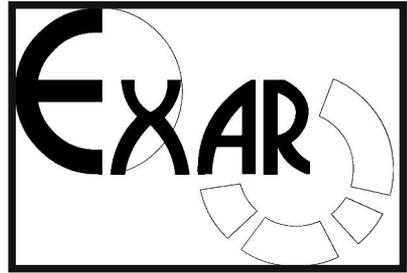


EXPERIMENTELLE ARCHÄOLOGIE IN EUROPA  
Jahrbuch 2017  
Heft 16

Herausgegeben von Gunter Schöbel  
und der Europäischen Vereinigung zur  
Förderung der Experimentellen  
Archäologie / European Association for  
the advancement of archaeology by  
experiment e.V.

in Zusammenarbeit mit dem  
Pfahlbaumuseum Unteruhldingen,  
Strandpromenade 6,  
88690 Unteruhldingen-Mühlhofen,  
Deutschland



EXPERIMENTELLE ARCHÄOLOGIE  
IN EUROPA  
JAHRBUCH 2017

Festschrift für Mamoun Fansa zum 70. Geburtstag

Unteruhldingen 2017

Gedruckt mit Mitteln der Europäischen Vereinigung zur Förderung der Experimentellen Archäologie / European Association for the advancement of archaeology by experiment e.V.

Redaktion: Ulrike Weller, Thomas Lessig-Weller,  
Erica Hanning

Textverarbeitung und Layout: Ulrike Weller, Thomas Lessig-Weller

Bildbearbeitung: Ulrike Weller, Thomas Lessig-Weller

Umschlaggestaltung: Thomas Lessig-Weller, Ulrike Weller

Umschlagbilder:

#### Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie, detaillierte bibliographische Daten sind im Internet abrufbar unter:  
<http://dnb.dbb.de>

ISBN

© 2017 Europäische Vereinigung zur Förderung der Experimentellen Archäologie / European Association for the advancement of archaeology by experiment e.V. - Alle Rechte vorbehalten

Gedruckt bei: Beltz Bad Langensalza GmbH, 99947 Bad Langensalza, Deutschland

# Inhalt

<i>Gunter Schöbel</i> Vorwort	8
<i>Julia Heeb</i> Prof. Mamoun Fansa – Prähistoriker, Experimental-Archäologe und unermüdlicher Verfechter des denkmalgerechten Wiederaufbaus von Aleppos Altstadt	9
<b>Experiment und Versuch</b>	
<i>Sayuri de Zilva, Josef Engelmann</i> Vom grünen Stein zum roten Metall – Reduktion von Malachit mittels Lungenkraft am offenen Feuer	13
<i>Alex R. Furger</i> Antike Buntmetalllegierungen im Experiment: Formbarkeit und Härteverhalten beim Kaltschmieden, Glühen, Abschrecken und Rekristallisieren	25
<i>Hans Reschreiter</i> 40 years of underground experiments – Getting to know the prehistoric Hallstatt salt mine with the aid of experimental archaeology	45
<i>Maikki Karisto, Karina Grömer</i> Different solutions for a simple design: New experiments on tablet weave HallTex152 from the salt mine Hallstatt	60
<i>Helga Rösel-Mautendorfer, Ines Bogensperger</i> Plinius der Ältere und das Bemalen von Textilien. Die Rolle der Experimentellen Archäologie zum Verständnis antiker Texte	70
<i>Matthias Bruestle</i> About the relationship of the coin image and the engraving tools	82
<i>Hannes Lehar</i> Puls meets fast food generation	96
<i>Frank Wiesenberg</i> Zur Herstellung römischer Rippenschalen. Resultate aus dem Borg Furnace Project 2015	104

<i>Maren Siegmann</i> Innenansichten – Glasperlen, vom Loch her betrachtet	116
<i>Stefan Stadler</i> Vom Zinkerz (Galmei) zum Messing im frühmittelalterlichen Ostalpenraum	123
<i>Stephan Patscher, Sayuri de Silva</i> Der byzantinische Traktat „Über die hochgeschätzte und berühmte Goldschmiedekunst“ – Neuedition, Übersetzung und interdisziplinärer Kommentar: Das Projekt und erste Ergebnisse der experimentellen Evaluierung	136
<i>Andreas Klumpp</i> Garmethoden und zugehöriges Gerät in der mittelalterlichen Küche	148

## Rekonstruierende Archäologie

<i>Bianca Mattl, Helga Rösel-Mautendorfer</i> Das Welterbedamen-Projekt – Gewandrekonstruktionen für das Oberösterreichische Landesmuseum	156
<i>Rüdiger Schwarz</i> Ascia-Hobel, Skeparnon, Mehrzweckdechsel oder zweiarmige Dechsel? Zur praktischen Arbeit mit einem vermeintlichen Vorläufer des Kastenhebels	166

## Vermittlung und Theorie

<i>Wolfgang Lobisser</i> Die Geschichte der archäologischen Architekturmodelle im Freilichtbereich des niederösterreichischen Museums für Urgeschichte – MAMUZ – in Asparn an der Zaya von den Anfängen bis zur Gegenwart	180
<i>Karina Grömer</i> Hin und wieder retour...Weltweite Resonanz auf archäologische Textilfunde – Fallstudie Hallstatt	196
<i>Barbara Rankl</i> The Sarcophagi garden in Ephesus. Condition survey of 21 sarcophagi and conservation of the "Amazon Battle" sarcophagus	208

<i>Tobias Schubert, Michael Zülch</i> Virtuelle Rekonstruktion. Anwendung der Computersimulation zur Validierung von archäologischen Kleidungsrekonstruktionen	217
<i>Julia Heeb</i> Neue Entwicklungen im Museumsdorf Düppel – Stadtmuseum und Freilichtlabor	225
<i>Julia Häußler</i> Guédelon – Experimentelle Archäologie und touristische Attraktion	234
<i>Tsvetanka Boneva</i> Digitale Rekonstruktion und 3D-Visualisierung der mittelalterlichen Stadt von Schumen (13.-14. Jh.)	246
 <b>Jahresbericht und Autorenrichtlinien</b>	
<i>Ulrike Weller</i> Vereinsbericht der Europäischen Vereinigung zur Förderung der Experimentellen Archäologie e.V. (EXAR) für das Jahr 2016	253
Autorenrichtlinien „Experimentelle Archäologie in Europa“	257

## Antike Buntmetalllegierungen im Experiment: Formbarkeit und Härteverhalten beim Kaltschmieden, Glühen, Abschrecken und Rekristallisieren

Alex R. Furger

**Summary – Behaviour of malleability and hardness during cold-forging, annealing and recrystallization.** *In order to review the hardening properties during cold-forging and recrystallization through annealing and subsequent quenching, seven non-ferrous alloys were produced following ancient examples. The small flat blanks were uniformly forged and annealed and during all working steps the Brinell hardness was measured. The results were graphically plotted and compared with observations from archaeological, archaeometrical, historical and modern specialist literature, iconographical presentations and field studies. In the outlook the results are assessed.*

*Stichwörter: Brinellhärte, Buntmetalle, Edelmetalle, Kaltschmieden, Zwischenglühen*  
*Keywords: annealing, cold-forging, Brinell hardness, non-ferrous alloys, precious metals*

### Zusammenfassung

Zum Überprüfen der Härtungseigenschaften durch Kaltschmieden und zur Rekristallisation durch Glühen und Abschrecken wurden sieben Buntmetalllegierungen nach antiken Vorbildern rekonstruiert. Die Proben-Plättchen wurden einheitlich geschmiedet und geglüht und in allen Bearbeitungsphasen die Brinell-Härte gemessen. Die Ergebnisse werden graphisch dargestellt und mit Beobachtungen aus der Archäologie, Archäometrie, der historischen und modernen Fachliteratur, ikonographischen Darstellungen und mit Feldstudien verglichen. Im Ausblick werden die Ergebnisse gewertet.

### Gefügeveränderungen: eine alte Beobachtung

Seit der Mensch Kupfer und später Legierungen damit verarbeitet, ist der Umstand genutzt worden, dass durch zunehmendes Hämmern, Schmieden, Treiben usw. eine Verdichtung des Materials erfolgt, was gut in der zunehmenden Härte spürbar wird. Schon immer hat man sich diese Eigenschaft zu Nutzen gemacht, um Arbeitskanten, Schneiden usw. besonders widerstandsfähig zu machen. Es gibt jedoch – gerade aus den frühen Metallzeiten – Beobachtungen, dass anscheinend nicht allen Bronzehandwerkern dieses Prinzip bekannt war, weil sie offensichtlich auch gussfrische, ungehämmerte Werkzeuge und Waffen in Umlauf brachten:

*"We are thus left with the impression that not all prehistoric copper and bronze smiths seem to have known how to or wanted to maximise the metal's full potentials. Since they otherwise had a considerable control over the metallurgical processes involved we are left to wonder whether this could be an effect of inaccurate transmission of knowledge, or of restricted, that is not widely shared, knowledge."* (OTTAWAY 2002, 11)

Will man ein durch Schmieden verhärtetes Werkstück weiterbearbeiten, wird es spröde und brüchig. Bei allen deformierenden Arbeitsprozessen, die nicht auf eine Erhärtung des Materials zielen, ist dies sehr hinderlich. Dem kann durch „Zwischenglühen“ abgeholfen werden, indem man das Stück auf eine schwache dunkelrote Glut erhitzt und entweder langsam oder rasch wieder abkühlt oder sogar abschreckt. Dadurch findet eine Rekristallisation des Gefüges statt, die zur alten Duktilität des Materials zurückführt (DESCH 1927; HILPKE 1956, 191-194; LUCAS, HARRIS 1962, 213; DIEBENER 1963, 58-65 [Edelmetalle]; AGRAWAL 1971, 177-179; RAUBER-SCHWEIZER 1976, 119; CHARLES 1979, 8 [Kupfer]; BREPOHL 2000, 184-197 [Edelmetalle]; PAPADIMITRIOU 2001 [Kupfer, Zinnbronze]; OTTAWAY, WANG 2004, 82). Es kann ohne Bruchrisiko weiter geschmiedet werden.

#### Erfahrungswerte von Edelmetall- und Buntmetallschmieden

Durch Hämmern, Treiben, Walzen oder Drücken wird eine Kupferlegierung zunehmend hart. Dies kann entweder erwünscht sein, wenn die Abnutzung eines Edelmetallgegenstandes (z. B. eines Fingerrings) verringert werden oder wenn ein Gefäß durch sorgfältiges „Spannen“ des Bodens stabil gemacht werden soll (DIEBENER 1963, 58). Oder die Bearbeitungsverhärtung führt im negativen Fall zur Versprödung und Rissbildung eines zu

schmiedenden Objekts. Dann muss immer wieder früh genug zwischengeglüht werden, um das Gefüge zu entspannen und um mit dem wieder duktil gewordenen Metall weiterarbeiten zu können. *„Das Ausglühen von Kupfer, Messing und Neusilber muss von Gürtlern, Ziseleuren und Graveuren häufig vorgenommen werden: beim Aufziehen, Treiben, Stanzen, Prägen [...], da sich alle metallischen Werkstoffe bei der Bearbeitung mit einer der o. a. Techniken in erheblichem Umfang verfestigen. Härte und Zerreißfestigkeit steigen, die Dehnung nimmt ab, es entstehen Spannungen“* (HILPKE 1956, 191).

Als Faustregel gilt, dass die Glühtemperatur umso niedriger sein muss, je intensiver das Objekt geschmiedet wurde. Wenn allerdings *„eine Legierung, die nur schwach verformt wurde, bei [zu] hoher Temperatur weich geglüht wird, kann das Gefüge so grobkörnig werden, dass die weitere Verarbeitung Schwierigkeiten bereitet“* (HILPKE 1956, 192; DIEBENER 1963, 60 [Zitat]). Erhard BREPOHL (2000, 186f.; 197) bringt dies so auf den Punkt: *„Maximale Umformung – niedrige Glühtemperatur – kurze Glühdauer ergeben optimales Gefüge“*, und Heinz HILPKE (1956, 192) ergänzt, dass *„ein zu langes Glühen tunlichst zu vermeiden [sei], weil dadurch [...] eine Kornvergrößerung eintreten kann“*.

