

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/299757512>

Theophilus und der Guss einer Bienenkorbglocke. Ein Experiment

Article · January 2016

CITATIONS

0

READS

12

1 author:



Bastian Asmus

University of Freiburg

7 PUBLICATIONS **5** CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Theophilus und der Guss einer Bienenkorbglocke. Ein Experiment

Einleitung¹

Gegossene Glocken sind schon lange vor dem Christentum in Gebrauch gewesen. Sie sind der Menschheit seit Jahrtausenden bekannt. Die ältesten gegossenen Metallglöckchen dürften aus der Vorhangzeit in China um 1900 BC stammen, ab der Shang Dynastie waren Glocken dort regelmäßig anzutreffen.² Bei den Römern spielten die Glocken im Alltagsleben eine große Rolle. Den Legionären regelten sie das Lagerleben, der zivilen Bevölkerung dienten sie als Signal für Markt- oder Badezeiten, sie waren Warnsignale, etwa bei Feuer, oder Mittel zum Herbeirufen von Bediensteten.³ Wann die Glocken Eingang in den christliche Liturgie fand, ist nicht genau festzulegen. Es ist jedoch anzuneh-

men, dass die rituelle Verwendung der Glocken aus vorchristlichen Religionen des Mittelmeerraumes übernommen wurde.⁴ Die vermutlich älteste erhaltene Kirchenglocke ist die Glocke von Canino bei Viterbo in Oberitalien und stammt aus dem 8./9. nachchristlichen Jahrhundert. Theophilus Presbyter hinterließ sehr genaue Aufzeichnungen zur Herstellung von Kirchenglocken im 85. Kapitel der *schedula diversarum artium*.⁵

Die frühen Kirchenglocken werden als Bienenkorbglocken angesprochen, da deren Form an einen Bienenkorb erinnert. Die Glocken, die Theophilus beschreibt, unterscheiden sich von modernen Glocken in mehreren Punkten: Zum einen weist die Glockenrippe keine großen Wandstärkenunterschiede auf und verfügt nur über einen verhältnismäßig schwach ausgeprägten Schlagring. Diese gleichmäßige Wandstärke führt zu dem für Bienenkorbglocken typischen, herben oder rauen Klangbild, in dem dissonante Teiltöne hervortreten.⁶ Zum anderen unterscheiden sie sich in der Herstellungsweise. Eine moderne Glocke wird im Lehmhemdverfahren, einem Formverfahren mit zweiteiliger Form, gegossen. Dabei besteht das Glockenmodell oder die falsche Glocke aus Ton. Zur Zeit des Theophilus und früher bestand das Modell entweder aus Wachs oder aus Talg, und die Form war aus einem Stück. Das Modell musste ausgeschmolzen werden.

Theophilus Presbyter war ein Benediktinermönch, der gegen Ende des 11. und Beginn des 12. Jahrhunderts die Aufzeichnungen verfasste, die heute als *Schedula diversarum artium* bekannt sind. Ob es sich bei Theophilus Presbyter nun tatsächlich um den berühmten Goldschmied Roger von Helmarshausen handelt, wie es Freise vorgeschlagen hatte, wird nach neueren Erkenntnissen wieder diskutiert.⁷ Unabhängig von der Autorenschaft der *Schedula* ist es unbestreitbar, dass die Anweisungen von einem oder mehreren sehr erfahrenen, praktizierenden Handwerkern verfasst wurden. Selbst für kontrovers diskutierte Kapitel wie das zur Kupferverhüttung konnte gezeigt werden, dass die Verständnisschwierigkeiten, eher auf Seiten der Bearbeiter als auf der Seite des Autors lagen.⁸

Theophilus and the casting of an early church bell: an experiment

The author Theophilus Presbyter has left us a very comprehensive manuscript which documents the state of the art in the 12th century. It covers painting, the manufacture of glass, goldsmiths' work, forging, organ building and casting. He also describes the tools needed and how they should be manufactured.

*One chapter is dedicated to the casting of bells. It is the most comprehensive one in Theophilus' *schedula* and describes the process in great detail. This article gives an account of an attempt at bell casting which follows the rules from Theophilus Presbyter's chapter of the same name while also taking archaeological finds and findings about early bell casting into account.*

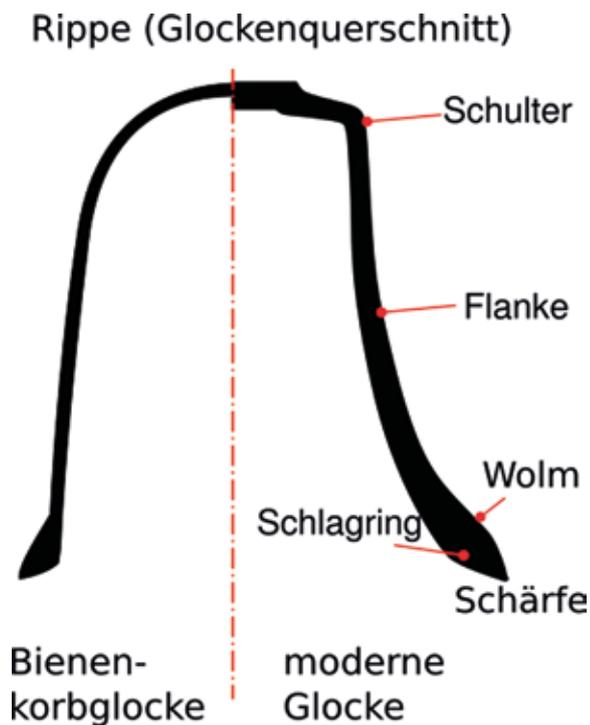


Abb. 1: Rippe einer Bienenkorbglocke im Vergleich zu einer modernen Glocke. Die gleichmäßige Wandung der Bienenkorbglocke ist für ihren typischen herben Klang verantwortlich.

Glockenguss als richtungsweisende Technologie?

Der Versuch verfolgt mehrere Ziele. Zum einen soll untersucht werden, wie genau Theophilus den Prozess beschreibt und an wen sich die *Schedula* richtete. Zum anderen gehören die Glocken im 8. Jahrhundert nicht nur zu den größten gegossenen Gegenständen, sondern auch zu den technisch aufwendigeren hohlen Gusserzeugnissen. Die Beherrschung dieser Technologie ermöglichte die Weiterentwicklung in zwei Richtungen: Erstens zum Guss monumentaler Objekte, da es notwendig wurde, größere Mengen Metall koordiniert zu verflüssigen und kontrolliert zu vergießen. Zweitens zum Guss hohler, d.h. vollplastischer Erzeugnisse wie beispielsweise dem Braunschweiger Löwen, was eine erhebliche gießtechnische Herausforderung darstellte. Einige technologische Schwierigkeiten mussten überwunden werden, um diese Gegenstände zu gießen. Es kann angenommen werden, dass die technologischen und logistischen Erfahrungen aus dem Glockenguss die Grundlagen für die monumentalen Güsse bildeten, die etwa ab dem 9. Jahrhundert in Mitteleuropa auftraten. Man denke hierbei an die Aachener Wolfstüren, die Gitter im selbigen Dom, im 11. Jahrhundert an die Christussäule oder die Bernwardstüren, um nur einige zu nennen.

Im Hinblick auf die Entwicklung der Technologie für den Guss monumentaler Werke wurde damit begonnen, einen ersten Versuch zu unternehmen, der sich mit dem Beginn dieser Entwicklung auseinandersetzt. Da die älteste erhaltene Kirchenglocke aus dem 8./9. Jahrhundert stammt, wurde zunächst der Prozess

für eine solche Glocke rekonstruiert und soll nun im Folgenden dargestellt werden. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf den Prozessen, die zur Herstellung des Modells und der Form dienen.

Warum ein Experiment zum Glockenguss?

Wir wissen, wie das Wachsauerschmelzverfahren funktioniert, wir wissen, wie man Glocken gießt, wir wissen, dass Theophilus Presbyter den Guss der Glocke sehr genau beschreibt, denn es ist sein umfangreichstes Kapitel. Wir wissen, wie eine Bienenkorbglocke klingt, denn es hängt noch eine aus dem 11. Jahrhundert in Bad Hersfeld. Auch wissen wir, wie eine Glocke aus dem 9. Jahrhundert klingt, denn Drescher veranlasste in den 1980er Jahren die Rekonstruktion der Glocke von Halthabu in einer Glockengießerei.⁹ Diese Rekonstruktion wurde mit Hilfe des Lehmhemdverfahrens durchgeführt und das Metall im Ofen der Glockengießerei geschmolzen. Beide Aspekte widersprechen jedoch der originalen, von Theophilus beschriebenen Technik.

In diesem Versuch geht es daher darum, die Glocke nach der Anweisung des Theophilus herzustellen. Nachdem ich in meiner Dissertation zeigen konnte,¹⁰ dass Theophilus sogar bei dem sehr kontrovers diskutierten Kapitel über die Kupferverhüttung erhebliche Sachkenntnis an den Tag legte, wollte ich prüfen, ob das auch für Glockengusskapitel gilt. Die Beschreibung ist vorzüglich und ausführlicher als die der Kupferverhüttung, dennoch waren in der praktischen Anwendung noch eine Menge Detailfragen zu klären.

Im Speziellen geht es um die Herstellung der Gussform und die Rekonstruktion des Formstoffs, der bisher zu wenig Beachtung in der Literatur fand. Auch Theophilus hält sich bei der Beschreibung des Formstoffs weitgehend zurück. Neben dem Formen der Glocke ging es auch darum, wie man die 44 kg Bronze geschmolzen hat und wie man den Guss in der Praxis bewältigte. Hierzu wurde der Ofen den Theophilus im 62. Kapitel beschrieb rekonstruiert und verwendet.

Der Versuch hat einen funktionierenden Prozess zum Ziel. Folgende Fragen erschienen besonders wichtig:

- Ist ein Glockenguss nach dem Verfahren des Theophilus möglich?
- Welche Vorkenntnisse sind notwendig bzw. an wen könnte sich die *Schedula* gerichtet haben?
- Sind die Rohmaterialien ausreichend beschrieben?
- Wie ist der Formstoff beschaffen?
- Wie stark muss die Form gebrannt werden?
- Was wird nicht beschrieben?
- Wie aufwendig ist das Verfahren?
- Wie ließ sich die verhältnismäßig große Metallmenge von 44 kg verarbeiten?

