

## Die Anfänge der Kupfermetallurgie – archäometallurgische Versuche zur Verhüttung von Malachit am offenen Feuer

Ralf Laschimke, Maria Burger

**Summary – Archaeometallurgical experiments on extracting copper from malachite in open fireplaces.** *The use of the copper metal began about 10000 years ago. It is assumed, that the extraction of copper metal from copper ore was carried out in open fireplaces, but the smelting technology that the early metallurgists had applied is not yet fully understood. Several researchers reported archeometallurgical experiments with pellets containing crushed malachite, pulverized charcoal, and clay. However, these experiments provided only very small quantities of copper in the form of tiny prills. A series of experiments was performed with the aim to improve metallurgical performance. Instead of crushed malachite, malachite pieces of 15 to 20 mm in diameter were inserted into charcoal/clay-pellets of about 50 mm in diameter. These pellets were heated in the embers of an open fireplace. Thereafter, the pellets were quenched in water. After cooling, the pellets could be easily crushed since no slag had developed. The aggregates of metallic copper, generated by the reduction process inside the pellets, were separated from the crushed pellets. The copper aggregates show an extremely high porosity, caused by their decrease in volume during the reduction process. Due to its large internal surface the porous copper is very sensitive to re-oxidation. Even, between 800 and 600°C intense re-oxidation takes place. To avoid this, the pellets were removed from the fire and quenched in water. This way ductile copper beads were obtained. The interaction of reduction and re-oxidation is shown in a time-temperature diagram. Both, the malachite and extracted copper we investigated by chemical and metallographic methods. The composition of the experimental copper is indistinguishable from many objects of the Chalcolithic period. The metal taken from several experimental pellets was melted in a modern ceramic crucible and used for casting a copy of a Chalcolithic flat axe. Further, we show that the very old copper artefacts excavated in Aşikli Höyük and in Mersin-Yumktepe are made by forging of native copper, possibly re-melted in pellets.*

Im Jahre 1964 wurden bei archäologischen Grabungen in der frühneolithischen Siedlung Çayönü Tepesi in Ost-Anatolien Artefakte aus Kupfer gefunden (MADDIN, STECH, MUHLY 1980, 211-225). Für die Archäologen war es unvorstellbar, dass dieses Kupfer im Frühneolithikum vor ca.

10000 Jahren aus Kupfererzen gewonnen worden sein könnte. Man kam zu der Überzeugung, dass es sich nur um gediegenes Kupfer handeln kann (ÖZDOGAN, ÖZDOGAN 1999, 13-23). Als 1991 in Aşikli Höyük/Anatolien 45 Schmuckperlen aus Kupfer gefunden wurden, die ebenfalls



Abb. 1: Malachit-Abschläge, die für die Verhüttung nach der Pellet-Technologie verwendet wurden. – Pieces of malachite prepared for extracting copper using pellet technology.



Abb. 2: Pellets in einem Holzkohlefeuer. Die Luftzufuhr erfolgt von der Seite aus, um ein Temperaturgefälle zu erzeugen. – Pellets in a bed of charcoal. The air supply is from one side only to generate a temperature gradient.

ins 10. Jahrtausend BP datiert wurden, kam man nach umfangreichen Materialuntersuchungen erneut zu dem Schluss, dass es sich um gediegenes Kupfer handelt (YALÇIN, PERNICKA 1999, 45-54). Da es im vorkeramischen Frühneolithikum noch keine Schmelztiegel gab, geht man bis heute davon aus, dass das gediegene Kupfer ohne vorheriges Umschmelzen direkt durch Schmieden verarbeitet worden

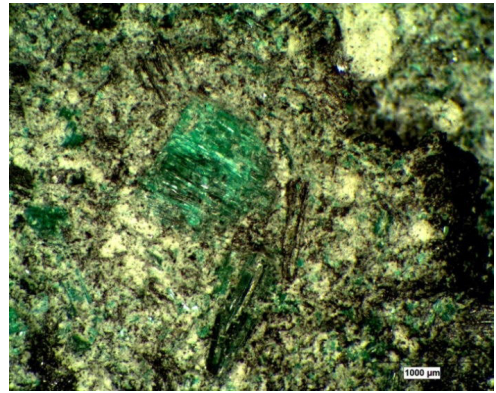


Abb. 3: Malachitstück, eingebettet in ein Pellet aus feuchtem Lehm und Holzkohlepulver. – A piece of malachite inserted in a pellet made of damp clay and charcoal.

ist (ENSIN 1999, 23-30). Unsere Experimente zeigen, dass die Gewinnung von Kupfer aus Malachit und das Umschmelzen von Kupfer auch ohne die Verwendung von keramischen Tiegeln mit den technischen Mitteln des Frühneolithikums möglich gewesen wäre.

