

Woher stammt das prähistorische Gold?*

Herkunftsanalysen von Metallfunden und ihre wirtschaftsgeschichtliche Bedeutung

Where does Prehistoric Gold come from?

Analysis of the Origins of Metal Finds and their Economical and Historical Significance

Von Ernst Pernicka

Schlüsselwörter: Gold; Bronzezeit; Spurenelemente; Herkunftsuntersuchung; Analytik; Nebra

Keywords: Gold; Bronze Age; Trace Elements; Provenance Research; Chemical Analysis; Nebra

Zusammenfassung: In diesem Artikel werden die Möglichkeiten und Grenzen der Herkunftsbestimmung von Gold diskutiert. Es werden zunächst die Eigenschaften von Gold, sein Auftreten in der Natur und die Geschichte seiner Gewinnung und Verwendung durch den Menschen beschrieben. Anhand der zahlreichen Goldfunde aus dem Gräberfeld von Varna in Bulgarien, die in die zweite Hälfte des 5. Jahrtausends v. Chr. datiert werden, kann die Aussagekraft von Analysen prähistorischer Goldfunde im Hinblick auf Fundzusammengehörigkeit und Gruppenbildung demonstriert werden. Es werden verschiedene Analysemethoden vorgestellt, mit denen versucht wurde, die geologische Herkunft von archäologischen Objekten aus Gold zu ermitteln. Es stellt sich heraus, dass es zwar Hinweise auf den Bezug von Gold einheitlicher Zusammensetzung und damit wohl von einer einzigen Region gibt, wie schon A. Hartmann am Beispiel der dänischen Goldfunde aus der Bronzezeit zeigen konnte. Aber wirklich überzeugende Herkunftsbeziehungen zwischen Goldvorkommen in der Natur und archäologischen Objekten sind bisher kaum erzielt worden. Der Grund liegt wohl in der Tatsache, dass das Gold, aus dem Objekte hergestellt wurden, oft bereits eine Mischung von mehreren Komponenten (Naturgold mit Silber, Kupferminerale, Zinnstein, Platingruppenminerale) darstellt, so dass der Vergleich von Naturgold allein mit Objekten keine ausreichende Grundlage bildet. Eine einigermaßen gute Herkunftsbeziehung konnte zwischen dem Gold der Himmelsscheibe von Nebra und Naturgold aus dem Fluss Carnon in Cornwall aufgrund von acht Spurenelementen hergestellt werden. Dennoch sind auch hier die Kupfer- und Platingehalte im Gold von Nebra höher als im Naturgold des Carnon.

Abstract: In this article the possibilities and limitations of the determination of the provenance of gold is discussed. Firstly the properties of gold, its occurrence in nature, and the history of its extraction and utilisation by man are discussed. On the basis of numerous gold

* Aktualisierte Fassung eines Vortrages im Jahr 2012.

finds from the burial ground at Varna in Bulgaria, which can be dated to the second half of the 5th century BC, the informative value of analyses of prehistoric gold finds with regard to their composition and grouping can be demonstrated. Various methods of analysis, which were used in the search for the geological origins of the gold in archaeological artefacts are described. It turns out that there are, indeed, indicators in respect of gold with the same composition and thereby probably from the same area, as previously recognised by A. Hartmann using the example of the bronze age Danish gold finds. But really convincing connections between the sources of gold in nature and in archaeological objects have rarely been achieved as yet. The reason lies in the fact that the gold from which the objects are made, is frequently already a mixture containing several elements (natural gold with silver, copper minerals, tinstone, minerals of the platinum group), so that the comparison of natural gold alone with objects does not form an adequate basis. A passable correlation of provenance between the gold of the Nebra sky disk and natural gold from the river Carnon in Cornwall could be established on the basis of eight trace elements. Even so, the copper and platinum content in the gold from Nebra is higher than that of the natural gold from the river Carnon.

Als mich Herr Dr. Veil zu diesem Vortrag einlud und dabei das Wunschthema nannte, habe ich zwar dankbar angenommen aber dennoch ein wenig gezögert. Ich sollte über das Thema „Woher kommt das prähistorische Gold?“ sprechen. Nun könnte ich spontan sagen: „Ich weiß es nicht oder, besser, wir wissen es nicht.“ In der Folge will ich aber erläutern, warum wir es nicht wissen oder warum wir näher kommen, es zu wissen.