Frédéric ADAMSKI (2008, 87-90, Abb. 5,16-5,18) hat sich besonders ausführlich mit dem Zwischenglühen (recuit) von Kupferlegierungen auseinandergesetzt und am Material verschiedener antiker Fundplätze in Aquitanien/F überprüft. An mehreren geschmiedeten resp. getriebenen Objekten ließen sich im Gefüge Hinweise auf Erhitzung und Rekristallisation gewinnen (ADAMSKI 2008, 116-125; 160; 169-171, Abb. 7,9-7,24; 10,9-10,13).

Als Glühtemperatur resp. notwendige Erhitzung zur Rekristallisation empfehlen Justine BAYLEY und Sarnia BUTCHER

(2004, 31) etwa 400°C für Bronze und Messing und etwa 200°C für Kupfer und Silber, Erhard BREPOHL (2000, 184f.) nennt 400°C für Gold, und Christian SCHWAHN (1945, 10) empfiehlt für Gold, Silber und Kupfer einheitlich 200°C, für Platin 450°C. Die Empfehlungen der Autoren gehen demzufolge weit auseinander und bei den Praktikern in den Werkstätten auf der ganzen Welt ist zu beobachten, dass die Werkstücke so knapp so weit geglüht werden, bis sie dunkelrot zu leuchten beginnen. Wir haben bei unseren Experimenten alle Testlegierungen – Gemische auf der Basis antiker Originale – vor dem Abschrecken in kaltem Wasser auf 650°C erhitzt.

#### Frühneuzeitliche Anleitungen zum Glühen und Rekristallisieren

In vielen alten Handbüchern und Werkstattanleitungen für Metallarbeiter werden die Arbeitsschritte des Kaltschmiedens, Zwischenglühens und Abschreckens zur Wiedererlangung der Duktilität von Kupfer und seinen Legierungen als bekannt vorausgesetzt und deshalb bloß am Rand erwähnt (BREPOHL 1987, 226; 237 [Theophilus Presbyter, frühes 12. Jh., Kap. 74 und 78]). Ausführlicher sind da die Anleitungen im „Kupferschmiedhandwerk“ aus dem Jahr 1839. Beschrieben werden zum Beispiel ein Rost auf der Esse zum Ausglühen von im Hammerwerk zweimal durchgeschmiedeten Messingplatten oder das Glühen von ganz normalen Treibarbeiten des Kupferschmieds: *„Hat man den Kessel in allen seinen Theilen getrieben und [...] bearbeitet, so wird er ausgeglüht. Da durch das Ausdehnen das Kupfer spröde geworden und man bei fortgesetzter Arbeit Gefahr liefe, dass dasselbe reißen würde. Eine solche Arbeit bis zum jedesmaligen Ausglühen wird Hitze genannt [...]“* (HÖHNE, RÖSLING 1839, 226f.; 302f.). Eugène François Marie d’Hubert unterscheidet in seinem alten Metall-Handbuch

von 1904 zwischen einerseits dem raschen Abschrecken („tremper“) im Wasser nach dem Erhitzen der Bronze auf Kirschröte. Andererseits *„on améliore les qualités des bronzes par un récuît au rouge-cerise, et un refroidissement très lent“*. Das langsame Abkühlen dient also der Homogenisierung des Gefüges des fertigen Metallobjekts (Abb. 3), das rasche Abschrecken der Rekristallisation zur Weiterverarbeitung durch Schmieden, Treiben, Ziehen oder Drücken (D’HUBERT 1904, 89). Barbara S. OTTAWAY und Quanyu WANG (2004, 82) meinen dazu: *“It was found that water-quenched bronzes can generally stand a greater reduction in thickness by cold-working than can air-cooled bronzes“*.

#### Archäologische Fundbelege und neuzeitliche Feldbeobachtungen

Michel PERNOT und Loïc HURTEL (1987, Tab. 2) haben einige keltische und römische Treibarbeiten aus Bronze und Messing hinsichtlich ihrer Bearbeitungsspuren untersucht. Die 13 Objekte resp. Analysen umfassen sowohl Zinnbronzen (mit 7-16% Sn) als auch Messinge (mit 28-ca. 35% Zn) sowie auch Zinnmessinge (mit 2-6% Sn und 17-25% Zn) mit bezeichnenderweise rund 7,6% resp. 15% Blei. Die Autoren erwägen für gewisse Legierungen auch ein Warmschmieden bei etwa 400°C. Die Dickenveränderung durch Treiben und wiederholtes Zwischenglühen ging in der Regel von 2 bis 6 mm dicken Rohplatten aus und endete mit Blechstärken von rund 0,5 mm. Die feinkörnige Mikrostruktur der untersuchten antiken und rekonstruierten Metallproben lässt auf rasches Glühen auf etwa 500°C und darauffolgendes Abschrecken schließen.

Andere metallurgische Untersuchungen an dünnen Bronzeblechen aus dem 14. Jahrhundert n. Chr. für Trachtbestandteile aus Paris ließen darauf schließen, dass

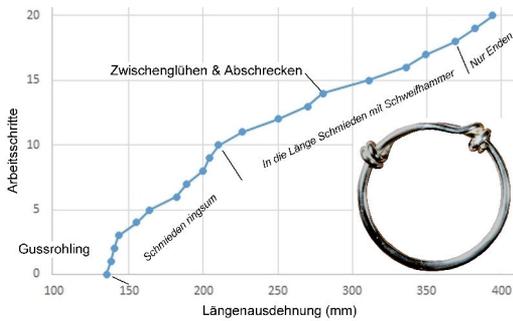


Abb. 1: Schrittweise Ausdehnung einer geschmiedeten Silberstange auf die dreifache Länge, ausgehend von einem 135 mm langen Gussrohling. Jeder Punkt in der blauen Linie entspricht einem Zwischenglühen mit Abschrecken in Wasser. Beachte die unterschiedlichen Arbeitsfortschritte je nach Hammertechnik. Rechts unten das Endprodukt: eine Armspange nach keltischem Vorbild. – Stepwise expansion of a forged stick of silver to threefold length starting from a 135 mm long blank. Each dot in the blue line corresponds with an intermediate annealing and quenching in water. Note the work progress according to hammering method. Right bottom the final product: a Celtic type bracelet.

die halbfertigen Platten vier bis acht Treibvorgängen mit jeweiligem Zwischenglühen unterzogen worden sind, bevor aus den 0,2 bis 0,4 mm dünnen Blechen kleine Zierplättchen ausgestanzt worden sind (THOMAS ET AL. 2008, 39). Ähnliche Erfahrungen machte Frank WILLER (2001, 37): Selbst mit einer Kupferlegierung mit schlechten Schmiedeeigenschaften (6% Sn und 6% Zn) liess sich im rekonstruierenden Experiment eine 0,5 mm dünne Platte gießen und anschliessend – mit viermaligem Ausglühen und Abschrecken in Wasser – zu einem Blech von 0,1-0,2 mm Dicke treiben.

Neuzeitliche Beobachtungen dokumentierten zum Beispiel 10-15maliges Zwischenglühen bei der Herstellung von kupfernen Schöpfplöfeln in Tibet (RAUBER-

SCHWEIZER 1976, 119, Kat. 6.9) resp. bis zu 100maliges Rekristallisieren beim Treiben von zinnreichen Bronze-Klangschalen in Indien (FÜRGER 2017, Abb. 368 Anm. 611-612, Abb. 456-459, Anm. 652-653).

Besonders detailliert schildert András HÖFER das Treiben eines Wasserkruges aus mehreren Kupferplatten mit anschließendem Zusammenlöten in Nepal (HÖFER 1972, 47-53 Abb. 12-19): Die zwei Hauptteile werden in den verschiedenen Stadien des Treibens, vor dem Zusammenlöten, immer wieder zwischengeglüht und langsam – „in einem Haufen von feuchten Reishülsen“ – abgekühlt, um durch Rekristallisation wieder ein duktileres Gefüge für das weitere Hämmern und Treiben zu bekommen. Der Unterteil des Krughalses muss im Laufe des Treibens 27-mal geglüht werden, das obere Mundstück 14-mal.

In Asien werden bis heute besonders zinnreiche Bronzen auch geschmiedet und nicht ausschliesslich gegossen. Die Legierungen mit 23-33% Zinn sind zwar wohlklingend, aber so spröde, dass sie nicht kalt geschmiedet werden können. Man hämmert sie daher bei schwacher Dunkelrotglut. Da auch so das Material mit zunehmender Ausdehnung versprödet, muss auch warm geschmiedetes Buntmetall immer wieder zwischengeglüht und abgeschreckt werden (SRINIVASAN, GLOVER 1995, 71).

Bei der Herstellung eines Silber-Armreifs nach keltischem Vorbild sollte die Relation von Längenausdehnung, Hammertechnik und Ausglühstufen aufgezeigt werden. Ausgangspunkt war eine gegossene, 135 mm lange Stange aus 800er-Silber. Das Ausschmieden auf 400 mm Länge erfolgt in drei Etappen: zuerst mit dem Bankhammer durch rundum gesetzte sanfte Hammerschläge zur Homogenisierung des Gefüges, dann durch forcierteres Strecken der Stange mit dem Finnenhammer und am Schluss nur noch in den

spitz auslaufenden Enden. Während des ganzen Schmiedeprozesses wurde 20-mal geglüht und in Wasser abgeschreckt (Abb. 1). Dennoch bildeten sich bisweilen feine Risse, die vor dem Weiterschmieden zugelötet und gefeilt werden mussten. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die dreifache Längenausdehnung des Stabes mit dem Finnenhammer besonders effizient war, während im Anfangsstadium mit den sanften, regelmäßig gesetzten Hammerschlägen noch eine geringere Ausdehnung erfolgte (Abb. 1).

#### Althistorische und ikonographische Belege

Nach John F. HEALY (1978, 231 Anm. 42; 234 Anm. 63-65) ist das Ausglühen – vorerst von Kupfer und Bronze – ab etwa 5000-4000 v. Chr. durchgeführt worden. Er führt auch einige griechische Belege für das Abschrecken von Bronze auf und zitiert in diesem Zusammenhang Aeschylus, Pausanias und Plutarch.

Ein hübsches Beispiel der Rekristallisation aus der Frühzeit der Metallverarbeitung ist ein Relief im Grab des Königssohnes Wepemnofret aus der 5. Dynastie (24./23. Jh. v. Chr.) bei Gizeh in Ägypten (Abb. 2): Es zeigt zwei Männer beim Schmieden eines Kupferbleches oder einer Platte. Die Beischriften zitieren deren Gespräch: Der Mann rechts sagt: „Glühe dies aus, es ist spröde, es ist hellfarbiges Metall“, worauf derjenige links entgegnet: „Es gibt keinen Hohlraum[?], wenn sein Ausglühen vortrefflich ist“ (WEINSTEIN 1974 [Zitat hier in Abb. 2]; SCHEEL 1985, 146 Tab. 6,4 [Zitat hier im Text]; 195; GARENNE-MAROT 1985, 97 Abb. 6,2 [französische Übersetzung]). Damit ist klar, dass das bearbeitete Blech (zwischen-)geglüht wird und es dadurch beim Austreiben keine Hohlräume – resp. wohl eher „keine Risse“ – bekommt.

