

Archäometallurgische Untersuchungen am und zum Hortfund von Nebra

Ernst Pernicka

Abstract

Archaeo-metallurgical investigations on and around the Nebra hoard

Because of its uniqueness, the Nebra hoard has not only been at the centre of archaeological interest, but it has also been the subject of publicly voiced doubt about its authenticity, at least where the Sky Disc was concerned. Right from the start scientific methods were used for investigating the find, not only to prove its authenticity, but also to identify the correlation of the individual objects and the origin of the metals. This was of interest in so far as at least shortly after the discovery of the Sky Disc a possible origin in the Mediterranean or the Near East was also considered. In this paper the investigation of the copper alloys in the light of these questions are described.

Keywords: Early Bronze Age, Nebra, metallurgy, authenticity, origin

Einleitung

Da der Hortfund von Nebra bekanntlich nicht in einer kontrollierten archäologischen Grabung geborgen wurde, sondern von zwei mittlerweile gerichtlich verurteilten Sondengängern, und er fast drei Jahre später in das Landesmuseum Sachsen-Anhalt gelangte und dort erstmals eingehend archäologisch untersucht werden konnte, waren zunächst viele Fragen offen. Weil es sich bei der Himmelscheibe von Nebra um einen einzigartigen Fund handelt, der typologisch nur durch die Begleitfunde datiert werden konnte (Meller 2002), standen zunächst die Untersuchung der Zusammengehörigkeit der Fundgruppe – neben der Himmelscheibe zwei Bronzeschwerter mit goldenen Griffmanschetten, zwei Bronzebeile, zwei Bronzearmspiralen und ein Bronzeeißel – sowie die Untersuchung der Echtheit im Vordergrund¹. Es gab auch Überlegungen zur Eingrenzung des Fundortes anhand der anhaftenden Erdreste und zur Herkunft der verschiedenen Metalle (Kupfer, Zinn, Gold). Die Eingrenzung des Fundortes wäre ein schwieriges Unterfangen gewesen, das sich durch die polizeilichen Ermittlungen erübrigte. Da aber nach den hier vorgestellten Untersuchungen Zweifel an der Echtheit zumindest der Himmelscheibe wie auch am durch Aussagen der Sondengänger identifizierten Fundort geäußert wurden, schloss sich eine Untersuchung der Bodenproben am Fundort und seiner unmittelba-

Zusammenfassung

Der Hortfund von Nebra steht wegen seiner Einzigartigkeit nicht nur im Mittelpunkt des archäologischen Interesses, sondern war auch Gegenstand öffentlich geäußelter Zweifel an der Echtheit zumindest der Himmelscheibe. Von Beginn an wurden naturwissenschaftliche Methoden zur Untersuchung des Fundes herangezogen, um nicht nur die Echtheit zu überprüfen, sondern auch die Zusammengehörigkeit der einzelnen Objekte und die Herkunft der Metalle. Dies war insofern von Interesse, als zumindest kurz nach Bekanntwerden des Fundes auch eine mögliche Herkunft aus dem Mittelmeerraum oder Vorderasien in Betracht gezogen wurde. In diesem Beitrag werden die Untersuchungen an den Kupferlegierungen im Hinblick auf diese Fragen beschrieben.

Schlüsselbegriffe: Frühbronzezeit, Nebra, Metallurgie, Echtheit, Herkunft

ren Umgebung an. Diese sind mittlerweile veröffentlicht (Pernicka u. a. 2008).

In diesem Beitrag werden die Untersuchungen zur chemischen und isotopischen Zusammensetzung des Fundes und die Schlussfolgerungen dargestellt, die sich daraus bezüglich der Echtheit, der Zusammengehörigkeit und der Herkunft der Objekte ziehen lassen. Eine erste kurze Veröffentlichung der Untersuchungen an den Goldfunden ist ebenfalls bereits erschienen (Pernicka u. a. 2003). Außerdem war die Frage der Unterscheidbarkeit verschiedener Goldprovinzen und ihre Beziehung zum Gold auf der Himmelscheibe von Nebra Gegenstand einer Dissertation an der Martin-Luther-Universität Halle (Schmiderer 2008), so dass auf eine eingehende Darstellung der Untersuchungen an den Goldteilen von Nebra verzichtet wurde².

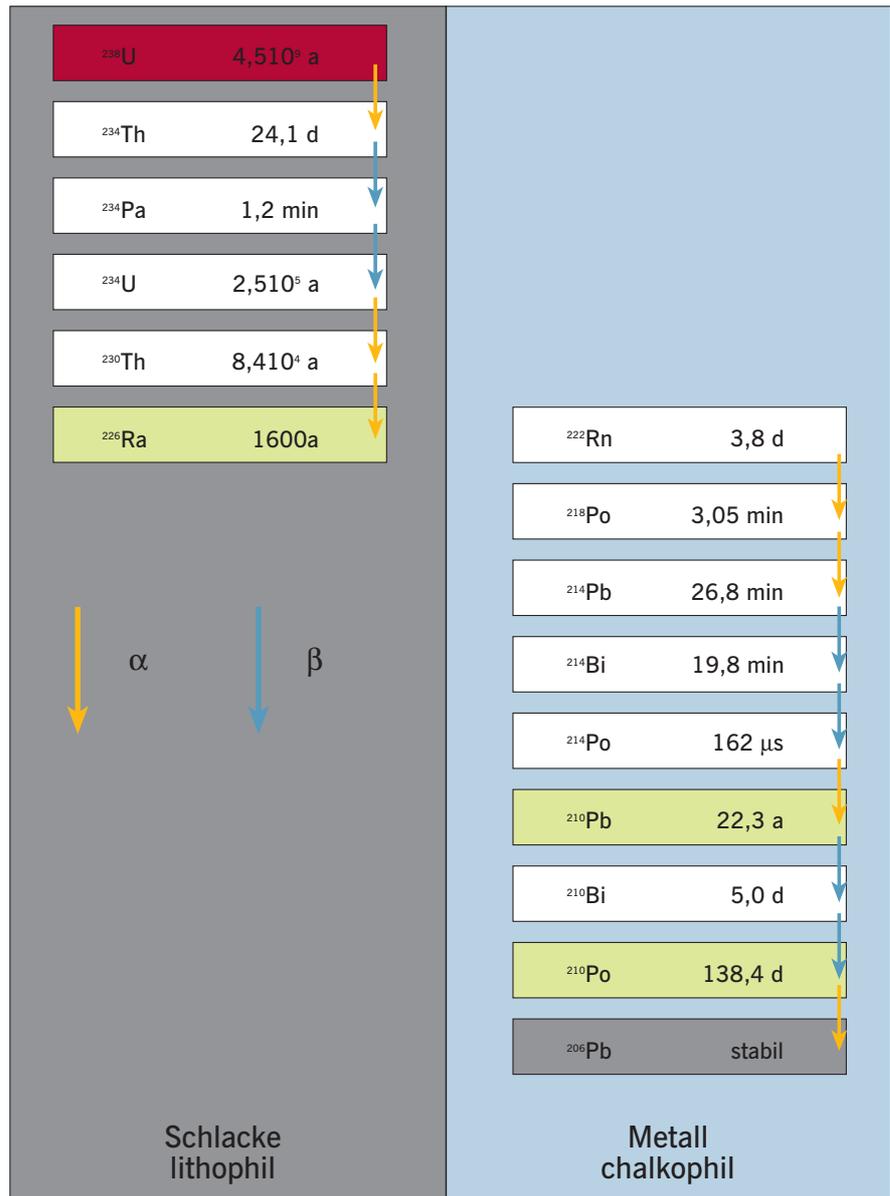
Obwohl es völlig zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden gibt, ist für die Analyse von Metallfunden dennoch in der Regel eine Probenahme erforderlich. Im vorliegenden Fall war dies schon wegen des ²¹⁰Pb-Tests notwendig, bei dem das Blei in der Probe chemisch abgetrennt wird und die Probe daher aufgelöst werden muss. Dafür wurde eine erste Probe vom Rand der Himmelscheibe entnommen. Im Verlauf der weiteren Untersuchungen stellte sich heraus, dass nach der Echtheitsprüfung weitere Fragestellungen in den Vordergrund rückten, wie die Zusammengehörigkeit der

¹ Eine erste Zusammenfassung dieser Untersuchungen erschien bereits kurz nach Bekanntwerden des Fundes (Pernicka/Wunderlich 2002).

² Der Hortfund von Nebra wird in einer getrennten Monographie vorgelegt werden, in der auch die Details aller naturwissenschaft-

lichen Untersuchungen noch einmal ausführlich zusammengestellt werden.

Abb. 2 Im sekulären Gleichgewicht zerfallen alle radioaktiven Zerfallsprodukte des ^{238}U mit derselben Halbwertszeit wie das Mutternuklid. Bei der Verhüttung von Buntmetallen werden die zwei Gruppen von Nukliden im grauen und blauen Bereich nahezu vollständig getrennt. Im blauen Bereich übernimmt dadurch das ^{210}Pb nach wenigen Stunden die Rolle des Mutternuklids, und die Aktivität klingt mit 22,4 Jahren Halbwertszeit ab.



für die Anwendung auf Metalle modifiziert und wird mittlerweile routinemäßig im Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie in Mannheim angewandt (Pernicka u. a. 2008a).

Das Grundprinzip des ^{210}Pb -Tests ist die Störung des radioaktiven Gleichgewichtes in der Zerfallskette und ^{238}U (Abb. 1). Wenn das Mutternuklid eine sehr viel längere Halbwertszeit als alle Zerfallsprodukte (Tochter-nuklide) hat, stellt sich nach einer gewissen Zeit ein Gleichgewicht ein, in dem alle Nuklide in der Zerfallskette die gleiche Aktivität und scheinbar die gleiche Halbwertszeit haben; man nennt das ein sekuläres Gleichgewicht. Dies ist allerdings nur dann gegeben, wenn das Mutternuklid und alle Töchter am gleichen Ort bleiben (geschlossenes System). Da Uran und seine Zerfallsprodukte in vielen Gesteinen enthalten sind, kann man auf den Kontinenten überall diese Radioaktivität messen. Sogar die Atmosphäre enthält radioaktive Substanzen, weil in der Zerfallskette auch das Edelgas Radon auftritt, das in die Atmosphäre entweichen kann und dort zu weiteren Tochter-nukliden zerfällt, die meist an Staubteilchen absorbiert werden. Wenn man deshalb eine Fläche, die der Atmosphäre ausgesetzt ist, z. B. ein Fenster, abwischt, kann man

diese Radioaktivität ebenfalls messen. Es ist offensichtlich, dass beim Entweichen von Radon von seinem Entstehungsort das sekuläre Gleichgewicht gestört wird, allerdings nur zu einem geringen Anteil.