Für diejenigen, die jetzt vielleicht enttäuscht sind, sei erwähnt, dass es bei den anderen Metallen auch sehr lange gedauert hat, bis die grundlegende Idee, dass die Materialzusammensetzung des Metalls eine Information über seine Herkunft enthalten sollte, tatsächlich umgesetzt werden konnte. Für Kupfer und Bronze wird diese Frage seit 150 Jahren diskutiert, wenn man den Titel der wegweisenden Publikation von Franz Göbel (Erlangen 1842) betrachtet: „Über den Einfluß der Chemie auf die Ermittlung der Völker der Vorzeit oder Resultate der chemischen Untersuchung metallischer Alterthümer, insbesondere der in den Ostseegouvernements vorkommenden, behufs der Ermittlung der Völker, von welchen sie abstammen“. Erst seit etwa 30 Jahren steht das methodische Rüstzeug zur Verfügung, in günstigen Fällen tatsächlich eine Herkunftsbeziehung zwischen Kupferlagerstätten und ihren archäologischen Endprodukten herzustellen. Dies war durch die Erweiterung der Materialanalyse auf Isotopenverhältnisse möglich geworden, die bereits früher zur Herkunftuntersuchung von Blei und Silber eingesetzt worden waren.

Bei Gold steht diese Entwicklung erst am Anfang und ich werde im Folgenden aufzeigen, was in der Vergangenheit versucht wurde, welche Sackgassen beschritten wurden, wo wir jetzt stehen und wo wir hoffen, hinzukommen. Bevor wir aber zu den methodischen Fragen kommen, will ich noch über die Bedeutung von Gold, über die Geschichte des Goldes und seine Vorkommen einige Hintergrundinformationen liefern.

Der Gebrauchswert Gold ist gering. Es ist ein sehr weiches Metall und kann nicht zu Geräten oder Waffen verarbeitet werden, obwohl es Waffen aus Gold gibt, die aber wohl nur symbolische Funktion hatten. Zu diesem Zweck wurde Gold symbolisch auf zwei Arten verwendet bzw. angesehen: Die eine war die ideelle Wertschätzung, wahrscheinlich wegen der Seltenheit und der Unzerstörbarkeit. Es war sozusagen das göttliche, das königliche Gold, damit auch ein wertvolles, wenn nicht das wertvollste Material. Dieser Aspekt gilt bis heute, wenn es auch heute nicht mehr das teuerste Metall ist sondern z. B. von Platin übertroffen wird. Der zweite Aspekt war der mystische; Gold als Metall und Symbol der Sonne. Dies beruht sicher auf seiner Farbe, während Silber immer als Metall und Symbol des Mondes gegolten hat und auch von den Alchimisten so verwendet wurde. Zum mystischen Aspekt



Abb. 1

Goldgräber auf dem Chilkoot Pass im Nordwesten Kanadas während des Klondike-Goldfiebers 1898 (Canadian National Archives, ref. no. C-005142).

gehörten auch das Licht, die Reinheit und die Wärme. All dieses wird vereint in der Vorstellung von einem goldenen Zeitalter, das in pessimistischer Sicht von anderen, weniger anheimelnden abgelöst wird. Es gibt aber auch die negative Seite oder begriffliche Besetzung von Gold, nämlich den Goldrausch oder den Fluch des Goldes (*Abb. 1*).

Wenn wir von der Symbolik wieder zur Realität der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Goldes zurückkehren, dann ist Gold das einzige gelb glänzende Metall, das auch extrem beständig und resistent gegenüber Korrosion ist. Es wird deshalb zu den Edelmetallen gezählt, zu denen Silber und die Platinmetalle sowie gelegentlich Quecksilber gehören. Es hat immer seinen Glanz bewahrt im Gegensatz zu den sechs anderen Metallen, die im Altertum bis in das hohe Mittelalter bekannt waren. Es hat für die Wertschätzung im Altertum natürlich keine Rolle gespielt, dass Gold eine sehr hohe thermische und elektrische Leitfähigkeit hat. Aber für die Bearbeitung war die außerordentlich hohe Duktilität schon wichtig, also die Verarbeitbarkeit zu langem dünnen Draht oder zu sehr dünnem Blech.

Vergoldung ist das Stichwort. Man kann aus einem Würfel von einem Kubikzentimeter Kantenlänge theoretisch eine Fläche von mehr als 10 m^2 vergolden oder einige Dutzend Kilometer Golddraht ziehen. Dies ist eine besondere Eigenschaft des Goldes, die es heraushebt von anderen Metallen.

Gold hat ein hohes spezifisches Gewicht, das nur von den Platinmetallen übertroffen wird. Das führt dazu, dass es bei natürlichen Prozessen und auch bei der Goldgewinnung durch

den Menschen angereichert wird. Gold ist in der Erdkruste weit verbreitet aber in ganz geringen Konzentrationen, etwa 4 mg/t. Das bedeutet, dass es in der Natur Anreicherungsprozesse geben muss, damit das Gold sichtbar wird. Auch das Meerwasser enthält Gold und es hat durchaus Überlegungen gegeben, daraus Gold zu gewinnen.