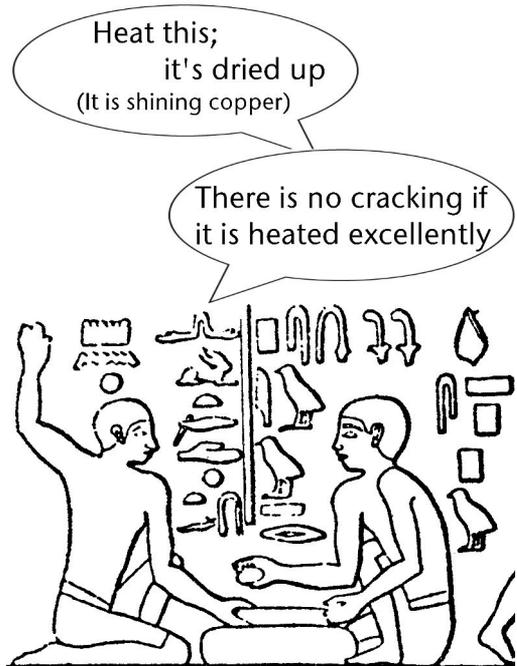


Abb. 2: Grab des Wepemnofret bei Gizeh in Ägypten, Ausschnitt aus einer Darstellung mit Szenen aus einer Metall verarbeitenden Werkstatt: Vermutlich die älteste Darstellung der Rekristallisierung durch Ausglühen (Lesung der Hieroglyphen-Beischriften nach WEINSTEIN 1974, 25). – Grave of Wepemnofret at Gizeh in Egypt, sequence depicting a scene from a metal-working shop: Probably the oldest depiction of recrystallization by annealing (Reading of the hieroglyphics according to WEINSTEIN 1974, 25).

#### Fragestellungen zum Experiment

In der archäometallurgischen Forschung und Ethnologie wird zwischen kaltem Abschrecken und langsamen Abkühlen unterschieden. In Nepal werden frische Güsse mitsamt den Lehmformen in Wasser abgeschreckt, in Thailand jedoch langsam abgekühlt (FURGER 2017, Abb. 103 Anm. 197). Bei Silberschmieden in der Sahara konnte der Autor in den 1970er-Jahren beobachten, dass die Güsse aus Silber nach dem Zwischenglü-



Abb. 3: Beispiel für langsames Abkühlen nach dem Glühen: Ein Touareg-Silberschmied in Agadez/RN (Hamid Kumama, 1973) glüht nach dem Guss ein silbernes Schmuckstück aus (oben) und kühlt es langsam im Sand des Werkstattbodens aus (unten). Jetzt ist es bereit zum Ziselieren mit dem Tremolierstichel. – Example of slow cooling after annealing: After casting, a Touareg silversmith in Agadez/RN (Hamid Kumama, 1973) is annealing a piece of silver jewelry (above) and is cooling it slowly in the sandy floor of the workshop (below). Now it is ready for chiseling using a zigzag-chisel (Tremolierstichel).

hen im Wüstensand langsam abgekühlt (Abb. 3), die frischen *cire-perdu*-Güsse mitsamt den Lehmformen jedoch mit Wasser abgeschreckt wurden.

Es soll im Folgenden nicht anhand moderner Norm-Legierungen, sondern mit in römischer Zeit geläufigen Legierungen untersucht werden,

- zu welcher Verhärtung das Kaltschmieden führt,
- wie die Härtezustände zu verschiedenen Arbeitsstadien objektiv dokumentiert werden können (mit Brinell-Härte; um publizierte Vickershärten [HV] vergleichen zu können, müssen sie [vereinfacht] mit dem Faktor 0,95 multipliziert werden, um Brinellhärten [HBW] zu erhalten),
- zu welchem Grad der Duktilität ein Zwischenglühen führt,
- ob Unterschiede zwischen raschem Abschrecken und langsamen Abkühlen festzustellen sind und
- inwiefern sich die sieben verschiedenen Testlegierungen unterschiedlich verhalten.

#### Die Testlegierungen

Für die folgenden Experimente und Härtebestimmungen wurden sieben Buntmetalle resp. Kupferverbindungen legiert und blanke Bohrspäne davon analysiert (Abb. 4):

##### Gold (G)

Anforderungen und Vorlage: Es sollte eine „unreine“ Goldlegierung für die Schmiede- und Abschreckversuche verwendet werden, die den heterogenen Gemischen im antiken Fundmaterial gerecht wird. Analysen antiker Goldobjekte zeigen oft Spuren von Recycling und anderen Verunreinigungen sowie in der Regel auch viele, von den Erzen herrührende Spurenelemente (DEMORTIER 1984, Tab. 2-4 [nur Au, Ag und Cu analysiert]; MOESTA, FRANKE 1995, 52-56; 68). Schon Natur-

gold, erschmolzen aus gediegenen Fluss-Nuggets, kann mehrere Prozentgehalte von Silber und manchmal auch Spuren von Kupfer enthalten. Es wurde aber auf die Rekonstruktion einer konkreten, analysierten Originalprobe verzichtet. Angestrebt wurde ein Gold von rund 16 Karat mit viel Silber und „Verunreinigungen“ resp. Spuren von Zinn, Zink, Blei, Eisen und Arsen.

Zusammensetzung G: 16,01% Cu, 0,69% Sn, 0,79% Zn, 0,03% Pb, 14,04% Ag, 65,78% Au, 0,17% As, 1,10% Fe.

##### Silber (A)

Anforderungen und Vorlage: Angestrebt war – auf der Basis römischer Silberobjekte – eine Legierung mit rund 80-90% Silber und einem Kupfergehalt, welcher dem Werkstoff eine gute Härte und Strapazierfähigkeit verleiht. Dass in antiken Silbern auch Verunreinigungen von Zinn, Zink, Blei, Gold, Arsen und/oder Eisen vorkommen, haben Analysen etwa an den Löffeln aus Augusta Raurica ergeben (STERN 1982, 45 Abb. 20 Tab. 1).

Zusammensetzung A: 15,95% Cu, 0,57% Sn, 0,40% Zn, 0,23% Pb, 81,14% Ag, 0,34% Au, 0,00% As, 0,16% Fe.

##### Kupfer (K)

Anforderungen und Vorlage: Die dem römischen Gießer und Kupferschmied zugänglichen Kupfer aus den antiken Verhüttungsstätten im Mittelmeergebiet weisen eine erstaunlich hohe Reinheit auf und waren dadurch auch sehr gut für Treibarbeiten geeignet (FURGER, RIEDERER 1995, 161f. Tab. 11 [97,26-99,84% Cu, Rest div. Spurenelemente]). Absolut reine Metalle wie Kupfer „*verändern durch Abschrecken ihre Struktur nicht*“ (HILPKE 1956, 192), sie kommen im archäologischen Fundstoff aber auch nie chemisch rein vor. Verunreinigungen in verhüttetem Kupfer, wie etwa von Strontium, Arsen, Nickel, Silber und noch geringeren Spuren anderer Metalle, ergeben Kupfer mit

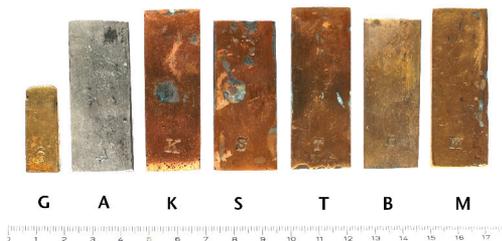


Abb. 4: Sieben experimentell rekonstruierte Kupferlegierungen, vor den Schmiede-, Härtings- und Rekristallisierungsversuchen (Legierungen siehe Text, Brinell-Härten Tab. 1. Verkleinert (Plättchenbreite 20 mm). – Seven experimentally reconstructed copper-alloys before forging-, annealing- and recrystallization trials. (Alloys see text, Brinell-hardness table 1. Reduced (flat blank width 20 mm).

rund 97 bis 99,97% Cu. In der Natur gediegen vorkommendes Kupfer hat meist ähnlich hohe Kupferkonzentrationen >98% Cu, auch wenn Verunreinigungen wie mit Silber, Arsen, Eisen, Nickel, Zink usw. im Promillebereich zu messen sind (RIEDERER 1981, Tab. 21-23; RAPP 1988, Tab. 2,2; WAYMAN, DUKE 1999, Tab. 2). Für unsere Experimente wurde ein Stück gediegenes Kupfer – in Ermangelung eines Stücks aus Osteuropa oder aus dem Nahen Osten – aus Arizona/USA eingeschmolzen (Abb. 4,K).

Zusammensetzung K: 99,79% Cu, 0,07% Sn, 0,00% Zn, 0,00% Pb, 0,00% Ag, 0,00% Au, 0,01% As, 0,08% Fe.

#### Zinnbronze 1 (S)

Anforderungen und Vorlage: Hier sollte eine Zinnbronze gehämmert und ihre Härteveränderungen gemessen werden, wie sie in der Antike für Schmiedearbeiten im Einsatz war. Römische Halbfabrikate aus Zinnbronzen (und Zinnmessing) weisen in der Regel diverse Spurenelemente im Promille- bis Prozentbereich auf (FURGER, RIEDERER 1995, 162-164 Tab. 13 und 17). „Pate“ stand ein kleines stäbchenförmiges

Schmiede-Halbfabrikat aus Augusta Raurica (Inv.-Nr. 1949.1975: FURGER, RIEDERER 1995, 150f., Legierung S, Anm. 84, Tab. 9,S), dessen Legierung rekonstruiert wurde. Mit etwas über 3% Sn ist die Legierung noch gut schmiedbar, der Bleianteil von nur 0,08% macht sich noch nicht als „Sprödemacher“ negativ bemerkbar (FURGER, RIEDERER 1995, 156, Legierung S, Tab. 10) und fehlendes Zink und Gold sprechen für eine Bronze mit kaum einer langen Rezyklierungs-Geschichte.

Zusammensetzung S: 96,00% Cu, 3,72% Sn, 0,00% Zn, 0,08% Pb, 0,00% Ag, 0,00% Au, 0,00% As, 0,12% Fe.

#### Zinnbronze 2 (T)

Anforderungen und Vorlage: Als Basis diente ein römisches, dünn ausgetriebenes Gefäßbruchstück aus einer Zinnbronze mit etwa dem doppelten Zinngehalt von Probe S. Probe T weist insgesamt weniger Kupfer auf als S und ist auch deutlich stärker „verunreinigt“ mit Zink und Blei, was vermutlich auf Altmetall-Recycling zurückgeführt werden muss (RIEDERER 1981, Tab. 25-28). Mit unseren Hammer- und Abschreckversuchen sollte herausgefunden werden, ob sich eine solche relativ heterogene Bronze immer noch gut für die Schmiede- und Treibarbeit eignet oder vom (antiken) Handwerker eine besonders aufmerksame und subtile Bearbeitung erfordert.

Zusammensetzung T: 92,00% Cu, 7,05% Sn, 0,27% Zn, 0,44% Pb, 0,00% Ag, 0,00% Au, 0,00% As, 0,12% Fe.

#### Bleibronze (B)

Anforderungen und Vorlage: Bleibronzen waren in der Antike je länger je beliebter geworden, einerseits weil die Legierungen mit dem billigen Blei kostengünstig gestreckt werden konnten (STERN 1982, 50f.) und andererseits weil eine bleireiche Bronze als Gussstück gut spanabhebend bearbeitet werden kann – zum Beispiel auf der Drehbank. Unter den zahlreichen

römischen Halbfabrikaten aus Bronze-  
werkstätten in Augusta Raurica finden  
sich mehrere Stücke mit 15-37% Pb (FUR-  
GER, RIEDERER 1995, 162 Tab. 15). Unsere  
Testlegierung weist noch nicht so viel Blei  
auf wie manche Statuengüsse (>20% Pb;  
FURGER, RIEDERER 1995, 150f., Anm. 78-  
79, Tab. 9, Legierungen P1 und P2) und  
bildet die Zusammensetzung einer Kas-  
serolle aus Augusta Raurica ab, die zu-  
erst gegossen, dann getrieben und an-  
schliessend wahrscheinlich auch gedrückt  
worden ist (FURGER, RIEDERER 1995, 150f.,  
Anm. 80, Tab. 9, Legierung K). Die Legie-  
rung wird charakterisiert durch hohe Zinn-  
und Bleigehalte, die Abwesenheit von  
Zink und die Tatsache, dass sie trotz des  
hohen Bleianteils in antiker Zeit durchaus  
stark verformt worden ist.