Eine wesentlich drastischere Störung tritt auf, wenn Metalle durch Verhüttung produziert werden. Dabei entstehen zwei flüssige Phasen, das Metall und die Schlacke, die unterschiedliche Tochter-nuklide des ^{238}U aufnehmen (Abb. 2). Die Anwesenheit von Uran ist kaum zu vermeiden, weil einerseits die Erzminerale mit dem Nebengestein verwachsen sind und weil zweitens in der Regel silikatische Zuschläge in den Verhüttungsraum gelangen, um eine optimale Schlackenzusammensetzung (verschiedene Eisensilikate) zu erreichen. Die Tochter-nuklide am Anfang der Zerfallskette, meist mit langen Halbwertszeiten, gehen nahezu vollständig in die Schlacke. Die Tochter-nuklide in der zweiten Hälfte der Zerfallskette gehören zur Gruppe der chalkophilen⁶ Elemente und sammeln sich bevorzugt im Metall. Das führt zunächst dazu, dass frisch verhüttetes Kupfer, aber auch Blei, Silber und Zinn, leicht radioaktiv sind. Diese Radioaktivität stammt aber nun nicht mehr vom Uran selbst, das mit der

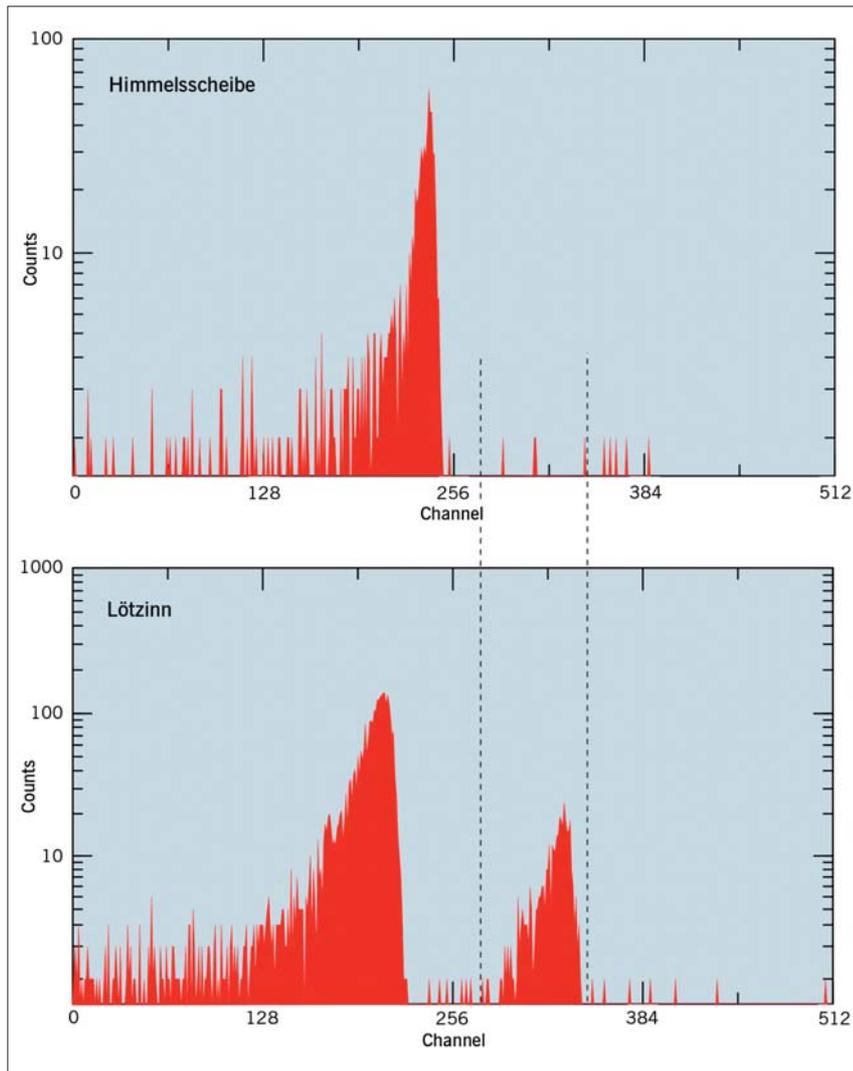


Abb. 3 Vergleich der Spektren der Alphastrahlung einer Probe aus der Himmelscheibe von Nebra mit modernem Lötzinn. Innerhalb der strichlierten Linien liegt die Linie von ^{210}Po , einem Zerfallsprodukt des Urans, das bei der Verhüttung vom Metall aufgenommen wird und das mit ^{210}Pb im Gleichgewicht steht. Die Himmelscheibe weist in diesem Bereich praktisch keine messbare Radioaktivität auf, im Gegensatz zum Lötzinn.

Schlacke abgetrennt wird, sondern von den Tochternukliden des Radons (Abb. 2). Unter diesen ist ^{210}Pb das Nuklid mit der längsten Halbwertszeit von 22,4 Jahren. Da dieses Nuklid nicht mehr ständig vom Mutternuklid nachgeliefert wird, zerfällt es auch mit dieser Halbwertszeit. Das bedeutet, dass nach fünf bis sechs Halbwertszeiten die Radioaktivität des Metalls so weit abgeklungen ist, dass sie unterhalb der Nachweisgrenze liegt.

Wenn deshalb in einem Metallobjekt Radioaktivität von ^{210}Pb nachgewiesen werden kann, ist es sicher vor weniger als etwa 100 Jahren hergestellt worden. Wenn keine Radioaktivität nachweisbar ist, dann ist das Metall eben älter, ohne dass man genau angeben kann, wie alt es ist. Für die Echtheit bedeutet es, dass junges Metall (und damit meist eine Fälschung) eindeutig nachsgewiesen werden kann.

Der Umkehrschluss ist aber nicht zwingend, dass bei Abwesenheit von Radioaktivität die Echtheit bewiesen ist. Es kann Altmetall verwendet worden sein oder es wurde Metall mit besonders niedriger Ausgangsaktivität verwendet. Beides ist allerdings nicht sehr wahrscheinlich. Da an

der Echtheit der Begleitfunde niemand zweifelt, müsste man diese zuerst analysieren, um das Metall der Scheibe an die Begleitfunde anzupassen (siehe unten). Für physikalische Experimente gibt es zwar einen Markt für Blei mit extrem niedriger Radioaktivität, allerdings zu einem hohen Preis und nur über spezielle Lieferanten. Da die Himmelscheibe keine messbare Radioaktivität enthielt (Abb. 3), muss das Metall bzw. müssen alle seine Komponenten älter als etwa 100 Jahre sein. Wenn es sich um eine Fälschung handeln sollte, müsste diese spätestens im 19. Jh. n. Chr. hergestellt worden sein – eine äußerst unwahrscheinliche Annahme. Bei der Verwendung von Altmetall hätten archäologische Objekte aus einer bestimmten Region verwendet werden müssen, wie unten noch gezeigt wird. Eine Mischung aus modernen Komponenten hätte nicht zum Erfolg geführt.

Obwohl das ein wichtiges Ergebnis war, wurden eine Reihe weiterer Untersuchungen durchgeführt, um allfällige Anzeichen für eine Fälschung zu entdecken. Es waren dies insgesamt:

6 In der Geochemie werden die Elemente entsprechend ihrem Verhalten bei der Differentiation von Planeten in verschiedene Gruppen eingeteilt: Siderophile Elemente reichern

sich im Kern aus Eisen/Nickel an, chalcophile finden sich bevorzugt in Sulfiden des Mantels, lithophile in Krustengesteinen und atmophile in der Atmosphäre. Die Klassifikation

stammt von V. M. Goldschmidt und wurde in den 1920er Jahren analog dem Verhalten der Elemente bei der Eisenverhüttung aufgestellt.

Proben-Nr.	Fe	Co	Ni	Cu	As	Pb	Bi	Ag	Sn	Sb
FG-020160	0,12	0,015	0,231	90,1	0,77	0,02	< 0,005	0,035	8,6	0,017

Tab. 1 Ergebnisse der Erstuntersuchung der Himmelscheibe von Nebra. Alle Angaben in Masseprozent. Fe, Zn, Se, Te und Au wurden ebenfalls analysiert, lagen aber in allen Proben unter der Nachweisgrenze von ca. 0,01 %.

Proben-Nr.	Probe	Cu	Sn	Fe	Co	Ni	Zn	As	Ag	Sb	Pb	Bi
FG-020724	Seite 2	97	2,56	0,15	< 0,005	0,236	0,1	0,161	0,009	0,014	0,02	< 0,005
FG-020725	Seite 3	97	2,47	0,16	< 0,005	0,241	0,2	0,174	0,009	0,014	0,04	< 0,005
FG-020726	Seite 4	97	2,55	0,25	< 0,005	0,240	0,2	0,202	0,010	0,017	0,03	0,006
FG-020727	Seite 5	96	2,82	0,08	0,006	0,213	0,1	0,32	0,014	0,012	0,02	< 0,005
FG-020723	Seite 1	95	4,1	0,12	< 0,005	0,198	< 0,1	0,31	0,009	0,018	< 0,01	< 0,005
FG-020728	Seite 6	95	4,0	0,08	< 0,005	0,164	< 0,1	0,285	0,011	0,006	0,01	< 0,005
Mittelwert		96	2,56	0,16	< 0,005	0,215	0,15	0,214	0,011	0,014	0,028	< 0,005

Tab. 2 EDRFA-Messungen der Himmelscheibe von Nebra an den blanken und den beiden korrodierten Flächen (Seite 1 und 6) des Blöckchens aus der Himmelscheibe. Aus den vier blanken Flächen wurde der Mittelwert berechnet, der die chemische Zusammensetzung der Scheibe am besten widerspiegelt. Alle Angaben in Masseprozent.

Proben-Nr.	Inv.-Nr.	Objekt	Cu	Sn	Fe	Co	Ni	As	Pb	Ag	Sb
FG-020678	1649g	Griff	93	8,1	< 0,05	0,014	0,201	0,285	< 0,01	0,02	0,045
FG-020680	1649b	Meißel	87	8,0	0,07	0,014	0,165	0,162	< 0,01	< 0,005	0,022
FG-020681	1649b	Meißel	87	8,7	0,14	0,012	0,179	0,21	< 0,01	0,008	0,023
FG-020682	1649c	Randleistenbeil	89	6,1	0,13	0,02	0,264	0,155	< 0,01	0,006	< 0,005
FG-020683	1649d	Randleistenbeil	92	4,2	0,19	0,012	0,179	0,076	< 0,01	< 0,005	< 0,005
FG-020684	1649m	Knauf	91	6,7	0,08	0,007	0,219	0,39	< 0,01	< 0,005	0,031
FG-020685	1649f	Schwert ohne Griff	93	8,5	0,06	0,01	0,247	0,35	< 0,01	0,027	0,015
FG-020688	1649e	Schwert mit Griff	94	7,1	0,05	0,016	0,192	0,32	< 0,01	0,015	0,023
FG-020689	1649l	Dorn	92	6,9	< 0,05	0,014	0,216	0,40	< 0,01	< 0,005	0,018
FG-020691	1649ak	Nietkopf	94	8,3	< 0,05	0,013	0,172	0,275	0,04	0,011	0,014
FG-020692	1649ak	Nietdorn	91	9,6	< 0,05	0,012	0,184	0,115	< 0,01	< 0,005	< 0,005
FG-020693	1649ak	Nietkopf	91	6,8	< 0,05	< 0,005	0,094	0,109	< 0,01	0,008	< 0,005
FG-020694	1649ak	Nietdorn	90	9,8	< 0,05	< 0,005	0,165	0,117	< 0,01	< 0,005	0,011
FG-020695	1649ah	Nietkopf	93	7,0	< 0,05	< 0,005	0,077	0,111	< 0,01	0,01	0,011
FG-020696	1649ah	Nietdorn	91	9,2	< 0,05	0,006	0,177	0,112	< 0,01	0,011	0,013
FG-020697	1649ai	Niet	92	7,1	< 0,05	< 0,005	0,082	0,122	< 0,01	< 0,005	< 0,005
FG-020698	1649ai	Nietdorn	89	8,3	< 0,05	0,006	0,141	0,109	< 0,01	0,005	< 0,005
FG-020699	1649ag	Nietstift	92	7,3	0,05	0,008	0,171	0,51	< 0,01	0,024	0,035
FG-020700	1649h	Griffdorn	92	7,9	< 0,05	0,012	0,172	0,59	< 0,01	0,008	0,033
FG-020701	1649h	Griffdornkopf	89	6,5	< 0,05	0,009	0,205	0,292	< 0,01	0,038	0,044
FG-020702	1649ad	Spiralring	93	9,1	0,09	0,017	0,092	0,104	< 0,01	< 0,005	< 0,005
FG-020703	1649u	Spiralring	92	8,6	0,07	0,007	0,109	0,08	0,02	< 0,005	< 0,005

Tab. 3 EDRFA-Messungen der Begleitfunde der Himmelscheibe von Nebra. Alle Angaben in Masseprozent.

- der ^{210}Pb -Test (altes Metall),
- die chemische Zusammensetzung der Bronze,
- die mineralogische Zusammensetzung der Bronzekorrosion,
- die Struktur der Bronzekorrosion,
- die Herstellungstechnik (Tauschierung),
- die mineralogische Zusammensetzung der Bodenanhafungen,
- die chemischen Analysen von Bodenproben an der Fundstelle,
- die chemische Einheitlichkeit des gesamten Hortfundes,
- die Bleiisotopenverhältnisse der Bronzegegenstände,
- die chemische Zusammensetzung des Goldes.