## Experimente

Für die Verhüttungsversuche stand uns Malachit aus dem Kongo zur Verfügung. Von einem größeren Malachitbrocken haben wir 1 bis 2 cm lange Abschläge hergestellt (Abb. 1) und in golfballgroße Pellets eingebettet. Die Pellets bestanden aus einer Mischung von 1 Raumteil Lehm und 2 Raumteilen Holzkohlepulver. Das Gemisch war mit Wasser zu einer knetbaren Masse angemacht worden. In jedes Pellet wurden 3 bis 4 Malachitstücke eingebettet. Die Pellets wurden nach Lufttrocknung in die Glut eines Holzkohlefeuers gelegt. Durch einseitige Luftzufuhr (Abb. 2) entstand in dem Feuer ein Temperaturgefälle, das die Ermittlung des in Abb. 10 dargestellten Zeit-Temperatur-Schaubildes ermöglichte.

Abb. 3 zeigt ein eingebettetes Malachitstück vor Beginn des Versuches. In der



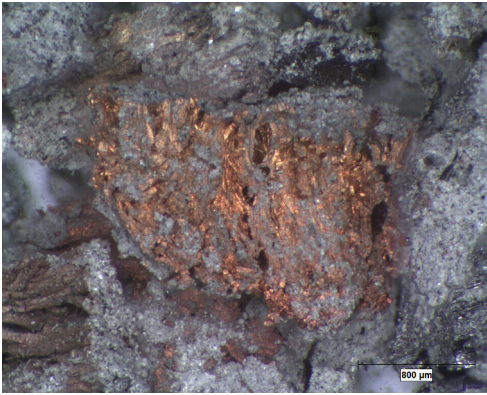


Abb. 4: Kupferaggregat, das durch Reduktion von Malachit in einem Pellet entstanden ist. – Aggregate of copper extracted from malachite in a pellet.

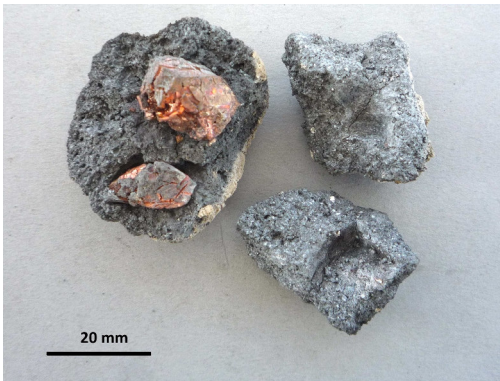


Abb. 5: Bei der Reduktion von Malachit hat sich in dem Pellet keine Schlacke gebildet. – The process of extracting copper from malachite works without the formation of slag.

Glut des Feuers wird der Malachit zu metallischem Kupfer reduziert (Abb. 4). Wie aus Abb. 5 hervorgeht, hat sich bei dieser Reduktion keine Schlacke gebildet, da alle Reaktionen über die Gasphase abgelaufen sind. Die entstandenen Aggregate aus Kupfer (Abb. 6) weisen zahlreiche Risse und Poren auf. Man erkennt, dass das Kupfer noch nicht schmelzflüssig war und äußerst brüchig ist. In dieser Form kann das Kupfer nicht verwendet werden. Die Oberfläche der Kupferaggregate ist unterschiedlich oxidiert. Man erkennt

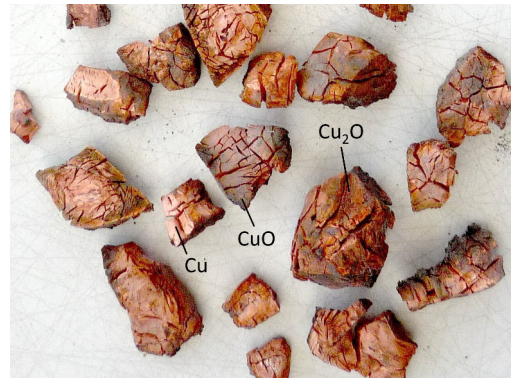


Abb. 6: Die Reduktion von Malachit erfolgt weit unterhalb des Schmelzpunktes des Kupfers. – The reduction of malachite takes place below the melting point of copper.