In der Natur kommt Gold wegen seiner chemischen Eigenschaften, vor allem wegen seiner Korrosionsbeständigkeit, fast immer nur als Metall vor. Es gibt natürlich auch Goldminerale, aber diese sind selten und bei Mineraliensammlern sehr begehrt. Für die Archäologie relevant sind zwei Formen von Goldanreicherungen, das so genannte Flussgold, oder Seifengold, und das Berggold. Der Begriff Seife (oder Saife) bezieht sich auf die mechanische Anreicherung des Goldes im Wasser. Diese Lagerstätten entstehen durch Verwitterung von goldhaltigen Gesteinen. Die so genannten Primärlagerstätten entstehen durch Fraktionierung von Magmen. Bei diesen Prozessen wird das Gold in heißen Lösungen angereichert und an bestimmten Stellen, meist zusammen mit Quarz, ausgefällt. Dies führt zur Bildung der Gold-Quarz-Gänge, der klassischen Paragenese. Die Lagerstättenkunde kennt mittlerweile eine Vielzahl von Lagerstättentypen, was aber hier nicht weiter von Interesse ist. Aus archäologischer Sicht bedeutender ist die sicher schwierigere Gewinnung von primärem Gold, weil notwendigerweise Bergbau damit verbunden ist.

Das Flussgold kann hingegen mit einfachen Methoden gewonnen werden. Weithin bekannt ist die Goldwäscherpfanne. Effizienter aber ist ein geriffeltes Brett, über das goldhaltiges Flusssediment mit Wasser gespült wird. Die Riffelung kann auch durch ein grobes Gewebe oder ein Schaffell ersetzt werden, und hier kommen wir wieder zur Mythologie, nämlich der Argonautensage des goldenen Vlies. Wie man sich das in der frühen Neuzeit vorstellte, ist in einem Holzschnitt aus dem berühmten Buch über Bergbau und Metallurgie, *de re Metallica* des Georgius Agricola zu sehen. Dort werden die Techniken des Bergbaus in Sachsen im späten 15. und frühen 16. Jahrhundert beschrieben. In der Darstellung wird ein Widderfell in einen Bach gelegt, auf dem sich das Gold gesammelt hätte. Deswegen die Bezeichnung „das goldene Vlies“. Dass diese Sage einen gewissen Wahrheitsgehalt hat, kann man daran erkennen, dass auch noch im 16. Jahrhundert, also zu Agricolas Zeiten, das Gold auf diese Weise gewonnen wurde, wenn auch nicht mit einem Widderfell, aber mit Fellen oder Tüchern, vielleicht sogar mit gefetteten Tüchern. Der Effekt beruht darauf, dass die Goldpartikel einerseits wegen des hohen spezifischen Gewichtes nach unten sinken und sich dann an das Fett anlagern und nicht mehr weiter gespült werden. Ein Widderfell enthält erhebliche Mengen an dem Naturfett Lanolin, sodass die Sage durchaus einen technisch richtigen Hintergrund hat.

Diese Methode wurde sicher seit Beginn der Goldgewinnung auch in großem Maßstab angewandt. In Armenien gibt es südöstlich der Sevansesee eine große Goldlagerstätte die heute abgebaut wird. Es ist, nebenbei bemerkt, die größte Goldlagerstätte in ganz Vorderasien. Dass sie wesentlich früher genutzt wurde, deutet sich durch große Waschkalden an, die bis zu sieben Meter hoch sind (*Abb. 2*). Sie konnten vorläufig mit der Methode der Optisch Stimulierten Lumineszenz in das 3. Jahrtausend v. Chr. bzw. in die frühe Bronzezeit (Kura-Araxes-Kultur) datiert werden. Zusammen mit Kollegen des Archäologischen Instituts der Akademie der Wissenschaften Armeniens, dem Landesdenkmalamt Sachsen-Anhalt und der Universität Halle sind wir seit zwei Jahren dort tätig und versuchen auch das archäologische Umfeld der Lagerstätte im 3. und im 2. Jahrtausend vor Christi zu erforschen. Diese Technik nutzt man auch heute noch, wie an einem Beispiel aus Kirgistan zu erkennen ist. Der Schäfer übt seinen Nebenberuf als Goldwäscher aus, nur dass hier kein goldenes Vlies benutzt wurde sondern eine Fußmatte von einem modernen Auto (*Abb. 3*). Diese war geriffelt und erfüllte den gleichen Zweck wie ein Widderfell. Zusätzlich kann man das gesammelte Gold leichter erkennen, weil der Untergrund schwarz ist.

