, in die hölzerne Unterlage, hineingetrieben wurde. Die mit den spitzen Punzen erzielten Lochungen wiesen an ihren Rückseiten den auch an der Himmelscheibe sichtbaren kreisrunden Absatz auf; ihre Ränder verliefen jedoch meist nicht gleichmäßig. Mitunter hing ein ausgefranztes Stück des Himmelscheibenblechs seitlich an einem Lochrand fest. Erst die Verwendung stumpfer Punzen mit der beschriebenen Bronzeblechaufgabe führte zu mit dem Originalbefund vergleichbaren Ergebnissen (Abb. 16a–b).

### Organisation und Arbeitsaufwand

Die von den Autoren für die Landesausstellung Sachsen-Anhalt 2004 »Der geschmiedete Himmel. Die weite Welt im Herzen Europas vor 3600 Jahren« gefertigten Himmelscheiben-Replikat tragen bis ins Detail die gleichen makroskopischen Arbeitsspuren wie der Originalbefund (z. B. Abb. 17). Wir möchten jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass wir nur Aspekte eines Fertigungsmodells vorstellen können. Folgende zusammenfassende Aussagen zur Durchführung der Arbeitsprozesse und zum benötigten Arbeitsaufwand sind somit auch nur als Hinweise zu verstehen. Sie sollen annähernde Möglichkeiten aufzeigen, die es durch weitere Versuchsreihen zu verdichten gilt.

Unserer Auffassung nach ist es wahrscheinlich, dass die Hersteller der Himmelscheibe spezialisierte Metallhandwerker waren und in einem eingespielten Team zusammenarbeiteten. Diese Einschätzung basiert auf im handwerklichen Nachvollzug erworbenen Erfahrungen. Grundvoraussetzung



Abb. 16 Ansichten der Durchlochung einer nachgebauten Himmelscheibe. a Durchlochung des Randbereichs von oben; b Durchlochung des Randbereichs von unten sowie Werkzeuge.



Abb. 17 Nachbau von Teilbereichen der Himmelscheibe von Nebra.

zur Fertigung der Scheibe ist eine detaillierte Materialkenntnis verschiedener Bronzelegierungen, ihrer unterschiedlichen Schmelzgrade und Materialeigenschaften, über die zumindest eine der am Prozess beteiligten Personen verfügen musste. Diese Person koordinierte und/oder ließ sich in den verschiedenen Teilprozessen zuarbeiten.

Die oben erwähnte Abbildung des ägyptischen Schmelzfeuerbetriebs (Abb. 1) zeigt drei Personen beim Betrieb eines Schmelzfeuers, dessen Belüftungssystem aus vier Blasbälgen besteht, die von zwei Personen betrieben werden. Eine dritte Person beaufsichtigt den eigentlichen Schmelzprozess. Zum Ausschmieden des Scheibenrohlings werden in unserem Fertigungsmodell zwei Personen benötigt. Diese müssen aufeinander eingespielt sein und über gute Material-

Produktionsmittel	Material	Bedarf (ca.)	Ressourcenverfügbarkeit	Beschaffung
Ofen	Lehm, Magerung	150 dm <sup>3</sup>	geringe lokale Abhängigkeit	unproblematisch
Gussform	Stein	18 dm <sup>3</sup>	lokale Abhängigkeit	logistisch aufwendig
	Lehm, Magerung	18 dm <sup>3</sup>	geringe lokale Abhängigkeit	unproblematisch
Tiegel	Lehm/Ton, Magerung	2 dm <sup>3</sup>	geringe lokale Abhängigkeit	unproblematisch
Zangen	Holz	gering	allgemein zugänglich	unproblematisch
	Rohhaut	gering	allgemein zugänglich	unproblematisch
Befuerung	Holzkohle	30 kg	allgemein zugänglich	unproblematisch
Amboss	Stein	15–20 kg	geringe lokale Abhängigkeit	unproblematisch
Gusspeise	Bronze: Kupfer, Zinn	4 kg	lokale Abhängigkeit	logistisch aufwendig
Auflage	Gold	0,2 kg	lokale Abhängigkeit	logistisch aufwendig

Tab. 1 Geschätzter Organisationsaufwand bei ausgewählten Rohmaterialien für die Herstellung einer Himmelscheibe.