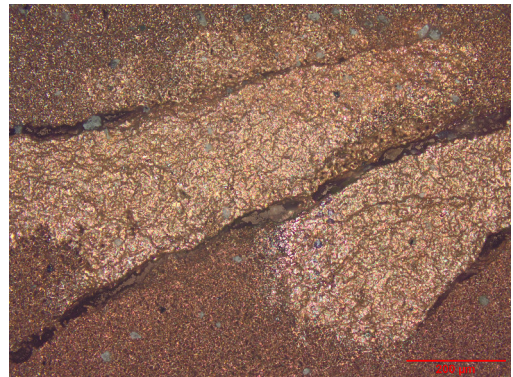


Abb. 7: Das in einem Pellet durch Reduktion von Malachit entstandene Kupfer weist zahlreiche Risse und Poren auf, die das Eindringen von Luftsauerstoff und die innere Oxidation erleichtern. – The copper extracted from malachite shows extreme porosity, which permits oxidation from within.

schwarzes  $\text{CuO}$ , rötliches  $\text{Cu}_2\text{O}$  und lachsrotes metallisches Kupfer. Unter dem Mikroskop (Abb. 7) wird sichtbar, dass die Kupferaggregate extrem porös und deshalb sehr oxidationsempfindlich sind. Werden die Pellets im Feuer bis über den Schmelzpunkt des Kupfers ( $1083^\circ\text{C}$ ) erwärmt, so entstehen aus den porösen Kupferaggregaten dichte, rundli-



*Abb. 8: Schmelzperlen aus Kupfer, die in einem Pellet durch Aufschmelzen von porösen Kupferaggregaten entstanden sind. Einige der größeren Schmelzperlen sind durch Zusammenschmelzen von kleineren Schmelzperlen entstanden. – Beads of ductile copper, generated by re-melting the porous copper from inside the pellets. Some of the large beads are formed by fusion of smaller beads.*

che Schmelzperlen (Abb. 8), die warm wie auch kalt bestens verformbar sind. Die Verhüttung von Kupfererzen mittels kohlenstoffhaltiger Pellets wird in Nepal noch heute praktiziert (ANFINSET 2011, 34-61). S. Timberlake hat in Anlehnung an diesen ethnometallurgischen Verhüttungsprozess eine Reihe von Experimenten zur Gewinnung von Kupfer aus Malachit durchgeführt (TIMBERLAKE 2007, 27-36). Das Ausbringen an verwertbarem Kupfer war bei diesen Versuchen allerdings ziemlich gering. P. Craddock (CRADDOCK, MEEKS, TIMBERLAKE 2007, 37-45) erzielte in Zusammenarbeit mit Timberlake eine höhere Ausbeute an Kupfer, jedoch hauptsächlich in Form von „tiny prills“, die nicht zur Weiterverarbeitung durch

Schmieden geeignet gewesen wären. Wir haben größere, schmiedbare Schmelzperlen erhalten und führen dies darauf zurück, dass wir die Re-oxidation des Kupfers während des Verhüttungsprozesses verhindert haben.

Abb. 9 zeigt das Innere eines nur teilweise zu Kupfer reduzierten Malachitbrockens. Der Kern des Brockens besteht aus noch nicht reduziertem, schwarzem Kupferoxid  $\text{CuO}$ , das in dem Pellet durch thermische Zersetzung von Malachit entstanden ist. Nach außen hin schließt sich eine Zone von rotem  $\text{Cu}_2\text{O}$  an und daran eine Schicht von metallischem Kupfer. Die Außenfläche der Kupferschicht ist bereits wieder mit schwarzem Kupferoxid bedeckt, das sich während der