Goldgewinnung aus Flüssen wird natürlich bis heute auch in Europa praktiziert, wenn auch kaum mehr für gewinnbringende Zwecke. Aber es ist gar nicht so lange her, dass aus

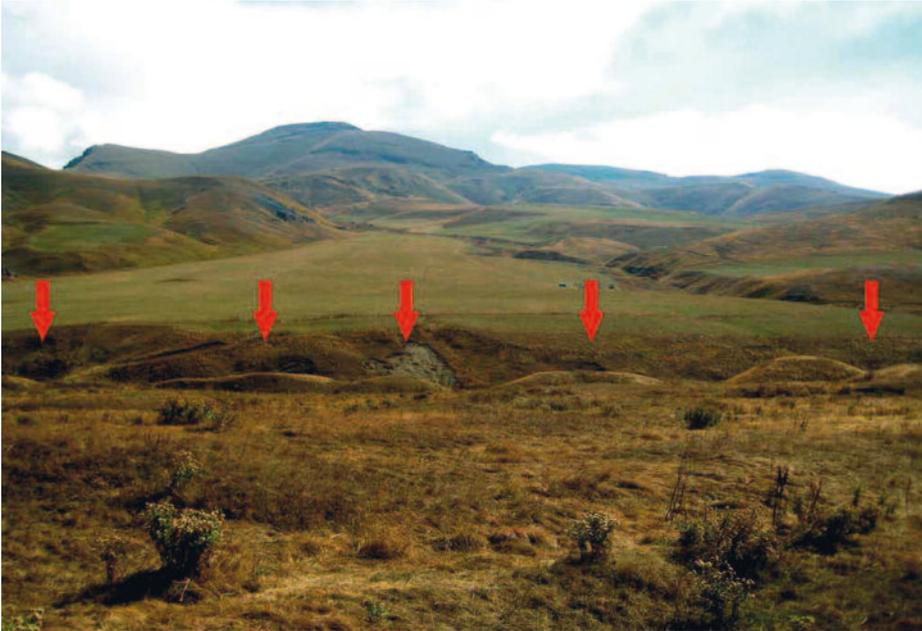


Abb. 2

Abraumhalten (Pfeile) der Seifengoldgewinnung entlang des Ufers des Sotk Flusses in Armenien (aus WOLF et al. 2011).

dem Rhein systematisch Gold gewonnen wurde, wie man an einem Dukaten, geprägt im Jahr 1767, erkennen kann, der eine Szene mit Goldwäschern und dem Mannheimer Schloss im Hintergrund zeigt (Abb. 4). Man hat also damals etwa 200 Kilo Gold pro Jahr aus dem Rhein gewonnen und es gibt auch heute noch eine Firma, die Gold aus Rheinschotter gewinnt. Aus dem Rhein selbst ist kein Gold mehr zu erwarten, da durch die vielen Staustufen das Gold mittlerweile nicht mehr transportiert wird.

Spätestens seit der römischen Kaiserzeit gibt es noch eine weitere Methode, Gold aus Flusssedimenten anzureichern, nämlich mit Quecksilber. Die Sande oder Schlämme werden mit Quecksilber vermischt, das sich mit Gold zu einem Amalgam legiert. Dieses kann leicht abgetrennt und das Quecksilber anschließend verflüchtigt werden. Dadurch wird zwar die Umgebung mit Quecksilber verseucht aber die Menschen haben Gold gewonnen.

Eine andere Technik ist sehr viel aufwendiger, das ist die Gewinnung von Berggold. Deshalb hat man lange Zeit gedacht, dass der Abbau frühestens in der Römerzeit beginnt und zwar besonders in Rumänien, wo römische Bergbauspuren im Goldenen Viereck in Siebenbürgen in großer Zahl bekannt sind. Aber ein Team aus dem Deutschen Bergbau-Museum in Bochum hat in Südgeorgien an einem unscheinbaren Hügel Anzeichen von prähistorischem Bergbau gefunden, die in das 3. Jahrtausend v. Chr. datiert werden können (STÖLLNER et al. 2010). Damit ist dieser Goldbergbau in Georgien der älteste, den wir kennen. Derzeit untersucht das genannte Team aus Halle, Armenien und Mannheim auch in Armenien, ob neben dem Flussgold primäre Goldvorkommen abgebaut wurden.

In der Ostwüste Ägyptens gibt es große goldhaltige Granitfindlinge, geologische Reste der Verwitterung. Hier hat die Natur dem Menschen einen Teil der Arbeit abgenommen, nämlich die Gewinnung von goldhaltigem Gestein untertage. Es war nur mehr der zweite



Abb. 3

Goldwäscher mit einer Gummifußmatte aus einem PKW in Kirgistan (Foto E. Pernicka).

