



Berg Huettenmaenn Monatsh (2023) Vol. 168 (9): 406–413  
<https://doi.org/10.1007/s00501-022-01310-7>  
 © Der/die Autor(en) 2022

**BHM** Berg- und  
 Hüttenmännische  
 Monatshefte

# Ein Kupferbeil aus der frühen Kupferzeit vom Heuberg bei Ohlstadt, Deutschland

Joachim Pechtl<sup>1</sup>, Susanne Strobl<sup>2</sup> und Roland Haubner<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Archäologien, Universität Innsbruck, Innsbruck, Österreich

<sup>2</sup>Technische Universität Wien, Wien, Österreich

Eingegangen 25. Oktober 2022; angenommen 24. November 2022; online publiziert 9. Januar 2023

**Zusammenfassung:** Ein am Heuberg bei Ohlstadt gefundenes Flachbeil aus Kupfer, welches typologisch dem frühen Jungneolithikum respektive der frühen Kupferzeit und somit der Zeit um 4000 v. Chr. zuzuordnen ist, wird im Rahmen der Studie materialkundlich untersucht. Eine RFA-Analyse ergab nahezu reines Kupfer mit geringen Mengen an Fe, P, Si, Ni und Al. Die Elemente As, Sb, S und Pb, die in derartigen Kupfergegenständen oft zu finden sind, waren nicht nachweisbar. Die metallographische Untersuchung zeigt ein sehr gleichmäßiges Gefüge mit feinem Cu-Cu<sub>2</sub>O Eutektikum. Aufgrund der Menge an Eutektikum wird der O Gehalt im Metall auf etwa 0,3 Gew. % geschätzt. Die einzelnen Kupferkörner sind mit einer Größe zwischen 300–400 µm als grob zu bezeichnen. Auffallend ist, dass im Bereich der Beilschneide eine deutliche Verformung des Gefüges feststellbar ist. Diese dürfte durch gezieltes Hämmern entstanden sein. Aufgrund des Fehlens von S und As im Kupfer kann davon ausgegangen werden, dass nur oxydische Erze für die Kupfergewinnung verwendet wurden.

**Schlüsselwörter:** Kupferbeil, Frühes Jungneolithikum, Frühe Kupferzeit, Cu-Cu<sub>2</sub>O Eutektikum

## An Early Copper Age Copper Axe from the Heuberg Hill Near Ohlstadt, Germany

**Abstract:** A copper flat axe found at the Heuberg hill near Ohlstadt, which typologically belongs to the Late Neolithic respectively the Early Copper Age and thus to the time around 4000 BC, is examined in terms of material science within the framework of the study. An XRF analysis revealed almost pure copper with small amounts of Fe, P, Si, Ni, and Al. The elements As, Sb, S, and Pb, which are of-

ten found in such copper objects, were not detected. The metallographic examination shows a very uniform structure with fine Cu-Cu<sub>2</sub>O eutectic. Based on the amount of eutectic, the O content in the metal is estimated to be about 0.3% by weight.

The individual copper grains have a size between 300–400 µm, which is rather coarse. It is striking that, in the area of the axe cutting edge, a significant deformation of the structure is noticeable. This may have been caused by deliberate hammering. Due to the absence of S and As in the copper, it can be assumed that only oxidic ores were used for copper extraction.

**Keywords:** Copper axe, Late Neolithic, Early Copper Age, Cu-Cu<sub>2</sub>O eutectic

## 1. Das Kupferbeil vom Heuberg und sein archäologischer Kontext

Zusammen mit einem umfangreichen Bestand an hauptsächlich bronzezeitlichen Metallfunden vom „Zeilkopf“ gelangten im Jahr 2020 auch einzelne weitere Funde vom benachbarten „Heuberg“ (Gemeinde Ohlstadt, Landkreis Garmisch-Partenkirchen) in die Sammlung des Museums Werdenfels in Garmisch-Partenkirchen. Diese mittels Metallsonde detektierten Einzelstücke entbehren eines archäologischen Kontexts und können daher nur auf typologischem Weg datiert werden. Die in Betrachtung stehende kupferne Beilklinge ist am rückwärtigen Ende abgebrochen und weist in der Aufsicht einen langgestreckten trapezförmigen Körper mit leicht eingezogenen Seitenbahnen sowie eine mäßig gebogene, stumpfe Schneide auf (Abb. 1). Der Längsschnitt ist etwa symmetrisch, wobei er seine größte Dicke im hinteren Bereich des erhaltenen Teils erreicht, der Querschnitt ist leicht abgerundet-rechteckig. Aufgrund der Korrosion der Oberfläche ist eine mögliche Überarbeitung der Gussoberflächen durch Hämmern nicht mehr erkennbar. Mit einer Länge von noch 69 mm, einer Breite von 33 mm und einer Dicke von immerhin 14 mm ist die Beilklin-

Dr. J. Pechtl (✉)  
 Institut für Archäologien,  
 Universität Innsbruck,  
 Langer Weg 11,  
 6020 Innsbruck, Österreich  
 joachim.pechtl@uibk.ac.at

Abb. 1: Kupferbeil vom Heu-  
berg bei Ohlstadt, Deutschland



ge relativ klein, zugleich aber bemerkenswert kräftig proportioniert.