Für den vorliegenden Artikel galt es, mehrere Kapitel aus Theophilus Manuskript einem archäometallurgischen Feldversuch zu Grunde zu legen:

- 85. Kapitel, *de campanis fundendis*: Vom Glockenguss,
- 65. Kapitel, *de compositione vasorum*: Von den Schmelztiegeln,
- 64. Kapitel, *de fornace*: Vom Ofen,
- 61. Kapitel, *de thuribulo fusili*: Vom gegossenen Rauchfass,
- 22. Kapitel, *de vasculis liquefaciendum aurum et argentum*: Von den Tiegelchen zum Schmelzen von Gold und Silber.

Der Formstoff

Formstoffe müssen folgende Kriterien erfüllen, um gute Gussergebnisse zu erzielen:

1. Feuerfestigkeit,
2. Bildsamkeit, also die Fähigkeit, eine Oberfläche in hoher Qualität wiederzugeben,
3. Gasdurchlässigkeit,
4. Guter Zerfall des Formstoffs nach dem Guss, sodass der Rohguss ohne Beschädigung aus der Form entfernt werden kann.

Um diese vier Eigenschaften zu erzielen, kann Formlehm aus frischem Ton, gebranntem und zerkleinertem Ton, mineralischer Magerung wie z.B. Sand, Stroh, Pferde- bzw. Kuhmist oder anderen organischen Materialien wie beispielsweise Tierhaar hergestellt werden.¹¹ Hierbei kam es auf die Verfügbarkeit der einzelnen Rohmaterialien und die Erfahrung der jeweiligen Gießer an, welche Materialien zum Einsatz kamen. Damit ist eine große Variabilität in den verwendeten Formstoffen möglich. Ganz allgemein lässt sich sagen, dass die einzelnen Materialien in Binder und Magerung eingeteilt werden können, wobei es aber zumindest eines Binders und eines feuerfesten Bestandteiles bedurfte.

Binder

Bis mindestens in das 14. Jahrhundert kann davon ausgegangen werden, dass Tonminerale die Aufgabe des Binders übernommen haben. Spätestens im 16. Jahrhundert wurde mit einer Vielzahl von Mischungen gearbeitet.¹² Der frische Ton diene als feuerfester Binder, der stark zur Bildsamkeit der Mischung beiträgt. Fetter, also reiner Ton ist als Formstoff dennoch aufgrund der starken Schwindung von bis zu 22 Volumenprozent beim Trocknen völlig unzureichend.¹³ Fette Tone würden beim Trocknen also reißen, wenn sie einen festen Körper wie ein Wachsmodell umschließen. Um dem entgegenzuwirken, werden dem Ton Magerungsmittel zugegeben.

Magerung

Unterschieden wird in echte und unechte Magerung, je nachdem ob die Magerung mineralischer oder organischer Natur ist. Die echte Magerung muss folgende Eigenschaften aufweisen: Sie darf beim Trocknen nicht schwinden, beim Brennen nicht platzen und sollte den thermischen Belastungen beim Metallguss standhalten. Sehr häufig verwendete Magerungsmittel bestehen aus Quarzsand und zerkleinertem, gebranntem Ton von alten Scherben. Unechte Magerungen sind solche, die beim Brand des Formlehms verbrennen und auf diese Weise die Gasdurchlässigkeit des Formstoffs erhöhen, z.B. Stroh oder Tierhaare. Eine ebenso wichtige Eigenschaft ist die Verbesserung der Plastizität des grünen¹⁴ Formstoffs. Der hohe Faseranteil in organischer Magerung sorgt für faserverbundähnliche Eigenschaften des Formstoffes, d.h. er kann noch stärker gemagert werden und besitzt dennoch genügend plastische Eigenschaften, um als Formstoff zu dienen. Eine weitere Möglichkeit, die Gasdurchlässigkeit des Formstoffs zu beeinflussen, besteht in der Brenntemperatur. Eine sehr hohe Brenntemperatur des Formstoffs hat aufgrund der stärkeren Versinterung eine schlechtere Gasdurchlässigkeit zur Folge.

Formstoff in der Überlieferung

In seinem Glockengusskapitel gibt Theophilus keine genauen Anweisungen bezüglich der Zusammensetzung des Formlehms. Er spricht von kräftig geknetetem Ton: „argillam fortiter maceratam“.¹⁵ Dass Theophilus das Magern von Ton bekannt war, lässt sich aber in drei weiteren Kapiteln nachweisen, denn er schreibt in Kapitel 22, „De vasculis ad liquefaciendum aurum et argentum“ also dem Kapitel zur Herstellung der Gusstiegel für das Schmelzen von Gold und Silber: „[...] nimm weißen Ton und zerreihe ihn ganz fein und nimm alte Tiegel, in denen früher Gold und Silber geschmolzen wurde und zerkleinere sie gesondert. [...] nimm zwei Teile gemahlene Ton und als dritten Teil gebrannte Schmelzschalen und menge dies mit lauwarmen Wasser an, knete es kräftig, und forme daraus größere und kleinere Tiegelchen.“

In diesem Kapitel hören wir von geknetetem Ton, nachdem frischer Ton mit einem Drittel Magerung aus alten Schmelztiegeln versehen worden war. Diese Praxis der Tiegelherstellung war weit verbreitet und ließ sich beispielsweise an den Schmelztiegeln von Dinant vom 11. bis in das frühe 20. Jahrhundert nachweisen. Im Kapitel 61, „De thuribulo fusili“, vom gegossenen Rauchfass, das in vielen technischen Details dem des Glockengusses entspricht, wird ausdrücklich eine organische Magerung, nämlich Pferdemist, genannt:¹⁶ „Nimm mit Pferdemist gemengten und gut durchgekneteten Ton [...]“. Wieder wird gut durchgekneteter Ton mit etwas anderem, dieses Mal mit organischer Magerung, vermischt. Er nimmt gut durchgekneteten Ton und mischt ihn mit Pferdemist, und nicht weißen, grauen oder frischen Ton.

Im Kapitel 65, „De compositione Vasorum“, von den Schmelztiegeln, gibt Theophilus Anweisungen, um Schmelztiegel für größere Buntmetallmengen herzustellen:¹⁷ „Nimm Scherben von alten Tiegeln, in denen früher Kupfer oder Edelmessing¹⁸ geschmolzen worden ist und zerkleinere sie auf einem Stein sehr fein. Dann nimm solche Erde, aus der Töpfe gemacht werden, von der es zwei Arten gibt, die eine weiß, die andere grau. Von denen ist die weiße für (die Tiegel beim) Färben des Goldes, die andere zur Herstellung dieser (Messing) Tiegel. [...] Nimm irgendein Gefäß und fülle es zweimal mit der rohen Erde und dreimal mit der gebrannten, sodass es zwei Teile von der rohen und drei von der gebrannten sind, und fülle sie in ein großes Gefäß, gieße lauwarmes Wasser darüber und knete die Masse mit Hämmern und mit den Händen kräftig durch, bis es in sich ganz zäh ist.“

Hier wird ein Mischungsverhältnis von 2:3 frischem Ton zu Magerung angegeben, um Tontiegel für den Buntmetallguss herzustellen. Bei diesem Verhältnis von Bindeton befindet man sich bereits in einem Bereich, der gerade noch als plastisch genug betrachtet werden kann, um daraus etwas zu formen. Wenn Theophilus von Ton als Rohmaterial spricht, spricht er von frischem, weißem, oder grauem Ton bzw. Erde. Wenn er von Formlehm spricht, nutzt er die Bezeichnung von gut oder kräftig durchgeknetetem Ton (argillam macerata). In den drei obigen Textstellen ist das Magern mit gebranntem Ton für feuerfeste Materialien wie Tiegel und das Magern mit organischen Materialien wie Pferdemist für Gussformen erläutert. Obwohl sich kein strenger Nachweis führen lässt, so erscheint es doch durchaus plausibel, dass Theophilus im Glockengusskapitel nicht frischen Ton, sondern speziell angemischten Formlehm meint, wenn er dort von „argillam maceratam“ spricht.

An Grabungsfunden von Glockengussformfragmenten kann untersucht werden, inwieweit die Theophilus-Beschreibung des

Glockengusses mit den Befunden zum Glockenguss übereinstimmen. Theoretische Überlegungen wurden bereits von Drescher angestellt,¹⁹ in diesem Artikel soll es aber um die praktische Umsetzbarkeit gehen. Von zentraler Bedeutung ist der Formstoff, und so folgen hier auszugsweise einige Beschreibungen des Formstoffes verschiedener Glockengussformfragmente des 10. bis zum 14. Jahrhundert.

Bayley und Kollegen²⁰ beschreiben die Zusammensetzung des Formlehm der Glocke von St. Oswald aus dem 10. Jahrhundert als „very sandy clay, poorly fired and very friable“, also als sehr sandigen, niedrig gebrannten und kaum- oder nichtbindigen Formlehm. Das muss als sehr stark gemagerter Lehm interpretiert werden. Solcher Formlehm ist auch aus anderen Gießereikontexten wie beispielsweise in Dinant bekannt.²¹ Leider wurden an den Glockengussformfragmenten aus St. Oswald keine Untersuchungen zur genauen Formstoffzusammensetzung unternommen, sodass ungeklärt bleiben muss, ob dieser Formstoff auch mit organischen Materialien gemagert war, so wie es der Fall der belgischen Funde aus Dinant belegt ist.

Drescher beschreibt den Formlehm der Glocken aus Mainz als organisch gemagerten fest gebrannten Formlehm, der in vielen dünnen Schichten aufgetragen wurde, wobei die Schichten nach außen hin gröber werden.²² Die erste Schicht beschreibt er als ein besonders feines Material. Die in das 13. Jahrhundert datierte Glockengießerei vom Gelände der Elisabethkirche in Marburg lieferte eine große Anzahl an Formfragmenten, die laut der Bearbeiterin aus einem „feinen organisch gemagerten Lehm“ bestanden haben.²³ Für das späte 13. und frühe 14. Jahrhundert beschreiben Bayley und Richards den Formlehm als: „being manufactured from a fine clay with a vegetable filler“.²⁴

Für die bis dato publizierten Formlehmfragmente fehlen detailliertere Beschreibungen, die über eine grobe Ansprache als feiner organisch gemagerter Lehm hinausgehen. Naturwissenschaftliche Untersuchungen fehlen bisher in der Regel ganz. Es kann festgehalten werden, dass sich die Zusammensetzung des Formlehms unterscheidet: Während der Formlehm von St. Oswald als weich und schwach gebrannt beschrieben wird, gilt der Formlehm von Mainz als fest gebrannt. Der Formlehm von St. Oswald weist offenbar keine organische Magerung auf, während der Formlehm von Marburg und Mainz als organisch gemagerter Lehm klassifiziert wird. Die beiden letzteren unterscheiden sich wiederum in ihrem Aufbau in der von Theophilus beschriebenen Methode. Während die in Marburg²⁵ und Mainz²⁶ aus vielen dünnen Schichten bestehen, gibt Theophilus die Anweisung, den Formmantel in drei Schichten aufzutragen²⁷.