Prozess	Material	Tätigkeit	Personenarbeitszeit (gesamt)
Bau eines Ofens	Lehm, Magerung 35,0 kg	Aufbereiten des Lehm-Magerungsgemisches, Aufbau des Ofens	4 h
Herstellung der Funktionsfähigkeit des Ofens		Verbinden des Belüftungssystems mit dem Ofen	0,5 h
Bau der Guss- form	Stein 4,5 kg Lehm, Magerung 3,0 kg	Spalten, Glätten und Ausarbeiten der Gussform Aufbereiten des Lehm-Magerungsgemisches, Aufbau der Gussform	5 h / 3 h
Bau des Tiegels	Lehm, Magerung ca. 3,5 kg	Aufbereiten des Lehm-Magerungsgemisches, Aufbau des Tiegels, Brennen des Tiegels	2 h (Brennen nicht eingerechnet)
Bau der Zange	Holz, Rohhaut	Spalten eines Rohlings, Schneiden eines Riemens, Verknoten	1 h
<b>Total</b>			<b>12,5 h / 10,5 h</b>

Tab. 2 Arbeitsaufwand bei gussvorbereitenden Tätigkeiten der Scheibenherstellung (ohne Anfertigung oder Vorbereitung von Bronzewerkzeugen).

kenntnisse verfügen, da sowohl das Führen des Scheibenrohlings auf dem Steinamboss als auch die Stärke der Schmiedeimpulse vom sich verändernden Zustand der Scheibe abhängen. Hier gilt es, die Härte an den Klang- und Federeigenschaften des Rohlings einzuschätzen und entsprechend zu reagieren.

Die bei der Tauschierplattierung und dem Durchlochen der Scheibe sehr schnell erfolgende Abnutzung der bronzenen Stichel, Punzen und Meißel erfordert entweder ein ununterbrochenes Nachschärfen der entsprechenden Werkzeuge oder ein phasenweises Instandsetzen eines abgearbeiteten Werkzeugsatzes, der mehrere Werkzeuge gleichen Typs beinhaltet haben dürfte. Im ersten Fall werden mindestens drei Personen benötigt: Eine fixiert den Scheibenrohling, eine bearbeitet ihn und die dritte schärft die abgearbeiteten Stücke nach. Im Fall eines phasenweisen Nachschärfens

würden, ebenso wie beim späteren Anbringen der Goldauflagen, zwei Personen ausreichen. Hierauf aufbauend gehen wir davon aus, dass mit dem eigentlichen Fertigungsprozess der Himmelscheibe etwa drei bis fünf Personen befasst waren. Nicht berücksichtigt werden hierbei vorbereitende Prozesse wie die Metallgewinnung (Verhüttung etc.) sowie die Herstellung der Goldauflagen.

Aufgrund von Befunden aus der späten Bronzezeit gehen die Autoren davon aus, dass der Werkzeugkasten eines spezialisierten Metallhandwerkers auch in der frühen Bronzezeit bestimmte Werkzeuge beinhaltete, die nicht extra für die hier dargestellten Produktionsvorgänge gefertigt werden mussten. Hierzu gehören z. B. Hämmer, Punzen, das Blasebalgsystem u. Ä. Daneben mussten aber sicherlich auch Produktionsmittel zusätzlich gefertigt bzw. zusätzlich organisiert werden (Tab. 1).