Typologisch gemahnt das Stück noch deutlich an Steinbeile und steht aufgrund der Form und dem kräftigen Bau den Beilen des Typs Stollhof nahe, genauer gesagt der durchaus heterogenen Variante Hartberg [1, 2]. Ähnliche – meist allerdings größere – Beilklingen finden sich weit verstreut, aber insgesamt selten im südlichen Mitteleuropa, mehrfach auch in Bayern [3]. Eine genauere Datierung gestaltet sich schwierig, da es sich häufig um Einzelfunde handelt. Kontexte wie die Depotfunde von Stollhof und Großheubach deuten auf eine Zeitstellung an der Wende vom 5. zum 4. beziehungsweise im frühen 4. Jahrtausend v. Chr., wobei unklar ist, wie lange derartige Formen in Gebrauch waren [1–3]. Zeitlich entspricht dies dem Horizont des älteren Jungneolithikums, respektive der älteren Kupferzeit, welche etwa mit Komplexen wie der Münchshöfener Kultur in Südbayern und im Tiroler Inntal, Michelsberg in weiter nordwestlich gelegenen Gebieten und Balaton-Lasinja in Ostösterreich vertreten ist [4]. Typologisch betrachtet sind die Beile der Variante Hartberg somit tendenziell älter als die weitaus zahlreicheren, breiten und flachen Beile des Typs Altheim [1, 2]. Diese sind im mittleren Drittel des 4. Jahrtausends v. Chr. weit verbreitet und gut belegt aus Kontexten des jüngeren Jungneolithikums bzw. der mittleren Kupferzeit. In Südbayern ist hier vor allem die Altheimer Gruppe zu nennen, westlich hiervon die Pfyner Gruppe und im östlich anschließenden Raum die Mondseekultur [4]. Tendenziell erneut jünger datieren frühe Randleistenbeile (Remedello-Beile), deren bekanntester Vertreter das Beil der Gletschermumie vom Hauslabjoch („Ötzi“) ist [5]. Derartige Formen entstammen dem jüngeren 4. und älteren 3. Jahrtausend v. Chr.

In Südosteuropa erlebte die Kupfermetallurgie während des jüngeren 5. und älteren 4. Jahrtausends v. Chr. eine erste große Blüte [6]. Charakteristisch sind massiv gegossene „Schwergeräte“, zu welchen Hammeräxte, kreuzschneidige Äxte und kräftige Flachbeile zählen. Als Rohstoff diente zu meist ein sehr reines Kupfer aus südosteuropäischen Lagerstätten. Vereinzelt gelangten derartige Schwergeräte weit nach Westen und Norden [7, 8]. Bemerkenswert ist, dass eines dieser seltenen Importstücke, eine kreuzschneidige Axt, bei Bad Kohlgrub gefunden wurde, also lediglich rund 15 km vom Heu-berg entfernt [9]. Angeregt durch derartige Kontakte zu hochkupferzeitlichen Kulturgruppen Südosteuropas setzte auch im nördlichen Alpenvorland eine – zunächst spärliche – Verarbeitung anfangs sicher importierten Rohmaterials ein [7, 8], Schlackenfunde am Mariahilfberg bei Brixlegg im Tiroler Inntal legen aber auch erste Versuche extraktiver Metallurgie nahe [8].

Ab etwa 3800 v. Chr. ist im nördlichen Alpenvorland schließlich eine wesentlich intensivere Metallverarbeitung greifbar, wobei sowohl Fertigprodukte als auch Tiegel und Schlacken vor allem in den Pfahlbaufundstellen der Pfyner Kultur im Westen und der Mondseekultur im Osten zahlreich auftreten, während aus Südbayern – mutmaßlich erhaltungsbedingt – deutlich weniger Belege vorliegen. Diese aufblühende Kupfermetallurgie ist verbunden mit einer Ausweitung des Typenspektrums, komplexeren Herstellungsweisen und der zunehmenden Verwendung von meist schwach arsenhaltigem Kupfer [7, 8, 10, 11]. Die Herkunft dieses sogenannten „Mondseekupfers“ ist bislang nicht abschließend geklärt, es scheint aber plausibel, dass ostalpine Lagerstätten hierzu beigetragen haben [7, 8, 12].

Die Beilklinge vom Heu-berg ist aus archäologischer Sicht somit wohl dem frühen Horizont der Kupferverwendung im



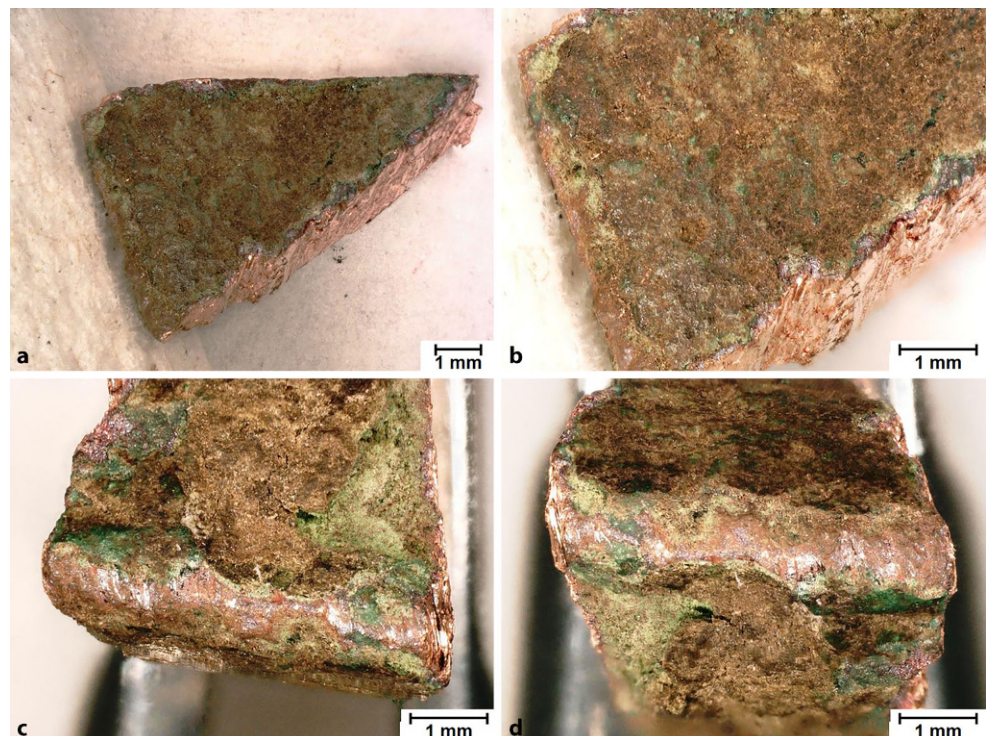
Abb. 2: Kupferbeil vom Heuberg nach der Probennahme