Der Formstoff im Versuch

Aus den oben genannten Überlegungen sowie aus eigenen Erfahrungswerten aus unzähligen Gussversuchen wurden folgende drei Formlehm-mischungen in diesem Versuch hergestellt: Eine für den Kern und den Formmantel, eine feine Mischung für die letzte Schicht des Kernes und eine Mischung für die erste Schicht, die auf das Wachsmodell aufgetragen wurde. Alle angegebenen Mischungsverhältnisse beziehen sich auf das Volumen; sie wurden mit einem Hohlmaß abgemessen.

Für den Kern wurde eine Mischung aus frischem, gesiebtem, fettem, weißem Westerwälder Ton, gemahlenem, gebranntem Ton, Kuhmist und Stroh hergestellt. Auf drei Teile gebranntem Ton kamen zwei Teile frischer Ton und ein Teil Kuhmist. Diese Mi-



Abb. 2: Fertig gemischter Formlehm für den Formmantel bzw. den Kern. Er besteht aus Ton, gebranntem und gemahlenem Tonscherben, Kuhmist und Stroh.

Abb. 3: Dieses Schema zeigt im oberen Bild ein Wachsmodell, das mit einer extra Tonschlickerschicht versehen wurde, um eine gute Oberflächenqualität oder Bildsamkeit zu erreichen. Das untere Bild nutzt die Eigenschaft des Tones, im Wasser zu quellen. Wenn das Wachsmodell angefeuchtet wird, erzeugt das auf das Wachs aufgetragene Wasser mit den Tonmineralen eine Suspension, die an die Grenzschicht zwischen Formlehm und Wachsmodell geschwemmt wird. Gute Bildsamkeit des Formstoffs kann auch durch das geschickte Ausnutzen physikalischer Eigenschaften des Formstoffs erreicht werden.

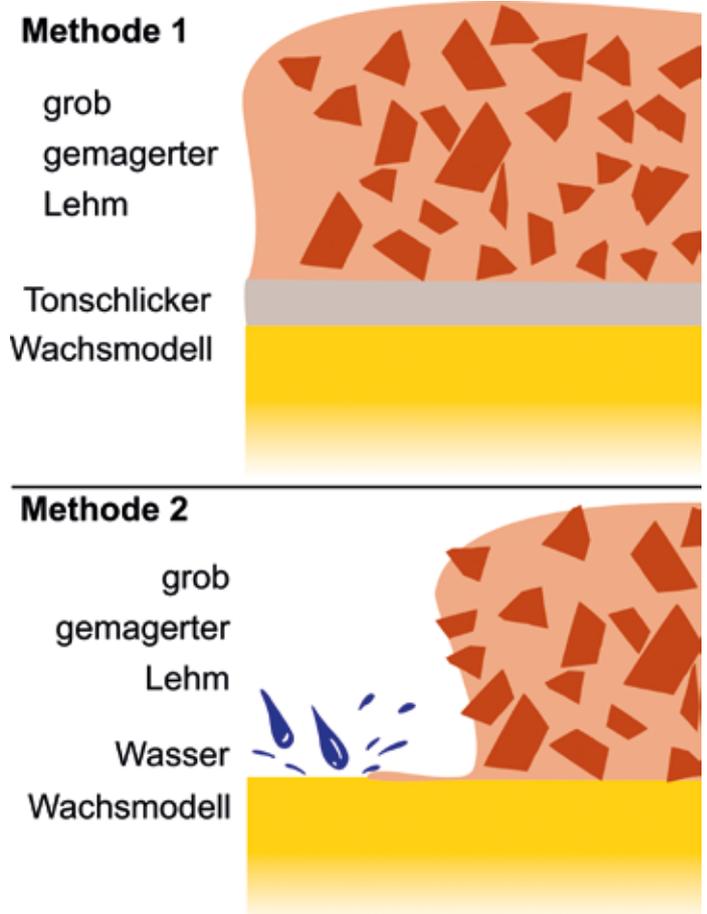




Abb. 4: Abbildung einer rekonstruierten Gussform für ein Aquamanile des 13. Jahrhunderts. Der Formlehm wurde nach Methode 2 aus Bild 3 aufgetragen. Die Abbildungsgenauigkeit ist sehr gut, obwohl der grob gemagerte Formlehm in nur einer Schicht aufgetragen wurde.

schung wurde mit Wasser versetzt und kräftig durchgeknetet. Während des Knetens wurde Stroh zugesetzt, so lange die Bindekraft des Lehm nicht nachließ.

Für die letzte Schicht des Gusskerns wurde eine Ton-Kuhmist-Mischung von 1:1 aufgetragen, um eine möglichst glatte Oberfläche, frei von Strohhalmen, zu erhalten und damit das anschließende Glätten leichter gelingt. Für die erste Schicht auf das Wachsmodell wurde eine Lehmschicht von je einem Teil Ton, Kuhmist und feinem Quarzsand angemischt. Die nachfolgenden Schichten entsprachen dem bereits für den Kern eingesetzten Formlehm. Während der Herstellung des Formlehms ist grundsätzlich auf dessen Eigenschaften zu achten und auch gegebenenfalls von starren Rezepten abzuweichen. Für Formlehm gilt allgemein, dass dieser eine noch gute Plastizität oder Bindigkeit besitzen soll, um das Abfließen von senkrechten Partien der Form zu vermeiden.

Das Auftragen einer feinen Ton- oder Lehmschicht wird in der Literatur immer wieder als zwingende Voraussetzung für eine gute Oberflächenabbildung genannt, ist so allerdings nicht richtig. Der Auftrag einer gesonderten feinen Tonschicht mag beim Erzielen einer guten Oberfläche einen Zeitvorteil bringen, wenn es sich etwa um große Gegenstände handelt. Bei kleineren Stücken ist es keinesfalls ein zwingender Arbeitsschritt, denn erstens muss diese Schicht unter Umständen extra getrocknet werden, und zweitens können zu dicke feine Tonschichten auch leicht wieder vom Wachsmodell abplatzen, während der zweite, stärkere Lehmauftrag erfolgt. Grob gemagerte Formlehm genügt, da in diesem auch alle Bestandteile vorhanden sind, um

eine gute Oberfläche zu erzielen. Für die Güte der Oberfläche ist nur der Tongehalt im Formstoff verantwortlich!

So lange gewährleistet ist, dass sich dieser Tonanteil bevorzugt an das Wachsmodell anlegen kann, steht einer guten Oberflächenwiedergabe nichts im Wege. Abbildung 3 gibt diesen Vorgang schematisch wieder. Der Ton kann durch kreisende Bewegungen ganz einfach an die Grenzschicht zwischen Formlehm und Wachsmodell transportiert werden, indem lokal mit einer kleinen Menge Wasser eine Schlämme aus dem Bindeton hergestellt wird. Dazu bringt man den Formlehm auf ein angefeuchtetes Wachsmodell auf. Es entsteht dort lokal eine Suspension aus Wasser und den feinsten Bestandteilen des Formlechmes, nämlich den Tonmineralen. Diese Schlämme legt sich an die Grenzschicht zwischen Wachs und Formlehm. Auf diese Weise lassen sich perfekt abgebildete Oberflächen erzeugen, ohne dass eine extra Schicht feinen Materials aufgetragen werden muss.

Der Versuch

Das Werkzeug

Im Glockengusskapitel beschreibt Theophilus zunächst die Herstellung der Drehlade, eines Werkzeugs mit horizontal gelagerter drehbarer Spindel.²⁸ In kleinerer Form ist das Werkzeug auch schon im Kapitel zum gegossenen Rauchfass beschrieben worden. Es ähnelt der Drechselbank, hat aber anstatt eines Wippantriebs lediglich eine Handkurbel, da die hohen Schnittgeschwindigkeiten einer Drechselbank nicht notwendig sind. Die Spindel, die einen viereckigen Querschnitt besitzt, ist der Länge nach konisch und endet in einem zylindrischen etwa 2 cm starken Schaft, der als Lager dient. Das andere Ende ist ebenfalls zylindrisch und dient als zweites Lager, an dem auch die Kurbel befestigt ist.

Abb. 5: Rekonstruktion einer Drehlade, wie sie Theophilus im Kapitel zum gegossenen Rauchfass beschreibt. Die Drehlade für Glocken arbeitet nach dem gleichen Prinzip.



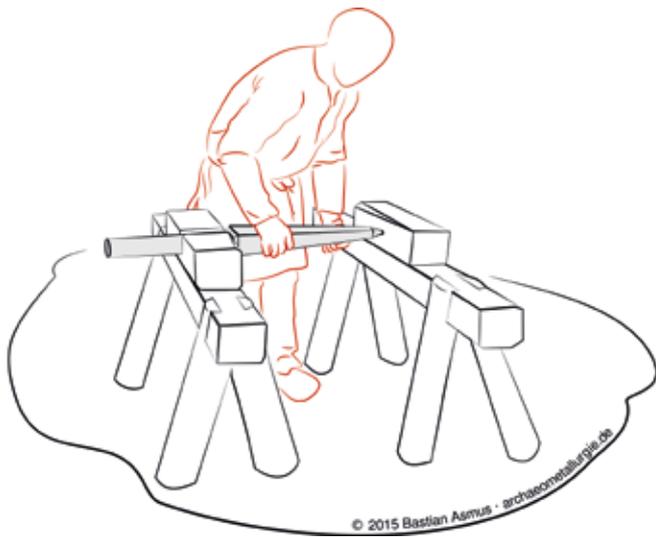


Abb. 6: Die Drehlade für das Glockenmodell aus Wachs. Grau: Die Spindel, die den Kern während des Aufbaus halten soll.



Abb. 7: Funktionsrekonstruktion einer Drehlade. Anstatt der Bohlenwände, die Theophilus vorschreibt, wurden zwei Böcke verwendet, um die Lager für die Spindel zu bilden. Hier zu sehen ist die Spindel samt Kern und Wachsmo-
dell.

Der Kern

Für den Kern, der den Hohlraum der späteren Glocke bilden soll, wird schichtweise Formlehm aufgetragen. Jede Schicht muss durchtrocknen, bevor eine neue Schicht aufgetragen werden kann. Dieser Schritt kann je nach Witterung und Temperatur mehrere Tage in Anspruch nehmen. Theophilus schreibt hierzu:²⁹ „Quo facto, sume ipsum lignum et circumpone ei argillam fortiter maceratam, inprimis duobus digitis spissam, qua diligenter siccata, suppone ei alteram, sicque facies donec forma compleatur quantam eam habere volueris, et cave ne unquam superponas argillam alteri nisi inferior omnino sicca fuerit.“ Ist das getan, nimm die Holzspindel und umgib sie mit kräftig durchgeknetete-



Abb. 8: Kern beim Trocknen über einem leichten Feuer ohne große Flammen. Bei dieser Methode ist Sorgfalt geboten, da sie zu unerwünschten Ergebnissen führen kann. Der Formlehm fühlt sich oberflächlich trocken an, er ist jedoch aufgrund des Kapillarbruchs im Material unterhalb der Oberfläche noch feucht. Besser ist das langsame Trocknen an einem luftigen Ort.