Wie bereits oben erwähnt, ist keine der Einzeluntersuchungen in der Lage, die Echtheit des Fundes zu beweisen. Das ist ein grundsätzliches erkenntnistheoretisches Problem. Da aber bei allen Untersuchungen ein negatives Ergebnis erzielt wurde, indem keinerlei Anzeichen für eine Fälschung entdeckt wurden, multipliziert sich die Wahrscheinlichkeit aller Einzeluntersuchungen zu einem Wert, der zwar nicht numerisch angegeben, aber in der Formulierung »Die Himmelscheibe von Nebra ist mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit echt« zusammenfasst werden kann. Eine Zusammenfassung aller Argumente für eine Echtheit des Fundes ist in Pernicka u. a. 2008 erschienen.

Die chemische Zusammensetzung der Himmelscheibe

Im Zuge der Erstuntersuchung im Februar 2002 wurde im Landeskriminalamt Magdeburg eine Probe von ca. 100 mg am Rand der Himmelscheibe nahe der modernen Beschädigung mit einer kleinen Stahlzange entnommen (Tab. 1). Die vergleichsweise große Menge wurde damals für den ^{210}Pb -Test benötigt. Die Analyse der chemischen Zusammensetzung der so entnommenen Probe erfolgte zerstörungsfrei mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenz (EDRFA⁷) an der mit einem Skalpell gereinigten Oberfläche. Anschließend wurde die gesamte Probenmenge gelöst und für den ^{210}Pb -Test verwendet.

Das mittels Funkenerosion entnommene Blöckchen wurde auf allen sechs Seiten mit derselben Methode analysiert, wobei zwei Flächen zwar gereinigt, aber doch noch von Korrosionserscheinungen beeinträchtigt waren: Die Ergebnisse sind in Tab. 2 dargestellt. Die Analysen in Tab. 1–2 zeigen deutlich, dass Zinn beim Korrosionsvorgang an der Oberfläche angereichert wird. Deshalb ist der Zinngehalt der nahezu unbehandelten Probe in Tab. 1 ebenfalls nicht repräsentativ für die Gesamtzusammensetzung. Zusätzlich scheinen sich Arsen und in geringem Maße auch Silber angereichert zu haben. Dies wird immer an archäologischen Objekten aus Kupfer oder Kupferlegierungen beobachtet, selbst wenn die Oberfläche für den Betrachter wenig oder gar nicht korrodiert erscheint, wie z. B. bei Funden aus reduzierendem Milieu (Moorfunde).

Im Hinblick auf die Echtheitsfrage lässt sich feststellen, dass die Zusammensetzung typisch für viele bronzezeitliche Metallfunde aus Mitteleuropa ist und untypisch für modernes, durch Elektrolyse gereinigtes Kupfer. In modernem Kupfer wird besonders auf niedrige Arsengehalte geachtet, weil diese die Leitfähigkeit des Kupfers herabsetzen und auch andere Materialeigenschaften negativ beeinflussen. Der Zinngehalt ist zwar niedrig, aber durchaus als absichtliche Beimengung (Legierung) zu interpretieren, denn die meisten Kupfererze enthalten deutlich weniger als 1 % Zinn. Solch niedriglegierte Bronze ist deutlich weicher als die optimale Legierungszusammensetzung von 10–15 % Zinn. Es ist wahrscheinlich, dass dies bei der Herstellung bekannt und beabsichtigt war, um die Scheibe für die Bilddarstellung mit Bronzewerkzeugen gravieren zu können (siehe Beitrag Berger u. a. in diesem Band).

Die chemische Zusammensetzung der Begleitfunde

Die Beprobung der Begleitfunde erfolgte mittels einer Lochbohrung, einer mittlerweile routinemäßigen Probenahme-technik, bei der ein Bohrer zu Hilfe genommen wird, um die gewünschten repräsentativen Proben – Bohrspäne des originalen Metalls – mit geringem Zeitaufwand zu erhalten. Es wurden, abhängig von der Größe des Objektes, Proben zwischen 2 und 40 mg entnommen. Sie wurden mit derselben Methode (EDRFA) analysiert. Die Ergebnisse sind in Tab. 3 zusammengefasst. Nach der Beprobung wurden die Funde restauriert.

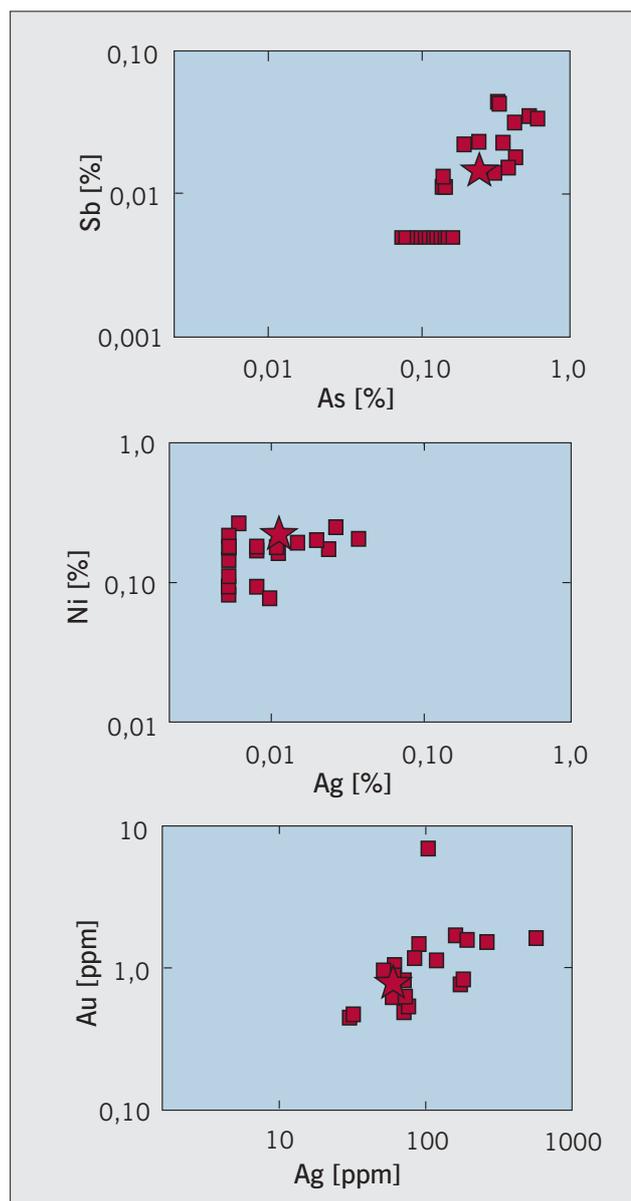


Abb. 4 Diagramme einiger für die Herkunft signifikanter Elementkonzentrationen im Hortfund von Nebra. Die Gründe für die logarithmische Darstellung sind von E. Pernicka (1995) dargelegt worden. Die Himmelscheibe (Tab. 2, Mittelwert) ist mit einem Stern dargestellt, die Begleitfunde aus Tab. 3 sind mit Quadraten gekennzeichnet. Die Gold- und Silbergehalte wurden mittels Neutronenaktivierungsanalyse bestimmt (Kuleff/Pernicka 1995).

Aus dem Vergleich der Analysenergebnisse der Begleitfunde mit denen der Himmelscheibe, besser zu erkennen in Abb. 4, wird zunächst deutlich, dass es sich bei allen Teilen des Hortfundes um ein ähnliches Metall handelt und dass die Himmelscheibe in allen drei Diagrammen in der Mitte der aus den Begleitfunden gebildeten Punktwolke liegt. Es handelt sich deshalb um ein einheitlich zusammengesetztes Metall, wenn man von dem niedrigeren Zinngehalt der Himmelscheibe absieht.

Wie an anderer Stelle erläutert (Pernicka 1990) sind nicht alle Elementkonzentrationen gleich gut geeignet, diese Aus-

⁷ Zur Methodik siehe Lutz/Pernicka 1996.

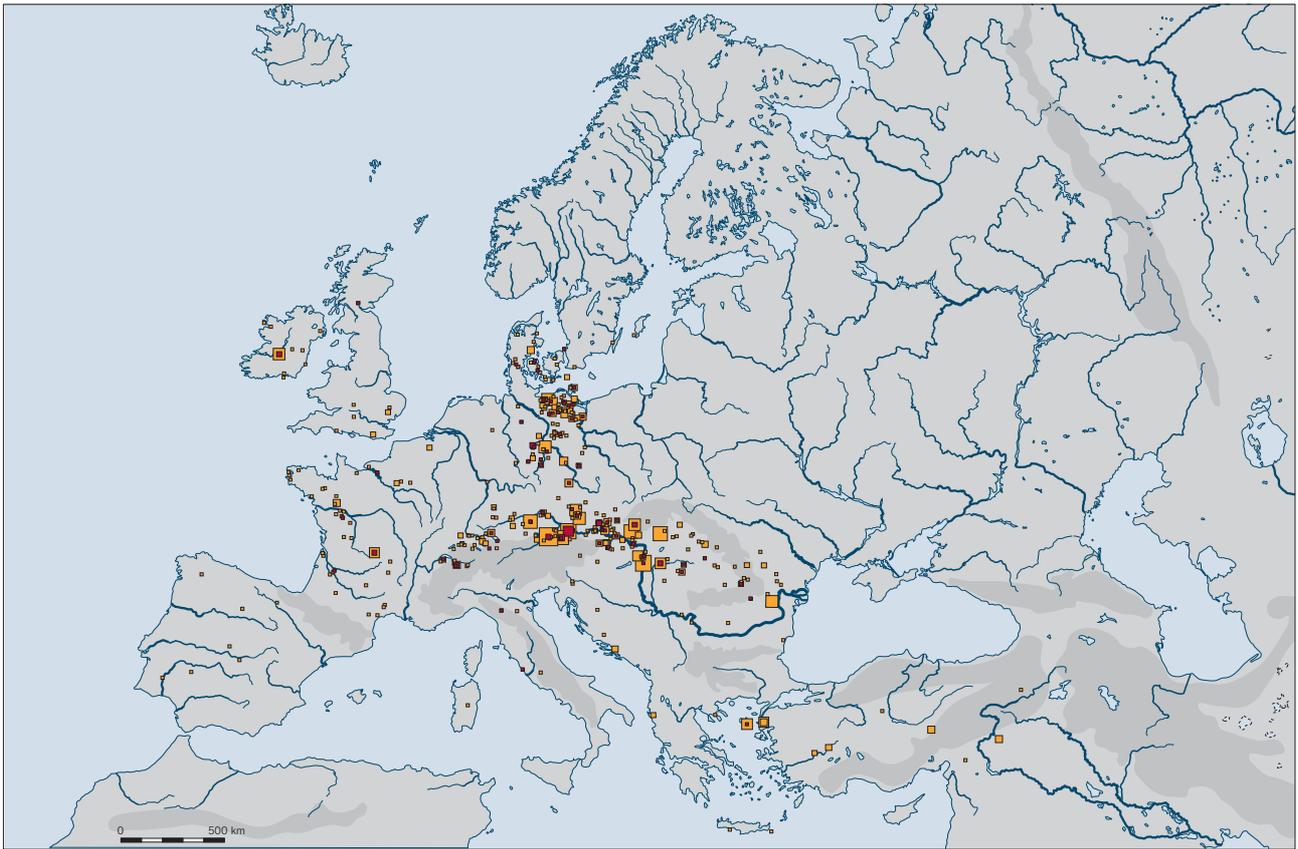


Abb. 5 Kartierung bronzezeitlicher Metallfunde (mehrheitlich Frühbronzezeit) mit ähnlicher Zusammensetzung bezüglich der Elemente As, Sb, Ni und Ag wie die Himmelscheibe von Nebra. Die Größe der Symbole zeigt die Anzahl der Objekte vom selben Ort an. Die dunklen Quadrate beziehen sich auf chemisch ähnliche Objekte, die in allen betrachteten Elementen innerhalb eines Faktors ± 2 der Werte der Himmelscheibe liegen. Die

hellen Quadrate beziehen sich auf Ähnlichkeiten innerhalb eines Faktors ± 4 . Deutlich ist zu erkennen, dass die meisten Vergleichsfunde in Mitteleuropa auftreten, wobei das Alpenvorland von der Schweiz bis nach Ungarn dominiert. In dieser Region gibt es eine Reihe bronzezeitlicher Kupferbergwerke, von denen der Mitterberg im Land Salzburg das größte ist.

sage zu treffen. Nur solche Elemente, die sich während der Verhüttung von Kupfererzen und während der Verarbeitung des Kupfers ähnlich wie Kupfer selbst verhalten, geben Hinweise auf das Ausgangserz. Von den hier betrachteten Elementen sind dies Nickel, Silber und Gold sowie – mit Einschränkungen – Arsen und Antimon. Dabei ist zu beachten, dass die Streuung innerhalb einer Lagerstätte meist recht groß ist (mehrere Größenordnungen). Die Tatsache, dass die Streuung innerhalb des Hortfundes kaum mehr als eine Größenordnung beträgt, bedeutet, dass das Metall aller Teile aus derselben Lagerstätte oder zumindest aus derselben Region stammt. Zufällige Ähnlichkeiten im Spurenelementmuster verschiedener Erzregionen sind zwar nicht ausgeschlossen, doch macht die geringe Streuung innerhalb der Teile des Hortfundes dies unwahrscheinlich.