nördlichen Alpenvorland zuzuweisen, als möglicherweise bereits erste Schritte hin zu einer eigenständigen Kupfermetallurgie erfolgten. Rohmaterial und Verarbeitungstechnik des Stücks sind daher von besonderem Interesse, zumal außer Importen aus Südosteuropa – gerade am Alpenrand – auch solche aus Italien denkbar sind [13].

## 2. Metallkundliche Untersuchungen

Die aus der Schneidenkante des Beils entnommene Keilprobe wurde metallographisch präpariert und untersucht (Abb. 2 und 3). Es wurden 3D-Digitalmikroskopie (3D-DM), Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), Lichtmikroskopie (LOM) und Rasterelektronenmikroskopie (REM) mit energiedispersiver Röntgenanalyse (EDX) eingesetzt.

Abb. 3: 3D-Digitalmikroskopie des untersuchten Segments (a, b), sowie Details der Schneide, (c, d)



Nach dem Kalteinbetten mit Araldit und Planschleifen wurde stufenweise bis  $1\ \mu\text{m}$  Diamant geschliffen bzw. poliert. Da  $\text{Cu}_2\text{O}$  im Hellfeld eine graue Eigenfarbe besitzt und im polarisierten Licht rot gefärbt ist, konnte das Gefüge bereits im polierten Zustand im LOM und REM erkannt werden. In Abb. 4 sind Überblicksaufnahmen zusammengestellt. Im polierten Zustand sind einige Lunker im Inneren der Probe erkennbar (Abb. 4a). Nach einer Ätzung mit Klemm 2-Lösung (Abb. 4b) ist ein gleichmäßiges Gefüge erkennbar, wobei sich an der Beilschneide und in den Randbereichen Verformungen erahnen lassen. In REM Bildern ist neben primär auskristallisiertem Kupfer auch das  $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$  Eutektikum in den interdendritischen Bereichen zu erkennen (Abb. 4c, d). Die Verformungen an der Beilspitze sind hier deutlicher zu sehen.

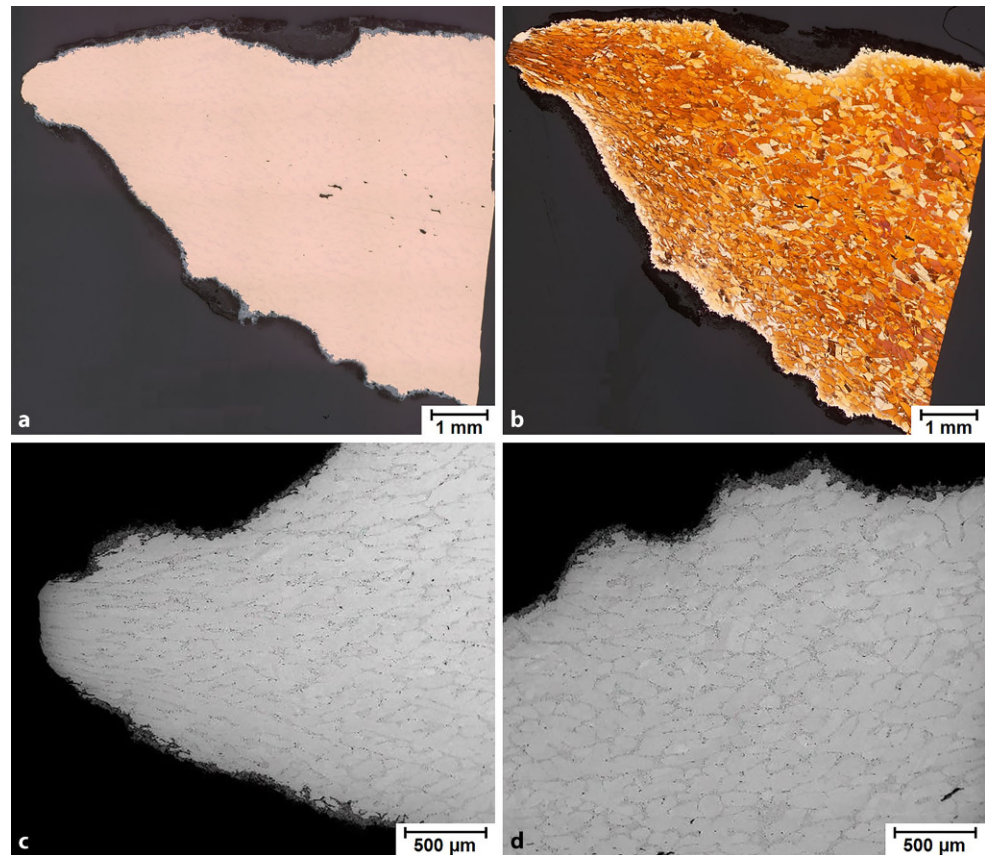
In Abb. 5 sind Detailaufnahmen des Beilgefüges dargestellt. Im Hellfeld sind die  $\text{Cu}_2\text{O}$  Ausscheidungen als dunkle Punkte deutlich erkennbar (Abb. 5a, c) und im polarisierten Licht leuchtet das  $\text{Cu}_2\text{O}$  hellrot auf (Abb. 5b, d). In Abb. 5c ist zu sehen, dass der Lunker, der aufgrund der Erstarrung der Schmelze entstanden ist, direkt an die Bereiche des  $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$  Eutektikums anschließt.