Zusammensetzung B: 74,58% Cu,  
11,37% Sn, 0,00% Zn, 13,86% Pb, 0,00%  
Ag, 0,00% Au, 0,00% As, 0,02% Fe.

#### Messing (M)

Anforderungen und Vorlage: Die Messing-  
e der Antike sind im Zementationsver-  
fahren aus metallischem Kupfer und ei-  
nem Zinkerz hergestellt worden. Ihr Zink-  
anteil kann mit diesem Verfahren nicht so  
genau gesteuert werden wie beim Legie-  
ren von exakt eingewogenen metallischen  
Komponenten. Die römischen Messing-  
Halbfabrikate aus Augusta Raurica ent-  
halten deshalb Zinkanteile zwischen etwa  
5% bis maximal 23% und als Verunrei-  
nungen immer auch geringe Spuren vieler  
anderer Metalle (FURGER, RIEDERER 1995,  
163f. Tab. 16-18). Es ist im Einzelfall ab-  
zuschätzen, ob diese Spuren vom antiken  
Rezyklieren oder aus den verhütteten Er-  
zen stammen. Die physikalischen Zusam-  
menhänge zwischen verschiedenen Mes-  
singlegierungen, der Glühdauer, Glüh-  
temperatur und Härte fasst u. a. Heinz HILPKE  
(1956, 193) zusammen.

Anders als bei unseren Zinnbronze-Test-  
legierungen (S und T) wurde nur ein Mes-  
sing rekonstruiert. Es sollte eine typische

römische Mischlegierung sein, die mit  
rund 7% Zink ein Messing darstellt, aber  
auch die Nebenkompenten Zinn (ca.  
5%) und – vom Original etwas abwei-  
chend – auch etwas Blei (ca. 2%) enthält.  
Nach der Definition von Josef Riederer  
wäre das ein Zinnmessing. Das Vorbild ist  
ein 77 mm langes Schmiedehalbfabrikat  
mit deutlichen Hammerspuren aus Augu-  
sta Raurica (Inv.-Nr. 1985.29855: FURGER,  
RIEDERER 1995, 134; 163f. Tab. 17).

Zusammensetzung M: 84,87% Cu, 4,64%  
Sn, 7,35% Zn, 1,85% Pb, 1,11% Ag,  
0,00% Au, 0,00% As, 0,06% Fe.

#### Durchführung des Experiments

Alle sieben Legierungen wurden in ein-  
heitlich große Plättchen gegossen und  
auf rund 2 × 5,5 cm Grösse und 3,4 bis  
3,8 mm Dicke gebracht (Abb. 4). Nur für  
Gold stand ein kleineres Stück von 30 ×  
11 × 3,8 mm zur Verfügung. Die in Was-  
ser abgeschreckte Guss Härte der Plätt-  
chen bildet die erste Messreihe. Zur An-  
wendung kam ein auf Brinell-Härte einge-  
richtetes Messgerät im Labor der Georg  
Fischer AG in Schaffhausen. Gemessen  
wurde mit einer 2,5 mm-Kugel und mit  
62,5 kp Prüfkraft. Von jedem Zwischen-  
zustand während der Schmiede- und  
Glüh-Etappen wurden drei Punkte in Ab-  
ständen von ca. 1 cm gemessen. Die in  
den Abb. 6-12 wiedergegeben Werte sind  
immer die Mittelwerte der drei Einzelmess-  
ungen (sämtliche Werte in Tab. 1).

Für die Beantwortung der Fragestellun-  
gen (s. oben) war vorgesehen, alle Legie-  
rungen schrittweise auszuschiessen und  
immer wieder die Härte zu messen. Als  
Hammer diente ein 250 Gramm leichter  
Goldschmiede-„Bretthammer“ mit runder  
polierter Bahn und schwach konvexer  
Wölbung. Jeder Schmiedevorgang um-  
fasste 40 resp. 70 (beim Gold 30 resp.  
50) möglichst gleichmäßige, über die Vor-  
derhälfte der Plättchen regelmäßig ver-  
teilte Hammerschläge (Abb. 5; s. Tab. 1).



Abb. 5: Die sieben experimentell rekonstruierten Kupferlegierungen von Abbildung 4 nach den Schmiede-, Härtings- und Rekristallisierungsversuchen. Verkleinert (Plättchenbreite ursprünglich 20 mm). – The seven experimentally reconstructed copper alloys in fig. 4 after forging-, annealing- and recrystallization trials. Reduced (original flat blank width 20 mm).

Jeweils vier solcher Schmiede-Serien sollten zeigen, wie sich die Oberflächenhärte steigert und wo allfällige Unterschiede zwischen den Testlegierungen festzustellen sind. Nach vier Schmiede-Vorgängen wurden die Metallproben im Muffelofen bei 650°C geglüht (BAYLEY, BUTCHER 2004, 31 [Phasenbildung und optimale Restrukturierungstemperatur]): das erste und das zweite Mal während je einer Stunde und das dritte Mal während einer halben Stunde.

Am Ende des ersten Ausglühens wurden die Stücke in kaltem Wasser abgeschreckt; beim zweiten Glühen in feinem Quarzsand gesteckt und langsam abgekühlt (analog Abb. 3) und beim dritten Glühen wiederum in Wasser abgeschreckt.

## Ergebnisse

Der Wechsel von Hämmern und nochmaligem Hämmern, Ausglühen und Abschrecken, nochmaligem wiederholtem Hämmern, Glühen und Abschrecken etc. führt in den meisten Fällen zu einem fast identischen Kurvenverlauf der Härtegrade (Abb. 6-12): Die Härte nimmt mit zunehmendem Schmieden mehr oder weniger kontinuierlich zu und bei jedem Zwischenglühen und Abschrecken wird das Material wieder etwa so duktil wie nach dem Guss. Das ist der Trend bei allen getesteten Legierungen, aber bei näherem Zusehen gibt es signifikante Unterschiede:

### Gold (G)

Die früher oft zitierte Meinung, Gold würde durch Hämmern nicht hart und müsse daher auch nicht zwischengeglüht werden, ist heute zum Glück verschwunden (FOLTZ 1979, 219f.). Was jedoch beim Gold (G) anders verläuft als bei Silber und Kupferlegierungen, geht aus Abb. 6 hervor: Einerseits ist ein grosser Verhärtungseffekt nur nach sehr intensiver Hammerarbeit zu erzielen und andererseits reagiert eine Goldlegierung offenbar beim langsamen Abkühlen ganz anders als alle anderen unserer Testlegierungen: Es findet fast keine Rekristallisierung resp. Erweichung statt (von 173 auf 161 HBW; Abb. 6,2). Dieses spezielle Werkstoffverhalten ist im Goldschmiedehandwerk bekannt: „Es ist ein Irrtum zu glauben, dass die Sprödigkeit von Goldlegierungen durch langsames Abkühlen gemindert wird. Das Gegenteil ist der Fall! – Auf der schon nach dem Löten usw. beim langsamen Abkühlen deutlich wahrnehmbaren Härtezunahme beruhen auch die Vergütungsmöglichkeiten, namentlich der kupferreichen Goldlegierungen“ (DIEBENER 1991, 14).

Der Metallurge Werner Menk schreibt zu diesem Phänomen: „Ich glaube nicht,

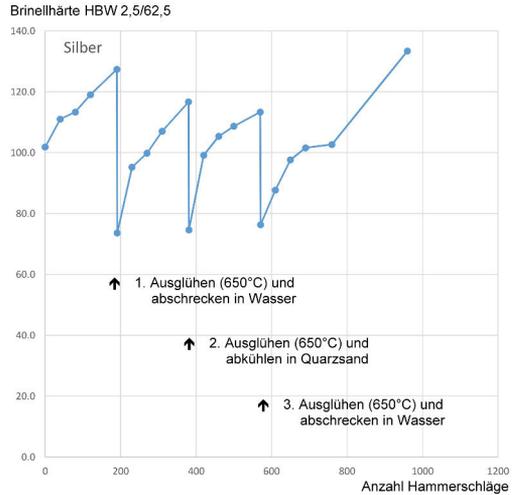
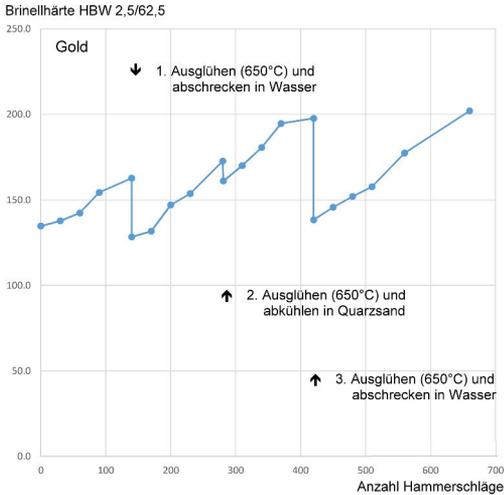


Abb. 6: Experiment „Schmieden-Glühen-Abschrecken“: Härteentwicklung (Brinellhärte HBW 2,5/62,5) beim Schmieden und beim Ausglühen und Abschrecken von Gold (G). Die kleine Metalloberfläche (Abb. 4) wurde mit gleichmäßigen, gezählten Schlägen eines leichten Bankhammers geschmiedet. Basis: Mittelwerte von je drei Messungen, Tab. 1. – Experiment “forging-annealing-quenching”: development of hardness (Brinell-hardness HBW 2,5 /62,5) during forging, annealing and quenching of gold (G). The small metal-surface (fig. 4) was forged with evenly counted strokes of a light goldsmith’s hammer. Base: Mean value of three measurements each, table 1.

Abb. 7: Experiment „Schmieden-Glühen-Abschrecken“: Härteentwicklung (Brinellhärte HBW 2,5/62,5) beim Schmieden und beim Ausglühen und Abschrecken von Silber (A). Die kleine Metalloberfläche (Abb. 4) wurde mit gleichmäßigen, gezählten Schlägen eines leichten Bankhammers geschmiedet. Basis: Mittelwerte von je drei Messungen, Tab. 1. – Experiment “forging-annealing-quenching”: development of hardness (Brinell-hardness HBW 2,5 /6.25) during forging, annealing and quenching of silver (A). The small metal surface (fig. 4) was forged with evenly counted strokes of a light goldsmith’s hammer. Base: Mean value of three measurements each, table 1.

dass der geringe Härteabfall dabei etwas mit der geringen Probenmasse [Abb. 4, links] zu tun hat. Eine geringere Masse könnte ja höchstens zu einer schnelleren Abschreckung führen und damit den Härteabfall eher verstärken. Vielmehr passiert bei Ihrer Wärmebehandlung möglicherweise mehr als nur eine Rekristallisation des Gefüges und ein Abbau der Eigenspannungen, sondern es ist auch möglich, dass (härtende) Ausscheidungen dabei gelöst werden (bei 650° C) und im Falle einer schnellen Abkühlung in übersättigter Lösung gehalten werden, wo-

durch die Härte sinkt. Bei einer langsamen Abkühlung können sich diese in Lösung gehaltenen Elemente aber wieder ausscheiden und damit zu einer Härtung führen. Ich denke, so etwas ist in Ihrer Gold-Legierung passiert [...]“.