Darüber hinaus lässt sich eine weitere Aussage treffen, wenn man den Analysenfehler betrachtet⁸. Die Streuung der einzelnen Objekte des Hortfundes ist zwar klein, aber nicht so klein, dass man annehmen könnte, dass sie alle aus derselben Metallcharge, sozusagen in einem Guss, hergestellt

worden sein können. In diesem Fall sollte die Streuung innerhalb der analytischen Unsicherheit liegen. Diese ist in den Abbildungen etwa so groß wie die Symbole. Bei einer Herstellung aller Objekte aus einem Guss sollten deshalb alle Punkte übereinanderliegen. Damit kann diese Hypothese ausgeschlossen werden.

Die Herkunft des Kupfers

Die chemische Zusammensetzung der Funde von Nebra kann nun als materialtypologisches Merkmal angesehen werden, das mit Analysen anderer Metallfunde aus demselben Zeithorizont verglichen werden kann. Die Vergleichsbasis ist eine Datenbank (Krause/Pernicka 1996), die im Wesentlichen auf den Analysen aus dem Württembergischen Landesmuseum in Stuttgart aufbaut⁹ und laufend ergänzt wird. Ein Zwischenstand wurde von R. Krause (2003) veröffentlicht. Da die Analysen in dieser Datenbank aus verschiedenen Laboren stammen und mit unterschiedlichen Methoden erzielt wurden, darf bei einem Analysenvergleich die Anforderung

⁸ Streng genommen handelt es sich nicht um einen Fehler, sondern um die Unsicherheit der Aussage über die exakten Elementkonzentrationen. Mit dieser Unsicherheit ist jede quantitative Messung behaftet und wird üblicherweise durch eine Gaußverteilung der

gemessenen Werte beschrieben. Die Breite dieser Verteilung bei halber Höhe wird als Standardabweichung s bezeichnet. Sie deckt 68 % der Gesamtwahrscheinlichkeit für eine einzelne Wiederholmessung ab, d. h. zwei von drei Wiederholmessungen sollten inner-

halb des Streubereiches $x \pm s$ liegen, wobei x der Mittelwert aller Messungen ist. In Tab. 1–2 betragen die typischen Standardabweichungen ca. 5 %.

⁹ Junghans u. a. 1960; Junghans u. a. 1968; Junghans u. a. 1974.

Proben-Nr.	Objekt	Fundort	Inv.-Nr.	Cu	Sn	Pb	As	Sb	Ag	Ni	Fe	Co
FG-030621	Nacken-scheibenaxt	Vámospércs	D 1; S 2.1910.973	95	3,7	0,03	0,71	0,117	0,009	0,62	0,13	0,025
FG-030622	Nacken-scheibenaxt	Hajdúsámson	D 2; 1907.1206	94	7	0,02	0,6	0,082	0,028	0,48	< 0,05	0,021
FG-030623	Nacken-scheibenaxt	Hajdúsámson	D 3; 89.5.1	94	7	0,09	0,268	0,041	0,012	0,268	< 0,05	< 0,005
FG-030624	Schafflochaxt	Hajdúsámson	D 4; 1907.1210	96	3,6	0,03	0,232	0,017	< 0,005	0,178	< 0,05	< 0,005
FG-030625	Schafflochaxt	Hajdúsámson	D 5; 1907.1216	94	5,1	0,03	0,52	0,111	0,015	0,51	0,09	< 0,005
FG-030626	Schafflochaxt	Hajdúsámson	D 6; 1907.1214	97	2,1	0,02	0,3	0,046	0,009	0,36	< 0,05	< 0,005
FG-030627	Nacken-scheibenaxt	Téglás	D 7; 78.17.2 (356)	93	4	0,06	1,05	0,61	0,094	1,4	< 0,05	0,031
FG-030628	Schwert, Griff	Téglás	D 8; 78.17.1, Griff	95	6,1	0,06	0,238	0,091	0,013	0,36	0,12	0,014
FG-030629	Schwert, Klinge	Téglás	D 9; 78.17.1, Klinge	94	5,4	0,05	0,76	0,37	0,046	1,28	0,22	0,048

Tab. 4 Chemische Zusammensetzung von mit dem Hortfund von Nebra zeitgleichen Funden aus Ostungarn. Alle Angaben in Masseprozent.

an die Übereinstimmung nicht zu hoch angesetzt werden. Die Präzision der Stuttgarter Analysen betrug etwa 30 % (Pernicka 1984), so dass eine Übereinstimmung zweier Analysen nur innerhalb eines Faktors 2 erwartet werden kann.

Dementsprechend wurden die Abfragen in der Datenbank mit zwei unterschiedlichen Suchintervallbreiten durchgeführt, einer kleineren des Faktors ± 2 um die Konzentrationswerte der Elemente As, Sb, Ni, und Ag in der Himmelscheibe von Nebra und einer größeren des Faktors ± 4 . Die Auswahl der Elemente folgte einerseits den metallurgischen Überlegungen und andererseits praktischen Erwägungen, weil die Datenbank für diese Elemente am vollständigsten ist. Die kleinere Intervallbreite entspricht etwa dem Genauigkeitsintervall der in Stuttgart angefertigten Analysen. Bei der Anwendung des größeren Suchintervalls werden zwischen den jeweils kleinsten und größten Werten bereits Unterschiede von einem Faktor 16 erreicht. Diese Spannweite liegt im Bereich der Streubreite der Elementkonzentrationen innerhalb einer Lagerstätte. Bei einer noch weiteren Fassung dieses Intervalls würden somit in zunehmendem Maße Objekte erfasst, die möglicherweise von anderen Lagerstätten stammen. Um die Zahl der anschließend zu bearbeitenden Vergleichsanalysen so gering wie möglich und so groß wie nötig zu halten, wurden vor der Durchführung des Suchprogramms noch einige sinnvolle chronologische¹⁰ und geographische¹¹ Begrenzungen vorgenommen. Die auf diese Weise ermittelten Vergleichsanalysen sind in Abb. 5 kartiert.

Es ist offensichtlich, dass diese Metallsorte ihren Verbreitungsschwerpunkt in Mitteleuropa hat. Damit sind Überlegungen unwahrscheinlich geworden, dass die Himmelscheibe im Mittelmeerraum oder in Vorderasien hergestellt worden sein könnte¹². Das Verbreitungsmuster in Europa ist ebenfalls interessant. Es zeichnet sich eine deutliche O-W-Verbreitung nördlich der Alpen von Westfrankreich bis in das Karpatenbecken ab und eine N-S-Verbreitung von den Alpen bis Dänemark. Dies drückt sich u. a. in der Zusammensetzung zeitgleicher Funde aus Ostungarn aus, von denen nur eine Nackenscheibenaxt und eine Schwertklinge aus Téglás etwas höhere Gehalte an As, Sb und Ni aufweisen als das Metall aus Nebra (Tab. 4). Zum Vergleich sind weitere Funde aus Hajdúsámson aus der Stuttgarter Analysenserie (Junghans u. a. 1974) in Tab. 5 aufgeführt, die das gleiche Elementmuster aufweisen.

Die Metallsorte des Hortfundes von Nebra ist übrigens nicht unbekannt. Sie tritt besonders häufig in den Spangen- oder Rippenbarren auf (Butler 1978; Krause 2003). Damit erweitert sich die Frage nach der Herkunft des Barrenkupfers (Ösenringe, Spangen- und Beilbarren) in der frühen Bronzezeit Mitteleuropas, wobei der Begriff »Barren« ein Zwischenprodukt suggeriert, was aber anhand der Zusammensetzung der vermuteten Endprodukte nicht belegt werden kann (Krause/Pernicka 1998).

Bezüglich der Herkunft des Ösenringkupfers gibt es unterschiedliche Auffassungen: H. Otto und W. Witter (1952) sahen darin ein auffallendes Material, das seinen Ursprung nur im Saalfelder Revier in Thüringen haben konnte. Dagegen favorisierte R. Pittioni (1957) eine Herkunft aus der Slowakei und nannte diese Metallsorte »Ostkupfer«. Vor wenigen Jahren konnte durch eine Kombination von chemischer

Proben-Nr.	Objekt	Fundort	Inv.-Nr.	Sn	Pb	As	Sb	Ag	Ni	Fe	Bi
12996	Axt, kreuzschneidig	Hajdúsámson	Nyíregyháza 57.12.1467	Spur	0	0	Spur	Spur	0	0	Spur
13055	Schwert, verziert	Hajdúsámson	Debrecen	~ 10	0	0,63	0,01	Spur	0,29	+	Spur
13056	Axt mit Nackenscheibe, verziert	Hajdúsámson	Debrecen 1907-120571	7,2	0	0,63	0,04	0,03	0,42	+	~ 0,001
13057	Axt mit Nackenscheibe	Hajdúsámson	Debrecen 1907-120673	5,9	0	0,8	0,11	0,05	0,5	++	~ 0,001
13058	Schafthalsaxt	Hajdúsámson	Debrecen 1907-121675	5,4	0	0,15	0,06	Spur	0,31	+	Spur
13059	Schafthalsaxt	Hajdúsámson	Debrecen 1907-121377	6	0	0,57	0,12	0,06	0,47	+	0
13060	Schafthalsaxt	Hajdúsámson	Debrecen 1907-121279	4,8	Spur	0,52	0,06	0,02	0,35	+	0
13061	Schafthalsaxt	Hajdúsámson	Debrecen 1907-120881	4,6	0	0,51	0,18	0,01	0,64	++	0
13062	Schafthalsaxt	Hajdúsámson	Debrecen 1907-121183	4,8	0	0,45	0,08	0,03	0,37	+	0
13063	Krtenov-Axt, verziert	Hajdúsámson	Debrecen 1907-120785	0	0	0	0	Spur	0	0	0

Tab. 5 Chemische Zusammensetzung von mit dem Hortfund von Nebra zeitgleichen Funden aus Ostungarn aus der Stuttgarter Analysenserie (Junghans u. a. 1974). Alle Angaben in Masseprozent. Zur Erläuterung der halbquantitativen Angaben siehe Pernicka 1984.

und isotopischer Analyse gezeigt werden, dass zumindest ein Teil dieses speziellen »Fahlerzmetalls« aus den Lagerstätten im Inntal zwischen Schwaz und Brixlegg stammen könnte (Höppner u. a. 2005).