Die Korngrößen des Kupfers betragen zwischen 300 und  $400\ \mu\text{m}$ , was eher grob ist, und außerdem reichen sie teilweise über die Bereiche des  $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$  Eutektikums hinaus. Daraus kann geschlossen werden, dass es noch während der Abkühlung des Beils zur Rekristallisation des Kupfers gekommen ist und danach keine Verformung mehr auftrat.

Um sicherzustellen, dass es sich um das  $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$  Eutektikum handelt, wurde eine REM-EDX Elementverteilung durchgeführt (Abb. 6).

Im Bereich der Beilschneide sind Verformungen erkennbar, da die Bereiche des  $\text{Cu-Cu}_2\text{O}$  Eutektikums eine

Abb. 4: Gefüge des Kupferbeils: **a, b** LOM, **a** poliert, **b** Klemm2 Ätzung, **c, d** REM



Längsstruktur aufweisen (Abb. 7a, b). Dies bedeutet, dass nach dem Guss die Schneidkante zur Schärfung und/oder Härtung gehämmert wurde. Da sich einzelne Kupferkörner teilweise über die eutektischen Cu-Cu<sub>2</sub>O Bereiche hinaus erstrecken, ist anzunehmen, dass in späterer Folge noch eine Rekristallisation des Kupfers stattfand. Ob diese Temperaturbehandlung absichtlich durchgeführt wurde oder aufgrund eines unbeabsichtigten Feuers eintrat, kann nicht entschieden werden. Bei höheren Vergrößerungen sind auch Verformungszwillinge im Kupfergefüge zu sehen (Abb. 7c, d).

An der Oberfläche des Beils sind Korrosionsschichten zu erkennen (Abb. 8a). Die Randzone im REM betrachtet zeigt, dass die Korrosion vorzugsweise entlang der Bereiche mit Cu-Cu<sub>2</sub>O Eutektikum voranschreitet (Abb. 8b). Dies ist ebenfalls in den LOM-Bildern gut zu erkennen (Abb. 8c, d). Die Korrosionsschicht (Patina) ist zweilagig aufgebaut, wobei

außen Malachit (dunkelgrau) und innen Cu<sub>2</sub>O (hellgrau) vorliegt (Abb. 8c). Im polarisierten Licht erscheint der Malachit grün und das Cu<sub>2</sub>O rot (Abb. 8d).

Um die genaue chemische Zusammensetzung des Werkstoffes zu erhalten, wurde eine RFA-Analyse durchgeführt. Diese ergab 99,8 Gew. % Cu und Spuren an Ni, Fe, P, Si und Al (Tab. 1). Es wurden weder S noch As und Pb nachgewiesen. Zu erwähnen bleibt noch O, welcher mittels RFA nicht erfasst wird. Sein Gehalt im Beil wird auf etwa 0,2 Gew. % geschätzt. Im Cu-Cu<sub>2</sub>O Eutektikum liegt die Sauerstofflöslichkeit im Cu bei 0,4 Gew. % [14].

Ähnliche Gefüge wurden auch beim sogenannten „Ötzi-Beil“ [5, 15] sowie bei einem Beil aus dem Burgenland [16] gefunden und sind allgemein charakteristisch auch für Schwergeräte der südosteuropäischen Hochkupferzeit [10].

### 3. Die Metallurgie des Jungneolithikums im südlichen Mitteleuropa

Durchsucht man die publizierten Analysedaten von jungneolithischen bzw. kupferzeitlichen Metallgegenständen, so handelt es sich allgemein meist um nahezu reines Kupfer mit Spurenelementen, von denen angenommen werden kann, dass sie aus den verwendeten Erzen stammen. Besonderes Augenmerk wird auf Arsen im Kupfer gelegt, da durch dieses die Härte gesteigert werden kann. Bei niedrigen As-Gehalten spricht man von Arsenkupfer, bei höheren Konzentrationen von Arsenbronze, wobei die Grenzen nicht

TABELLE 1  
RFA-Analyse am metallographischen Schliff

Zeilkopf (Gew. %)	
Cu	99,79
Ni	0,01
Fe	0,04
S	nicht nachweisbar
P	0,04
Si	0,09
Al	0,03

Abb. 5: Cu-Matrix und  $\text{Cu}_2\text{O}$ -Cu Eutektikum, LOM: a-d polarisiert, a, c Hellfeld, b, d polarisiertes Licht, e, f Klemm2 Ätzung