Teil der Anreicherung notwendig, indem man diese Gesteine zerkleinert und mit Handmühlen gepulvert hat, um auch kleinste Goldpartikel zugänglich zu machen, die anschließend mit dem ebenfalls sehr kostbaren Wasser angereichert wurden. Auf diese Weise entstehen in der Ebene kleine Häufchen, die man auch als Waschhalden bezeichnen kann. Das Ehepaar Dietrich und Rosemarie Klemm hat den Goldbergbau in Ägypten intensiv untersucht und sie fanden heraus, dass praktisch jedes Goldvorkommen in der Ostwüste schon im 3. Jahrtausend gefunden und ausgebeutet wurde (KLEMM und KLEMM 2013). Der Turiner Papyrus aus dem 12. Jahrhundert v. Chr. gilt als die älteste geologische Karte weltweit (Abb. 5). Sie zeigt einen Teil des Wadi Hammamat, die umgebenden Hügel, einen Steinbruch und eine Goldmine. Zusätzlich sind neben vielen Anmerkungen auch die Goldlagerstätten in den Hügeln verzeichnet. Die Karte ist oben nach Süden in Richtung der Nilquelle ausgerichtet.

In der römischen Kaiserzeit wurde Gold großtechnisch abgebaut. Die Römer waren große Ingenieure, die solche ingenieurtechnischen Leistungen wie die Aquädukte, Großkuppeln und anderes vollbracht haben. In Nordwestspanien, bei Las Médulas, wurde ein goldhaltiges Konglomerat sowohl mechanisch als auch hydraulisch abgebaut, indem zunächst Stollen in das wenig standfeste Gestein getrieben und diese dann mit aufgestautem Wasser erweitert wurden, sodass teilweise ganze Hänge einstürzten. Der Schlamm wurde in Kanäle geleitet, in denen Strömungshindernisse, z. B. Ginsterbüschel, eingebracht waren, an denen die Goldpartikel hängen blieben. Der Ginster wurde schließlich verbrannt, das Gold blieb in



Abb. 4
Rheingolddukat, geprägt 1767, mit Stadtansicht von Mannheim und im Vordergrund vier Goldwäscher am Rheinufer (Foto T. Tütken).



Abb. 5
Fragmente des Turin Papyrus mit einem Lageplan von Bergwerken unter Ramses IV, 12. Jahrhundert v. Chr. (Foto J. Harrell).

der Asche zurück. Plinius der Ältere war 74 AD römischer Prokurator der Region und beschreibt dieses System des Goldbergbaus als *arrugia* oder *ruina montium*, mit dem jährlich 20000 römische Pfund (ca. 6500 kg) Gold gewonnen wurden. Er notierte: „*Was in Las Médulas geschieht, übersteigt das Werk von Giganten. In die Berge werden Gänge und Stollen gegraben ... monatelang sehen die Bergleute keine Sonne und viele von ihnen sterben in den Tunneln*“. Vielleicht hat Plinius übertrieben, was die Goldproduktion angeht. Aber immerhin sollen rund 100 Millionen Kubikmeter Erdreich in Las Médulas in knapp zwei Jahrhunderten gesprengt und weggespült worden sein. Das ergäbe bei konstanter Produktion über 250 Jahre etwa 8 g/t Gold im Gestein, ein durchaus realistischer Wert aus heutiger Sicht. Wahrscheinlich war die Produktionsrate nicht konstant, sodass man eher von einem geringeren Durchschnittsgehalt ausgehen kann, der dann dem Durchschnittswert der weltgrößten Goldlagerstätte in Südafrika (ebenfalls eine Paläoseife) von 5 g/t nahe kommt. Was wir heute sehen (Abb. 6), blieb stehen, wenn der Druck der Wassermassen die Berge nicht vollständig zerreißen konnte, und es wirkt oft wie ein abstraktes Kunstwerk oder wie ein riesiger Karieszahn.

Offenbar unterscheidet Plinius aufgrund dieses Eindrucks drei verschiedene Sorten von Goldvorkommen: Das alluviale oder Flussgold, das primäre Gold (*aurum canalicum*), das vorwiegend in Adern vorkommt, aber auch das hydraulisch zu gewinnende Gold (*aurum arrugia*). Heute würde man die dritte Form von Goldlagerstätte Paläoseife nennen, d. h. Gold wurde bei der Gesteinsverwitterung angereichert und zusammen mit dem Gesteinsmaterial in einem Konglomerat verfestigt.

In Las Médulas sollen 60000 freie Arbeiter beschäftigt gewesen sein. Wie das ausgesehen haben mag, vermittelt ein Bild eines modernen Goldrausches aus den 1980er-Jahren in Brasilien, der etwa 10 bis 14 Jahre in der Serra Pelada im Amazonasgebiet währte (Abb. 7). Zu sehen sind tausende von Menschen, die kleine Säcke mit goldhaltigem Schlamm nach



Abb. 6

Die antike Bergbauregion von Las Médulas in Nordwestspanien. Diese außergewöhnliche Landschaft ist durch den römischen Goldbergbau entstanden (Foto E. Keefer).