Abb. 9: Auftragen einer Lehmschicht auf eine bereits völlig trockene Lehmschicht. Die geritzten Markierungen geben an, an welcher Stelle der Kern bereits rund ist und an welcher Stelle noch Formlehm fehlt. Direkt vor dem Lehmauftrag wird der Kern mit Wasser bestrichen, sodass sich der frische Lehm mit dem trockenen Lehm verbinden kann.





Abb. 10: Mit einer feinen Lehmischung, die nur aus Ton und Kuhmist besteht, wird der Kern geglättet und poliert, denn diese Oberfläche ist verantwortlich für die Gussoberfläche der Innenseite der Glocke.



Abb. 11: Auswalzen der Wachsplatten nach Theophilus' Vorschrift. Die Stärke der Leisten bestimmen die Wandstärke der späteren Glocke. Hier sind die Leisten 6,5 mm stark. Das Brett ist angefeuchtet, um ein Ankleben des Waxes zu verhindern.

tem Ton, zunächst von zwei Fingern Dicke. Ist dieser sorgfältig getrocknet, lege den nächsten darüber, und so mache es, bis die Form fertig ist, so groß, wie du sie haben willst. Und achte darauf, dass Du niemals eine Tonlage auf die andere aufträgst, ehe die darunterliegende vollständig getrocknet ist.“

Der Versuch zeigte, dass dieser Anweisung unbedingt Folge zu leisten ist. Der erste Kern brach bei der Bearbeitung in der horizontalen Lage auseinander, da der Gesamtfeuchtegehalt des Tonkerns zu hoch war. Die Rekonstruktion von Drescher zeigt ein Feuer unter dem Kern, obwohl das von Theophilus nicht beschrieben wurde.³⁰ Er folgt damit der Auffassung von Theobald, der sich wiederum auf Biriguccios *Pirotechnia* bezieht, der das Trocknen der Kerne mit Feuer beschreibt.³¹ Da diese Auffassung naheliegend und überzeugend erschien sowie auch aus eigenen Erfahrungswerten bei kleineren Formen erfolgreich zum Einsatz kam, wurde der Kern im Versuch ebenfalls mit Feuer getrocknet.

Ein zweiter Kern wurde hergestellt, und dieser wurde über einige Wochen an der Luft getrocknet, bevor das Wachsmodell der Glocke darauf modelliert wurde. Auch dieser Kern wurde in einzelnen Schichten aufgetragen. Vor jeder neuen Schicht muss der trockene Kern mit Wasser benetzt werden, sodass der frische Lehm mit dem Kern eine dauerhafte Verbindung eingeht. Als letzter Schritt wurde die Oberfläche des Kerns mit einer Lehmischung aus Ton und Kuhmist 1:1 geglättet.

Es stellte sich heraus, dass das Trocknen mit dem Feuer zwar Vorteile bringt, da es den Prozess beschleunigte, aber die Nachteile überwogen. Denn der Ton fühlte sich nach einigen Stunden oberflächlich trocken an, während er unterhalb der Oberfläche noch feucht war. Dadurch ist es zum Kapillarbruch gekommen, d.h. durch die schnelle Trocknung der Oberfläche konnte das Wasser aus dem Inneren des Kernes nicht mehr abtransportiert werden. Es kann hieraus nicht abgeleitet werden, dass Theobalds Hypothese falsch ist, denn es ließe sich beispielsweise durch dünnere Schichtaufträge Abhilfe schaffen, da die verbleibende Restfeuchte von der Schichtdicke und der Dauer der Trocknung abhängt. Allerdings stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob unsere moderne Sichtweise, eine Prozessdauer zu optimieren, für den betreffenden Zeitraum des 9. bis 12. Jahrhunderts auch zutrifft und ob es nicht plausibler ist, den Kern von alleine trocknen zu lassen, so wie es Theophilus beschreibt.

Das Glockenmodell

Theophilus schreibt:³² „Dann nimm Talg, schneide ihn fein in einem Gefäß und knete ihn mit den Händen. Befestige zwei glatte Leisten von der Dicke, die Du wünschst, auf einem glatten Brett. Den in der Mitte aufgelegten Talg walze mit einem runden Holz dünn und glatt wie oben das Wachs, feuchte es darunter an, dass es nicht anhaftet.“

Dieser Abschnitt ist besonders interessant, denn Theophilus nimmt hier ausdrücklich Bezug auf ein anderes Kapitel. Nämlich auf das vom gegossenen Rauchfass, in welchem er die Wachsplatten für das Rauchfass auf die gleiche Weise herstellt. Wir erfahren, dass die Technik sowohl für Wachs als auch für Talg funktioniert. Da der Versuch in den Hochsommermonaten stattfand, schied der eigens für den Versuch hergestellte Rindertalg aus, da er bei den herrschenden Temperaturen von etwa 32 °C zu weich wurde. Als Ersatz kam Bienenwachs zum Einsatz. Es wurde am Feuer erwärmt und mit der Vorrichtung, die Theophilus beschreibt, zu Platten gewalzt. Die Stärke der Leisten bestimmt hierbei die spätere Wandstärke der Glocke. In diesem Versuch sind es 6,5 mm.

Weiter schreibt Theophilus vor:³³ „Und dann hebe es [den Talg] so schnell wie möglich ab, lege es auf die Form und verschmelze es mit einem warmen Eisen ringsum. Walze wiederum auf dieselbe Weise ein Stück Talg aus und lege es neben das erste, und mache weiter so, bis Du die Form [Kern] bedeckst. Den Rand der Glocke aber mache so dick wie Du willst. Den Talg aber, wenn er ganz abgekühlt ist, drehe mit scharfen Eisenwerkzeugen ab. [...] und forme neben der Halsöse vier dreieckige Löcher, damit sie besser klingt.“

Die Wachsplatten wurden danach im noch warmen Zustand auf den Kern gelegt und festgedrückt. Die Bearbeitung des Waxes erfolgte durch Verschmelzen der Oberfläche mit einem heißen Eisen und die endgültige Formgebung durch Abdrehen mit einem scharfen Werkzeug. Das Arbeiten mit dem heißen Eisen verlief erstaunlich gut, da es das Wachs lediglich verteilte, und dieses nichts von seiner Stärke verlor. An diesem Schritt wird deutlich, wie wichtig ein runder Kern ist. Ist der Kern unrund, resultiert das in einer Glocke mit ungleichmäßiger Wandstärke. Die vier dreieckigen Klanglöcher wurden bei der Bearbeitung des Wachsmodells schlichtweg vergessen. Zumindest klanglich



Abb. 12: Nachdem alle Wachsplatten aufgelegt sind, muss noch der Schlagring modelliert werden.



Abb. 13: Die endgültige Formgebung wurde sowohl durch Abdrehen als auch durch ein heißes Eisen erreicht.



Abb. 14: Der fertige Schlagring ist hier bereits zu erkennen. Das heiße Eisen ist für Wachs die bessere Bearbeitungsmethode, da es die Materialstärke nicht vermindert, sondern das Wachs nur verteilt.



Abb. 15: Um die Krone zu modellieren, wird das Modell aus der Drehlade genommen und nun senkrecht auf eine Arbeitsfläche gestellt. Die umlaufende Nut am Kern verbessert den Zusammenhalt zwischen Kern und Formmantel.



Abb. 16: Der Aufhänger für den Klöppel wird in das Wachsmodell der Glocke einmodelliert, sodass er später, von Metall umflossen, innerhalb der Metallwandung sitzt.



Abb. 17 Fertiges Glockenmodell.

ist das kein Problem, da sie nach Ansicht der Glockenkundler nichts zum Klang beitragen und auch bereits zu Theophilus' Zeiten in manchen Glocken nur noch andeutungsweise vorhanden waren wie z.B. in der Glocke von Aschara bei Langensalza aus dem 11. Jahrhundert.³⁴

Theophilus weist weiter an:³⁵ „Danach lege Ton auf, der gesiebt und sorgfältig durchgemischt ist. Ist er getrocknet, bringe die nächste Schicht auf. Ist diese ebenfalls ganz getrocknet, lege die Form auf die Seite und ziehe unter leichtem Klopfen das Holz heraus, richte die Form wiederum auf, und fülle das obere Loch (des Tonkerns) mit weichem, feuchten Ton aus; das gebogene Eisen, an dem der Klöppel hängen soll, drücke so in das Zentrum (des Tonkerns) hinein, dass seine Enden (den Kern) überragen. Wenn der Ton trocken geworden ist, glätte die restliche Form (den Kern) und bedecke sie so mit Talg, dass die Enden des Eisens reichlich darin hängen. Danach forme die Hals(-öse), die Henkel und die Entlüftungen und darüber den Einguss und bedecke alles mit Ton.“

Hier weicht der Versuch ein wenig von der Beschreibung des Theophilus ab, da das Wachsmodell wesentlich unempfindlicher ist, als das Talgmodell. Ein Talgmodell ist so empfindlich, dass es Schaden nehmen würde, entnähme man es ohne schützende, stützende Lehmschicht aus der Drehlade. Nachdem das Glockenmodell auf der Drehlade fertig modelliert war, konnte es direkt senkrecht auf einer Arbeitsfläche abgestellt werden. Es musste nicht erst mit zwei Tonschichten versehen werden. Die Spindel wurde unter beständigem Klopfen aus dem Kern entnommen. Daraufhin erhielt die Glocke noch die Aufhängung für den Klöppel, ein U-förmiges Stahlstück, das in das Wachs der Glocke einmodelliert wurde. An dieser Stelle ist die Wandstärke größer, sodass der Aufhänger während des Gusses von flüssigem Metall eingeschlossen werden kann. Zu guter Letzt erhält die Glocke ihre Krone für die spätere Aufhängung, die zugleich der Anschnitt³⁶ für die Glocke ist. Auch die Glocken des frühen und hohen Mittelalters wurden fallend, d.h. von oben gegossen.