Dagegen wurde die Herkunft des Kupfers vom Typ der (meisten) Spangenbarren seit P. Reinecke (1930) meist in den Ostalpen gesucht (Menke 1978/79; Eckel 1992; Krause 2003), vor allem wegen der Konzentration von Barrenhorten in Süddeutschland und der geographischen Nähe zu den seit Langem bekannten bronzezeitlichen Bergwerken im Raum Bischofshofen im Land Salzburg. Pittioni (1957) nannte es sogar »ostalpin« Kupfer. In der Tat ist die Übereinstimmung des Spurenelementmusters im Hortfund von Nebra mit Kupfererz vom Mitterberg bei Bischofshofen und von Kitzbühel, wo ebenfalls bronzezeitlicher Abbau umging, recht gut (Abb. 6).

An dieser Stelle ist es vielleicht angebracht, die Möglichkeit einer Veränderung des Spurenelementmusters durch Beimengungen zu erwähnen. Schließlich ist Bronze eine Mischung von zwei Metallen, Kupfer und Zinn. Die wenigen prähistorischen Zinnobjekte, die bisher untersucht wurden, sind allerdings sehr rein, d. h. sie haben niedrige Konzentrationen an allen Spurenelementen. Dies erklärt sich daraus, dass Zinnstein (SnO_2), das wichtigste Zinnerz im Altertum, relativ rein ist und das Zinnmetall durch Aufschmelzen zusätzlich gereinigt wird. Wegen des niedrigen Schmelzpunktes von Zinn ist das leicht vorstellbar. Ferner enthält Zinnstein in der Regel sehr geringe Konzentrationen an Blei,

so dass auch im Fall der Bleiisotopenverhältnisse die Zusammensetzung der Bronze fast ausschließlich vom Kupfer bestimmt wird, das zusätzlich ca. 90 % der Legierung ausmacht.

Seit den 1960er Jahren hat sich ein weiteres geochemisches Merkmal für die Herkunftsuntersuchung von Metallen bewährt, nämlich die Bleiisotopenverhältnisse. Sie wurden zunächst nur auf Blei (Brill/Wampler 1965; Grögler u. a. 1966), später auch auf Silber und 1982 in der Ägäis erstmals auf prähistorische Kupferobjekte angewandt (Gale/Stos-Gale 1982). Seither sind die Bleiisotopenverhältnisse neben dem Spurenelementmuster das wichtigste Instrument zur Herstellung einer Relation zwischen Lagerstätte und Fertigprodukt.

Isotope besitzen weitgehend gleiche chemische Eigenschaften. Deshalb ist die Isotopenzusammensetzung der Elemente in erster Näherung in allen Materialien und überall auf der Erde gleich. Es gibt aber Vorgänge, bei denen sich die geringen Massenunterschiede auf das Verhalten der Isotope auswirken und dadurch z. B. zu unterschiedlichen Diffusions- oder Reaktionsgeschwindigkeiten führen. Solche Fraktionierungseffekte sind allerdings nur bei leichten Elementen zu erwarten, bei denen die relativen Massenunterschiede groß sind. Schwere Elemente ab etwa der Massenzahl 70 haben überall auf der Erde das gleiche Isotopenverhältnis, wenn sie denn aus mehreren stabilen Isotopen bestehen. Dennoch gibt es einige Elemente in diesem Bereich mit variabler Isotopenzusammensetzung. Ausschlag-

10 Ausschnitt der frühen Bronzezeit und Ausblendung aller übrigen Zeithorizonte.

11 Ausschluss von Analysen von Funden aus Mittel- und Ostasien sowie aus der Neuen Welt.

12 Dies stimmt auch mit dem Winkel zwischen den Enden der Horizontbögen auf der Himmelsscheibe überein, der auf eine geographische Breite der Beobachtungsposition schlie-

ßen lässt, die mit Sachsen-Anhalt und damit der Fundregion kompatibel ist (Schlosser 2003).

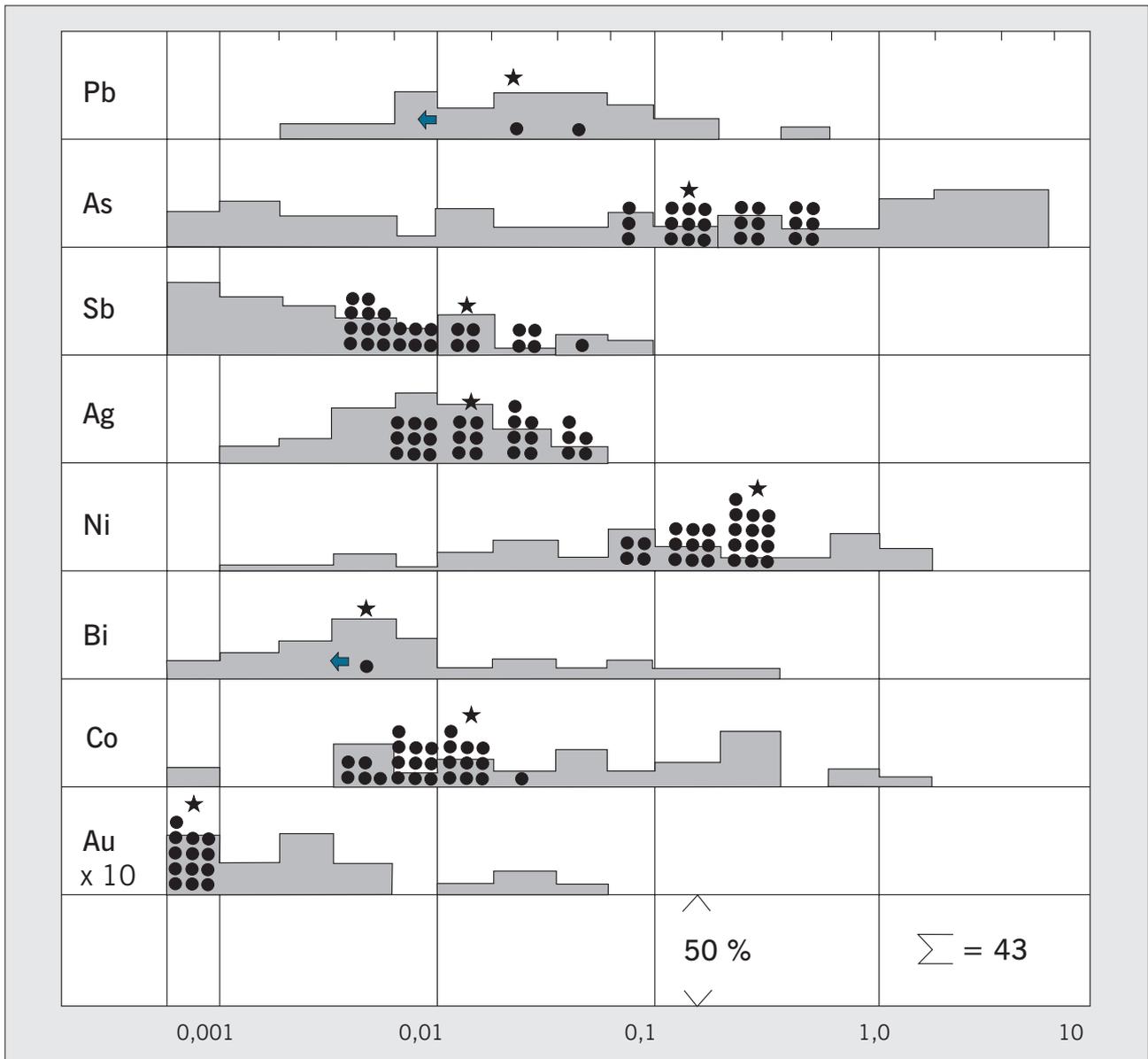


Abb. 6 Vergleich des Spurenelementmusters der Funde von Nebra mit 43 Erzproben aus den bronzezeitlichen Kupferbergwerken vom Mitterberg und von Kitzbühel (Österreich), analysiert mittels Neutronenaktivierung und Atomabsorptionsspektrometrie. Diese Art der multiplen Histogrammdarstellung geht auf H. T. Waterbolk und J. J. Butler (1965) zurück. Auf der

Abszisse sind die Konzentrationen in Masseprozent angegeben. Die Himmelscheibe ist mit einem Stern dargestellt, die Begleitfunde sind mit Punkten gekennzeichnet. Die Pfeile geben die Nachweisgrenze der für die Analyse der Funde von Nebra verwendeten Methode (EDRFA) an.

gebend dafür ist der radioaktive Zerfall bestimmter Nuklide mit langen Halbwertszeiten. Für die Archäometallurgie ist der radioaktive Zerfall von Uran und Thorium über mehrere Zwischenprodukte zu Blei am wichtigsten, denn von allen Elementen mit radiogenen Isotopen ist Blei das einzige, das in der Metallurgie eine Rolle spielt¹³.

Bevor die Ursachen der Veränderungen der Isotopenzusammensetzung beim Blei durch radioaktiven Zerfall ein bisschen näher betrachtet werden, ist es nützlich, sich in Erinnerung zu rufen, dass diese Zusammensetzung durch chemische Reaktionen nicht verändert werden kann. Wenn deshalb eine Lagerstätte durch ein bestimmtes Bleiisotopen-

verhältnis gekennzeichnet ist, dann ist dieses Verhältnis auch in den daraus erzeugten Fertigprodukten zu finden, unabhängig von den Komplikationen, die die Zuordnung von Metallobjekten zu Lagerstätten aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung so schwierig machen, wie Aufbereitung, Verhüttung, Raffination und gegebenenfalls Korrosion. Alle diese Prozesse beruhen auf chemischen Reaktionen, die keinen Einfluss auf die Bleiisotopenverhältnisse haben. Ebenso spielt es keine Rolle, in welcher chemischen Form und in welcher Mineralphase das Blei vorliegt.

Dadurch ist es möglich, selbst solche Lagerstätten zu charakterisieren, die im Altertum auf andere Erze abgebaut

¹³ In den letzten Jahren sind allerdings einige archäometallurgisch interessante Isotopensysteme hinzu gekommen, wie z. B. Kupfer

(Klein u. a. 2004), Osmium (Junk/Pernicka 2003) und Zinn (siehe unten). Es ist allerdings noch nicht ganz klar, ob sie dieselbe

Bedeutung wie die Bleiisotopenverhältnisse erlangen werden.

Abb. 7 Bleiisotopendiagramm von Fahlerzen aus dem Inntal zwischen Schwaz und Brixlegg zusammen mit bronzezeitlicher Kupferschlacke vom Buchberg bei Wiesing im Inntal und Ösenhalsringen von Gammersham (Bayern). Die Übereinstimmung zwischen Schlacke und Erzen legt trotz der großen Streuung nahe, dass die Fahlerze im Inntal bereits in der frühen Bronzezeit genutzt wurden. Die Ösenhalsringe von Gammersham entsprechen diesen Fahlerzen chemisch und auch isotopisch, weil sie innerhalb der Extremwerte der Erze liegen.