Beim raschen Abschrecken in Wasser allerdings tritt eine ganz normale Rekristallisation und eine Wiedererweichung ein (DIEBENER 1963, 61). Dies führte bei unserer 16-karätigen Gold-Kupferlegierung zu einer Brinell-Härtedifferenz von 34-60 HBW (Abb. 12,1.3). Die bei unserer 16karätigen Goldlegierung ermittelte Här-

te-Spannweite erstreckt sich von 128 bis 202 HBW (Tab. 1). Diese von uns erzeugte obere Härtegrenze passt gut zum Walzergebnis von 14karätigem Gold mit 192-215 HBW (DIEBENER 1963, 59 Tab. 3). Bei nicht legiertem Reingold sind jedoch lediglich Härten von 87-135 HBW zu erzielen (HEALY 1978, 230 Anm. 38).

### Silber (A)

Silber (A; Abb. 7) – mit immerhin 81% Ag – verhält sich bezüglich Verhärtung beim Bearbeiten und Wiedererlangen seiner Duktilität beim Zwischenglühen und Abschrecken ganz ähnlich wie die Kupferlegierungen (s. unten). Es fällt auf, dass der abgeschreckte Guss mit 102 HBW viel härter erstarrte als nach den drei experimentellen Rekristallisierungen (74-76 HBW). Silber lässt sich dank seiner hervorragenden Eigenschaften als Treibmetall lange ohne Rissbildungen ausschmieden (Abb. 5,A); der Verhärtungseffekt ist jedoch geringer als bei Kupferlegierungen, die mit Zinn oder Zink legiert sind. Unsere Silberprobe ließ sich bis zu einer Härte von 133 HBW ausschmieden (Abb. 7, Tab. 1). Durch Walzen von 800er-Silber wird praktisch dieselbe Härte von 135 HBW erzeugt (DIEBENER 1963, 59 Tab. 3).

### Kupfer (K)

Beim Kupfer (K; Abb. 8) nimmt die Verhärtung zu Beginn der Hammerarbeit am meisten zu (REHDER 1989, Abb. 1). In geringem Maße ist dieser Effekt auch bei Zinnbronze 1 (S; Abb. 9), Messing (M; Abb. 12) und Silber (A; Abb. 7), nicht jedoch bei Zinnbronze 2 (T) und Bleibronze (B) zu beobachten. Bei der Weiterarbeit mit dem Schmiedehammer steigert sich der Härtungseffekt nur noch langsam. Selbst bei den letzten 200 Hammerschlägen überstieg die Materialhärte 92 HBW nicht. Cecil Henry Desch gelang es sogar, Kupfer durch Hämmern von 87 Brinell-Härtegraden auf bis zu 135 HB zu bringen (DESCH 1927; AGRAWAL 1971, 178). Der

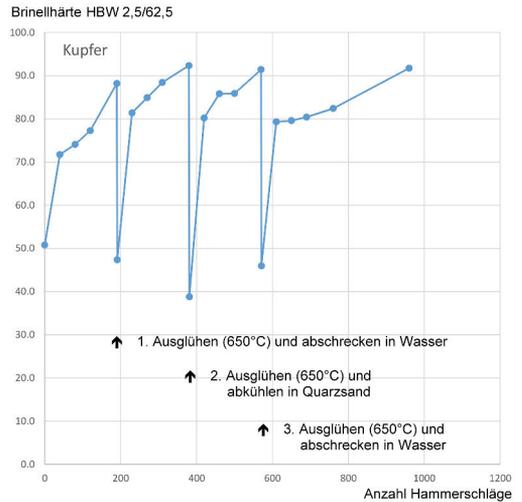


Abb. 8: Experiment „Schmieden-Glühen-Abschrecken“: Härteentwicklung (Brinellhärte HBW 2,5/62,5) beim Schmieden und beim Ausglühen und Abschrecken von gediegenem Natur-Reinkupfer (K). Die kleine Metalloberfläche (Abb. 4) wurde mit gleichmäßigen, gezählten Schlägen eines leichten Bankhammers geschmiedet. Basis: Mittelwerte von je drei Messungen, Tab. 1. – Experiment “forging-annealing-queenching”: development of hardness (Brinell-hardness HBW 2,5 /6.25) during forging, annealing and quenching naturally occurring pure copper (K). The small metal surface (fig. 4) was forged with evenly counted strokes of a light goldsmith’s hammer. Base: Mean value of three measurements each, table 1.

Rekristallisierungseffekt führt bei schnellem Abschrecken in Wasser zu 46-47 HBW, ähnlich wie der Rohguss (51 HBW). Beim langsamen Abkühlen im Sand fällt die Härte jedoch auf tiefe 39 HBW! Dieser Effekt ist sonst nur noch bei Bleibronze zu beobachten (Abb. 11) und bei Gold fällt er extrem schwach aus (Abb. 6; s. oben).

### Zinnbronzen (S, T)

Die Zinnbronze 1 (S; Abb. 9) verhält sich

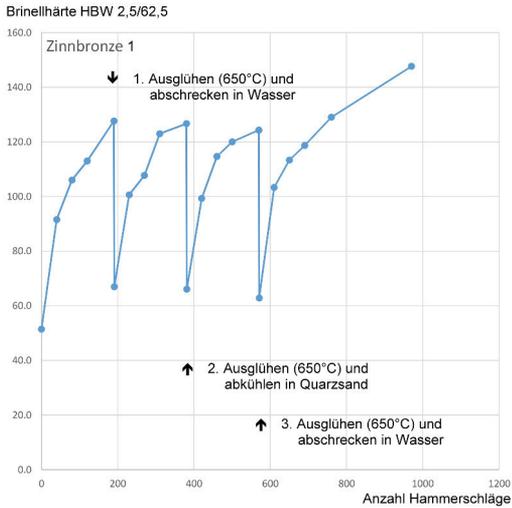


Abb. 9: Experiment „Schmieden-Glühen-Abschrecken“: Härteentwicklung (Brinellhärte HBW 2,5/62,5) beim Schmieden und beim Ausglühen und Abschrecken von Zinnbronze 1 (S). Die kleine Metalloberfläche (Abb. 4) wurde mit gleichmäßigen, gezählten Schlägen eines leichten Bankhammers geschmiedet. Basis: Mittelwerte von je drei Messungen, Tab. 1. – Experiment “forging-annealing-queenching”: development of hardness (Brinellhardness HBW 2,5 /62,5) during forging, annealing and quenching of tin bronze 1 (S). The small metal-surface (fig. 4) was forged with evenly counted strokes of a light goldsmith’s hammer. Base: Mean values of three measurements each, table 1.

ähnlich wie Kupfer (REHDER 1989, Abb. 1; PAPADIMITRIOU 2001, Tab. 1 Abb. 5; 6; 10). Mit zunehmendem Zinngehalt wird die Legierung generell härter – auch in ausgeglühtem Zustand (3,72% Sn:  $\geq 51$  HBW). Nach Erhard BREPOHL (2000, 89 Tab. 1.11) ist eine gegläute 4%Sn-Bronze 70 HBW hart und steigert sich bis 115 HBW bei 14% Sn. Durch Kaltschmieden allerdings erhärtet sich das Material nicht linear, sondern mit steigendem Zinngehalt verstärkt (PLEINER 2006, 68 Abb. 28). Zinnbronze 1 ist – in unserem Fall mit

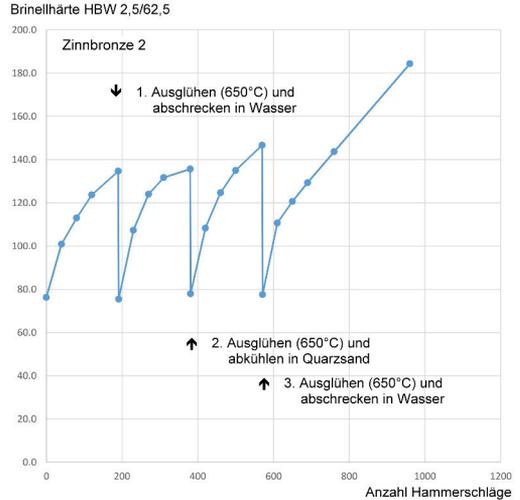


Abb. 10: Experiment „Schmieden-Glühen-Abschrecken“: Härteentwicklung (Brinellhärte HBW 2,5/62,5) beim Schmieden und beim Ausglühen und Abschrecken von Zinnbronze 2 (T). Die kleine Metalloberfläche (Abb. 4) wurde mit gleichmäßigen, gezählten Schlägen eines leichten Bankhammers geschmiedet. Basis: Mittelwerte von je drei Messungen, Tab. 1. – Experiment “forging-annealing-queenching”: development of hardness (Brinellhardness HBW 2,5 /62,5) during forging, annealing and quenching of tin bronze 2 (T). The small metal-surface (fig. 4) was forged with evenly counted strokes of a light goldsmith’s hammer. Base: Mean values of three measurements each, table 1.

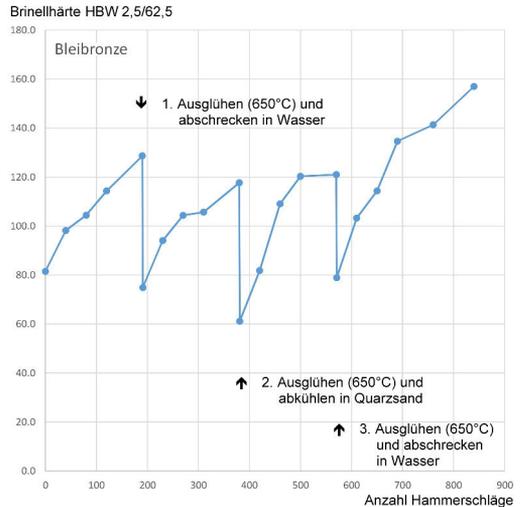
3,72% Sn – nach dem Rekristallisieren deutlich härter (um 63-66 HBW) als das bekannterweise weiche Kupfer. Durch sehr langes, forciertes Ausschmieden (Abb. 5) lässt sich die Härte von Zinnbronze 1 noch deutlich über das übliche Maß beim Schmieden steigern, in unserem Fall auf rund 148 HBW. Andere Experimente durch C. S. Smith kamen zu einem ähnlichen Ergebnis, jedoch mit etwas größerer Bandbreite: von rund 57 HBW gegläht bis etwa 162 HBW kalt gehämmert (PLEINER 2006, 68 Abb. 28 [HV]).

Noch viel deutlicher hat Zinnbronze 2 mit 7% Sn (T; *Abb. 10*) das Potential, durch sehr langes Hämmern hart zu werden. Mit 184 HBW war die größte Härte unter den Buntmetallen zu erreichen (Gold: 202 HBW; *Tab. 1*). Es wird gerne übersehen, dass eine derart gehärtete Zinnbronze einem normalen und nicht gehärteten Eisen bezüglich Härte deutlich überlegen ist, denn einfache Verhüttungseisen weisen nur Härten von 75-110 HBW auf (FURGER in Vorb.)! Von einem technischen Fortschritt eisenzeitlicher Metallurgie kann erst gesprochen werden, wenn kohlenstoffhaltige Stähle erzeugt und mit den richtigen Methoden gehärtet werden.

Unsere Zinnbronze 2 ist jedoch schon in entspanntem Zustand ziemlich hart (um 78 HBW). Ronald-Frank TYLECOTE (1973, 3) konnte anhand einer noch höher legierten Bronze (mit 13,6% Sn) nach dem Gießen, Hämmern, Zwischenglühen und erneutem Schmieden sogar eine Vickershärte von 224 HV2.5 (ca. 213 HBW) messen. Gerade diese alt bekannte Tatsache hat schon in den frühen Metallzeiten dazu geführt, dass sehr rasch Zinnbronzen für Waffen und Werkzeuge dem Kupfer vorgezogen worden sind (KIENLIN 2007, *Abb. 6; 8*).