Prozess	Tätigkeit	Personenarbeitszeit (gesamt)
Vorheizen des Ofens	Auffüllen mit Holzkohle, Anfeuern	Zeitbedarf 1 h (keine reine Arbeitszeit)
Vorbereiten der Steinform	Präparieren der Form: Zusammen- setzen, Vorwärmen	1 h
Hochfahren des Tiegels mit Gusspeise	Belüftung des Ofens (umgesetzt auf prähistorisches System) durch 4 Pers., zusätzl. 1 Pers. für die Tiegelbetreuung	1 h x 5 Pers. = 5 h
Guss der Scheibe	Entnahme des Tiegels und Guss durch 2 Pers.	< 1 min
Auspacken der Form	Öffnen der Form, Entnahme des Gussstücks	5 min
<b>Total</b>		<b>7 h</b>

Tab. 3 Arbeitsaufwand beim Guss des Scheibenrohrlings (Gusspeise: ca. 2,5 kg).

Nicht sicher zu beurteilen ist der Aufwand für die Anfertigung zusätzlicher Produktionsmittel und die Organisation bestimmter Rohstoffe (Tab. 1); die Autoren können diesen Aufwand nur auf der Basis ihrer individuellen Situation, z. B. ihrer geographischen Lebensmittelpunkte (Südwestdeutschland/Alpenraum) und ihrer Netzwerke, abschätzen. In unserem Modell müssen diverse Hölzer z. B. für Gusstiegeldeckel, Holzkohlen für die Befuerung des Ofens sowie Feuerholz für das Ausglühen des Scheibenrohrlings organisiert werden. Diese Materialien dürften auch in der Bronzezeit allgemein zugänglich und somit unproblematisch zu beschaffen gewesen sein. Lehm und Magerungsmittel werden für den Aufbau des Schmelzofens, der Gussform und der Tiegel benötigt. Ihre Lagerstätten sind nicht allgemein zugänglich bzw. geeignete Materialien sind nicht generell und gleichmäßig verteilt. Hier besteht, ebenso wie im Fall des Steinambosses, eine geringe lokale Abhängigkeit. Die Autoren gehen davon aus, dass der zur Fertigung der Himmelscheibe gewählte Standort dieses berücksichtigte und dass in der Bronzezeit wenig »wertvolle« Rohmaterialien (wie Gestein für den Amboss oder Lehm für den Ofen) nicht in großen Massen und großen Volumen unzweckmäßig über weite Strecken transportiert wurden. Logistisch aufwändig dürfte die Versorgung mit den Metallen und mit geeignetem Rohmaterial für steinerne Gussformen gewesen sein. Die Lagerstätten dieser Rohmaterialien sind geographisch begrenzt und ihre Förderungs- bzw. Verhüttungsvorgängen aufwendig.

Zu den gussvorbereitenden Tätigkeiten zählen die Autoren den Bau von Ofen, Gussform, Tiegel und Holzspanne (Tab. 2). Für den Bronzeschmelzofen ein Lehm-Magerungsmittel-Gemisch mit der benötigten Masse von ca. 35 kg aufzubereiten, beansprucht etwa drei Personenarbeitsstunden. Hierauf folgt das Aufbauen des Ofens, was ca. eine Personenarbeitsstunde in Anspruch nimmt. Das Spalten, Planschleifen der Innenseite und einseitige Ausarbeiten des Formennegativs des Scheibenrohrlings erfordern unter ausschließlicher Verwendung natürlicher Hilfsmittel (z. B. Feuerstein) und bronzener Werkzeuge etwa fünf Personenarbeitsstunden, unabhängig davon, ob es sich um Sandstein- oder Specksteinformen handelt. Etwa drei Personenarbeitsstunden dau-

ert es, aus einem Lehm-Magerungsmittel-Gemisch eine entsprechende Form für einen Guss in einer verlorenen Form anzulegen, worin der Arbeitsaufwand für das Trocknen und Brennen dieser Form nicht enthalten ist. Für das Aufbauen eines Gusstiegels inklusive Materialvorbereitung und Ausformen des Tiegels sind etwa zwei Personenarbeitsstunden zu veranschlagen. Der Bau einer Holzspanne zur Handhabung des Gusstiegels erfordert etwa eine Personenarbeitsstunde. Insgesamt benötigen somit die gussvorbereitenden Tätigkeiten unter Verwendung einer steinernen Gussform etwa 12,5 Personenarbeitsstunden und beim Guss in der verlorenen Form etwa 10,5 Personenarbeitsstunden.