Der Formmantel

Theophilus:³⁷ „Ist dann zum dritten Mal der Ton überall getrocknet, lege ringsum Ringeisen so dicht, dass zwischen zwei Reifen nicht mehr als eine Handbreit passt.“

Der Formmantel wurde in vier Schichten aufgetragen, wobei die erste Schicht aus einer Mischung von je einem Teil frischem Ton, feinem Quarzsand und Kuhmist bestand. Die zweite, sowie alle folgenden Schichten bestanden aus demselben Formlehm,

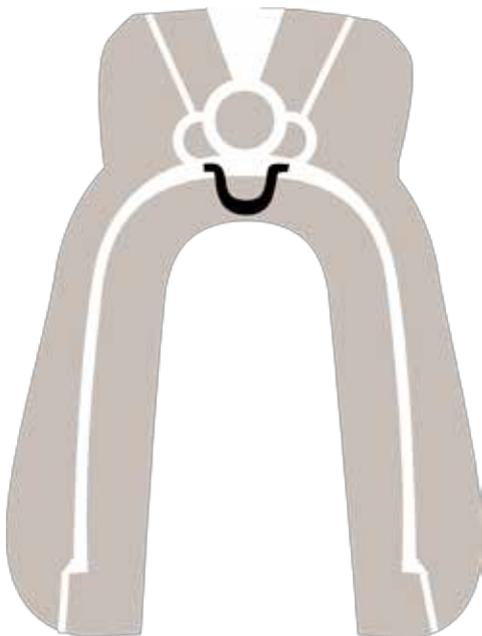


Abb. 18: Die erste Schicht besteht aus einer besonders feinen Mischung zu je einem Teil aus frischem Ton, feinem Quarzsand und Kuhmist.



Abb. 19: Alle weiteren Schichten bestehen aus demselben Material wie der Kern. Hier zu sehen ist die dritte Lehmschicht. Besonders deutlich kann man hier die Strohhalme des Formlehms erkennen.

Abb. 20: Schematischer Schnitt durch die Form der Bienenkorb-glocke. Die Form besteht aus einem Stück. Kern und Formmantel sind nicht trennbar. Am unteren Ende sind die Wachsablaufkanäle A und B zu sehen. Diese werden vor dem Guss verschlossen. Am oberen Ende befinden sich der Eingusstrichter oder Anschnitt, daneben die beiden Entlüftungen des Formhohlraums.



der auch schon für den Kern Verwendung fand. Die Form besitzt zwei Wachsablaufkanäle, die von der Unterseite des Schlagringes nach unten aus der Form führen. Hier kann das Wachs während des Ausschmelzens ablaufen. Diese Kanäle werden vor dem eigentlichen Brand wieder verschlossen.

Zwischen der dritten und der letzten Formlehmschicht wurden drei Stahlbänder angebracht. Eines auf der Höhe des Schlagringes, eines auf der Höhe der Schulter und eines dazwischen. Die Stahlringe, besonders der untere, sollen der Form helfen, dem Druck während des Gusses standzuhalten. Der sogenannte metallostatische Druck, der auf die Formwand wirkt, lässt sich einfach aus der Dichte des Metalls ρ und Höhe h der flüssigen Metallsäule sowie der Erdbeschleunigung berechnen:

$$p = \rho * g * h$$

$$p = 8,800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{N}}{\text{kg}} * 0,6\text{m} = 517968 \frac{\text{N}}{\text{m}_2} = 517968\text{Pa} \approx 5h\text{Pa}$$

Hieraus lässt sich ablesen, dass die Stahlbänder nicht notwendig sind, denn 5 hPa Druck sollte die Form, wenn sie in der Grube eingegraben, ist ohne Weiteres aushalten. Archäologische Belege für Stahlbänder lassen sich bisher auch nur für große Glocken erbringen.³⁸

Brennen der Form

Ein ganzer Abschnitt im Glockengusskapitel beschäftigt sich mit dem Absenken der Form in die Grube, wobei die Form auf der mit Sand gefüllten Grube steht. Der Sand wird nach und nach ausgeschaufelt, und die Form senkt sich. Hier beschreibt Theophilus ganz offensichtlich eine sehr große Form, welche nicht mehr von Hand bewegt werden kann. Für diesen Versuch ist das nicht relevant, da die Form von zwei Personen in die Grube gehoben werden konnte. Dort wurde diese zuerst gebrannt und danach gegossen. Die Grube sieht nach Theophilus folgendermaßen aus:³⁹ „Mache dann an der Stelle, wo Du die Form zum Brennen einlassen willst, eine Grube, deren Durchmesser der Höhe der Form entspricht. Mit Steinen und Ton mache in der Art einer Grundmauer einen kräftigen Sockel von 1 Fuß Höhe, auf dem die Form stehen soll, sodass in der Mitte eine Gasse von 1,5 Fuß Breite verbleibt, in dem das Feuer unter der Form brennt.“

Auch hier gibt es Anpassungen an den Versuch, da ein 1,5 Fuß breiter Sockel eine viel zu geringe Auflagefläche für die Glockenform bedeutet hätte. Ganz offensichtlich beschreibt Theophilus den Guss einer größeren Glocke. Die Gasse unter der Form war im Versuch lediglich 15 cm breit. Ein kleines Feuer wurde entfacht, sodass zunächst das Wachs in der Nähe der Ablaufkanäle zu schmelzen begann und ablaufen konnte. Später wurde das Feuer stärker geschürt, sodass auch die Bereiche weiter oben in der Form schmelzen konnten. Das Wachs war nach etwa 18 Stunden vollständig abgelaufen.

Theophilus beschreibt auch hier wieder sehr genau den Fortgang des Verfahrens, was auf seine profunden Kenntnisse des Prozesses schließen lässt:⁴⁰ „Ist aber der Talg vollständig herausgelaufen, verschließe beide Löcher mit geknetetem Ton, der genau so bemessen ist, dass der Rand der Glocke nicht beschädigt wird, und fülle rings um die Form reichlicher Holz auf, damit während des ganzen Tages und der folgenden Nacht das Feuer nicht ausgeht.“



Abb. 21: Die noch grüne Form in der Grube am Beginn des Brandes. Zu erkennen ist noch das Ende eines Entlüftungskanals aus Wachs.

Abb. 22: Am Abend des ersten Tages des Brandes der Glockenform. Eine Mischung aus Wasser- und Wachsdampf verlässt die Form durch die Entlüftungskanäle.

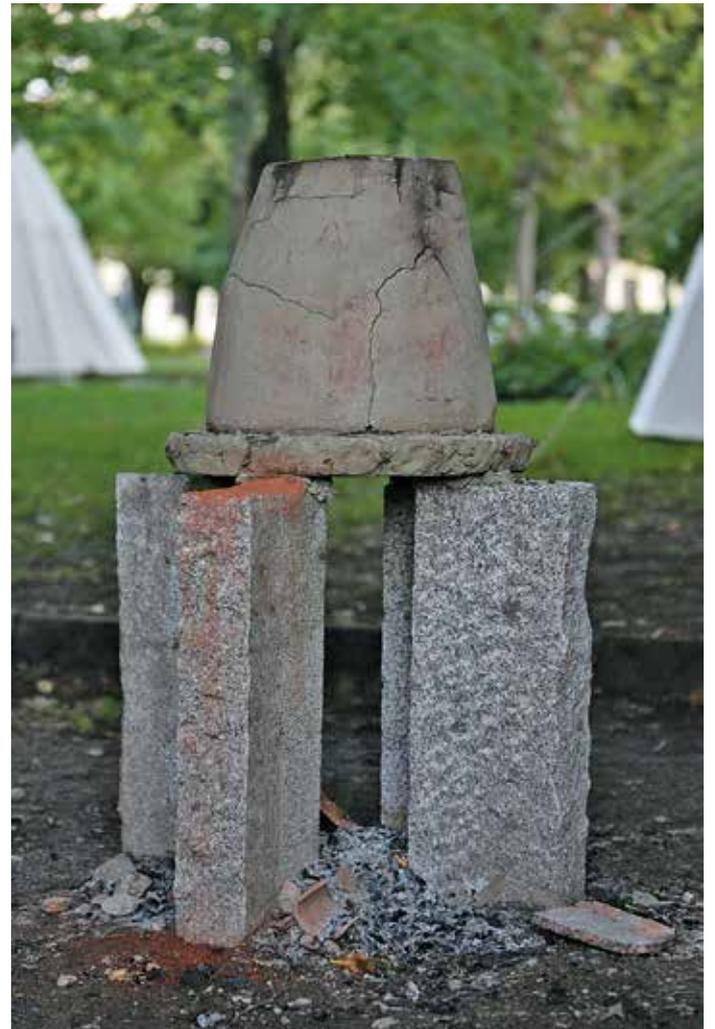


Wir sehen, dass der Brennprozess in zwei Schritten erfolgen soll: Vor dem eigentlichen Brand der Form muss zunächst der Talg, in unserem Fall das Wachs, heraus geschmolzen werden. Dann werden die Löcher, damit sind die Ablaufkanäle gemeint, verschlossen, bevor man zum Brand der Form von 24 Stunden übergeht. Die Gesamtbrenndauer der Form betrug in unserem Versuch 68 Stunden. Während der letzten Stunden des Formbrandes wurde der Schmelzofen in Betrieb genommen. Auf diese Weise konnte die Grube, in der die heiße Form stand, unmittelbar vor dem Guss mit Sand und Erde verfüllt und verdichtet werden.

Der Schmelzofen

Für diesen ersten Versuch wurde darauf verzichtet, den Schmelzofen zu rekonstruieren, den Theophilus im Glockengusskapitel beschreibt, da dieser für größere Mengen Metall bestimmt ist und Theophilus eindeutig den Guss einer großen Glocke beschreibt. Ein weiterer Versuch zu diesem Ofentypus ist in Planung und soll im Sommer 2016 stattfinden. Aus den genannten Gründen, aber auch wegen der Prozesssicherheit, wurde entschieden, das Metall mit einem Ofen zu schmelzen, den Theophilus in seinem 64. Kapitel beschreibt und mit dem der Autor über zehnjährige

Abb. 23: Rekonstruktion nach Theophilus Presbyters 64. Kapitel „De Fornace“. Dieses Ofenprinzip wurde leicht vergrößert, um die 44 kg Bronze für die Glocke zu schmelzen.