Abb. 7

Tagebau von Serra Pelada, Brasilien, wo in den 1980er-Jahren mehr als 100.000 Arbeiter mit einfachsten Mitteln nach Gold schürften (Foto A. Bernardelli).

oben tragen und dort mit Wasser und Quecksilber anreichern. Eine Situation, die im 19. Jahrhundert in den nordwestlichen Vereinigten Staaten ebenso geherrscht hat und zu den Geisterstädten geführt hat, wenn der Goldrausch vorüber war.

Auch in primären Lagerstätten liegt das Gold mehrheitlich in Form sehr kleiner Flitter vor, die aus dem Gesteinsverband gelöst werden müssen, das heißt, dass das Erz zerkleinert werden und auf Pulverfeinheit gebracht werden muss. Das hat man in der Ostwüste im Alten Reich Ägyptens noch mit der Hand gemacht, in der römischen Periode hatte man Pochmühlen konstruiert, ähnlich dem Pochwerk, das uns Georgius Agricola überliefert hat (*Abb. 8*).

Und eine weitere Methode der Erzzerkleinerung ist heute z. B. in Peru noch in Gebrauch (*Abb. 9*). Hier werden große Steinmörser verwendet, in denen die Stößel von einem Hebel bedient werden. Dieser Hebel muss in Fußarbeit angetrieben werden und auch hier wird das Gold aus dem Pulver mit Quecksilber mit Wasser angereichert.

Wo kommt das Gold nun vor? Auf der Karte in *Abb. 10* sind die großen Goldlagerstätten weltweit verzeichnet. Südafrika hat zwar in den prähistorischen Epochen keine Rolle gespielt, ist aber heute nach wie vor die größte Goldlagerstätte weltweit. In der Alten Welt dominieren eindeutig die Lagerstätten in Ägypten und in Osteuropa, besonders in Rumänien, Siebenbürgen und in Spanien. Es gibt auch einige goldreiche Gegenden in Mittelasien, im heutigen Afghanistan, Uzbekistan, Tadschikistan aber sonst gibt es nur kleinere Vorkommen. Nun ist der Begriff einer Lagerstätte ökonomisch definiert und auch kleine Goldvorkommen können in vergangenen Zeiten durchaus ökonomisch betrieben worden sein. Es wird immer



Abb. 8
Pochwerk nach G. Agricolas „De re metallica“ von 1556.

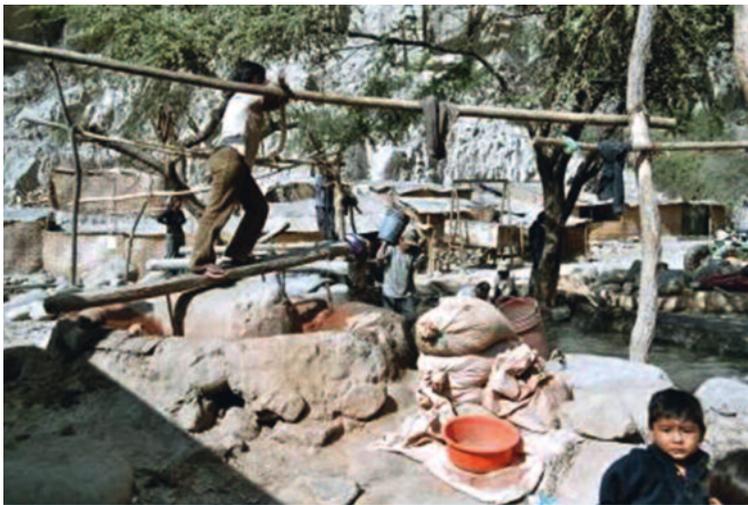


Abb. 9
Betrieb eines Quimbaleta bei Palpa, Peru, eines groß dimensionierten feststehenden Mörsers zur Zerkleinerung von Golderzen (Foto G.-G. Schulz).