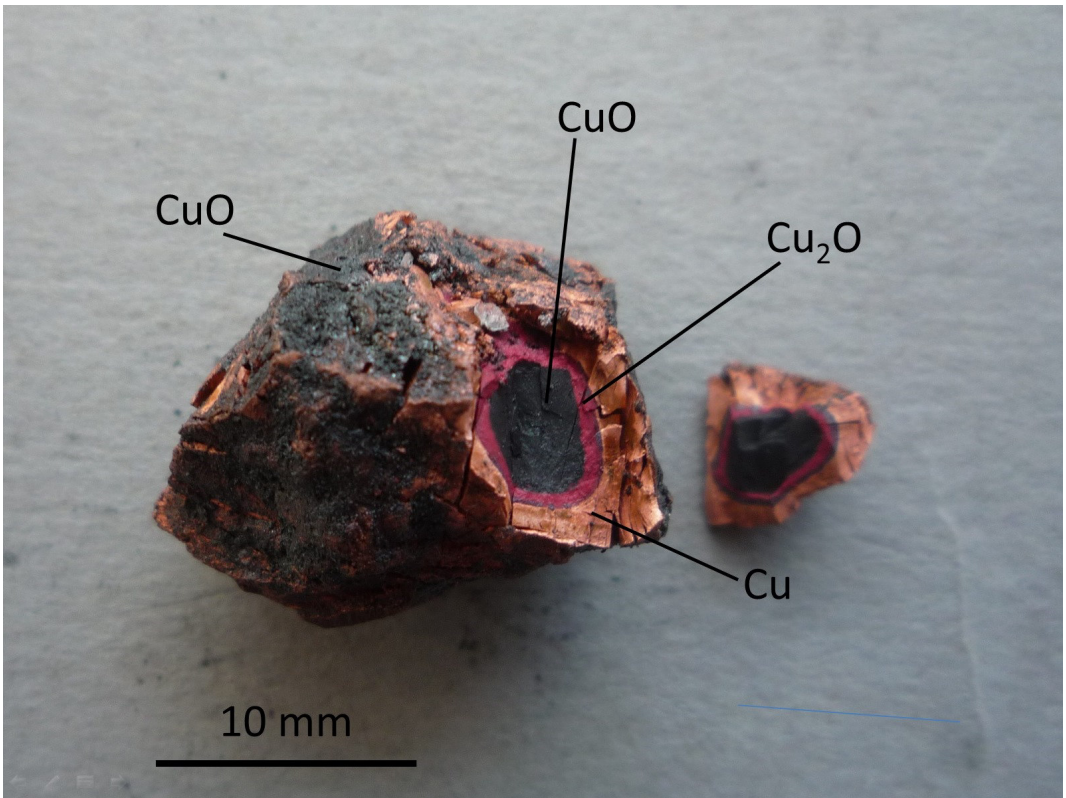


Abb. 9: Nur teilweise bis zu metallischem Kupfer reduziertes Malachitstück. Die Oberfläche des Kupfers ist wieder zu schwarzem CuO re-oxidiert worden. – Malachite which is only partly reduced to copper metal. The surface of the copper has re-oxidized again to black CuO.

Abkühlung des Pellets durch Re-oxidation gebildet hat.

Das Wechselspiel von Reduktion und Re-oxidation haben wir in dem Zeit-Temperatur-Schaubild Abb. 10 dargestellt. Wir betrachten zunächst die rote Kurve. Der hydroxidisch-karbonatische Malachit wird bei ca. 250°C thermisch zu CuO, CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O zersetzt. Bei 700°C reagiert das aus dem Lehm nur langsam dampfförmig entweichende Wasser mit dem Kohlenstoff der Holzkohle und bildet Wassergas, das aus Wasserstoff und Kohlenmonoxid besteht. Beide Gase wirken reduzierend auf CuO, wobei die Reduktionswirkung von CO mit steigender Temperatur stark zunimmt.

In einem der Pellets hatten wir neben

dem Malachitpartikel ein Silberpartikel eingebaut (Abb. 10, rechts oben). Man erkennt, dass das Silber, dessen Schmelzpunkt bei 961°C liegt, noch nicht geschmolzen war, aber der Malachit ist bereits vollständig in poröses Kupfer umgewandelt worden. Wird das Pellet in diesem Stadium aus dem Feuer genommen und schnell mit Wasser abgekühlt, so wird das Kupfer nicht re-oxidiert und behält seine rote Farbe.

Wir betrachten die grüne Kurve. Es werden zunächst die gleichen Stadien durchlaufen wie bei der roten Kurve. Danach steigt die Temperatur für kurze Zeit über den Schmelzpunkt des Kupfers an. Anschließend erfolgt wieder schnelle Abkühlung mit Wasser. Es werden nichtoxidier-