### Bleibronze (B)

Bleibronze (B; *Abb. 11*) ist bekanntlich viel spröder und schwieriger zu schmieden als kupferreichere Bronzen und Messinge (FURGER, RIEDERER 1995, 155ff. *Abb. 11-13*; OTTAWAY, WANG 2004, 71; 84). Rasch bildeten sich unter dem Hammer des neuzeitlichen Experimentators – anders als beim erfahrenen römischen Handwerker (FURGER, RIEDERER 1995, 150f.) – Haarrisse (*Tab. 1*) und es müsste viel öfters zwischengeglüht werden als bei anderen Buntmetallen. Durch intensive Hammerbearbeitung „bis zum Geht-nicht-mehr“ (Bruch; *Abb. 5,B*) lässt sich aber eine beachtliche Härte von 157 HBW erzielen.



*Abb. 11: Experiment „Schmieden-Glühen-Abschrecken“: Härteentwicklung (Brinellhärte HBW 2,5/62,5) beim Schmieden und beim Ausglühen und Abschrecken von Bleibronze (B). Die kleine Metalloberfläche (*Abb. 4*) wurde mit gleichmäßigen, gezählten Schlägen eines leichten Bankhammers geschmiedet. Basis: Mittelwerte von je drei Messungen, *Tab. 1*. – Experiment “forging-annealing-quenching”: development of hardness (Brinellhardness HBW 2,5 /62,5) during forging, annealing and quenching of lead bronze 2 (B). The small metal-surface (*fig. 4*) was forged with evenly counted strokes of a light goldsmith’s hammer. Base: Mean values of three measurements each, *table 1*.*

### Messing (M)

Das 7,35Zn-Messing (M, mit 4,64% Sn und 1,85% Pb; *Abb. 12*) lässt sich offenbar beliebig oft Schmieden und Abschrecken mit gleichbleibendem Effekt und es macht auch keinen Unterschied, ob es schnell oder langsam abgekühlt wird. Es erfordert jedoch eine sehr behutsame Hammerarbeit, da es rasch reißen kann (*Abb. 5,M; Tab. 1*). Durch langes Aus Schmieden und sorgsames Verdichten konnte ich – ausgehend von geglühten 70 HBW – immerhin 176 HBW erreichen,

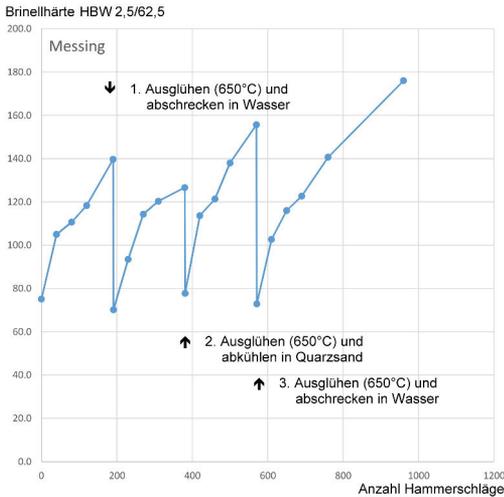


Abb. 12: Experiment „Schmieden-Glühen-Abschrecken“: Härteentwicklung (Brinellhärte HBW 2,5/62,5) beim Schmieden und beim Ausglühen und Abschrecken von Messing (M). Die kleine Metalloberfläche (Abb. 4) wurde mit gleichmäßigen, gezählten Schlägen eines leichten Bankhammers geschmiedet. Basis: Mittelwerte von je drei Messungen, Tab. 1. – Experiment “forging-annealing-quenching”: development of hardness (Brinell-hardness HBW 2,5 /62,5) during forging, annealing and quenching of brass (M). The small metal-surface (fig. 4) was forged with evenly counted strokes of a light goldsmith’s hammer. Base: Mean values of three measurements each, table 1.

ohne dass das Metall weiter riss. Geglühte, niedrig legierte Messinge weisen normalerweise 60-70 HBW auf und sind erst mit höheren Zinkanteilen härter (80 HBW bei 37% Zn; BREPOHL 2000, 89 Tab. 1.11).

#### Ausblick

Archäologische Belege für das Ausglühen und Abschrecken von geschmiedeten Buntmetall-Halbfabrikaten in antiker Zeit sind fast nur durch die Metallurgie, d. h., durch Gefüge- und Härteuntersuchungen am Fundobjekt selbst zu erkennen (THO-

MAS ET AL. 2008, 39). Das Ausglühen ist in jedem Holzkohle-Herdfeuer zu bewerkstelligen und erfordert keine spezielle Werkstatteinrichtung. So wird auf Ausgrabungen wohl kaum je eine eindeutige Struktur zum Ausglühen und Abschrecken gefunden. Das einzige mir bekannte, jedoch unsichere Beispiel stammt aus Bad Wimpfen/D, wo weit eines vermuteten römischen Schmelzofens „sich eine in das Erdreich eingetieft Feuermulde, die zum Glühen getriebener Bleche gedient haben könnte“, fand (FILGIS, PIETSCH 1986, 532).

Sekundär verwendete Amphoren hingegen, die als Wasserbecken zum Abschrecken glühender Metallwerkstücke dienen, sind mancherorts in die Werkstattböden von Schmieden und Bronzeießereien eingetieft worden (z. B. MARTIN-KILCHER 1987, 177-180 Abb. 102-105).

In der vorliegenden Arbeit wird bewusst nicht mit „reinen“ modernen Industrielegierungen, die so oft in archäometrischen Experimenten verwendet werden, gearbeitet. Die extra legierten Ausgangsproben unserer Versuche waren konsequent Mischlegierungen mit Verunreinigungen resp. Spuren von Recyclingprozessen, wie sie im antiken Alltag üblich waren.

Es erstaunt eigentlich, dass Kupferlegierungen – sowohl Bronzen als auch Messinge – und die Edelmetalle Silber und Gold sich beim Schmieden und Ausglühen ganz ähnlich verhalten. Ob das Abkühlen langsam – an der Luft oder im Sand – erfolgen sollte oder ob rasch in Wasser abzuschrecken ist, hängt ganz vom Arbeitsprozess ab: Will man ein ausgeglichenes Metallgefüge, zum Beispiel in einem Rohguss, so kühlt man eher langsam ab; will man nach der durch langes Verformen bedingten Erhärtung eine optimale Erlangung der alten Duktilität, so wird man abschrecken.

Die konkreten Ergebnisse unserer Versuche und Härtemessungen zeigen u. a., dass die Spanne zwischen weichem Zu-

Bez.	Bearbeitung	Schf.	HBW 1	HBW2	HBW3	HBW 0	HV	Dicke (mm)	Bem.
Leg. G	gegossen + nass abgeschreckt	0	136,0	136,0	132,0	134,7	142	3,8	
Leg. G	30x sanft gehämmert*	30	136,0	141,0	136,0	137,7	145	3,7	*) kl. Fläche!
Leg. G	30x gehämmert	60	148,0	135,0	144,0	142,3	150	3,6	
Leg. G	70x gehämmert	90	150,0	165,0	148,0	154,3	162	3,5	
Leg. G	50x gehämmert	140	155,0	168,0	165,0	162,7	171	3,2	
Leg. G	geglüht 650°C, in Wasser kalt	140	132,0	129,0	134,0	128,3	135	3,2	
Leg. G	30x sanft gehämmert	170	135,0	130,0	130,0	131,7	139	3,2	
Leg. G	30x gehämmert	200	150,0	142,0	149,0	147,0	155	3,1	
Leg. G	30x gehämmert	230	147,0	163,0	151,0	153,7	162	2,9	
Leg. G	50x gehämmert	280	176,0	173,0	169,0	172,7	182	2,8	
Leg. G	geglüht 650°C, im Sand geküht	281	166,0	157,0	160,0	161,0	169	2,8	
Leg. G	30x gehämmert	310	167,0	170,0	172,0	170,0	179	2,6	
Leg. G	30x gehämmert	340	185,0	177,0	180,0	180,7	190	2,5	
Leg. G	30x gehämmert	370	200,0	186,0	198,0	194,7	205	2,4	feiner Haarriss
Leg. G	50x gehämmert	420	195,0	195,0	203,0	197,7	208	2,4	
Leg. G	geglüht 650°C, in Wasser kalt	420	148,0	134,0	133,0	138,3	146	2,4	
Leg. G	30x gehämmert	450	142,0	141,0	154,0	145,7	153	2,2	
Leg. G	30x gehämmert	480	154,0	161,0	141,0	152,0	160	2,1	
Leg. G	30x gehämmert	510	171,0	148,0	154,0	157,7	166	2,0	
Leg. G	50x gehämmert	590	167,0	183,0	182,0	177,3	187	1,9	
Leg. G	100 Schläge ohne Rissbildung	690	213,0	202,0	191,0	202,0	213	1,4	
Leg. A	gegossen + nass abgeschreckt	0	99,7	97,8	108,0	101,8	107	3,7	
Leg. A	40x sanft gehämmert	40	123,0	103,0	107,0	111,0	117	3,6	
Leg. A	40x gehämmert	80	114,0	109,0	117,0	113,3	119	3,5	
Leg. A	40x gehämmert	120	116,0	120,0	121,0	119,0	125	3,5	
Leg. A	70x gehämmert	190	131,0	120,0	131,0	127,3	134	3,4	
Leg. A	geglüht 650°C, in Wasser kalt	191	76,4	71,8	72,6	73,6	77	3,4	
Leg. A	40x sanft gehämmert	230	90,3	101,0	94,3	95,2	100	3,2	
Leg. A	40x gehämmert	270	101,0	106,0	92,5	99,8	105	3,1	
Leg. A	40x gehämmert	310	113,0	106,0	102,0	107,0	113	3,0	
Leg. A	70x gehämmert	380	118,0	119,0	113,0	116,7	123	2,9	
Leg. A	geglüht 650°C, im Sand geküht	391	73,6	72,0	78,2	74,6	79	2,9	
Leg. A	40x gehämmert	420	107,0	89,0	101,0	99,1	104	2,7	
Leg. A	40x gehämmert	460	106,0	101,0	109,0	105,3	111	2,5	
Leg. A	40x gehämmert	500	108,0	104,0	114,0	108,7	114	2,4	
Leg. A	70x gehämmert	570	113,0	109,0	118,0	113,3	119	2,4	
Leg. A	geglüht 650°C, in Wasser kalt	571	75,6	75,4	77,9	76,3	80	2,4	
Leg. A	40x gehämmert	610	81,0	93,0	86,7	87,7	92	2,3	
Leg. A	40x gehämmert	650	101,0	96,1	95,8	97,6	103	2,2	
Leg. A	40x gehämmert	690	98,7	103,0	103,0	101,6	107	2,1	
Leg. A	70x gehämmert	760	105,0	102,0	101,0	102,7	108	2,0	
Leg. A	200 Schläge ohne Rissbildung	960	131,0	133,0	136,0	133,3	140	1,2	
Leg. K	gegossen + nass abgeschreckt	0	58,2	45,8	48,3	50,8	53	3,4	
Leg. K	40x sanft gehämmert	40	67,5	65,6	82,1	71,7	76	3,3	
Leg. K	40x gehämmert	80	68,5	75,6	78,1	74,1	78	3,0	
Leg. K	40x gehämmert	120	83,5	70,3	78,0	77,3	81	2,8	
Leg. K	70x gehämmert	190	87,2	88,4	89,0	88,2	93	2,5	
Leg. K	geglüht 650°C, in Wasser kalt	191	49,1	50,8	42,1	47,3	50	2,5	
Leg. K	40x sanft gehämmert	230	80,0	78,6	85,5	81,4	86	2,3	
Leg. K	40x gehämmert	270	85,1	86,6	83,0	84,9	89	2,0	
Leg. K	40x gehämmert	310	90,6	89,7	85,0	88,4	93	1,9	R. ausgefranst
Leg. K	70x gehämmert	380	92,4	91,9	92,7	92,3	97	1,8	
Leg. K	geglüht 650°C, im Sand geküht	391	29,5	44,1	42,7	38,8	41	1,8	
Leg. K	40x gehämmert	420	75,7	82,5	82,4	80,2	84	1,7	eingeringelt
Leg. K	40x gehämmert	460	85,8	90,0	81,6	85,8	90	1,6	
Leg. K	40x gehämmert	500	79,7	82,9	88,7	85,9	90	1,5	
Leg. K	70x gehämmert	570	92,6	90,9	90,7	91,4	96	1,4	
Leg. K	geglüht 650°C, in Wasser kalt	571	45,6	45,5	46,7	45,9	48	1,4	
Leg. K	40x gehämmert	610	81,4	80,9	75,6	79,3	83	1,3	
Leg. K	40x gehämmert	650	80,3	75,9	82,3	79,6	84	1,2	
Leg. K	70x gehämmert	690	83,5	79,0	78,7	80,4	85	1,2	
Leg. K	40x gehämmert	760	84,3	82,5	80,4	82,4	87	1,1	
Leg. K	200 Schläge ohne Rissbildung	960	92,1	87,5	95,6	91,7	97	0,8	
Leg. S	gegossen + nass abgeschreckt	0	50,2	49,9	54,2	51,4	54	3,4	
Leg. S	40x sanft gehämmert	40	82,4	97,0	95,3	91,6	96	3,2	
Leg. S	40x gehämmert	80	119,0	95,1	104,0	106,0	112	3,1	
Leg. S	40x gehämmert	120	120,0	117,0	102,0	113,0	119	2,8	
Leg. S	70x gehämmert	190	143,0	127,0	113,0	127,7	134	2,6	
Leg. S	geglüht 650°C, in Wasser kalt	191	62,2	69,0	69,6	66,9	70	2,6	
Leg. S	40x sanft gehämmert	230	106,0	93,0	102,0	100,6	106	2,4	
Leg. S	40x gehämmert	270	118,0	99,2	106,0	107,7	113	2,4	
Leg. S	40x gehämmert	310	127,0	124,0	118,0	123,0	129	2,2	
Leg. S	70x gehämmert	380	125,0	128,0	127,0	126,7	133	2,0	
Leg. S	geglüht 650°C, im Sand geküht	391	62,4	67,5	68,3	66,1	70	2,0	