Zum Vorheizen des Ofens ist ein Zeitaufwand von ca. einer Stunde notwendig (Tab. 3). Der Ofen wird hierbei vor dem eigentlichen Hochfahren der Temperatur noch einmal durchgetrocknet; es entsteht ein gleichmäßig durchgeglühtes Holzkohlebett. Der darin eingebettete Schmelztiegel mit dem noch kalten Rohmaterial erreicht langsam eine Ausgangstemperatur von 600–700°C. Abgesehen vom Auffüllen mit Holzkohle und deren Anfeuerung ist für diesen Vorgang kein weiterer Arbeitsaufwand nötig. Parallel hierzu wird die Gussform vorbereitet, d. h. sie wird vorgewärmt, ihre innere Oberfläche mit Holzkohle bestäubt, die zwei Formhälften werden zusammengesetzt und am Boden in einem Sandbett fixiert. Gleichzeitig erfolgt das Hochfahren des Gussofens, bis die Gusspeise eine Temperatur von etwa 1200°C erreicht hat. Hierbei steckt die wesentliche Arbeitsleistung in der Belüftung des Schmelzofens. Für diese werden bei einem prähistorischen System vier sehr gut aufeinander eingespielte Personen benötigt, die die gewünschte Gusstemperatur nach etwa einer Stunde zustande bringen. Eine fünfte Person betreut den Tiegel, bis dieser aus der Glut genommen werden kann und die flüssige Gusspeise in die Form gegossen wird. Für diesen sehr schnell ablaufenden Produktionsschritt sind zwei Personen nötig. Insgesamt sind somit für die eigentliche Gussthroughführung etwa sieben Personenarbeitsstunden zu veranschlagen.

Die folgende Überarbeitung, das flächige Ausschmieden (Tab. 4), führen zwei Personen durch; für das Ausschmieden werden bei 60–70 Schmiedezyklen insgesamt bis zu 50 Per-



Prozess	Tätigkeit	Personenarbeitszeit (gesamt)	
Ausschmieden	60–70 Schmiedezyklen à 2 Pers.	50 h	
Ausglühen	Durchglühen der Scheibe mind. 60–70-mal während es Schmiedeprozesses	Zeitbedarf 40–60 min pro Arbeitszyklus (keine Arbeitszeit)	
Tauschierplattierung	Einschneiden, Unterschneiden und Kantebrechen der Motivkonturen mit 2 Pers.: 6–7 Arbeitsvorgänge, Gesamtzeitbedarf pro cm ca. 6,5 min, in Phase I ca. 167 cm, in Phase II ca. 134 cm	Phase I 36,2 h Anbringen der Sterne und der beiden großen Applikationen	Phase II 29 h Versetzen der Sterne; Anbringen der Horizontbögen und der Sonnenbarke
	Anbringen der Motive mit 2–3 Pers.: Einklemmen etc.	48,7 h	39 h
	Verzierung der Sonnenbarke		6,5 h
Werkzeugnachbearbeitung	Abstumpfen der Werkzeuge nach etwa 2–4 cm, benötigter Zeitaufwand zum Nachschärfen pro Stichel 5 min, 223-mal nachschleifen	18,6 h	15 h
	Schleifen der restlichen Meißel und Punzen durch 1 Pers.	3 h	4,5 h
Randdurchlochung	Durchlochen des Randbereichs ca. 3 min pro Loch, Schleifen der Punze nach 3 Löchern, bei 39 Löchern 13 Nachschärfvorgänge mit einem Zeitaufwand von ca. 4 min pro Schleifvorgang		3 h
<b>Total</b>		<b>156,5 h in Phase I</b>	<b>97 h in Phase II</b>