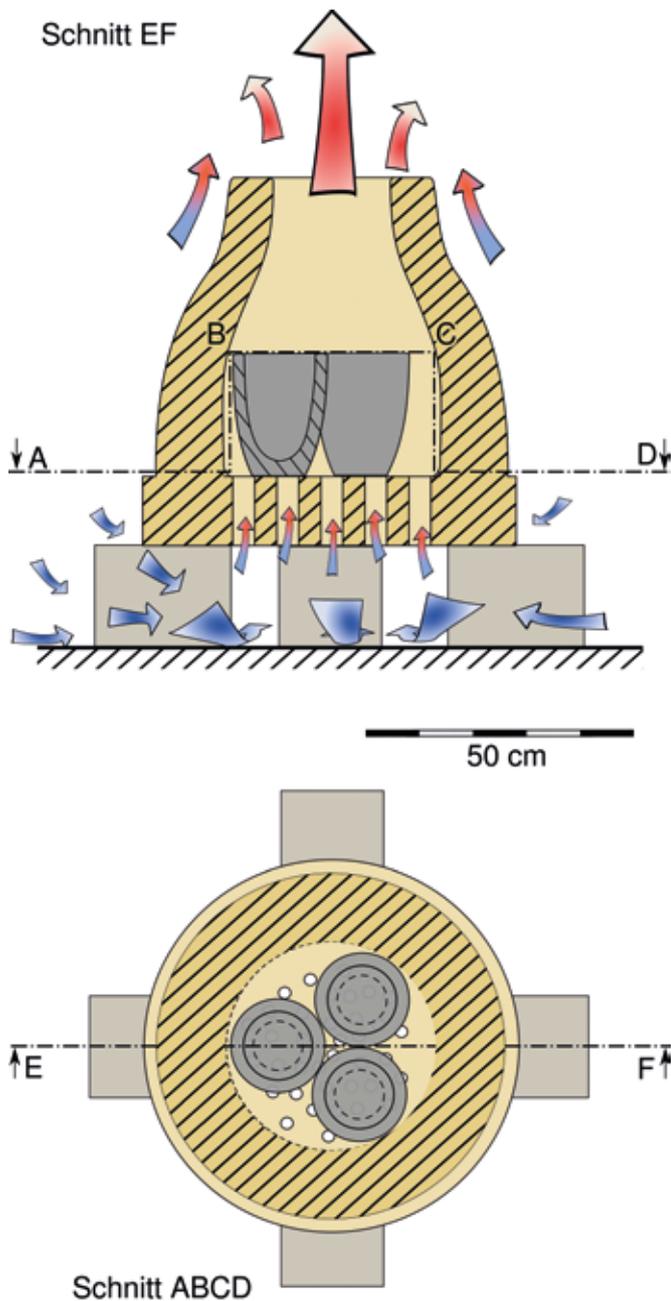


Abb. 24: Schematischer Aufbau des für den Glockenguss rekonstruierten Ofens nach Theophilus. Der Ofen fasste drei Schmelztiegel. Die Tiegel befinden sich in der Mitte, und hatten etwa 1 cm zur Ofenwand. Die Sohle des Bodens ist eine Lochtenne. Der Brennstoff befindet sich auf, neben und zwischen den Tiegeln.

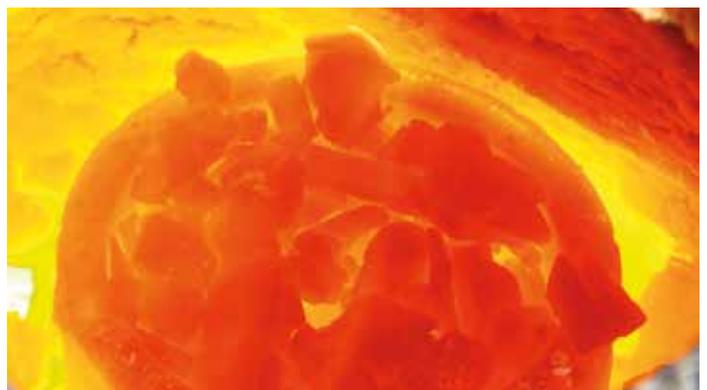
Erfahrung hat. Es handelt sich um einen Lehmofen, der vom Boden abgehoben auf vier Steinen sitzt und über eine Lochtenne, also eine mit Löchern versehene Ofensohle, verfügt. Im Inneren des Ofens befinden sich die Schmelztiegel und der Brennstoff. Der Ofen wird mit drei Gusstiegeln von je 15 kg Fassungsvermögen bestückt. Die verwendete Bronze ist eine 20%ige Zinnbronze CuSn20, wobei die Charge zum Teil aus 12%iger CuSn12 und 14%iger CuSn14 Zinnbronze sowie Zinn bestand. Aus Gründen der Arbeits- und Prozesssicherheit wurde auf Graphittiegel zurückgegriffen. Archäologisch lassen sich für die Mitte des 12. Jahrhunderts Tiegel mit einem Fassungsvermögen von 12 kg in der Buntmetallgießerei von Bonn-Schwarzrheindorf nachwei-



Abb. 25: Rund um die gebrannte Form wird in der Grube mit Sand Erde verdichtet, sodass die Form während des Gusses nicht reißt. Im Hintergrund der Schmelzofen.

sen.⁴¹ Der Ofen funktioniert nach dem Kaminprinzip, benötigt somit keinerlei Blasebälge. Durch seine Konstruktionsweise bildet sich über dem Ofen eine Hochdruckzone und darunter eine Tiefdruckzone. Durch den umgebenden höheren Luftdruck wird Luft von unten in den Ofen gedrückt.⁴² Der Ofen funktionierte außerordentlich gut, sodass die Schmelzdauer lediglich 4 Stunden betrug, bei einem Holzkohledarf von nur 36 kg. Die Vorheizdauer mit Holz betrug 3 bis 4 Stunden. Zinnbronzen haben keinen Schmelzpunkt, sondern schmelzen in einem Bereich, der von zwei Temperaturen eingegrenzt wird.

Abb. 26: Blick in den Schmelzofen: Gut zu sehen ist, wie nahe die Schmelztiegel an der Ofenwand stehen. Guter Schmelzarbeit stand dies jedoch nicht Wege.



Am Soliduspunkt beginnt die Legierung zu schmelzen, am Liquiduspunkt ist sie vollständig flüssig. Eine 20%ige Zinnbronze hat einen Soliduspunkt von 820 °C und eine Liquidustemperatur von 890 °C. Die Schmelze wurde auf etwa 1050 °C erhitzt und somit um 160 °C überhitzt. Vor dem Guss wurde die auf dem Schmelzgut schwimmende Holzkohle entfernt.

Abschätzung des Energie- und Luftbedarfs

Entscheidend für die Schmelzarbeit ist die Einsicht, dass der Erfolg des Schmelzens in allererster Linie durch die Minimierung des Wärmeverlusts erreicht wird.⁴³ Folgende Arten des Wärmeverlusts existieren:

1. Abwärme durch die große Öffnung des Ofens,
2. Wärmeverlust durch die Ofenwand,
3. Feuchtigkeit in der Ofenwand,
4. Feuchtigkeit im Brennstoff,
5. Luftfeuchtigkeit.

An Punkt 1 kann bei rekonstruierten Öfen nicht viel geändert werden. Dieser betragsmäßig mit Abstand größte Verlust muss in Kauf genommen werden. Punkt 2 lässt sich dagegen durch bessere Isolation des Ofens verbessern. Punkt 3 lässt sich durch Vorheizen des Ofens minimieren, Punkt 4 durch sachgemäße Lagerung des Brennstoffs, und Punkt 5 lässt sich durch die Wahl der Jahreszeit beeinflussen.

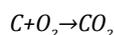
Weiteren Einfluss auf die Temperatur hat die Geschwindigkeit, mit der der Sauerstoff durch den Holzkohlestapel strömt. Somit ist die Korngröße und damit die Oberfläche des Brennstoffs, der mit Sauerstoff in Berührung kommt und reagiert, von entscheidender Bedeutung. Je mehr Sauerstoff pro Zeiteinheit durch den Ofen strömt, desto schneller und heißer kann die Holzkohle verbrennen. Hier soll ein kleiner Exkurs stattfinden, der sich mit Überlegungen zur Energiebilanz auseinandersetzt. Ein Blick auf den Heizwert von Holzkohle und die Energie Q, die benötigt wird, Bronze zu schmelzen, veranschaulicht dies auf eindruckliche Weise.

$$Q = m_{\text{bronze}} \cdot c_p \cdot \Delta t + m_{\text{bronze}} \cdot \Delta_{\text{fus}}H$$

$$Q = 44\text{kg} \cdot 0,377 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 1039\text{K} + 44\text{kg} \cdot 190 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 25594,9\text{kJ} \approx 26\text{MJ}$$

c_p ist die spezifische Wärmekapazität von Zinnbronze, $\Delta_{\text{fus}}H = 190 \text{ kJ/kg}$ die Schmelzwärme für Zinnbronze, Δt die Temperaturänderung in Kelvin. Die Energie, die notwendig ist, um 44 kg Bronze zu schmelzen, beträgt somit etwa 26 MJ.

Hier soll eine grobe Annäherung versucht werden. Folgende Voraussetzungen sollen für die Abschätzung gelten. Der Versuch benötigte 36 kg Holzkohle. Kohlenstoffgehalte von Holzkohle liegen zwischen 75 und 90 %, hier wird ein konservativer Wert von 80% angenommen. Der Sauerstoffgehalt der Luft wird mit 21 % angenommen und der gesamte Kohlenstoff wird in CO_2 umgesetzt. Wenn der Kohlenstoff mit Sauerstoff reagiert, können wir damit die Mindestluftmenge berechnen, denn die Stoffmenge n des Sauerstoffs ist gleich der Stoffmenge des Kohlenstoffs ist gleich der Stoffmenge des Kohlenstoffs.



Für $n_c = 2400 \text{ mol}$ Kohlenstoff benötigt man mindestens $n_{O_2} = 2400 \text{ mol}$ Sauerstoff, um $n_{CO_2} = 2400 \text{ mol}$ Kohlendioxid zu bilden. Es folgt:

$$n_c = n_{O_2}$$

Masse Holzkohle: $m_{\text{Hk}} = 36 \text{ kg}$

Masse Kohlenstoff: $m_c = 36 \text{ kg} \cdot 0,80 = 28,8 \text{ kg}$

Molare Masse Kohlenstoff: $M_c = 12 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$

Stoffmenge Kohlenstoff: $n_c = \frac{m_c}{M_c} = \frac{28800\text{g}}{12 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 2400\text{mol}$

Bei 21 % Sauerstoffgehalt lässt sich die Mindestluftstoffmenge folgendermaßen annähern:

$$L_{\text{min}} = n_c / 0,21$$

$$L_{\text{min}} = 2400 \text{ mol} / 0,21 = 11428 \text{ mol}$$

Es werden also mindestens 11400 mol Luft benötigt, um die gesamte Holzkohle zu verbrennen. Das gesamte Luftvolumen V_{Luft} lässt sich nun mit der thermischen Zustandsgleichung idealer Gase in Abhängigkeit des herrschenden Luftdrucks und der Umgebungstemperatur berechnen.