Bez.	Bearbeitung	Schf.	HBW 1	HBW2	HBW3	HBW 0	HV	Dicke (mm)	Bem.
Leg. S	40x gehämmert	420	93,8	102,0	102,0	99,3	104	1,9	
Leg. S	40x gehämmert	460	116,0	116,0	112,0	114,7	121	1,8	
Leg. S	40x gehämmert	500	117,0	132,0	111,0	120,0	126	1,7	
Leg. S	70x gehämmert	570	124,0	128,0	121,0	124,3	131	1,6	
Leg. S	geglüht 650°C, in Wasser kalt	571	62,3	62,2	64,0	62,8	66	1,6	
Leg. S	40x gehämmert	610	109,0	101,0	100,0	103,3	109	1,6	
Leg. S	40x gehämmert	650	114,0	110,0	116,0	113,3	119	1,5	
Leg. S	40x gehämmert	690	121,0	115,0	120,0	118,7	125	1,4	
Leg. S	70x gehämmert	760	137,0	123,0	127,0	129,7	136	1,3	
Leg. S	200 Schläge ohne Rissbildung	970	140,0	147,0	156,0	147,7	155	1,1	
Leg. T	gegossen + nass abgeschreckt	0	74,5	77,3	77,0	76,3	80	3,6	
Leg. T	40x sanft gehämmert	40	99,6	102,0	101,0	109,0	106	3,5	
Leg. T	40x gehämmert	80	121,0	112,0	106,0	113,7	119	3,3	
Leg. T	40x gehämmert	120	120,0	128,0	123,0	123,7	130	3,2	
Leg. T	70x gehämmert	190	132,0	144,0	128,0	134,7	142	3,0	
Leg. T	geglüht 650°C, in Wasser kalt	191	73,9	72,5	80,0	75,5	79	3,0	
Leg. T	40x sanft gehämmert	230	102,0	101,0	119,0	107,3	113	2,9	
Leg. T	40x gehämmert	270	125,0	119,0	128,0	124,0	131	2,7	
Leg. T	40x gehämmert	310	134,0	128,0	133,0	131,7	139	2,6	
Leg. T	70x gehämmert	380	140,0	129,0	134,0	135,7	143	2,5	
Leg. T	geglüht 650°C, im Sand geküht	391	77,4	76,0	80,6	78,0	82	2,5	
Leg. T	40x gehämmert	420	104,0	107,0	114,0	109,3	114	2,4	
Leg. T	40x gehämmert	460	120,0	131,0	123,0	124,7	131	2,3	
Leg. T	40x gehämmert	500	136,0	136,0	133,0	135,7	142	2,2	
Leg. T	70x gehämmert	570	145,0	152,0	143,0	146,7	154	2,1	
Leg. T	geglüht 650°C, in Wasser kalt	571	80,4	75,9	76,5	77,6	82	2,1	
Leg. T	40x gehämmert	610	113,0	114,0	105,0	110,7	116	2,1	
Leg. T	40x gehämmert	650	114,0	130,0	118,0	120,7	127	2,0	
Leg. T	40x gehämmert	690	121,0	139,0	128,0	129,3	136	1,9	
Leg. T	70x gehämmert	760	140,0	144,0	147,0	143,7	151	1,8	
Leg. T	200 Schläge ohne Rissbildung	960	186,0	182,0	185,0	184,3	194	1,4	
Leg. B	gegossen + nass abgeschreckt	0	80,6	83,6	80,3	81,5	86	3,5	
Leg. B	40x sanft gehämmert	40	91,6	100,0	103,0	98,2	103	3,4	
Leg. B	40x gehämmert	80	115,0	116,0	82,3	104,4	110	3,2	
Leg. B	40x gehämmert	120	101,0	123,0	120,0	114,3	120	3,1	
Leg. B	70x gehämmert	190	149,0	127,0	110,0	128,7	135	3,0	
Leg. B	geglüht 650°C, in Wasser kalt	191	74,9	77,3	72,4	74,9	79	3,0	
Leg. B	40x sanft gehämmert	230	97,3	85,7	89,2	94,1	99	2,8	Haarriss
Leg. B	40x gehämmert	270	108,0	107,0	88,2	104,4	110	2,7	Haarriss
Leg. B	40x gehämmert	310	101,0	109,0	107,0	105,7	111	2,6	
Leg. B	70x gehämmert	380	122,0	117,0	114,0	111,7	124	2,4	
Leg. B	geglüht 650°C, im Sand geküht	391	65,9	56,2	61,4	61,2	64	2,4	
Leg. B	40x gehämmert	420	84,3	88,8	74,2	81,8	86	2,3	Risse grösser
Leg. B	40x gehämmert	460	129,0	101,0	97,2	109,1	115	2,1	
Leg. B	40x gehämmert	500	129,0	108,0	124,0	120,3	127	2,0	
Leg. B	70x gehämmert	570	138,0	139,0	106,0	121,7	127	1,9	
Leg. B	geglüht 650°C, in Wasser kalt	571	82,3	82,4	72,1	78,9	83	1,9	
Leg. B	40x gehämmert	610	111,0	105,0	93,8	103,3	109	1,8	R. ausgefranst
Leg. B	40x gehämmert	650	122,0	114,0	107,0	114,3	120	1,7	
Leg. B	40x gehämmert	690	139,0	132,0	133,0	134,7	142	1,6	
Leg. B	70x gehämmert	760	134,0	140,0	150,0	141,3	149	1,5	
Leg. B	80 Schläge bis Bruch	840	162,0	150,0	159,0	157,0	165	1,4	
Leg. M	gegossen + nass abgeschreckt	0	75,3	76,6	73,5	75,1	79	3,6	
Leg. M	40x sanft gehämmert	40	109,0	105,0	101,0	105,0	111	3,4	
Leg. M	40x gehämmert	80	119,0	112,0	101,0	110,7	116	3,2	
Leg. M	40x gehämmert	120	121,0	122,0	112,0	118,3	125	3,1	
Leg. M	70x gehämmert	190	136,0	145,0	138,0	139,7	147	2,9	
Leg. M	geglüht 650°C, in Wasser kalt	191	74,4	74,3	81,8	70,2</			

stand nach dem Glühen und hartem Gefüge nach langem Hämmern beim Kupfer am kleinsten und bei der höher legierten Zinnbronze am größten ist. Die Edelmetalle weisen wie Kupfer eine kleine Spanne zwischen minimaler und maximaler Härte auf. Die getesteten Legierungen bilden bezüglich Härte-Spanne folgende Reihenfolge:

Kupfer	~ 55 (HBW; Abb. 8)
Silber	~ 60 (HBW; Abb. 7)
Gold	~ 75 (HBW; Abb. 6)
Bleibronze	~ 95 (HBW; Abb. 11)
Zinnbronze 1	~ 95 (HBW; Abb. 9)
Messing	~ 105 (HBW; Abb. 12)
Zinnbronze 2	~ 110 (HBW; Abb. 10)

Bei den Zinnbronzen hängen die Härtungsmöglichkeiten durch ausdauerndes Kaltschmieden stark vom Zinngehalt ab. Wir konnten oben feststellen, dass sich eine 3,72er-Bronze auf rund 148 HBW aushämmern lässt (Abb. 9), eine 7,05er-Bronze auf 184 HBW (Abb. 10) und eine 13,6er-Bronze auf gar 213 HBW. Dass Gold bei langsamem Erkaltenlassen kaum rekristallisiert resp. weicher wird, ist auf Seite 34 ausführlich beschrieben.

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass es immer vom Metallhandwerker und seiner Erfahrung abhängt, ob er die Härtungs- resp. Rekristallisierungseigenschaften einer Legierung kennt, optimal einsetzt, so wenige Zwischenglühungen wie nötig durchführt und das Material beim Treiben und Schmieden ausreizt, ohne dass es zu früh brüchig wird.

## Outlook

Archaeological proof for the annealing and quenching of forged non-ferrous alloy semi-finished products from antiquity, can be recognized mainly through metallurgical investigations, a.e. through the analysis of the microstructure and hardness on the found objects (THOMAS ET AL. 2008, 39). The annealing can be achieved in

any charcoal hearth fire and does not require any special workshop facilities. During excavations therefore hardly any clear structure indicating annealing and quenching can be found. To me the only known, however uncertain example stems from Bad Wimpfen/D, where not far from an assumed Roman melting furnace, "where in the soil in a lowered fire pit, forged metal-sheets might have been annealed" (FILGIS, PIETSCH 1986, 532). In many places however secondary used amphorae have been set into the floors of workshops of forges and foundries which may have served as water containers for the quenching of glowing metal work pieces (e.g. MARTIN-KILCHER 1987, 177-180 figs. 102-105).

For the present investigation it was decided not to work with "pure" modern industrial alloys which in archaeometrical experiments are often used. The specially alloyed starting samples for our trials were strictly mixed alloys with impurities, traces of recycling processes respectively which were common in antique daily life.

It is actually surprising that copper alloys – bronzes as well as brass – and the precious metals silver and gold are behaving quite similarly during forging and annealing. Whether cooling should be slow in air or in sand or quick in water, depends completely on the working process: If one would like a homogeneous metal-structure, e.g. as cast, cooling is preferably slow; if hardening after a long deformation process an optimal old ductility should be obtained, quenching will be used.