## Extraction of copper from malachite

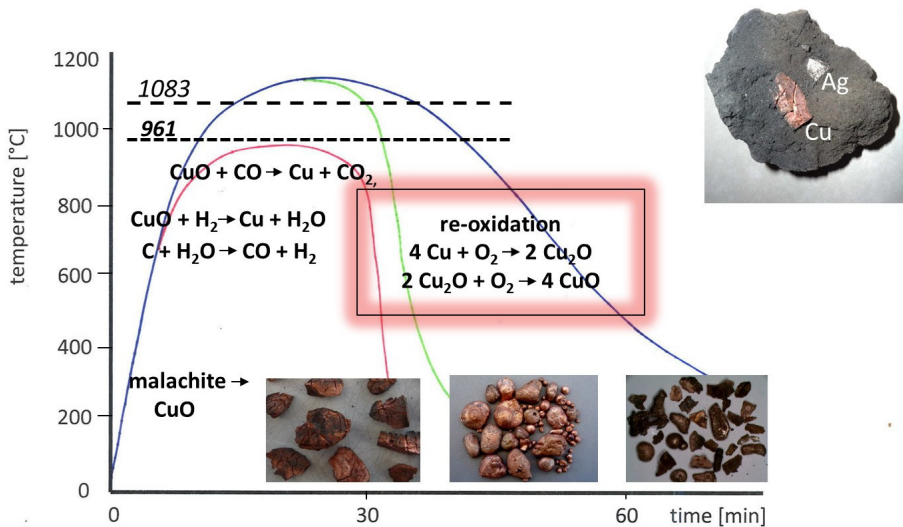


Abb. 10: Zeit-Temperatur-Schaubild, das die Wechselwirkung von Reduktion und Re-oxidation von Kupfer bei der Verhüttung von Malachit mit Pellets zeigt (schematisch). – Diagram showing the interaction of oxidation and re-oxidation of copper during the pellet technology process (schematic).

te, dichte Schmelzperlen (Abb. 8) erhalten, die eine hervorragende Duktilität besitzen.

Wir betrachten die blaue Kurve. Das Kupfer wurde im Inneren des Pellets längere Zeit schmelzflüssig gehalten. Danach wurde das Pellet langsam am Rande des Feuers abgekühlt. Das Ergebnis waren stark oxidierte „prills“. Für die drei unterschiedlichen Versuchsergebnisse haben wir folgende Erklärung: Innerhalb des in Abb. 10 rot eingerahmten Bereiches bietet Kohlenmonoxid für das Kupfer nur einen schwachen Oxidationsschutz. Dies ist bedingt durch den mit sinkender Temperatur geringer werdenden Unterschied der freien Enthalpie von CuO und CO (siehe Lehrbücher der Physikalischen Chemie: Ellingham-Diagramm). Bei langsamer Abkühlung ist die Verweilzeit im

kritischen, roten Bereich länger, und es kommt zu einer erhöhten Re-oxidation des Kupfers durch Luftsauerstoff. Um die Re-oxidation zu vermindern, haben wir die Pellets bei den meisten Versuchen nach 30 bis 35 Minuten Reaktionszeit aus dem Feuer genommen und mit Wasser abgekühlt. Dabei haben wir die in Abb. 8 gezeigten Schmelzperlen erhalten. Ein wichtiger Prozessparameter war die Korngröße des eingesetzten Malachits. Wird der Malachit stark zerkleinert, so kommt es zu stärkerer Re-oxidation des Kupfers. Wir haben mit Malachitstücken von 15 bis 20 mm Länge (Abb. 1) die besten Ergebnisse erzielt.

Bei einer Prozessführung gemäß der grünen Kurve haben wir pro Pellet bis zu 25 Gramm Kupfer erhalten. Das Kupfer ist sehr rein und enthält außer 0,25% Eisen

## Das Ötzi-Beil 5300 BP



*copper extracted from malachite*

*Abb. 11: Replik des chalkolithischen Ötzi-Beiles. Die Replik wurde aus Kupfer gegossen, das mit Hilfe der Pellet-Technologie aus Malachit gewonnen worden war. – Replica of the chalcolithic Ötzi axe. The processed copper was extracted from malachite by means of the above described pellet technology .*

alle anderen Beimengungen nur in sehr geringen Konzentrationen (Abb. 14). Obwohl das einzelne Pellet nur eine geringe Menge Kupfer liefert, ist die Pellet-Technologie ergiebig, wenn die aus vielen Verhüttungsgängen gewonnenen Schmelzperlen gesammelt werden. Um dies zu demonstrieren, haben wir mit dem aus 24 Pellets gewonnenen Kupfer ein 180 g schweres kupfersteinzeitliches Flachbeil gegossen (Abb. 11). Die Schmelzperlen wurden in einem modernen Keramiktiegel in einem elektrisch beheizten Kammerofen unter reduzierenden Bedingungen eingeschmolzen. Die Kupferschmelze wurde in eine nach dem Wachs-ausschmelzverfahren hergestellte Keramikform gegossen. Flachbeile aus Kupfer er-

scheinen bekanntlich erst im späten Neolithikum. Die frühneolithischen Artefakte aus gediegenem Kupfer sind wesentlich kleiner und sind nicht gegossen, sondern geschmiedet.