Am Gießtag lag der Luftdruck bei 990 hPa, die Temperatur bei 11 °C und die relative Luftfeuchte bei 82 %.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$V = \frac{n \cdot R \cdot T}{p}$$

Wobei p der Luftdruck in Pa, R = 8.3144598 J/(mol * K) die universelle Gaskonstante und T die absolute Temperatur in Kelvin ist.

$$V_{\text{Luft}} = \frac{11400 \cdot 8,3144598 \frac{\text{J}}{\text{molK}} \cdot 284\text{K}}{99000\text{Pa}} = 272\text{m}^3$$

272 m³ Luft während einer Betriebszeit von 4 Stunden entsprechen einer Luftmenge von 19 Litern, die pro Sekunde den Ofen durchlaufen.

Bei 82 % relativer Luftfeuchte und 11 °C beträgt der absolute Wassergehalt von Luft 8 g/m³. Die gesamte Masse des im Ofen zu erhaltenden Wasserdampfes ist demnach:

$$272\text{m}^3 \cdot 8 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 2176\text{g}$$

Die Energie, die dafür aufgewendet werden muss, lässt sich über die spezifische Wärmekapazität des Wasserdampf $c_p = 2,08 \text{ kJ/(kg*K)}$ grob abschätzen:

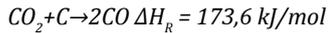
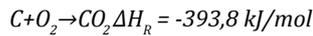
$$Q_{\text{Luftfeuchte}} = c_p \cdot m_{\text{Luftfeuchte}} = 2,08 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \cdot 2,176\text{kg} \cdot 1239\text{K} = 5607\text{kJ} \approx 5,6\text{MJ}$$

Es sind 5,6 MJ an Energie aufzuwenden, um die gesamte Luftfeuchtigkeit der Verbrennungsluft aufzuheizen, und dies beträgt immerhin einem Fünftel der Energie, die für das Schmelzen des Metalles notwendig ist.

Den Heizwert von 1 kg Holzkohle kann man mit 25 MJ/kg ansetzen.⁴⁴ Die Energie, die 36 kg Holzkohle zur Verfügung stellen, ist demnach:

$$Q_{\text{total}} = m_{\text{Hk}} \cdot \text{Heizwert}_{\text{Hk}} = 36\text{kg} \cdot 25 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 900\text{MJ}$$

Nur ein sehr kleiner Bruchteil der Energie aus der Holzkohle kann genutzt werden, um die Bronze zu schmelzen, der überwiegende Teil geht durch Wärmeverluste verloren. Reherd gibt hier einen groben Anhaltspunkt und einen Wert von 8,2 MJ/kg für Holzkohle mit einem Kohlenstoffgehalt von 80 % an, wobei hier die Bildungsenthalpien für die Reaktionen



bereits abgezogen sind und offenbar auch das Aufheizen des Stickstoffs in der Luft mit in die Rechnung einbezogen ist.⁴⁵ Leider muss dies, wie so oft in Rehders Buch, eine Annahme bleiben, da er eine exakte Berechnung dieses Wertes schuldig bleibt. Demnach hätten bei 36 kg Holzkohle mit 80 % Kohlenstoffgehalt nur eine Energie von $36 \text{ kg} \cdot 8,2 \text{ MJ/kg} = 295,2 \text{ MJ}$ zur Verfügung gestanden.

Hieraus lässt sich erkennen, dass zwei Drittel der in Holzkohle verfügbaren Energie für die Reaktion von Sauerstoff zu Kohlenmonoxid und Kohlendioxid sowie für das Aufheizen der benötigten Luftmenge von 272 m^3 aufgebracht werden müssen. Immerhin werden mit 26 MJ, die für das Schmelzen des Metalls notwendig sind, gut 10 % der nutzbaren Energie umgesetzt, die restlichen 270 MJ werden durch Wärmeübertragung in die Ofenwand überführt und als Wärmeverluste im Ofen an die Umwelt abgegeben.

Der Guss

Der Guss wurde von zwei Gießern und zwei Assistenten durchgeführt und erfolgte aus drei Schmelztiegeln, die nacheinander gegossen wurden. Ein Assistent reinigte die Schmelzbadoberfläche, zog die Tiegel und stellte sie dem Gießer in die Gießbrille. Der zweite Assistent hatte die Aufgabe, noch immer auf der Schmelze schwimmende Oxide oder Holzkohlestücke zurückzuhalten. Auch wenn sich der Ablauf bei unserem Versuch von dem von Theophilus beschriebenen unterschied, so hat Theophilus doch die richtigen Ratschläge für die Logistik und Personalführung während dieses kritischen Prozessschritts, der noch genauso auf die heutige Zeit zutrifft:⁴⁶ „Diese Arbeit duldet keine trägen Arbeiter, sondern flinke und fleißige, damit nicht durch die Nachlässigkeit irgendeines (Mannes) die Form zerbrochen wird oder jemand den anderen behindert, verletzt oder zum Jähzorn reizt, was unter allen Umständen vermieden werden muss.“ Während des Eingießens mit dem zweiten Tiegel öffnete sich ein Teil eines offenbar mangelhaft (sic!) verschlossenen Wachsablaufkanals. Als Folge trat ein Teil der flüssigen Glockenbronze aus diesem Kanal aus und war verloren. Obwohl die geschmolzene Metallmenge von 44 kg deutlich über dem Bedarf von 36 kg für die Glocke lag, fehlte am Ende der Glocke dadurch die Krone. Theophilus gibt noch eine Warnung im Zusammenhang mit dem Erkalten der Form, und auch hier zeigt sich, dass er ein genauer und analytischer Beobachter war:⁴⁷ „Wenn aber die Bronze im Einguss erstarrt ist, veranlasse, dass die Erde um die Wette aus der Grube geschaufelt wird und die Form von außen etwas abkühlt.“

Nun wird die Form bei Theophilus Stück für Stück mit Sand unterfüttert und auf diese Weise aus der Grube geholt. In unserem Versuch ließ sich die Glocke mit zwei Mann aus der Grube heben. „Ist das getan, soll sie ganz auf die Seite gelegt und mit Hacken und anderen scharfen Eisenwerkzeugen, die an langen Holzstielen befestigt sein sollen, der innere Ton um die Wette herausgeworfen werden, weil er, wenn zugelassen würde, in ihr abzukühlen, von der Feuchtigkeit der Erde anschwellen und ohne Zweifel die Glocke zerbrechen würde.“ Wir erfahren abermals, dass es sich offenbar um eine große Glocke handelt, ansonsten hätte Theophilus ebenso wie wir in unserem Versuche ver-



Abb. 27: Während des Gießens der Glockenspeise.



Abb. 28: Die Form nach dem Guss. Theophilus weist an, die Form gleich nach dem Guss auszugraben und den Kern zu entfernen, weil ansonsten die Glocke reißen könnte. Deutlich zu sehen ist die fehlende Krone.

fahren können und die Glockenform heraus heben können. Der zweite Teil des Satzes ist jedoch viel interessanter, zeigt er doch, dass Theophilus wusste, dass Glocken Risse bekommen konnten, wenn man diese in der Form abkühlen ließ. Bienenkorbglocken haben geringe Wandstärken, und es ist vorstellbar, dass die Glocken während des Schwindungsprozesses des Metalls Risse erleiden könnten, da der Lehmkern nicht nachgibt. Theophilus hatte zwei Möglichkeiten, diese Rissbildung zu erklären: Erstens durch Ausdehnung des Kerns und zweitens durch die Schwindung des Metalls. Er entschied sich, wie wir heute wissen, für die falsche Erklärung.

Fazit und Ausblick

Der Versuch zum Formen der Glocke hat sehr gut funktioniert, auch wenn während der Rekonstruktion ein Fehler passiert ist, der verhinderte, dass die Glocke eine Krone erhielt. Dieser Fehler war jedoch keiner der Rekonstruktion, sondern auf Unachtsamkeit zurückzuführen. Viele praktische Aspekte zum Prozessablauf konnten geklärt werden. Als gute Ergebnisse können folgende Punkte genannt werden:



Abb. 29: Auf diesem Bild ist der nicht ordentlich verschlossene Wachsablaufkanal zu erkennen, der während des Gusses ausgelaufen ist.



Abb. 30: Die Gussoberfläche der Glocke ist sehr gut gelungen. Hier ist die Verzierung des Schlagrings zu sehen.

- Ein funktionierender Formlehm konnte erfolgreich rekonstruiert werden.
- Die Form hat das Trocknen, Ausschmelzen und Brennen ohne Rissbildung überstanden.
- Keine Rissbildung während des Gusses in der Form.
- Eine Glockenform kann ohne Weiteres in einer offenen Grube gebrannt werden.
- Die Form hat dem Gießdruck ohne Weiteres stand gehalten.
- Die Oberflächenqualität kann als sehr gut bezeichnet werden.
- Die Metallmenge ließ sich ohne Probleme aus drei Tiegeln gießen, es kam zu keinen Fehlstellen, wie Kaltlauf o.ä.

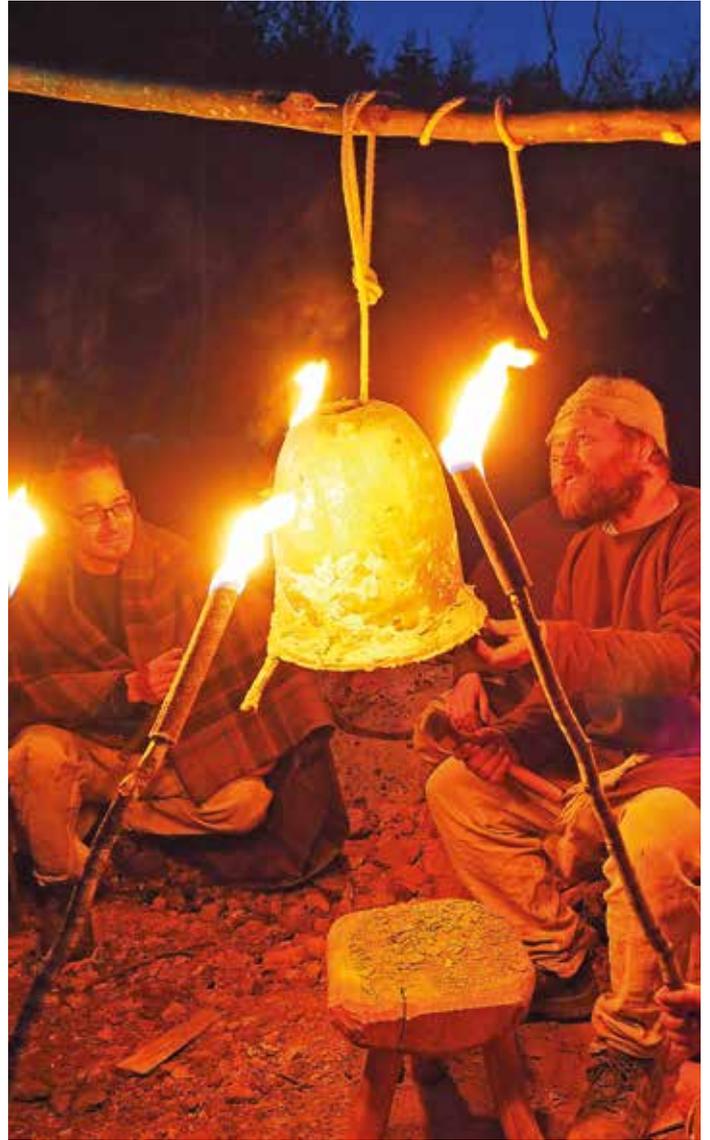


Abb. 31: Trotz fehlender Krone besitzt die Glocke alle essentiellen Partien, um noch am Abend des Giebtages ein erstes Mal angeschlagen zu werden. Sie klingt herb und dissonant, wie es sich für eine Bienenkorbglocke gehört.