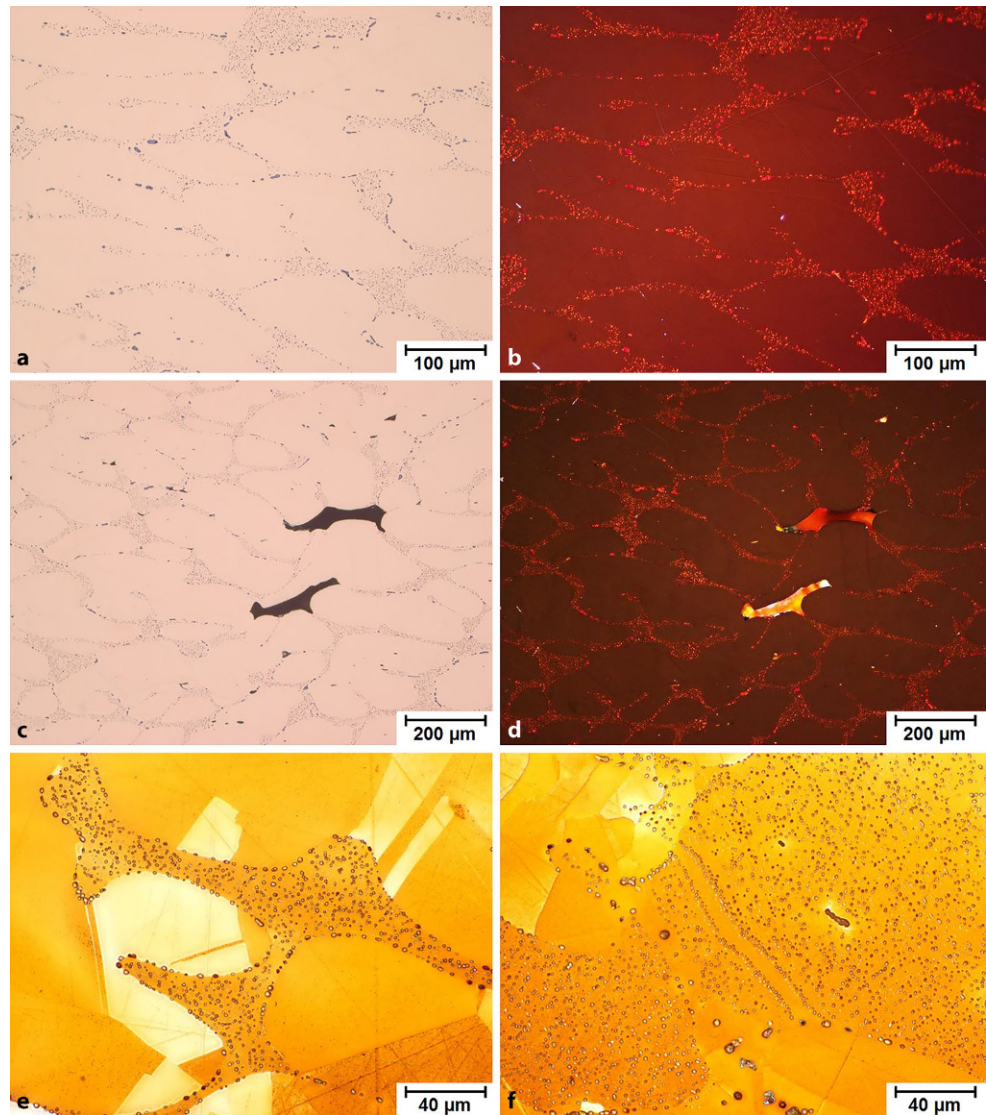
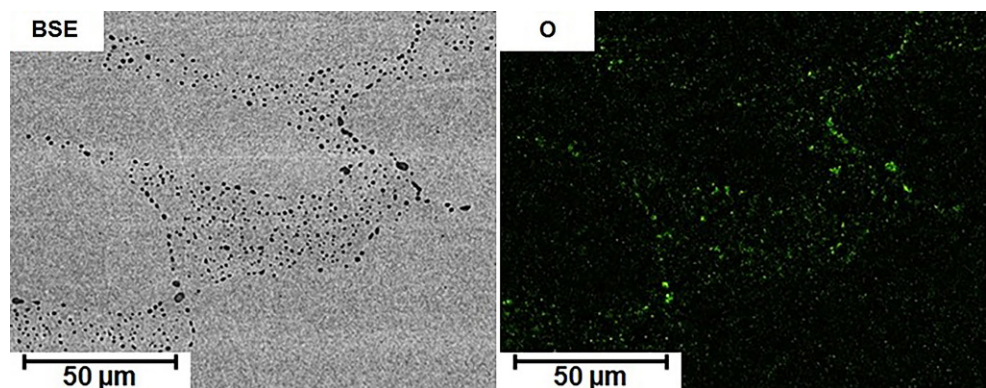


Abb. 6:  $\text{Cu}_2\text{O}$ -Cu Eutektikum, REM-EDX Elementverteilung von Sauerstoff



festgelegt sind. Obwohl üblicherweise lediglich zwischen 0 und etwa 0,5 Gew.% As im Kupfer nachgewiesen wurden und nur in einzelnen Fällen auch bis 1,9 Gew.% As gemessen wurden [17], unterliegt das Auftreten von Arsenkupfer einem klaren zeitlichen Trend: Das als „Mondseekupfer“ bezeichnete Material ist – wenn auch keineswegs exklu-

siv – überregional charakteristisch für die Metallurgie des jüngeren Jungneolithikums ab etwa 3800 v. Chr. [17–19].

Das hier untersuchte Kupferbeil vom Heuberg ist formtypologisch aber als älter einzustufen. Dies erfährt eine Bestätigung sowohl von chemischer Seite durch das Fehlen eines nachweisbaren Arsengehalts als auch metallo-