Ü. Yalçın berichtet, dass zu Beginn des 7. Jahrtausends BP in Yumuktepe/Mersin in Süd-Anatolien alles Kupfer, sowohl das gediegene wie auch das verhüttete Kupfer, umgeschmolzen wurde, bevor es geschmiedet worden ist (YALÇIN 2000, 119-129). Über die Technologie des Umschmelzens und des Verhüttens hat man keine klare Vorstellung. Keramische Schmelztiegel sind in Yumuktepe nicht gefunden worden. Der einzige Weg, auch ohne Keramiktiegel mit geschmolzenem Kupfer umzugehen, ist die Pellet-Techno-



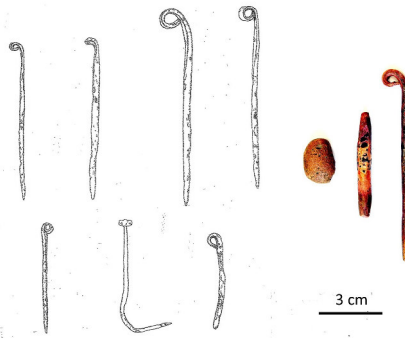


Abb. 12: Kupfernadeln aus der frühneolithischen Siedlung Meresin-Yumuktepe/Anatolia und experimentell hergestellte Replik. Für die Herstellung der Replik wurde aus einer Schmelzperle bei Rotglut ein Bolzen geschmiedet und dieser im kalten Zustand zu einer Nadel ausgehämmert. – Neolithic copper pins excavated in Meresin-Yumuktepe/Anatolia. For making a replica a copper bead was forged when red hot to create a bolt and cold hammered to make a pin.

logie. Wir betrachten das Pellet deshalb als die Urform des metallurgischen Tiegels. Mit der Pellet-Technologie kann Kupfererz im offenen Feuer verhüttet oder bereits verhüttetes Kupfer bzw. gediegenes Kupfer umgeschmolzen werden. Berühren sich in einem Pellet mehrere Schmelzperlen, so verschmelzen sie zu einem größeren Regulus (Abb. 8). Ein Nachteil der Pellet-Technologie ist, dass die Kupferschmelze nicht in eine separate Gießform abgegossen werden kann. Von den in Yumuktepe gefundenen Artefakten aus Kupfer sind vor allem die auf 6000 BP datierten Nadeln interessant. Eine solche Nadel haben wir aus einer der Schmelzperlen (Abb. 8) nachgebildet. Zur Herstellung der Nadel musste die Schmelzperle stark ausgeschmiedet werden. Eine solche hochgradige Umformung gelingt nur, wenn das Kupfer frei ist von nichtmetallischen Einschlüssen. Derartige Inhomogenitäten treten bei gediegenem



Abb. 13: Schmuckperlen aus der frühneolithischen Siedlung Aşıklı Höyük/Anatolien, Funde und experimentell hergestellte Repliken. a) Für die Herstellung einer Replik wurde eine Schmelzperle bei Rotwärme zu einer Ronde gestaucht und diese im kalten Zustand zu einer Schmuckperle aufgerollt; b) Für die Herstellung einer Replik wurde eine Schmelzperle bei Rotwärme um einen Dorn aus Stein geschmiedet. Der dabei entstandene Grat wurde auf einer Sandsteinplatte abgeschliffen. Es entstand eine glatte, rundliche Schmuckperle. – Decorative copper beads excavated at the early-neolithic settlement of Aşıklı Höyük/Anatolia and replicas. a) In order to make the replica, a ductile copper bead was forged red hot to make a round blank and then cold-rolled to make a decorative bead; b) This replica was made by forging a red hot ductile copper bead around a stone bolt. The edge was ground down on sandstone until a smooth, round decorative bead developed.