Das Verfahren ist von Theophilus ausreichend genau, bisweilen sogar sehr detailliert beschrieben, sodass ein erfahrener Handwerker den Anweisungen folgen kann, sofern er Kenntnis vom Umgang mit den verwendeten Materialien besitzt. Hiervon kann zu Theophilus' Zeiten wohl für viele Handwerker ausgegangen werden. Lediglich Theophilus' Angaben zur Zusammensetzung des Formstoffes sind sehr knapp gehalten, sodass ein Handwerker ohne Erfahrungen mit Formlehm mit Sicherheit solche sammeln musste, bevor es zu erfolgreichen Güssen kam. Um noch offene Fragen zu klären, soll im Sommer 2016 eine weitere Glocke gegossen werden. Diesmal soll eine genaue Kopie der Glocke von Canino angefertigt werden, wobei der Ofen und Schmelzprozess, den Theophilus im Glockengusskapitel beschreibt, rekonstruiert wird. Dieser Ofentypus hat das Potenzial, erheblich größere Mengen an Metall zu schmelzen und zu gießen. Die Beherrschung dieser Technik ist Voraussetzung für die monumentalen Gussstücke, die im hohen Mittelalter geschaffen wurden.

Anmerkungen

- 1 Mein besonderer Dank gilt all jenen Kolleginnen und Kollegen vom Campus Galli, die diesen Versuch möglich gemacht haben: Iris Dutt, Mareike Punzel, Jens Lautenschlager, Hans Lässig, Johannes Wolff, Daniel Witschard-Schruttker, Michael Straub, Andreas Herzog, Erik Reuter, Thomas Fuhrmann, David Röder und Herrn Dr. Hannes Napierala. Herrn Dr. Ing. Ralf Laschimke gebührt Dank für die Spende des Metalls. Den Photographen Serge Paulus, Simone Napierala, Isabella Krichel-Bonstein und Oliver Bonstein sei an dieser Stelle herzlich gedankt.
- 2 Meineke et al. 1998; Tong 1983.
- 3 Meineke et al. 1998.
- 4 Price 1983, S. 76.
- 5 Siehe z.B. Brepohl 1999.
- 6 Ruf 1991, S. 159ff.
- 7 Freise 1981; Dines 2010.
- 8 Asmus 2012.
- 9 Waurick et al. 1992; Drescher 1984.
- 10 Asmus 2014; Asmus 2012.
- 11 Förster 1987, S. 142 und 154; Anfinset 2011, S. 78; Levy et al. 2008, S. 60.
- 12 Z.B. Biringuccio 1990; Cennini et al. 1954.
- 13 Salmang et al. 2007, S. 629f.
- 14 Grün bedeutet in Gießereikontexten feucht.
- 15 Brepohl, 1999, S. 234.
- 16 Ebd., S. 159.
- 17 Ebd., S. 175.
- 18 D.h. in diesem Fall Messing ohne Bleigehalt.
- 19 Z.B. Drescher 1984; 1992; 1995.
- 20 Bayley et al. 1993, S. 238
- 21 Asmus, in Vorbereitung.
- 22 Drescher 1995, S. 184f.
- 23 Theiß 2015, S. 22.
- 24 Bayley et al. 1993, S. 186.
- 25 Theiß 2015, S. 23.
- 26 Drescher 1995, S. 184.
- 27 Brepohl 1999, S. 235.
- 28 Zeichnerische Rekonstruktionen sind bei Theobald 1933, Drescher 1984 und Brepohl 1999 zu finden.
- 29 Brepohl 1999, S. 234.
- 30 Drescher 1984.
- 31 Theobald 1933; Biringuccio 1990, S. 263.
- 32 Brepohl 1999, S. 234f.
- 33 Ebd., S. 235.
- 34 Ebd., S. 241.
- 35 Ebd., S. 235.
- 36 In der Gießerei der Eingusskanal bzw. Eingussstrichter.
- 37 Brepohl 1999, S. 325.
- 38 Drescher 1995.
- 39 Brepohl 1999, S. 235f.
- 40 Ebd., S. 236.
- 41 Janssen 1987.
- 42 Asmus 2009.
- 43 Rehder 2000.
- 44 Asmus 2009.
- 45 Rehder 2000, S. 168f.
- 46 Brepohl 1999, S. 237f.
- 47 Ebd., S. 239.

Bibliografie

- ANFINSET, Nils:
2011 Social and technological aspects of mining, smelting and casting copper. An ethnoarchaeological study from Nepal (Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum, Nr. 181), Bochum 2011
- ASMUS, Bastian:
2009 A natural draft furnace for bronze casting. In Rehren, Thilo/Mei, Jianjun (Hrsg.): Metallurgy and Civilisation: Eurasia and Beyond (Proceedings of the 6th International Conference on the Beginnings of the Use of Metals and Alloys (BUMA VI)), London 2009
- ASMUS, Bastian:
2012 Medieval copper smelting in the Harz Mountains (Montanregion Harz, Bd. 10) (Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum, Nr. 191), Bochum 2012
- ASMUS, Bastian:
2014 Theophilus und die mittelalterliche Verhüttungstechnologie, in: Der Anschnitt 66 (2014), S. 126-140
- BAYLEY, J. et al.:
1993 A tenth-century bell-pit and bell-mould from St Oswald's Priory,

- Gloucester, in: Medieval Archaeology 37 (1993), S. 224-236
- BIRINGUCCIO, Vannoccio:
1990 The pirotechnia of Vannoccio Biringuccio. A classic sixteenth-century treatise on metals and metallurgy. Translated from the Italian with an introduction and notes of Cyril Stanley Smith and Martha Teach Gnudi, New York 1990
- BREPOHL, Erhard:
1999 Theophilus Presbyter und das mittelalterliche Kunsthandwerk. Bd. 2: Goldschmiedekunst, Köln u.a. 1999
- CENNINI, Cennino/THOMPSON, Daniel Varney:
1954 The Craftsman's Handbook. Il Libro dell'Arte, 2. Aufl. New York 1954
- DINES, Ilya:
2014 The Theophilus manuscript tradition reconsidered in the light of new manuscript discoveries, in: Speer, Andreas u.a. (Hrsg.): Zwischen Kunsthandwerk und Kunst: Die Schedula diversarum artium, Berlin/Boston 2014, S. 3-14
- DRESCHER, Hans:
1984 Das archäologische Fundmaterial (Berichte über die Ausgrabungen in Haithabu, Bd. 19), Neumünster 1984
- DRESCHER, Hans:
1992 Glocken und Glockenguss im 11. und 12. Jahrhundert, in: Waurick, Götz/Böhme, Horst Wolfgang (Hrsg.): Das Reich der Salier 1024-1125. Katalog zur Ausstellung des Landes Rheinland-Pfalz, Sigmaringen 1992, S. 405-414
- DRESCHER, Hans:
1995 Gießformen früher Glocken aus Mainz, in: Mainzer Zeitschrift 90/91 (1995), S. 183-225
- FÖRSTER, Till:
1987 Glänzend wie Gold: Gelbguss bei den Senufo, Elfenbeinküste, Berlin 1987
- FREISE, Eckhard:
1981 Roger von Helmarshausen in seiner monastischen Umwelt, in: Frühmittelalterliche Studien 15 (1981), S. 180-293
- GROTE, Karl Heinrich u.a. (Hrsg.):
2007 Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau, 22. Aufl. Berlin/New York 2007
- HAWTHORNE, John G./SMITH, Cyril Stanley:
1979 Theophilus: On divers arts. The foremost medieval treatise on painting, glassmaking and metalwork. Theophilus translated from the Latin with introduction and notes by John G. Hawthorne and Cyril Stanley Smith, New York 1979
- JANSSEN, Walter:
1987 Eine mittelalterliche Metallgießerei in Bonn-Schwarzrheindorf, in: Beiträge zur Archäologie des Rheinlandes (Rheinische Ausgrabungen, Bd. 27), Köln 1987, S. 135-235
- LEVY, T. E. u.a.:
2008 Masters of fire. Hereditary bronze casters of South India (Veröffentlichungen aus dem Deutschen Bergbau-Museum Bochum, Nr. 162), Bochum 2008
- MEINECKE, Eckhard u.a.:
1998 Glocke, in: Germanische Altertumskunde Online. Reallexikon der Germanischen Altertumskunde 12, http://www.degruyter.com/view/GAO/RGA_1976

- PRICE, P.:
1983 Bells and Man, Oxford 1983
- REHDER, J. E.:
2000 The Mastery and Uses of Fire in Antiquity, Montreal/Kingston 2000
- RUF, Wolfgang (Hrsg.):
1991 Lexikon der Musikinstrumente, Mannheim u.a. 1991
- SALMANG, Hermann/SCHOLZE, Horst:
2007 Die Keramik, Berlin 2007
- THEIß, Alissa:
2015 Eine Glockengussanlage vom Gelände der Elisabethkirche in Marburg Untersuchungen zur mittelalterlichen Glockengießertechnik, Bamberg 2015
- THEOBALD, Wilhelm (Hrsg.):
1933 Technik des Kunsthandwerks im 10. Jahrhundert des Theophilus Presbyter. Schedula Diversarum Artium, Berlin 1933
- TONG, K.-W.:
1983 Shang musical instruments, in: Asian Music 15 (1983), S. 103-184

Anschrift des Verfassers

Bastian Asmus, PhD
Labor für Archäometallurgie
Beroldingerweg 1
79194 Gundelfingen