Abb. 7: Verformungen an der Schneide, LOM: a–d Klemm2 Ätzung

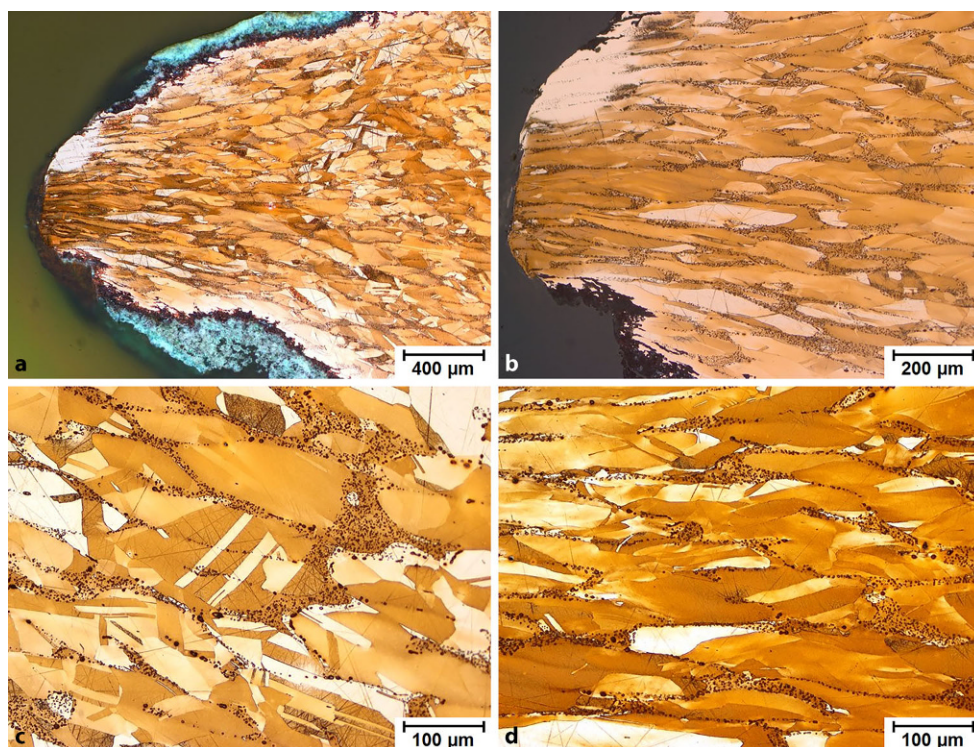
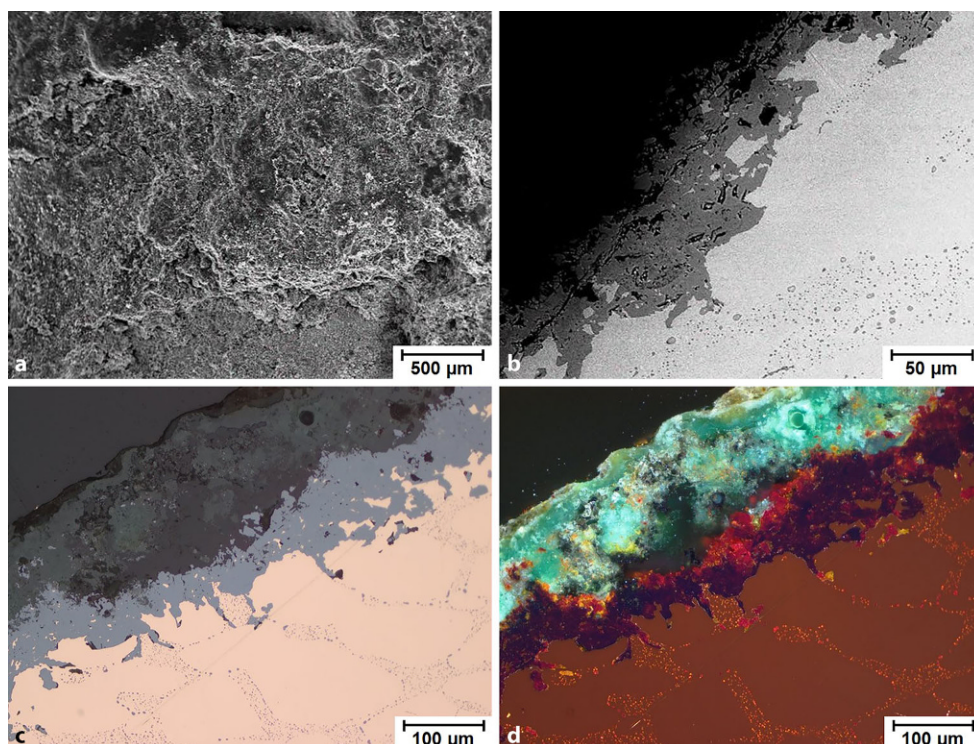


Abb. 8: Korrosionsprodukte an der Beiloberfläche a, b REM, c, d LOM, d polarisiertes Licht



graphisch durch die einfache angewandte Technologie. In beiden Punkten unterscheidet es sich von den üblichen Beilen des Typs Altheim des entwickelten 4. Jahrtausends v. Chr. [10]. Da im vorliegenden Kupferbeil vom Heuberg weder As noch S nachgewiesen werden konnten, sondern nur das Cu-Cu<sub>2</sub>O Eutektikum, ist von einer sehr reinen

Malachit-Erzbasis auszugehen [20]. Das oxydische Erz Malachit Cu<sub>2</sub>(OH)<sub>2</sub>(CO<sub>3</sub>) ist aufgrund seiner auffällig grünen Farbe sehr leicht an entsprechenden Aufschlüssen zu finden. Die Verhüttung von oxydischen Kupfererzen zu metallischem Cu ist einfach und kann in einem flachen Tiegel oder Herd mit Holzkohle als Reduktionsmittel durch-

geführt werden. Hierfür geeignete Gießlöffel, in denen vermutlich auch die Reduktion der Erze durchgeführt wurde, sind aus dem entwickelten 4. Jahrtausend v. Chr. im nördlichen Alpenvorland gut bekannt aus Fundplätzen der Pfyn-Kultur und der Mondseekultur, ältere Belege aber sind aber lediglich am östlichen Rand der Alpen belegt [8]. Die Temperatur für die Reduktion beziehungsweise das Aufschmelzen des Cu konnte mittels Blasrohren erreicht werden. Durch das Vorliegen eines Cu-Cu<sub>2</sub>O Eutektikums konnte bereits beim Schmelzpunkt von Cu (1085°C) eine vollständig aufgeschmolzene Legierung erhalten werden. Der im geschmolzenen Kupfer gelöste Sauerstoff wird bei der eutektischen Erstarrung als Cuprit (Cu<sub>2</sub>O) ausgeschieden. Eine Lokalisierung des genutzten Erzvorkommens erscheint nicht möglich, da Vergleichsdaten mit kleinen Erzvorkommen der Region fehlen [12]. Außerdem könnten Erze verschiedenen Vorkommens gemischt worden sein, was eine Zuordnung zu einer Lagerstätte letztendlich unmöglich macht.