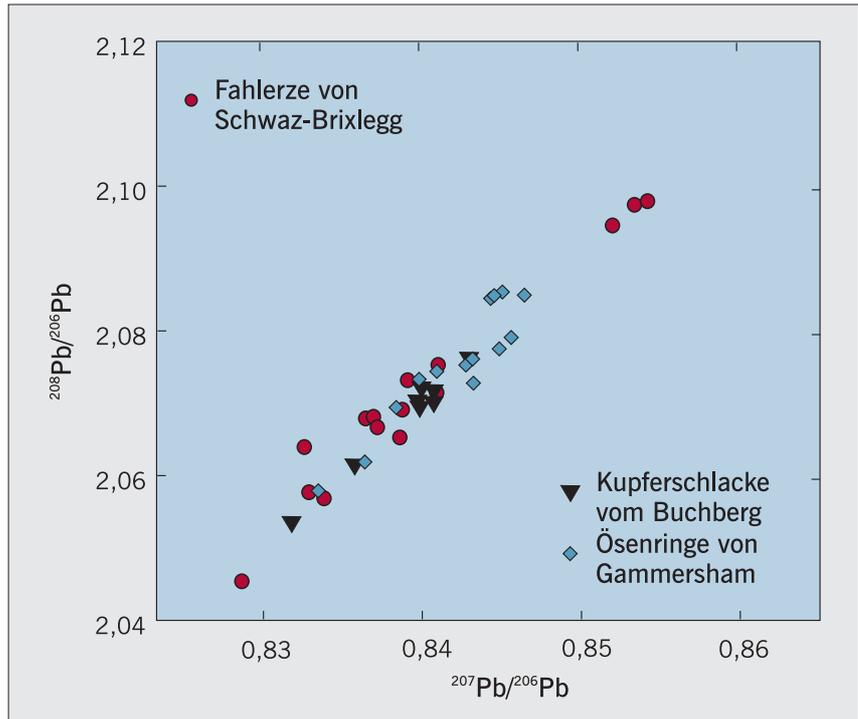
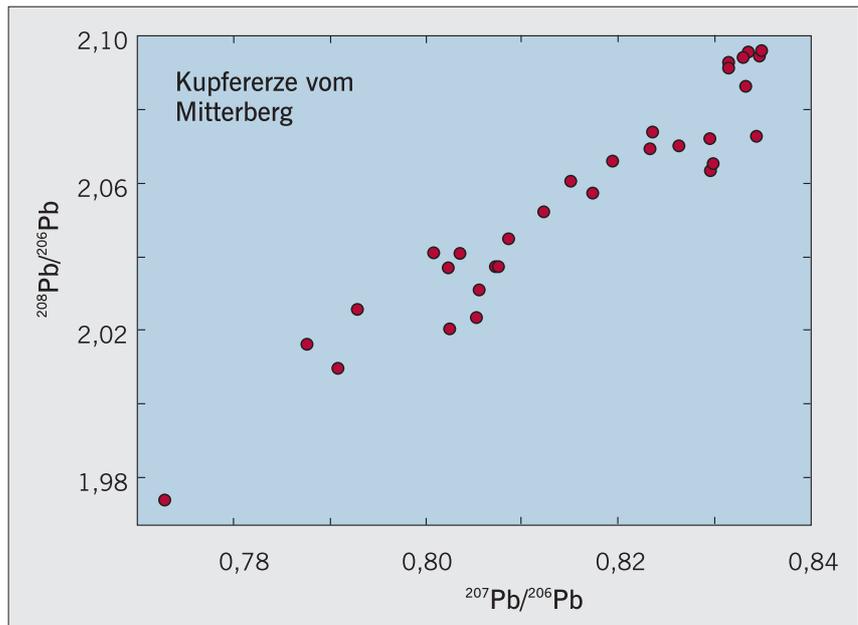


Abb. 8 Bleiisotopendiagramm von Kupfererzen vom Mitterberg aus der Sammlung E. Preuschen. Wie groß die Streuung im Vergleich zur üblichen ist, mag man daran ermesen, dass die große Kupferlagerstätte von Majdanpek (Serbien) eine interne Streuung aufweist, die etwa der Größe eines Symbols in dieser Abbildung entspricht.



wurden als heute, wie z. B. Majdanpek in Serbien (Pernicka u. a. 1993). Auf diese Weise können nicht nur Blei-, sondern auch Kupferlagerstätten charakterisiert werden, wenn das Blei aus dem Erz ganz oder teilweise als Verunreinigung in das Kupfer gelangt. Da die Messmethode sehr empfindlich ist¹⁴, genügen schon sehr geringe Spuren von Blei, um die Methode anwenden zu können. Diese erlaubt deshalb in der Tat eine Korrelation von Lagerstätte und Fertigobjekt, wie sie für Spurenelemente wiederholt postuliert wurde, und ist

somit eine außerordentlich wichtige Komponente bei dem Versuch, die Herkunft von Metallen zu bestimmen.

Für die Herkunftsbestimmung von Metallen genügt es zu prüfen, ob sich Erzlagerstätten in ihrer Bleiisotopenzusammensetzung unterscheiden und ob es eine Übereinstimmung mit den zu untersuchenden Artefakten gibt. Es ist allerdings zu beachten, dass die Stärke dieser Methode vor allem im Ausschluss einzelner Lagerstätten liegt. Wenn durch genügend Analysen das Streufeld einer Lagerstätte

¹⁴ Routinemäßig werden 100 ng Pb zur Messung benötigt, aber selbst an 1 ng Pb können die Isotopenverhältnisse noch bestimmt werden. Bei einer typischen Menge von 10–

50 mg Kupfer, die üblicherweise aus einem Objekt entnommen wird, um eine repräsentative Probe zu erhalten, genügt für eine Routineanalyse ein Bleigehalt von 2–10 µg/g

(= 0,0002– 0,0010 %) im Kupfer. Solch niedrige Bleigehalte werden in archäologischen Kupferobjekten nur selten unterschritten.

Proben-Nr.	Objekt	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$
FG-020678	Schwert ohne Griff	2,0758	0,83851	38,792
FG-020680	Meißel	2,0155	0,80692	39,255
FG-020682	Randleistenbeil I	2,0326	0,80948	39,528
FG-020683	Randleistenbeil II	2,0609	0,82784	39,086
FG-020685	Schwert ohne Griff	2,0434	0,82106	39,212
FG-020687	Schwert mit Griff	2,0602	0,82557	39,205
FG-020688	Schwert mit Griff	2,0560	0,82644	39,104
FG-020692	Nietdorn I	2,0528	0,82543	39,076
FG-020694	Nietdorn II	2,0525	0,82511	39,103
FG-020695	Nietkopf III	2,0605	0,83122	38,900
FG-020696	Nietdorn III	2,0752	0,83813	38,798
FG-020698	Nietkopf mit Dorn	2,0578	0,82923	38,961
FG-020699	Nietstift	2,0202	0,80362	39,575
FG-020701	Schwert (Griffdornkopf)	2,0491	0,82181	39,161
FG-020702	Spiralring	2,0734	0,83240	39,146
FG-020703	Spiralring	2,0753	0,83275	39,159
Mittelwert	Himmelsscheibe	2,0672	0,83101	39,061

Tab. 6 Bleiisotopenverhältnisse in der Himmelsscheibe und den Begleitfunden von Nebra, gemessen mittels Multikollektor-ICP-MS. Zur Methodik siehe Niederschlag u. a. 2003. Die Werte für die Himmelsscheibe wurden an mehreren Proben gemessen, die innerhalb des Messfehlers übereinstimmten, so dass deren Mittelwert als bester Wert gilt. Deshalb ist keine Probennummer angegeben.

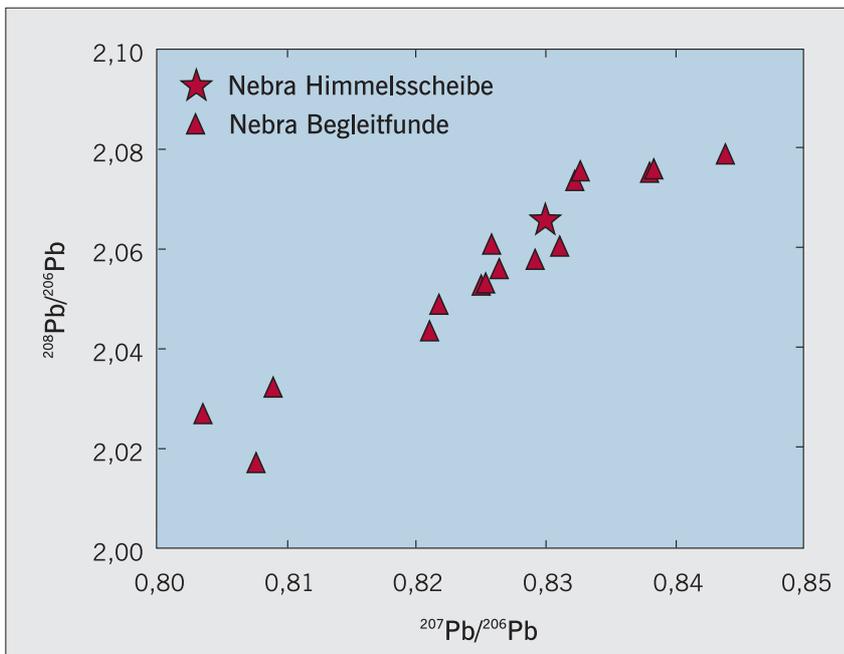


Abb. 9 Bleiisotopendiagramm der Funde von Nebra.

definiert ist, kann man mit einiger Sicherheit ausschließen, dass ein Objekt von dort stammt, wenn es sich in seinen Bleiisotopenverhältnissen wesentlich unterscheidet. Eine positive Zuordnung ist aus prinzipiellen Gründen nicht möglich, weil man nie sicher sein kann, dass es eine andere Lagerstätte mit ähnlicher Charakteristik gibt, die man nicht beprobt hat. Aber in Verbindung mit dem Spurenelementmuster sollte eine positive Zuordnung zumindest sehr wahrscheinlich gemacht werden können.

Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendbarkeit der Methode ist natürlich, dass die Variation der Bleiisotopenverhältnisse innerhalb einer Lagerstätte kleiner ist als die Gesamtvariation zwischen den Lagerstätten. Dies ist oft erfüllt, weil bei der Lagerstättenbildung das Blei nicht nur mobilisiert und homogenisiert, sondern auch weitgehend von Uran und Thorium getrennt wird, so dass sich in der

Lagerstätte selbst keine messbaren Veränderungen der Isotopenzusammensetzung mehr ergeben. Leider ist diese Voraussetzung nicht immer erfüllt, besonders bei Kupfererzen mit sehr niedrigen Bleigehalten. Wenn nämlich niedrige Bleigehalte im Kupfererz mit Urangehalten gleicher Größenordnung gekoppelt sind, verändert sich die Bleiisotopenzusammensetzung im Erz auch nach der Bildung der Lagerstätte. Da das U/Pb-Verhältnis in der Lagerstätte stark schwanken kann, ist auch der Anteil des radiogenen Bleis sehr variabel. Das Ergebnis ist eine sehr große Streuung der Bleiisotopenverhältnisse entlang einer Geraden, wie am Beispiel der Fahlerze aus dem Inntal zu erkennen (Abb. 7). Dennoch lassen sich auch in solchen Fällen Aussagen zur Herkunft machen, wenngleich mit einigen Einschränkungen.

Leider sind auch die Kupferlagerstätten aus dem Salzburger Land von dieser Komplikation betroffen, denn sie ent-