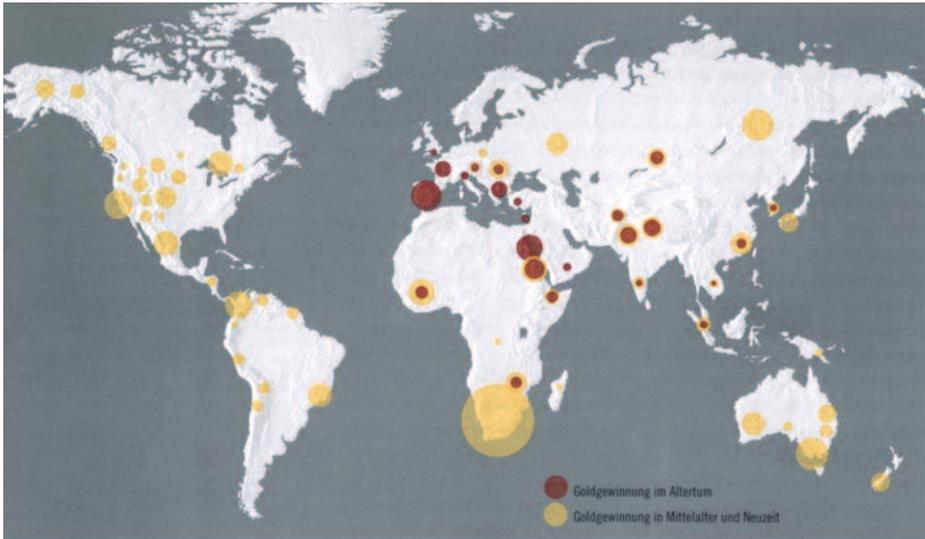


Abb. 10
Goldlagerstätten weltweit (aus BACHMANN 2006).

wieder davon gesprochen, dass eine Lagerstätte im Altertum völlig ausgebeutet worden wäre. Das ist selten richtig, denn die Methoden des Abbaus haben sich im Laufe der Zeit dramatisch verändert, sodass die kumulative Weltproduktion an Gold in den letzten hundert, hundertfünfzig Jahren exponentiell zugenommen hat und immer noch weiter steigt. Es wäre reizvoll, die gesamte Goldproduktion in bestimmten Epochen abzuschätzen und mit den zeitgleichen Objekten zu vergleichen. Bei Kupfer hat sich herausgestellt, dass wohl weniger als ein Promill des produzierten Metalls auf uns gekommen ist. Trotz Wiederverwendung wird es bei Gold ähnlich sein.

Wenn wir die relative Wertschätzung von Gold, Silber und Kupfer betrachten, fällt auf, dass die Häufigkeitsverhältnisse dieser Metalle in der Erdkruste in etwa der kumulativen Weltproduktion entsprechen, soweit man sie abschätzen kann (Abb. 11). Das ist zwar gemacht worden, aber für die frühen Perioden liegt durchaus ein archäologisch-wirtschaftsgeschichtliches Desiderat vor. Darüber hinaus gestaltet sich auch das ökonomische Wertverhältnis ähnlich. Dies ist also eine Widerspiegelung, ein Echo der relativen Häufigkeit und damit der Arbeit, die investiert werden muss, um diese Metalle zu gewinnen. Heute ist das Kupfer aus dem Lot geraten; es ist viel zu billig. Aber das Wertverhältnis zwischen Gold und Silber bewegte sich von den Anfängen bis in das Mittelalter und sogar bis in die Neuzeit zwischen fünf und zwanzig. Das halte ich für bemerkenswert. Heute ist wegen der Finanzkrise das Gold überbeuert und das Verhältnis liegt bei fast sechzig.

Wenn wir also daran denken, dass Gold in der Natur vorwiegend als Metall vorkommt, so könnten wir zunächst vermuten, dass es auch das erste Metall war, das der Mensch gefunden und verwendet hat. Das stimmt aber nicht, denn nach dem derzeitigen Fundbestand war es Kupfer und zwar lange vor Gold, das zuerst in Vorderasien verarbeitet wurde. Dann kam Blei schon im 7. Jahrtausend, was besonders bedeutsam ist, weil Blei anders als Kupfer in der Natur nicht als Metall vorkommt.

Und warum ist Kupfer zuerst verarbeitet worden? Kupfernuggets sind in der Regel sehr viel größer. Das hat damit zu tun, dass Kupfer einerseits häufiger in der Erdkruste ist als Gold

Produktion und Wertverhältnisse von Kupfer, Silber und Gold			
	Kupfer	Silber	Gold
Gehalt in der Erdkruste (in mg/kg)	75	0,008	0,003
relativ	25000	25	1
kumulative Weltproduktion (in 10 ⁸ t)	320	1,4	0,13
relativ	2500	11	1
Wertverhältnis Mesopotamien	1000	10	1
Wertverhältnis heute	2000000	50	1

Abb. 11

Produktion und Wertverhältnisse von Kupfer, Silber und Gold (nach PERNICKA 1990).

und andererseits leichter löslich, sodass das Metall durch natürliche Vorgänge aus Lösungen abgeschieden werden kann. Gold kommt sehr häufig in kleinen Nuggets vor, die man nicht sieht, aber Kupfer kommt oft in großen Massen vor, die man leicht verarbeiten kann. Gold taucht im 5. Jahrtausend im archäologischen Fundbestand auf mit einem Schwerpunkt in Südosteuropa und Silber ab etwa 4000 v. Chr. vorwiegend in Vorderasien und im östlichen Mittelmeerraum. Dabei ist es interessant, dass Silber bereits in dieser Zeit in einem zweistufigen Prozess aus silberhaltigen Bleierzen gewonnen wurde. Aber das ist eine andere Geschichte.