Die im Mondseekupfer oft gefundenen As-Gehalte lassen sich auch einfach durch die Verhüttung von oxydischen, verwitterten Fahlerzen erklären. Bei der Verwitterung entsteht Malachit, der mit den Oxiden von As, Sb und vermutlich auch S aus dem Fahlerz verunreinigt ist. Für die Aufreinigung des Erzes war wiederum die Farbe des Malachits maßgeblich und die Verunreinigungen wurden während der Reduktion mehr oder weniger stark im metallischen Kupfer aufgenommen [21]. Bei dieser Methode der Kupfergewinnung handelte es sich somit um einen einfachen einstufigen Prozess, in dem Reduktion und Schmelzen gleichzeitig durchgeführt wurden. As, welches einmal im Cu gelöst ist, bleibt auch während nachfolgender Schmelzprozesse erhalten und verflüchtigt sich nicht [22].

In der Entwicklung der Kupfermetallurgie folgte die Verhüttung von Fahlerzen, wofür ein zumindest zweistufiger Prozess notwendig ist, nämlich Rösten und Reduzieren. Da Fahlerze oberflächlich verwittert sind, bedurfte es bereits etwas tiefer gehender bergmännischer Abbauarbeiten. Die Fahlerzverhüttung ist gut untersucht, wobei zu beachten ist, dass As und Sb während des Röstens verdampfen beziehungsweise in die Schlacke gehen [23]. Im hergestellten Kupfer aus Fahlerz kann auch S enthalten sein, falls dieser nicht vollständig beim Rösten entfernt wurde. Wie bei der Kupfergewinnung aus oxydischen Erzen kann im Röstgut enthaltenes As und Sb im Kupfer aufgenommen werden. Auf die später durchgeführte Verhüttung von Chalkopyrit und die Herstellung von Zinnbronzen wird hier nicht näher eingegangen.

#### 4. Zusammenfassung

Am Heuberg bei Ohlstadt in Deutschland wurde ein Kupferflachbeil gefunden, welches aufgrund formtypologischer und metallurgischer Kriterien in das frühe 4. Jahrtausend v. Chr. oder sogar an die Wende vom 5. zum 4. Jahrtausend v. Chr. datiert werden kann. In diesem Zeitraum ist im südbayerischen Raum sowie im angrenzenden Tiroler und Salzburger Gebiet die jungneolithische beziehungsweise kupferzeitliche Münchshöfener Kultur verbreitet.

Ein dem Beil entnommener Probekeil konnte metallographisch untersucht werden. Eine am metallographischen Schliff durchgeführte RFA-Analyse ergab nahezu reines Kupfer. Die in jungneolithischem Kupfer häufig vorhandenen Elemente As, Sb, S und Pb, waren nicht nachweisbar. Das Gefüge der Probe ist sehr gleichmäßig und enthält neben zuerst entstandenem Kupfer ein feines Cu-Cu<sub>2</sub>O Eutektikum. Im Bereich der Beilschneide wurde eine deutliche Verformung des Gefüges festgestellt, was auf ein gezieltes Hämmern hindeutet.

Aufgrund des Fehlens von S und As im Kupfer kann davon ausgegangen werden, dass nur oxydische, malachitische Erze für die Kupfergewinnung verwendet wurden. Das Beil vom Heuberg erweitert somit den Bestand der wenigen Belege von früher Kupferverwendung im nördlichen Alpenvorland wesentlich.

**Danksagung.** Angaben zum genauen Fundort sind dem Finder zu verdanken, der freundlicherweise eine Führung zur Fundstelle unternahm und so die irrtümliche, aber bisher als Fundort kursierende Bezeichnung „Zeilkopf“ korrigierte. Unser Dank geht außerdem an Peter Schwarz und Josef Kümmerle vom Museum Werdenfels sowie den Landkreis Garmisch-Partenkirchen für die Möglichkeit der Beprobung des Beils, an Dr. Ulrike Töchterle (Universität Innsbruck) für die restauratorische Unterstützung sowie an Dr. Johannes Zbiral (TU Wien) für die durchgeführte RFA-Messung.

**Funding.** Open access funding provided by University of Innsbruck and Medical University of Innsbruck.

**Open Access** Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

#### Literatur

1. Maier, E.F.: Die Äxte und Beile in Österreich. Prähistorische Bronzefunde, Bd. IX 9. C.H. Beck'sche Verlagsbuchhandlung, München (1977)
2. Pászthory, K., Mayer, E.F.: Die Äxte und Beile in Bayern. Prähistorische Bronzefunde, Bd. IX 20. Franz Steiner, Stuttgart (1998)
3. Schwarzberg, H.: Neues zu jungneolithischen Kupferbeilen aus Oberbayern. Bayer. Vorgeschichtsblätter 81, 7–18 (2016)
4. Schier, W.: Jungneolithikum und Kupferzeit in Mitteleuropa (4500–2800 v. Chr.). In: Lichter, C. (Hrsg.) Jungsteinzeit im Umbruch. Die „Michelsberger Kultur“ und Mitteleuropa vor 6000 Jahren, S. 26–36. Primus, Darmstadt (2010)
5. Spindler, K.: Das Beil vom Hauslabjoch mit seinem archäologischen Umfeld. In: Weisgerber, G., Goldenberg, G. (Hrsg.) Alpenkupfer = Rame delle Alpi. Dt. Bergbau-Museum, Bochum (2004). Der Abschnitt, Beiheft 17, 228
6. Rosenstock, E., Scharl, S., Schier, W.: Ex oriente lux? – Ein Diskussionsbeitrag zur Stellung der frühen Kupfermetallurgie Südosteuropas. In: Bartelheim, M., Horjes, B., Krauss, R. (Hrsg.) Von Baden