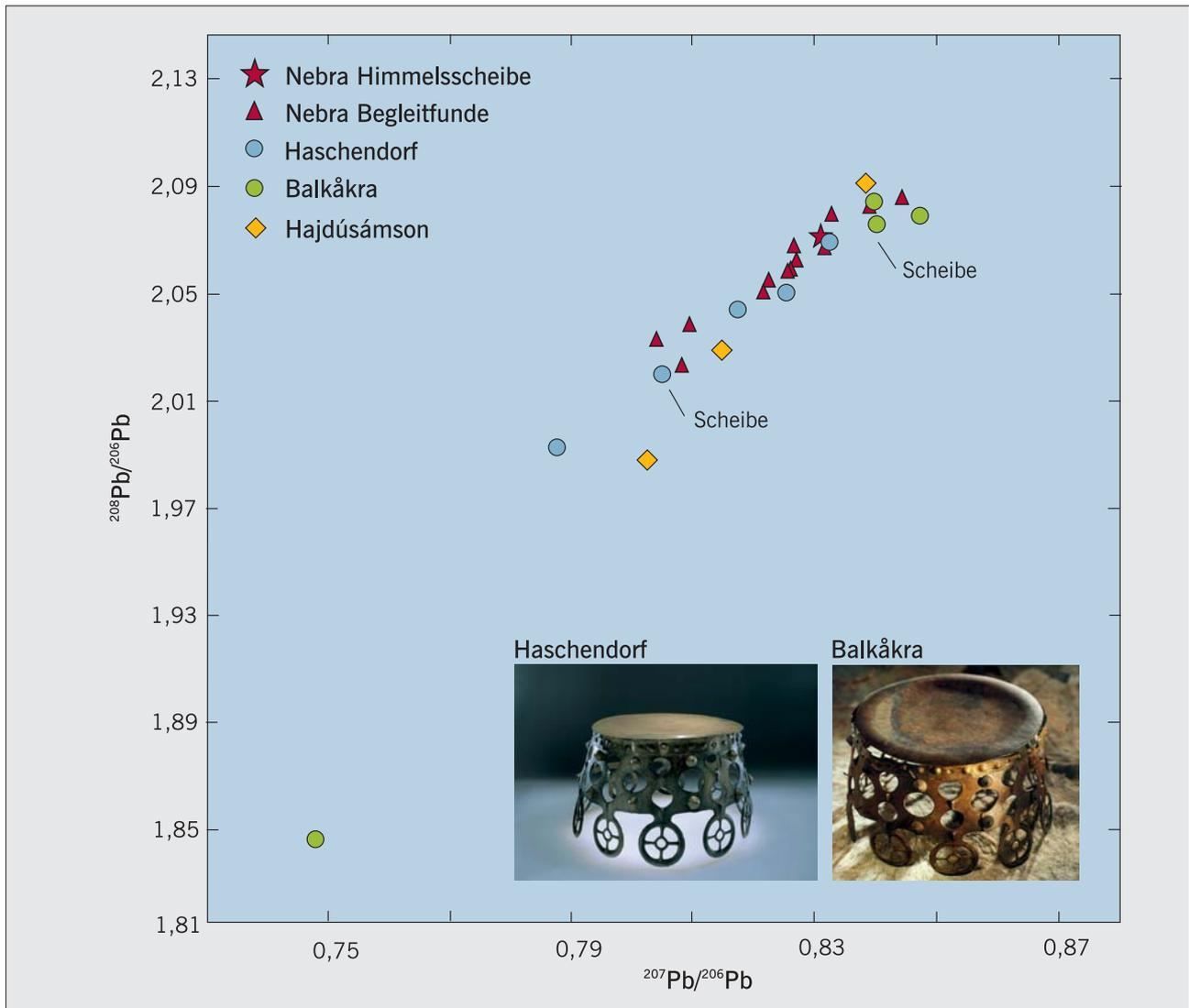


Abb. 10 Bleiisotopendiagramm der Funde von Nebra zusammen mit Proben aus den Scheiben und jeweils drei Radelementen der Kultobjekte von Balkåkra (Schweden) und Haschendorf (Österreich) sowie aus einigen Objekten von Hajdúsámson (Ungarn).

halten zwar mehr Blei als die Tiroler Fahlerze, allerdings auch mehr Uran¹⁵. Dadurch wird die Streuung extrem, wie z. B. bei Kupfererzen vom Mitterberg aus der Sammlung von E. Preuschen (Abb. 8). Obwohl diese starke Streuung für die Herkunftsdiskussion eine Komplikation bedeutet, ist sie für die Echtheitsdiskussion sehr nützlich. Denn wenn man die Bleiisotopenverhältnisse in den Objekten aus dem Hortfund von Nebra betrachtet (Tab. 6; Abb. 9), wird deutlich, dass diese Metallsorte chemisch einheitlich, bezüglich der Bleiisotopenverhältnisse hingegen sehr uneinheitlich ist. Durch eine solche Charakteristik zeichnen sich einige Kupferlagerstätten in Europa aus, wie z. B. Rudna Glava in Serbien (Pernicka u. a. 1993) oder die Lagerstätten des Erzgebirges (Niederschlag u. a. 2003). Für die Echtheitsfrage bedeutet dies, dass ein Fälscher nicht nur die chemische Zusammensetzung hätte kennen müssen, um die Himmelscheibe anzupassen, sondern auch die Bleiisotopenverhältnisse, um

diese unterschiedlich zu halten. Ein solches Vorgehen ist höchst unwahrscheinlich.

Um zu verdeutlichen, dass diese Charakteristik auch innerhalb eines Objektes auftreten kann, sei auf die beiden Kultobjekte von Balkåkra in Schweden und Haschendorf in Österreich verwiesen. Diese fast ununterscheidbaren Kultobjekte sind aus jeweils zehn Radelementen und einer Scheibe zusammengesetzt. Die chemische Zusammensetzung ist den Funden von Nebra ähnlich, und auch in diesem Fall sind die Bleiisotopenverhältnisse extrem variabel, sogar im selben Objekt (Abb. 10). Das bedeutet, dass für den Guss eines jeden Teiles eine andere Metallcharge verwendet wurde¹⁶, wobei die Chargen chemisch ähnlich, aber isotopisch variabel sind. Dasselbe gilt für die Funde von Hajdúsámson, die ebenfalls den Funden von Nebra chemisch ähnlich sind.

Wenn es nun mehrere Kupferlagerstätten in Mitteleuropa gibt, die eine ähnliche Charakteristik – einheitliche

15 In den 1970er Jahren wurden konkrete Pläne entwickelt, aus diesen stillgelegten Kupferlagerstätten Uran zu gewinnen. Sie wurden

aufgegeben, als sich die österreichische Bevölkerung gegen die Nutzung der Kernenergie entschied.

16 Denkbar wäre z. B. jeweils ein oder mehrere Spangenbarren.

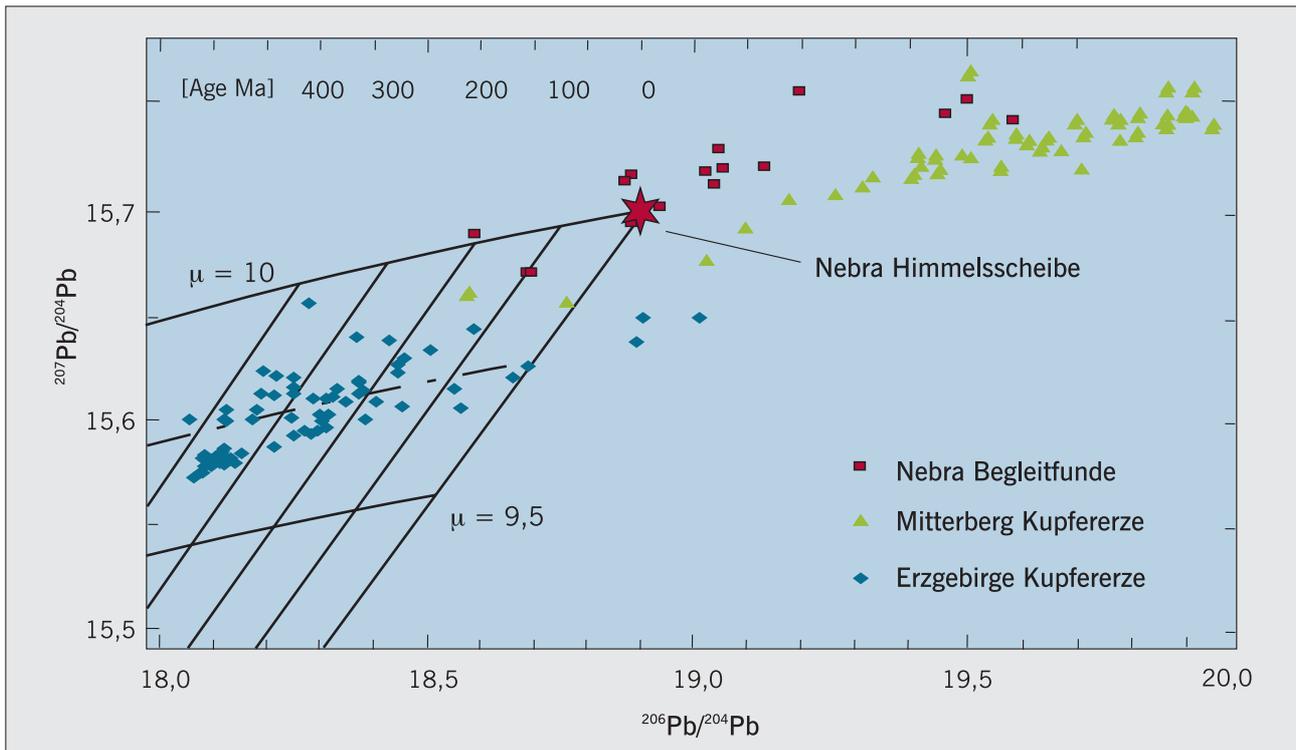


Abb. 11 Alternatives Bleisotopendiagramm der Funde von Nebra zusammen mit den Streubereichen von Kupfererzen aus dem Mitterberger Revier und dem Erzgebirge. Diagramme dieser Art werden für die geolo-

gische Datierung der Erzbildung verwendet; dabei ist $\mu = {}^{238}\text{U}/{}^{204}\text{Pb}$. Scheinbar negative Alter ergeben sich durch die Zufuhr von Uran nach der Bildung der Kupfererze.

chemische Zusammensetzung und variable Bleisotopenverhältnisse – aufweisen, lässt sich dennoch die Herkunft des Kupfers unabhängig vom Spurenelementmuster eingrenzen? Zu diesem Zweck ist es nützlicher, eine anderes Bleisotopendiagramm zu verwenden, das auch in den Geowissenschaften genutzt wird, und zwar das Uranblei (${}^{206}\text{Pb}$ und ${}^{207}\text{Pb}$) normiert auf das einzige Bleisotop, das keinen radio-genen Anteil hat, nämlich ${}^{204}\text{Pb}$ (Abb. 11).

Es ist zunächst befriedigend festzustellen, dass zumindest die Lagerstätten im Erzgebirge von denen der Ostalpen unterschieden werden können. Die Lagerstätten im Harz scheiden ohnehin als Ursprungsregion aus, weil deren Streuung der Bleisotopenverhältnisse viel geringer ist (Niederschlag u. a. 2003). Es bleibt daher der Schluss, dass auch aufgrund der Bleisotopenverhältnisse die Herkunft des Kupfers im Hortfund von Nebra aus den Ostalpen am wahrscheinlichsten ist. Harz und Erzgebirge scheiden aus¹⁷. Dies steht im Einklang mit den Vergleichen der Spurenelementmuster und der geographischen Verbreitung dieses Kupfertyps, der am häufigsten in den frühbronzezeitlichen Spangenbarren auftritt, die in Horten vorwiegend in Süd-Deutschland und im österreichischen Alpenvorland gefunden wurden.

Darüber hinaus ist bis heute kein Nachweis der prähistorischen Nutzung der Lagerstätten im Erzgebirge gelungen, weder im Gelände noch über geochemische Untersuchungen (Niederschlag u. a. 2003), während es in den Ostalpen eine Reihe prähistorischer Kupferbergwerke gibt, für die eine Datierung in die gesamte Bronzezeit gesichert ist. Das

Erzgebirge wird natürlich immer wieder als mögliche Zinnquelle in Betracht gezogen (z. B. Taylor 1983; Bouzek u. a. 1989). Neueste Messungen der Zinnisotopenverhältnisse (Haustein/Pernicka in Vorbereitung) machen aber selbst dies unwahrscheinlich.

Danksagung

Der vorliegende Beitrag ist Teil des umfangreichen Untersuchungsprogramms zur Himmelsscheibe von Nebra und zu ihrem Umfeld, das bis heute betrieben wird. Das Programm wurde vom Landesarchäologen Sachsen-Anhalts, Dr. Harald Meller, initiiert, dem ich für die interessante, ergebnisreiche und freundschaftliche Zusammenarbeit danken möchte. Das Gleiche gilt für Dr. Christian-Heinrich Wunderlich, dem Leiter des Referates Restaurierung des Landesmuseums für Vorgeschichte in Halle, mit dem ich die Untersuchungen an der Himmelsscheibe leitete.

Einen wesentlichen Beitrag hat Daniela Nickel mit ihrer Diplomarbeit am Institut für Archäometrie der TU Bergakademie Freiberg geleistet. Eine detaillierte Darstellung ihrer Ergebnisse wird in der in Vorbereitung befindlichen Monographie zum Hortfund von Nebra veröffentlicht werden.