The concrete results of our trials and hardness measurements show amongst other things, that the span between the soft state after annealing and a hard alloy structure after a long period of hammering of copper is smallest whereas in the case of higher alloyed tin bronzes it is bigger. Precious metals, similar to copper show a smaller span between minimal and maximal hardness. The tested alloys in relati-

on to the hardness-span show the following sequence:

Copper	~ 55 (HBW; <i>fig. 8</i> )
Silver	~ 60 (HBW; <i>fig. 7</i> )
Gold	~ 75 (HBW; <i>fig. 6</i> )
Lead-bronze	~ 95 (HBW; <i>fig. 11</i> )
Tin-bronze 1	~ 95 (HBW; <i>fig. 9</i> )
Brass	~ 105 (HBW; <i>fig. 12</i> )
Ton-bronze 2	~ 110 (HBW; <i>fig. 10</i> )

In the case of tin-bronzes the possibilities for hardening by continued cold forging depend strongly on the tin content. We have found that a 3.72 type bronze can be hammered to roughly 148 HBW (*fig. 9*), a 7.05 type bronze to 184 HBW (*fig. 10*) and a 13.6 type bronze even to 213 HBW.

Gold when cooling slowly hardly recrystallizes, resp. becoming softer is described in detail above on page 34.

As conclusion and for the record it always depends on the metalworker and his experience whether he knows the hardening or the recrystallization properties of an alloy respectively and uses it optimally with as little intermediate annealing as necessary and that the material during metal beating and forging is not getting brittle too early.

#### Verdankungen

Die pXRF-Analysen der rekonstruierten und getesteten „antiken“ Legierungen verdanke ich Markus Helfert von der Universität Frankfurt/M. (mit Ausnahme der Gold- und Silberlegierungen wurden diese Buntmetalle teilweise schon bei früheren Experimenten zu deren Bearbeitbarkeit verwendet: FURGER, RIEDERER 1995, 150ff. Tab. 9, Abb. 10). – Ich danke auch Dirk Lindemann, Werner Menk und Urs Werner von der Georg Fischer AG in Schaffhausen/Schweiz für die Vermittlung und Erlaubnis, die Schmiedearbeiten und Härtemessungen im Firmenlabor durchzuführen (im September 2015) und Herrn Rudolf Kubiz und seinem Team für die hilfs-

bereite Unterstützung vor Ort. – Besondere Anerkennung gebührt Urs Werner, Metallurge in Schaffhausen, für die Englisch-Übersetzungen von Bildlegenden, Summary und Outlook.

#### Literatur

**ADAMSKI, F. 2008:** Ateliers, techniques et artisans du „bronze“ en Aquitaine antique. De la fin de l'âge du Fer à la période gallo-romaine. Dissertation Bordeaux 2008.

**AGRAWAL, D. P. 1971:** The Copper Bronze Age in India. An integrated archaeological study of the Copper Bronze Age in India in the light of chronological, technological and ecological factors, ca. 3000-500 B.C. New Delhi 1971.

**BAYLEY, J., BUTCHER, S. 2004:** Roman Brooches in Britain. A technological and typological study based on the Richborough collection. Reports of the Research Committee of the Society of Antiquaries of London 68. London 2004.

**BREPOHL, E. 1987:** Theophilus Presbyter und die mittelalterliche Goldschmiedekunst. Leipzig 1987.

**BREPOHL, E. 2000:** Theorie und Praxis des Goldschmieds. Leipzig 2000<sup>14</sup>.

**CHARLES, J. A. 1979:** From Copper to Iron – the Origin of Metallic Materials. Journal of Metals 31/7, 1979, 8-13.

**DEMORTIER, G. 1984:** Analysis of Gold Jewellery Artefacts. Characterization of ancient Gold Solders by Pixe. Gold Bulletin 17/1, 1984, 27-38.

**DESCH, C. H. 1927:** The Tempering of Copper. Discovery 8, 1927, 361-362.

**DIEBENER, W. 1963:** Handbuch des Goldschmieds. Ein Werkstattbuch für die Praxis 2. Stuttgart 1963<sup>5</sup>.

**DIEBENER, W. 1991:** Diebeners Werkstattrezepte für Gold- und Silberschmiede. Stuttgart 1991<sup>5</sup>.

**D'HUBERT, E. 1904:** Les Métaux Usuels. Cuivre, Zinc, Étain, Plomb, Nickel, Aluminium. Paris 1904.

**FILGIS, M. N., PIETSCH, M. (Hrsg.) 1986:**

Römische Zeit. Fundberichte aus Baden-Württemberg 10, 1986, 523-591.

**FOLTZ, E. 1979:** Einige Beobachtungen zu antiken Gold- und Silberschmiedetechniken. Archäologisches Korrespondenzblatt 9, 1979, 213-222.

**FURGER, A. R. 2017:** Der vergoldete Buddha. Traditionelles Kunsthandwerk der Newar-Giesser in Nepal. Basel 2017.

**FURGER, A. R., in Vorb.:** Zur antiken Stahlerzeugung. Ein Nachweis der Aufkohlung von Eisen aus Augusta Raurica (in Vorb.).

**FURGER, A. R., RIEDERER, J. 1995:** Aes und aurichalcum. Empirische Beurteilungskriterien für Kupferlegierungen und metallanalytische Untersuchungen an Halbfabrikaten und Abfällen aus metallverarbeitenden Werkstätten in Augusta Raurica. Jahresberichte aus Augst und Kaiseraugst 16, 1995, 115-180.

**GARENNE-MAROT, L. 1985:** Le travail du cuivre dans l'Égypte pharaonique d'après les peintures et bas-reliefs. Paléorient 11/1, 1985, 85-100.

**HEALY, J. F. 1978:** Mining and Metallurgy in the Greek and Roman World. London 1978.

**HILPKE, H. 1956:** Handbuch der Graveure, Ziseleure und Gürtler. Material, Werkzeuge und Arbeitsmethoden. Stuttgart 1956.

**HÖFER, A. 1972:** Eine Siedlung und Werkstatt der Dorfschmiede (Kāmi) in Nepal. Archiv für Völkerkunde 26, 1972, 29-57.

**HÖHNE, F., RÖSLING, C. W. 1839:** Das Kupferschmiedhandwerk mit den nöthigen Vorlehen über die Erzeugung und Behandlung des Rohkupfers so wie aller in dieses Fach einschlagenden Produkte. Neuer Schauplatz der Künste und Handwerker mit Berücksichtigung der neuesten Erfindungen 101. Weimar 1839. Reprint Hannover 1996.

**KIENLIN, T. L. 2007:** Von den Schmieden der Beile: Zu Verbreitung und Angleichung metallurgischen Wissens im Verlauf der Frühbronzezeit. Prähistorische Zeitschrift 82, 2007, 1-22.

**LUCAS, A., HARRIS, J. R. 1962:** Ancient Egyptian materials and industries. London 1926<sup>1</sup>; 1962<sup>4</sup>. Reprint London 1999.

**MARTIN-KILCHER, S. 1987:** Die römischen Amphoren aus Augst und Kaiseraugst. Die südspanischen Ölamporen (Gruppe 1). Forschungen in Augst 7/1. Augst 1987.

**MOESTA, H., FRANKE, P. R. 1995:** Antike Metallurgie und Münzprägung. Ein Beitrag zur Technikgeschichte. Basel 1995.

**OTTAWAY, B. S. 2002:** Towards interpretative archaeometallurgy. In: M. Bartelheim u. a. (Hrsg.), Die Anfänge der Metallurgie in der Alten Welt. Forschungen zur Archäometrie und Altertumswissenschaft 1. Rahden/Westf. 2002, 7-13.

**OTTAWAY, B. S., WANG, Q. 2004:** Casting Experiments and Microstructure of Archaeologically Relevant Bronzes. BAR International Series 1331. Oxford 2004.

**PAPADIMITRIOU, G. 2001:** Simulation study of ancient bronzes: Their mechanical and metalworking properties. In: Y. Bassiakos et al. (eds.), Archaeometry Issues in Greek Prehistory and Antiquity. Athens 2001, 713-733.

**PERNOT, M., HURTEL, L. 1987:** Caractérisation métallographique de tôles d'alliages base cuivre des époques Celtique et Gallo-Romaine. Bulletin de la Société Préhistorique Française 84/8, 1987, 238-247.

**PLEINER, R. 2006:** Iron in Archaeology. Early European Blacksmiths. Praha 2006.

**RAPP, G. 1988:** On the origins of copper and bronze alloying. In: R. Maddin (ed.), The Beginnings of the Use of Metals and Alloys. Cambridge 1988, 21-27.

**RAUBER-SCHWEIZER, H. 1976:** Der Schmied und sein Handwerk im traditionellen Tibet. Dissertation Zürich 1976.

**REHDER, J. E. 1989:** Ancient Carburization of Iron to Steel. Archaeomaterials 3, 1989, 27-37.

**RIEDERER, J. 1981:** Kunstwerke chemisch betrachtet. Materialien, Analysen, Altersbestimmung. Berlin, Heidelberg, New York 1981.

**SCHEEL, B. 1985:** Studien zum Metallhandwerk im Alten Ägypten I. Handlungen und Beischriften in den Bildprogrammen der Gräber des Mittleren Reiches. Studien zur Altägyptischen Kultur 12, 1985, 117-177.

**SCHEEL, B. 1986:** Studien zum Metallhandwerk im Alten Ägypten II. Handlungen und Beischriften in den Bildprogrammen der Gräber des Mittleren Reiches. Studien zur Altägyptischen Kultur 13, 1986, 181-205.

**SCHWAHN, C. 1945:** Die Oberflächenbehandlung der Metalle. Kleine Fachbücherei des Gold- und Silberschmieds 3. Halle 1945.

**SRINIVASAN, S., GLOVER, I. 1995:** Wrought and quenched, and cast high-tin bronzes in Kerala State, India. The Journal of the Historical Metallurgy Society 29/2, 1995, 69-88.

**STERN, W. B. 1982:** Metallanalytische Untersuchungen. In: E. Riha, W. B. Stern, Die römischen Löffel aus Augst und Kaiseraugst. Archäologische und metallanalytische Untersuchungen. Forschungen in Augst 5. Augst 1982, 41-59.

**THOMAS, N., ET AL. 2008:** Un atelier de "bronziers" au XIVe siècle: une fabrication de masse d'objets du quotidien. In: S. Max-Colinart (ed.), Actes du colloque Science des matériaux du patrimoine culturel, 6 et 7 décembre 2007. Technè, Hors série. Paris 2008, 36-42.

**TYLECOTE, R. F. 1973:** Casting Copper and Bronze into Stone Moulds. Bulletin of the Historical Metallurgy Group 7/1, 1973, 1-5.

**WAYMAN, M. L., DUKE, M. J. M. 1999:** The effects of melting on native copper. In: A. Hauptmann et al. (eds.), The Beginnings of Metallurgy. Der Anschnitt, Beiheft 9. Bochum 1999, 55-63.

**WEINSTEIN, J. 1974:** A Fifth Dynasty Reference to Annealing. Journal of the American Research Center in Egypt (JARCE) 11, 1974, 23-25.

**WILLER, D. 2001:** The experimental recon-

struction in bronze of a Merovingian treasure box from 6<sup>th</sup> century A. D. In: C. Tulp et al. (eds.), Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Workshop, experimental and educational aspects of bronze metallurgy, Wilhelminaord 18-22 October 1999. Leiden 2001, 30-38.

Abbildungsnachweis

Abb. 1: Bearbeitung, Foto und Diagramm  
Alex R. Furger

Abb. 2: Nach Weinstein 1974, Abb. S. 24  
(Ausschnitt); Texteingfügung Alex R.  
Furger

Abb. 3: Fotos Alex R. Furger

Abb. 4-5: Legierungen, Bearbeitung und  
Fotos Alex R. Furger

Abb. 6-12: Härtemessungen und Grafiken  
Alex R. Furger

Autor

Alex R. Furger

Lenzgasse 11

4056 Basel

Schweiz

[alex@woauchimmer.ch](mailto:alex@woauchimmer.ch)