Tab. 4 Arbeitsaufwand beim Ausschmieden, bei der Tauschierplattierung und bei der Durchlochung der Scheibe.

sonenarbeitsstunden benötigt. Das jeweils zwischengeschaltete Ausglühen des Scheibenrohrlings erfordert keinen großen zusätzlichen Arbeitsaufwand. Ursprünglich waren auf der Himmelscheibe (Phase I) 34 Goldbleche angebracht, deren Konturen eine Gesamtstrecke von etwa 167 cm aufwiesen. Beim Einschneiden, Unterschneiden und Kantebrechen dieser Konturlinien muss der jeweilige Arbeitsschritt unterschiedlich oft wiederholt werden, wobei ein Großteil der Arbeitsleistung auf das Unterschneiden der Konturlinien entfällt. Bei einer Gesamtkontur von 167 cm sind insgesamt etwa sechs bis sieben Wiederholungen der genannten Arbeitsprozesse notwendig. Der Zeitbedarf beläuft sich im Mittel hierbei auf ca. 6,5 Minuten pro Zentimeter Konturlinie. Da eine Person zum Fixieren der Scheibe und eine Person zum Ausführen der gestaltenden Tätigkeiten notwendig sind, ergibt sich hieraus ein zeitlicher Arbeitsaufwand von etwa 36,2 Personenarbeitsstunden für das Vorbereiten der Konturlinien. Durch das Abstumpfen der schneidenden Werkzeuge wird je nach Arbeitsschritt bereits nach etwa 2–4 cm bearbeiteter Konturlinie ein Nachschärfen dieser Stücke erforderlich, das etwa fünf Minuten beansprucht. Bei einer Gesamtlänge der Konturen von etwa 167 cm und ca. vier Arbeitswiederholungen der schneidenden Vorgänge ergibt sich hieraus ein Zeitaufwand von 21,6 Personenarbeitsstunden für das Instandsetzen dieser Werkzeuge inklusive aller sonst noch benutzten Werkzeuge. Für das folgende, wiederum von zwei, teilweise aber auch von drei Personen ausgeführte Einklemmen der Goldmotive

werden (4,5 Minuten zu dritt und zwei Minuten zu zweit) 6,5 Minuten pro Zentimeter Konturlinie benötigt. Somit werden bei unserem Fertigungsmodell etwa 48,7 Personenarbeitsstunden für den Einlegevorgang aufgewendet.

Die Scheibe war, gemäß unserem Fertigungsmodell, somit in ihrer ersten Ausbauphase nach etwa 160 Personenarbeitsstunden fertiggestellt. Alle weiteren späteren Veränderungsmaßnahmen erfolgten bis auf das Durchlochen des Randbereichs mit denselben Arbeitsschritten. Der oben dargestellte Durchlochungsvorgang aus der finalen Nutzungsphase der Himmelscheibe würde infolge des schnellen Abstumpfens der Durchschläge nach etwa zwei bis vier Durchlochungen bei 39 Löchern des Randbereichs 13 Nachschärfvorgänge von bis zu vier Minuten Arbeitsdauer benötigen (Tab. 4). Zusammen mit einem Zeitaufwand von etwa zwei Stunden für das eigentliche Lochen ergibt sich insgesamt somit ein Zeitaufwand von etwa drei Personenarbeitsstunden für diesen späten Abschnitt des Fertigungsprozesses.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass nach Ansicht der Autoren eine allerletzte Überarbeitung des linken Randbereichs möglicherweise zur Optimierung des runden Umrisses nach dem Anbringen der randlichen Durchlochungen stattfand. Hierbei wurden diese z. T. angeschnitten (Meller 2004a, 25 Aufsicht linker Scheibenrand) und die linke äußere Konturlinie des linken Horizontbogens wurde teilweise geschwächt und dadurch geöffnet. Dies könnte zur Folge gehabt haben, dass sich dieser Bogen schon im späteren Verlauf der Nutzung der Scheibe löste.