Schließlich möchte ich mich bei den Leitern und Mitarbeitern des Statens Historiska museet in Stockholm (Balkåkra), des Déri Múzeum in Debrecen (Hajdúsámson) und des Soproni Múzeum in Sopron (Haschendorf/Hasfalva) dafür bedanken, dass wir an den entsprechenden Objekten kleine Proben für die Analyse entnehmen durften.

¹⁷ Nach neuesten Erkenntnissen scheiden auch die Lagerstätten in der Slowakei aus, zumin-

dest die bekanntesten im Hronal (Schreiner 2007).

Literaturverzeichnis

- Bouzek u. a. 1989**
J. Bouzek/D. Koutecý/K. Simon, Tin and prehistoric mining in the Erzgebirge (Ore Mountains): Some new evidence. *Oxford Journal of Archaeology* 8, 1989, 203–212.
- Brill/Wampler 1965**
R. Brill/J. M. Wampler, Isotope ratios in archaeological objects of lead. In: W. J. Young (Hrsg.), *Application of science in the examination of works of art* (Boston 1965) 155–166.
- Butler 1978**
J. J. Butler, Rings and ribs: the copper types of the »ingot hoards« of the central European Early Bronze Age. In: M. Ryan (Hrsg.), *The origins of metallurgy in Atlantic Europe. Proceedings of the 5th Atlantic Colloquium, Dublin 30th March to 4th April 1978* (Dublin 1978) 345–362.
- Eckel 1992**
F. Eckel, Studien zur Form- und Materialtypologie von Spangenbarren und Ösenringbarren: zugleich ein Beitrag zur Frage der Relation zwischen Kupferlagerstätten, Halbzeugproduktion und Fertigwarenhandel. *Saarbrücker Beiträge zur Altertumskunde* 54 (Bonn 1992).
- Gale/Stos-Gale 1982**
N. H. Gale/Z. A. Stos-Gale, Bronze Age copper sources in the Mediterranean. *Science* 216, 1982, 11–19.
- Grögler u. a. 1966**
N. Grögler/J. Geiss/M. Grünenfelder/F. G. Houtermans, Isotopenuntersuchungen zur Bestimmung der Herkunft römischer Bleirohre und Bleibarren. *Zeitschrift für Naturforschung* 21a, 1966, 1167–1172.
- Haustein/Pernicka in Vorbereitung**
M. Haustein/E. Pernicka, Die Verfolgung der bronzezeitlichen Zinnquellen Europas durch Zinnisotopie – eine neue Methode zur Beantwortung einer alten Frage. *Jahresschrift für mitteldeutsche Vorgeschichte* 92, in Vorbereitung.
- Höppner u. a. 2005**
B. Höppner/M. Bartelheim/M. Huijsmans/R. Krauss/K.-P. Martinek/E. Pernicka/R. Schwab, Prehistoric copper production in the Inn valley (Austria) and the earliest copper in Central Europe. *Archaeometry* 47,2, 2005, 293–315.
- Junghans u. a. 1960**
S. Junghans/E. Sangmeister/M. Schröder, Metallanalysen kupferzeitlicher und frühbronzezeitlicher Bodenfunde aus Europa (Berlin 1960).
- Junghans u. a. 1968**
S. Junghans/E. Sangmeister/M. Schröder, Kupfer und Bronze in der frühen Metallzeit Europas 1–3 (Berlin 1968).
- Junghans u. a. 1974**
S. Junghans/E. Sangmeister/M. Schröder, Kupfer und Bronze in der frühen Metallzeit Europas 4 (Berlin 1974).
- Junk/Pernicka 2003**
S. A. Junk/E. Pernicka, An assessment of osmium isotope ratios as a new tool to determine the provenance of gold with platinum group metal inclusions. *Archaeometry* 45, 2003, 313–331.
- Keisch 1967**
B. Keisch, Dating and authenticating works of art by measurement of natural alpha emitters. *Science* 155, 1967, 1238–1241.
- Klein u. a. 2004**
S. Klein/Y. Lahaye/G. P. Brey/H.-M. von Kaelnel, The early Roman Imperial aes coinage 2: Tracing the copper sources by analysis of lead and copper isotopes – copper coins of Augustus and Tiberius. *Archaeometry* 46, 2004, 469–480.
- Knape/Nordström 1994**
A. Knape/H.-Å. Nordström, Der Kultgegenstand von Balkåkra. *The Museum of National Antiquities Stockholm, Monographs* 3 (Stockholm 1994).
- Krause 2003**
R. Krause, Zur Chronologie der frühen und mittleren Bronzezeit Süddeutschlands, der Schweiz und Österreichs. *Acta Archaeologica* 67, 2003, 73–86.
- Krause/Pernicka 1996**
R. Krause/E. Pernicka, Das neue Stuttgarter Metallanalysenprojekt »SMAP«. *Archäologisches Nachrichtenblatt* 1, 1996, 274–291.
- Krause/Pernicka 1998**
R. Krause/E. Pernicka, The function of ingot torques and their relation with Early Bronze Age copper trade. In: C. Mordant/M. Pernot/V. Rychner (Hrsg.), *L'atelier du bronzier en Europe du XX^e au VIII^e siècle avant notre ère 2. Du minerai au métal, du métal à l'objet. Actes du colloque international Bronze '96, Neuchâtel et Dijon* (Paris 1998) 219–225.
- Kuleff/Pernicka 1995**
I. Kuleff/E. Pernicka, On the instrumental neutron activation analysis of native copper: some methodological considerations. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 191, 1995, 145–161.
- Lutz/Pernicka 1996**
J. Lutz/E. Pernicka, Energy dispersive X-ray fluorescence analysis of ancient copper alloys: empirical values for precision and accuracy. *Archaeometry* 38,2, 1996, 313–323.
- Meller 2002**
H. Meller, Die Himmelscheibe von Nebra – ein frühbronzezeitlicher Fund von außergewöhnlicher Bedeutung. *Archäologie in Sachsen-Anhalt N. F. 1*, 2002, 7–20.
- Menke 1978/79**
M. Menke, Studien zu den frühbronzezeitlichen Metalldepots Bayerns. *Jahresbericht der Bayerischen Bodendenkmalpflege* 19/20, 1978/79, 5–305.
- Niederschlag u. a. 2003**
E. Niederschlag/E. Pernicka/Th. Seifert/M. Bartelheim, Determination of Lead Isotope Ratios by Multiple Collector ICP-MS: A case study of Early Bronze Age artefacts and their possible relation with ore deposits of the Erzgebirge. *Archaeometry* 45, 2003, 61–100.
- Otto/Witter 1952**
H. Otto/W. Witter, *Handbuch der ältesten vorgeschichtlichen Metallurgie in Mitteleuropa* (Leipzig 1952).
- Pernicka 1984**
E. Pernicka, Instrumentelle Multi-Elementanalyse archäologischer Kupfer- und Bronzeartefakte: Ein Methodenvergleich. *Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz* 31, 1984, 517–531.
- Pernicka 1990**
E. Pernicka, Gewinnung und Verbreitung der Metalle in prähistorischer Zeit. *Jahrbuch des Römisch-Germanischen Zentralmuseums Mainz* 37, 1990, 21–129.
- Pernicka 1995**
E. Pernicka, Rezension zu: F. Eckel, Studien zur Form- und Materialtypologie von Spangenbarren und Ösenringbarren: zugleich ein Beitrag zur Frage der Relation zwischen Kupferlagerstätten, Halbzeugproduktion und Fertigwarenhandel (Bonn 1992). *Germania* 73, 1995, 174–183.
- Pernicka/Wunderlich 2002**
E. Pernicka/Ch.-H. Wunderlich, Naturwissenschaftliche Untersuchungen an den Funden von Nebra. *Archäologie in Sachsen-Anhalt N. F. 1*, 2002, 24–31.
- Pernicka u. a. 1993**
E. Pernicka/F. Begemann/S. Schmitt-Strecker/G. A. Wagner, Eneolithic and Early Bronze Age Copper Artefacts from the Balkans and their Relation to Serbian Copper Ores. *Prähistorische Zeitschrift* 68, 1993, 1–54.
- Pernicka u. a. 2003**
E. Pernicka/M. Radtke/H. Riesemeier/Ch.-H. Wunderlich, European Network of Competence at 1600 BC. *BESSY-Scientific Highlights* 2003, 8–9.
- Pernicka u. a. 2008**
E. Pernicka/Ch.-H. Wunderlich/A. Reichenberger/H. Meller/G. Borg, Zur Echtheit der Himmelscheibe von Nebra – eine kurze Zusammenfassung der durchgeführten Untersuchungen. *Archäologisches Korrespondenzblatt* 38, 2008, 331–352.
- Pernicka u. a. 2008a**
E. Pernicka/R. Schwab/N. Lockhoff/M. Haustein, Scientific Investigations of West African Metal Castings from a Collection in Bochum. In: E. Pernicka/S. von Berswordt-Wallrabe (Hrsg.), *Original – Copy – Fake? Examining the Authenticity of Ancient Works of Art – Focussing on Asian and African Bronzes and Terracottas* (Mainz 2008) 80–98.
- Pernicka u. a. o. J.**
E. Pernicka/D. Nickel/Ch.-H. Wunderlich, Probenahmen am Hortfund von Nebra. *Unveröffentlichtes Manuskript* (Halle/Saale o. J.).
- Pittioni 1957**
R. Pittioni, Urzeitlicher Bergbau auf Kupfererz und Spurenanalyse. Beiträge zum Problem der Relation Lagerstätte – Fertigungsobjekt. *Archaeologia Austriaca, Beiheft* 1 (Wien 1957).
- Reinecke 1930**
P. Reinecke, Die Bedeutung der Kupferbergwerke in den Ostalpen für die Bronzezeit Mitteleuropas. In: *Direktion des Römisch-Germanischen Zentralmuseums in Mainz* (Hrsg.), *Schumacher-Festschrift: zum 70. Geburtstag Karl Schumachers, 14. Oktober 1930* (Mainz 1930) 107–115.
- Schlosser 2003**
W. Schlosser, Astronomische Deutung der Himmelscheibe von Nebra. *Sterne und Weltraum* 12/2003, 34–38.
- Schmiderer 2008**
A. Schmiderer, *Geochemische Charakterisierung von Goldvorkommen in Europa. Dissertation an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg* (Halle/Saale 2008).
- Schreiner 2007**
M. Schreiner, *Erzlagerstätten im Hronstal, Slowakei: Genese und prähistorische Nutzung* (Rahden/Westf. 2007).
- Taylor 1983**
J. Taylor, Erzgebirge tin: A closer look. *Oxford Journal of Archaeology* 2, 1983, 295–298.
- Waterbolk/Butler 1965**
H. T. Waterbolk/J. J. Butler, Comments on the use of metallurgical analysis in prehistoric studies. *Helinium. Revue Consacrée à l'Archéologie des Pays-Bas, de la Belgique et du Grand-Duché de Luxembourg* 5, 1965, 227–251.

Abbildungsnachweis

- | | | | |
|-----|--|----------|--------------------------|
| 1–4 | Verfasser | | |
| 5 | Verfasser; N. Seeländer, LDA | | |
| 6 | Verfasser | | |
| 7 | nach Höppner u. a. 2005 | | |
| 8–9 | Verfasser | | |
| 10 | Verfasser; J. Lipták, Köln (Foto Haschendorf); Knape/Nordström 1994 (Foto Balkákra) | | |
| 11 | Verfasser; unveröffentlichte Daten aus dem Projekt HiMAT des österreichischen Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (Mitterberg); nach Niederschlag u. a. 2003 (Erzgebirge) | | |
| | | Tab. 1–4 | Verfasser |
| | | Tab. 5 | nach Junghans u. a. 1974 |
| | | Tab. 6 | Verfasser |

Anschrift

Prof. Dr. Ernst Pernicka

Eberhard-Karls-Universität Tübingen
 Institut für Ur- und Frühgeschichte und Archäologie des Mittelalters
 Schloss Hohentübingen
 D-72070 Tübingen
 ernst.pernicka@uni-tuebingen.de

Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie gGmbH
 An-Institut der Universität Tübingen
 C5, Zeughaus
 D-68159 Mannheim
 ernst.pernicka@cez-archaeometrie.de