- bis Troja. Ressourcennutzung, Metallurgie und Wissenstransfer. Eine Jubiläumsschrift für Ernst Pernicka, *Oriental and European Archaeology*, Bd. 3, S. 59–122. Marie Leidorf, Rahden (2016)
7. Matuschik, I., Merkl, M., Strahm, C.: Von großer Tragweite. Neuer Werkstoff Kupfer. In: 4.000 Jahre Pfahlbauten, S. 379–383. Jan Thorbecke, Ostfildern (2016)
  8. Turck, R.: Die Metalle zur Zeit des Jungneolithikums in Mitteleuropa. *Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie*, Bd. 185. Rudolf Habelt, Bonn (2010)
  9. Otto, H., Witter, W.: Handbuch der ältesten vorgeschichtlichen Metallurgie in Mitteleuropa. Johann Ambrosius Barth, Leipzig, S. 116–117 (1952)
  10. Kienlin, T.L.: Kupferzeitliche Waffen und Geräte – Aspekte der Herstellung und des sozialen Kontexts. In: Dietz, U.L., Jockenhövel, A. (Hrsg.) *Bronzen im Spannungsfeld zwischen praktischer Nutzung und symbolischer Bedeutung, Prähistorische Bronzefunde*, Bd. XX 13, S. 131–162. Franz Steiner, Stuttgart (2011)
  11. Matuschik, I.: Kupferfunde und Metallurgie-Belege, zugleich ein Beitrag zur Geschichte der kupferzeitlichen Dolche Mittel-, Ost- und Südosteuropas. In: Mainberger, M., Billamboz, A. (Hrsg.) *Das Moordorf von Reute: Archäologische Untersuchungen in der jungneolithischen Siedlung Reute-Schorrenried*, S. 207–312. Teraqua CAP, Staufen (1998)
  12. Pernicka, E., Frank, C.: Das Kupfer der Mondseegruppe. In: Stöllner, T., Oeggel, K. (Hrsg.) *Bergauf, Bergab, 10000 Jahre Bergbau in den Ostalpen*, S. 77–82. Deutsches Bergbaumuseum, Bochum (2015)
  13. Artioli, G., Angelini, I., Kaufmann, G., Canovaro, C., Dal Sasso, G., Villa, I.M.: Long-distance connections in the Copper Age: New evidence from the Alpine Iceman's copper axe. *PLoS ONE* (2017). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179263>
  14. Massalski, T.B.: *Binary alloy phase diagrams*. ASM International, Metals Park (1990)
  15. Sperl, G.: Der Werkstoff des „Ötzi-Beiles“ Die kupferzeitliche Beilklinge der Gletschermumie aus den Ötztaler Alpen. *Berg Huettenmaenn Monatsh* **163**, 451–455 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00501-018-0782-0>
  16. Haubner, R., Strobl, S., Thurner, M., Herdits, H.: Ein Metallflachbeil der Kupferzeit aus Bernstein, Burgenland. *Berg Huettenmaenn Monatsh* **165**, 447–452 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00501-020-00983-2>
  17. Klassen, L., Stürup, A., Stürup, S.: Decoding the Riesebusch-copper: lead-isotope analysis applied to early neolithic copper finds from south Scandinavia. *Prähistorische Z.* **76**, 55–73 (2001). <https://doi.org/10.1515/prhz.2001.76.1.55>
  18. Gross, E., Schaeren, G., Villa, I.M.: Die jungsteinzeitliche Kupferbeilklinge von Zug-Riedmatt, Ein Schlüsselfund zur Chronologie und Metallurgie in der zweiten Hälfte des 4. Jahrtausends v. Chr. *Tugium* **33**, 79–89 (2017)
  19. Gleser, R.: Klassifikation, Verbreitung und chemische Zusammensetzung kupferzeitlicher Metallartefakte an Rhein, Mosel und Saar. In: Koch, M. (Hrsg.) *Archäologie in der Großregion, Archäologentage Otzenhausen*, Bd. 3, S. 163–189. (2021) <https://doi.org/10.11588/propylaeum.798.c10533>
  20. Haubner, R.: Die prähistorische Kupfermetallurgie – allgemeine Betrachtungen. *Berg Huettenmaenn Monatsh* **166**, 343–351 (2021). <https://doi.org/10.1007/s00501-020-01056-0>
  21. Hauptmann, A.: Die Kupfer- und die Bronzezeit. *Ferrum*, Bd. 63., S. 12–17 (1991) <https://doi.org/10.5169/seals-378262>
  22. Mödinger, M., Oro Calderon, R., Haubner, R.: Arsenic loss during metallurgical processing of arsenical bronze. *Archaeol. Anthropol. Sci.* **11**, 133–140 (2019). <https://doi.org/10.1007/s12520-017-0534-1>
  23. Haubner, R., Strobl, S.: Considerations on copper smelting from Fahlores and the metallurgy of Cu-as bronzes. *Berg Huettenmaenn Monatsh* (2022). <https://doi.org/10.1007/s00501-022-01230-6>
- Hinweis des Verlags.** Der Verlag bleibt in Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutsadressen neutral.