## Resümee

Wir zollen unseren prähistorischen Vorbildern Respekt für ihre Arbeit, an deren Fertigungsprozesse wir uns in Versuchsreihen nur annähern konnten. Die von uns begleitend zur Ausstellung »Der geschmiedete Himmel« für das Landesmuseum Halle gefertigten Himmelsscheiben-Repliken tragen weitgehend bis ins Detail die gleichen makroskopischen

Arbeitsspuren wie das Original. Man muss sich jedoch gegenwärtigen, dass wir hier nur Aspekte eines Fertigungsmodells vorgestellt haben. Die sogenannte »experimentelle Archäologie« kann in der Regel unsere Vergangenheit nicht wieder vollständig erlebbar machen. Sie kann aber annähernde Möglichkeiten aufzeigen.

## Literaturverzeichnis

- Bertemes 2004**  
F. Bertemes, Frühe Metallurgen in der Spätkupfer- und Frühbronzezeit. In: Meller 2004, 144–149.
- Bočkarjev/Leskov 1980**  
V. S. Bočkarjev/A. M. Leskov, Jung- und spätbronzezeitliche Gußformen im nördlichen Schwarzmeergebiet. Prähistorische Bronzefunde XIX 1 (München 1980).
- Born/Hansen 2001**  
H. Born/S. Hansen, Helme und Waffen Alteuropas. Sammlung Alex Guttmann 9 (Mainz 2001).
- Büll 1959**  
R. Büll, Vom Wachs. Höchster Beiträge zur Kenntnis der Wachse. Bronze und Feinguß nach dem Wachsaußschmelzverfahren 1,3 (Frankfurt/M. 1959).
- Deutsches Kupferinstitut 2004**  
Deutsches Kupferinstitut (Hrsg.), Kupfer-Zinn-Knetlegierungen. Informationsdruck 15 (Düsseldorf 2004).
- Dies 1967**  
K. Dies, Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik (Berlin 1967).
- Drescher 1957**  
H. Drescher, Zur Verwendung von Bronze Werkzeugen in der älteren Bronzezeit. Hammaburg 5, 1957, 23–29.
- Drescher 1962**  
H. Drescher, Bronzezeitliche Gießer im östlichen Mitteleuropa. Ergebnis einer Studienreise in die Tschechoslowakei. Gießerei. Zeitschrift für das gesamte Gießereiwesen 49,25, 1962, 817–822.
- Drescher 1973**  
H. Drescher, Der Guß von Kleingerät, dargestellt an Funden aus provinzialrömischen Werkstätten. Early Medieval Studies 6. Antikvariskt Arkiv 53, 1973, 48–62.
- Fasnacht 1991**  
W. Fasnacht, Der prähistorische Bronzeguss im Experiment. Minaria Helvetica 11, 1991, 3–12.
- Furger/Müller 1991**  
A. Furger/F. Müller, L'or des Helvètes: trésors celtiques en Suisse. Catalogue d'exposition du 16 février au 12 mai 1991, Zurich, Musée national suisse, du 22 janvier au 15 mars 1992, Genève, Musée d'art et d'histoire (Zürich 1991).
- Giese u. a. 2002**  
E. Giese/K. Schwämmle/F. Trommer, Bronzeguss. Eine Versuchsreihe zur Technik des prähistorischen Bronzegusses unter dem besonderen Aspekt des Formenmaterials. Experimentelle Archäologie in Europa, Bilanz 2002 (Oldenburg 2002) 93–106.
- Goldmann 1981**  
K. Goldmann, Guß in verlorener Sandform – Das Hauptverfahren alteuropäischer Bronzegießer? Archäologisches Korrespondenzblatt 11, 1981, 109–116.
- Heilmann/Schunke 2004**  
H. Heilmann/T. Schunke, Metall in Form – Neue Funde zur bronzezeitlichen Metallverarbeitung aus Mitteldeutschland. In: Meller 2004, 110–113.
- Holdermann/Trommer in Vorbereitung**  
C.-S. Holdermann/F. Trommer, Zum bronzezeitlichen Metallhandwerk. Aspekte der Verfahrenstechnik unter besonderer Berücksichtigung des Ofenbaus, des Formenmaterials und der Gussdurchführung (in Vorbereitung).
- Jockenhövel 1986**  
A. Jockenhövel, Bemerkungen zur Frage der Metallverarbeitung in der »Wasserburg« Buchau. Germania 64, 1986, 565–572.
- Jockenhövel 1994**  
A. Jockenhövel, Arbeiten an Ofen und Tiegel – Frühe Metallurgen und Künstler. In: A. Jockenhövel/W. Kubach (Hrsg.), Bronzezeit in Deutschland (Stuttgart 1994) 36–40.
- Leineweber/Wunderlich 2002**  