Kupfer ziemlich oft auf, bei unseren experimentell erzeugten Schmelzperlen wurden sie hingegen nicht beobachtet. Wir haben eine Schmelzperle zwischen 800°C und 700°C vorgeschmiedet und im kalten Zustand mit mehreren Zwischenglühungen zu einer Nadel mit gebogenem Kopf fertiggeschmiedet (Abb. 12). Auch die eingangs erwähnten Schmuckperlen



## Copper extracted from malachite

Element	Malachit [%]	Kupfer [%]	Methode
Cu	56,3	99,0	Flammen-AAS
Sn	< 0,005	< 0,005	ICP-OES
Pb	< 0,02	< 0,02	ICP-OES
Ag	< 0,005	< 0,005	Flammen-AAS
Au	< 0,002	< 0,002	ICP-OES
Fe	0,25	0,12	Flammen-AAS
Co	0,044	0,040	ICP-OES
Ni	0,005	0,005	Flammen-AAS
Bi	< 0,005	< 0,005	ICP-OES
Sb	< 0,02	< 0,02	ICP-OES
As	< 0,005	0,007	ICP-OES
Zn	0,006	0,010	Flammen-AAS
S	< 0,001	< 0,001	LECO CS230

Abb. 14: Chemische Zusammensetzung des für unsere Experimente verwendeten Malachits und des daraus erzeugten Kupfers. Das Probematerial für die Analyse wurde aus dem Eingusssystem des Flachbeiles von Abb. 11 entnommen. Die angegebenen Werte stellen also Mittelwerte aus einer Vielzahl von Schmelzperlen dar. – Chemical composition of the malachite and the copper extracted by pellet technology. The sample material was taken from the chalcolithic axe shown in Fig. 11. In this way we determined the average composition of a large number of copper beads.

von Aşikli Höyük haben wir auf diese Weise aus Schmelzperlen nachgebildet (Abb. 13).

Man nimmt allgemein an, dass die Schmuckperlen von Aşikli Höyük hergestellt worden sind, indem in der Natur gefundenes, gediegenes Kupfer zu Blech ausgehämmert und zu kleinen Hohlzylindern aufgerollt worden ist. Diese Version wurde jedoch niemals experimentell überprüft. Bemerkenswert ist, dass die 45 Schmuckperlen von Aşikli Höyük fast alle die gleiche Größe und Form haben. Wir vermuten, dass sie aus gleichmäßig portioniertem Vormaterial geschmiedet wor-

den sind. Wir halten es jedoch für zweifelhaft, dass in der Natur gefundene, unregelmäßig geformte Aggregate aus gediegenem Kupfer (YALÇIN, MAASS 2013, 1-5) mit den Steinwerkzeugen des Frühneolithikums in schmiedegerechte, für Schmuckperlen passende Vormaterialstücke zerteilt werden konnten. Wir nehmen an, dass inhomogene, von Cuprit und Malachit durchwachsene und darum nicht schmiedbare Stücke aus gediegenem Kupfer mit Hilfe der Pellet-Technologie zu dichten, leicht schmiedbaren Schmelzperlen von annähernd gleicher Größe umgeschmolzen worden sind.

Ausgesuchte Schmelzperlen wurden sodann im rotwarmen Zustand zu Ronden gestaucht und zu Schmuckperlen aufgerollt (*Abb. 13*). An den aneinandergefügten Rändern der aufgerollten Ronden entstanden dabei zungenartige Überlappungen. Da die von uns experimentell hergestellten Schmuckperlen exakt die gleiche Art von Überlappungen aufweisen, kommen wir zu dem Schluss, dass die Schmuckperlen von Aşikli Höyük aus Schmelzperlen, die mit der Pellet-Technologie gewonnen worden sind, geschmiedet wurden.

### Schlussbemerkung

Die Schmuckperlen von Aşikli Höyük stellen aus unserer Sicht einen indirekten Beweis dafür dar, dass die Pellet-Technologie in der Frühphase der Kupfermetallurgie bekannt war. Es gibt allerdings keine direkten archäologischen Belege, die zeigen, in welchem Maße das tiegellose Verhütten von Malachit sowie das tiegellose Umschmelzen von Kupfer im vorkeramischen Neolithikum mit Hilfe der Pellet-Technologie stattgefunden haben. A. Hauptmann (HAUPTMANN U. A. 1993, 541-572) erwähnt in einer Untersuchung zur Technologie der frühesten Kupferverhüttung die Pellet-Technologie nicht. Unsere Aussagen beruhen allein auf archäometallurgischen Experimenten. Bei unseren Experimenten hat sich gezeigt, dass die Pellets nach der Verhüttung keine dauerhaften Spuren hinterlassen, sondern schnell zu einer undefinierbaren, formlosen Masse verwittern. Da außerdem bei der Pellet-Verhüttung keine kupferhaltigen Schlacken entstehen (s. *Abb. 5*), ist das Fehlen von archäologischen Befunden nicht verwunderlich.

Die Voraussetzungen für die Pellet-Technologie waren im vorkeramischen Neolithikum zweifellos überall vorhanden. An jeder Feuerstelle gab es Lehm, Holzkohle und Wasser. Fanden die Menschen den

auffällig grünen Malachit, so lag es auf der Hand, dass sie das Verhalten dieses merkwürdigen Steines im Feuer untersucht haben, auch mit einer Ummantelung aus Lehm und Holzkohle, einem Pellet. Es ist vorstellbar, dass das allseitig geschlossene Pellet weiterentwickelt wurde zu einem nach oben teilweise geöffneten Schmelzgefäß, dass für den einmaligen Abguss einer kleinen Schmelzmenge geeignet war. Diesen Entwicklungsschritt auf dem Wege zum feuerfesten, metallurgischen Schmelztiegel wollen wir durch weitere archäometallurgische Experimente nachvollziehen.

### Danksagung

Unsere Untersuchungen wurden mit freundlicher Unterstützung der ZOLLERN GmbH & Co. KG Sigmaringendorf durchgeführt. Wir danken den Kollegen des ZOLLERN-Zentrallabors für ihre engagierte Mitarbeit. Unser besonderer Dank gilt den Gesellschaftern von ZOLLERN, S. H. Karl Friedrich Fürst von Hohenzollern und Herrn Ludwig Merkle. Ebenso gilt unser Dank dem Geschäftsführer von ZOLLERN, Herrn Dr. Klaus F. Erkes.

### Literatur

**ANFINSET, N. 2011:** Mining and Smelting of Copper in Okahrbot, Western Nepal. In: N. Anfinset, Social and Technological Aspects of Mining, Smelting and Casting Copper. Bochum 2011, 34-61.

**CRADDOCK, P., MEEKS, N., TIMBERLAKE, S. 2007:** On the edge of success: the scientific examination of the products of the Early Mines Research Group smelting experiments. In: S. La Niece, D. Hook, P. Craddock (Eds.), Metals and Mines: Studies in Archaeometallurgy. London 2007, 37-45.

**ENSIN, U. 1999:** Copper objects from the Pre-Pottery Neolithic site of Aşikli. *Der Anschnitt, Beiheft 9*, 1999, 23-30.

**HAUPTMANN, A., U. A. 1993:** Zur Technologie der frühesten Kupferverhüttung im östlichen Mittelmeerraum. In: M. Frangipane u. a. (Eds.), *Between the Rivers and Over the Mountains*. *Archaeologica Anatolica et Mesopotamia*. Alba Palmieri Dedicata. Rome 1993, 541-572.

**MADDIN, R., MUHLY, J., STECH, T. 1999:** Early metalworking at Çayönü. *Der Anschnitt*, Beiheft 9, 1999, 39-46.

**MADDIN, R., STECH, T., MUHLY, J. D. 1980:** Distinguishing Artefacts Made of Native Copper. *Journal of Archaeological Science* 1980, 211-225.

**ÖZDOĞAN, M., ÖZDOĞAN, A. 1999:** Archaeological evidence of the early metallurgy at Çayönü Tepesi. *Der Anschnitt*, Beiheft 9, 1999, 13-23.

**TIMBERLAKE, S. 2007:** The use of experimental archaeology/archaeometallurgy for the understanding and reconstruction of Early Bronze Age mining and smelting technologies. In: S. La Niece, D. Hook, P. Craddock (Eds.), *Metals and Mines: Studies in Archaeometallurgy*. London 2007, 27-36.

**YALÇIN, Ü. 2000:** Frühchalkolithische Metallfunde von Mersin-Yumuktepe: Beginn der extraktiven Metallurgie? *TÜBA-AR III*, 2000, 110-128.

**YALÇIN, Ü., MAASS, A. 2013:** Prähistorische Kupfergewinnung in Derekutugun, Anatolien. *Der Anschnitt*, Beiheft 25, 2013, 1-5.

**YALÇIN, Ü., PERNICKA, E. 1999:** Frühneolithische Metallurgie von Aşikli Höyük. *Der Anschnitt*, Beiheft 9, 1999, 45-54.

Autoren  
Dr.-Ing. Ralf Laschimke  
Schloßhalde 1  
72479 Straßberg  
Deutschland  
laschimke@t-online.de

Dipl.-Chem. Maria Burger  
ZOLLERN GmbH & Co.KG  
Hitzkoferstr. 1  
72517 Sigmaringendorf  
Deutschland  
maria.burger@zollern.com

#### Abbildungsnachweis

Abb. 1-10, 13-14: Burger, Laschimke

Abb. 11 und Abb. 12: von den Autoren bearbeitet nach Vorlagen von U. Yalçin.