R. Leineweber/Ch.-H. Wunderlich, Heiße Luft. In: H. Meller (Hrsg.), Schönheit Macht und Tod. 120 Funde aus 120 Jahren Landesmuseum für Vorgeschichte Halle. Begleitband zur Sonderausstellung vom 11. Dezember 2001 bis 28. April 2002 im Landesmuseum für Vorgeschichte Halle. Landesamt für Archäologie/Landesmuseum für Vorgeschichte Sachsen-Anhalt (Halle/Saale 2001) 200–201.
- Meller 2004**  
H. Meller (Hrsg.), Der geschmiedete Himmel. Die weite Welt im Herzen Europas vor 3600 Jahren. Begleitband zur Sonderausstellung, Landesmuseum für Vorgeschichte Halle (Saale) 15. Oktober 2004–24. April 2005, Dänisches Nationalmuseum Kopenhagen 1. Juli 2005–22. Oktober 2005, Reiss-Engelhorn-Museen Mannheim 4. März 2006–9. Juli 2006 (Stuttgart 2004).
- Meller 2004a**  
H. Meller, Die Himmelsscheibe von Nebra. In: Meller 2004, 22–31.
- Mohen 1988**  
J. P. Mohen, La Métallurgie. In: L'Association Abbaye de Daoulas (Hrsg.), Avant les celtes: l'Europe à l'âge du bronze, 2500–800 avant J.-C. Abbaye de Daoulas, Musée départemental breton, 14 mai–31 août 1988 (Brest 1988) 30–37.
- Ohlhaver 1939**  
H. Ohlhaver, Der Germanische Schmied und seine Werkzeuge. Hamburger Schriften zur Vorgeschichte und Germanischen Frühgeschichte 2 (Leipzig 1939).
- Paret 1952–1954**  
O. Paret, Der große Fund von Bronzeußformen der Spätbronzezeit von Neckargartach (Gem. Heilbronn). Fundberichte aus Schwaben N. F. 13, 1952–1954, 35–39.
- Probst 1996**  
E. Probst, Deutschland in der Bronzezeit (München 1996).
- Resi 1979**  
H. G. Resi, Die Specksteinfunde aus Haithabu (Neumünster 1979).
- Rieser/Schrattenthaler 2002**  
B. Rieser/H.-P. Schrattenthaler, Prähistorischer Bergbau im Raum Schwarz-Brixlegg. Urgeschichtliche Bergbauspuren, Werkzeugfunde, Experimente, Mineralien (Brixlegg 2002).
- Roden 1988**  
Ch. Roden, Blasrohrdüsen. Der Anschnitt 40, 1988, 62–82.
- Schlichtherle/Rottländer 1982**  
H. Schlichtherle/R. Rottländer, Gußiegel der Pfyn Kultur in Südwestdeutschland. Fundberichte aus Baden-Württemberg 7, 1982, 59–71.
- Schumann 1989**  
H. Schumann, Metallographie (Leipzig 1989).
- Sölder 2005**  
W. Sölder, Bronzezeit (ca. 2200–800 v. Chr.). In: A. Höck/W. Sölder/E. Walde, Spurensuche<sup>3</sup>: Ausstellungstrilogie 2005/2006/2007 Teil 1. Vom Schnabelmenschen zur Zwergengstadt. Ausstellung des Museums der Stadt Lienz Schloss Bruck in Zusammenarbeit mit dem Tiroler Landesmuseum Ferdinandeum; 11. Juni bis 26. Oktober 2005 (Innsbruck, Wien, Bozen 2005) 17–25.
- Sonnenschein 1985**  
F. H. Sonnenschein, Technikgeschichte des Schmiedens. Ein kurzer Abriss. Technische Kulturdenkmale 14, 1985, 12–17.
- Strahm 1972**  
Ch. Strahm, Das Beil von Thun-Renzenbühl. Helvetia Archaeologica 3, 1972, 99–112.
- Velten 1941**  
A. Velten, Formerei und Gießerei 1 (Leipzig 1941).
- Waldhauser 1986**  
J. Waldhauser, Kupfergewinnung und -verhüttung in Böhmen und Mähren während der Späthallstatt- und Latènezeit (Forschungsstand). In: B. Gramsch (Hrsg.), Siedlung, Wirtschaft und Gesellschaft während der jüngeren Bronze- und Hallstattzeit in Mitteleuropa. Internationales Symposium Potsdam, 25.–29. April 1983, Bericht. Veröffentlichungen des Museums für Ur- und Frühgeschichte Potsdam 20 (Potsdam 1986) 197–212.
- Weisgerber 1993**  
G. Weisgerber, Quarzit, Feuerstein, Hornstein, Jaspis, Ocker – mineralische Rohstoffe der Steinzeit. In: H. Steuer/U. Zimmermann (Hrsg.), Alter Bergbau in Deutschland. Archäologie in Deutschland, Sonderheft 1993 (Stuttgart 1993) 24–34.
- Wiegmann 1997**  
U. Wiegmann, Crévic, Dép. Meurthe-et-Moselle, Lothringen, Frankreich. In: A. Hänsel/B. Hänsel, Gaben an die Götter. Schätze der Bronzezeit Europas. Bestandskatalog 4. Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer

Kulturbesitz und Freie Universität, Seminar  
für Ur- und Frühgeschichte (Berlin 1997)  
121–123.

**Wunderlich 2004**

Ch.-H. Wunderlich, Vom Bronzebarren zum  
Exponat – Technische Anmerkungen zu den  
Funden von Nebra. In: Meller 2004, 38–43.

## Abbildungsnachweis

- |     |   |   |   |          |                                |
|-----|---|---|---|----------|--------------------------------|
| 1   | nach Sonnenschein 1985, Abb.<br>S. 12, mit Veränderungen der<br>Verfasser | 6 | a Schumann 1989, 5129 Abb. 882;<br>b Deutsches Kupferinstitut 2004,<br>11 Abb. 10 | 8        | J. Lipták, Köln                |
| 2–5 | Verfasser   | 7 | Verfasser   | 9–10     | Verfasser                      |
|     |   |   |   | 11       | a J. Lipták, Köln; b Verfasser |
|     |   |   |   | 12–17    | Verfasser                      |
|     |   |   |   | Tab. 1–4 | Verfasser                      |

## Anschriften

Claus-Stephan Holdermann M. A.  
Universität Innsbruck  
Institut für Archäologien  
Langer Weg 11  
6020 Innsbruck  
Österreich  
c.s.holdermann@gmx.at

Frank Trommer  
Staatl. gepr. Denkmalpfleger  
Ulmer Str. 43  
D-89143 Blaubeuren  
franktrommer@aol.com