Obwohl in der prähistorischen Archäologie Neufunde den Kenntnisstand ständig verändern können, gelten die Goldfunde vom Gräberfeld in Varna am Schwarzen Meer in Bulgarien seit fast vierzig Jahren als die ältesten. Hier erscheint das Gold sozusagen mit einem Paukenschlag, denn es handelt sich um rund 3000 Goldobjekte, insgesamt ca. 6 Kilogramm. Der Fundplatz wurde bei Arbeiten in den 1970er-Jahren in einem Industriegebiet angeschnitten und in der Folge wurden insgesamt 240 Gräber der Kodjadermen-Gumelnitsa-Karanovo VI-Kultur aufgedeckt, die vor allem in Ostbulgarien und Südostrumänien verbreitet ist. Aus archäologischer Sicht ist es ebenso interessant, dass die Goldfunde in den Gräbern sehr ungleichmäßig verteilt sind. In nur drei Gräbern befanden sich 95 % des Goldes. Das ist ein deutliches Anzeichen einer sozialen Differenzierung, die es vorher in dieser Deutlichkeit nicht gab. Eine besondere Anwendung von Gold wurde hier ebenfalls gefunden, nämlich die Kaltbemalung von Keramik mit Goldstaub. In *Abb. 12* ist eine Schüssel von etwa 50 cm Durchmesser zu sehen, schwarz poliert, mit Teilvergoldung. Eine Technik, die sonst nirgendwo bekannt ist. Die Funde von Varna werden derzeit in einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekt untersucht. Die Goldfunde werden von Verena Burnett im Rahmen einer Dissertation analysiert und ausgewertet, wobei auch Fragen der Herstellungstechnik eine Rolle spielen. Dabei sind bereits einige interessante Ergebnisse zu verzeichnen, wie z. B. die Übereinstimmung von Formtypologie mit Materialgruppen bei einigen Perlen (*Abb. 13*) und die Erkenntnis, dass das Gold gelegentlich Einschlüsse von Platinmetallen enthält, was auf ein fluviatiles Vorkommen hinweist.

Die wichtigste Fragestellung ist aber die nach der Herkunft des Goldes, die auf den ersten Blick ganz einfach zu sein scheint. Im Prinzip könnte man meinen, dass die chemische Zusammensetzung des Goldes Auskunft über seine Herkunft geben könnte, weil es, ähnlich wie bei Steinmaterial, auf dem Weg von der Lagerstätte zum Fertigprodukt nicht verändert wird. Es liegt ja schon als Metall vor, das nur mehr in die gewünschte Form gebracht werden muss.

Ähnliche Überlegungen haben möglicherweise dazu geführt, dass am Württembergischen Landesmuseum in Stuttgart eine umfangreiche Analysenserie prähistorischer Gold-



Abb. 12
Schale mit Goldbemalung aus dem Gräberfeld von Varna, Bulgarien, ca. 5300 v. Chr.
(Foto E. Pernicka).

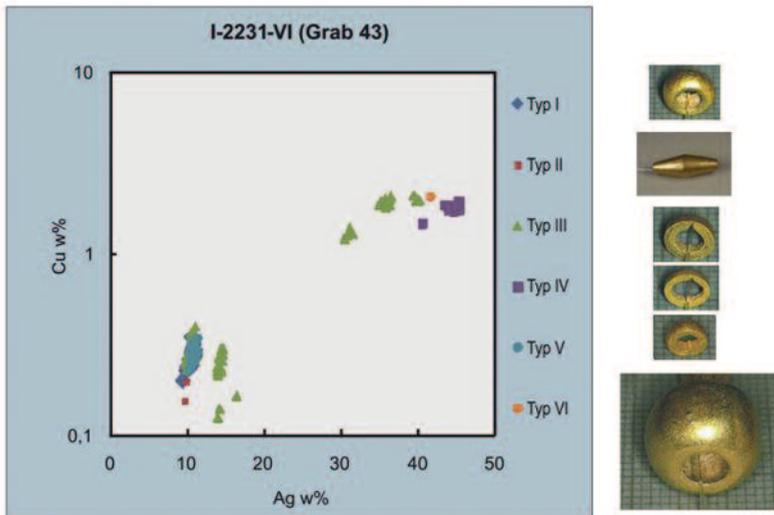


Abb. 13
Chemische Zusammensetzung der Goldperlen einer Halskette aus Grab 43, chalkolithisches Gräberfeld von Varna, mit typologisch unterschiedlichen Perlen. Verschiedene Goldgruppen können anhand der Kupfer- und Silbergehalte abgegrenzt werden. Ein Zusammenhang zwischen Goldgruppen und Perlentypen ist deutlich erkennbar und legt eine Serienproduktion nahe (nach LEUSCH et al. 2014).

funde von Axel Hartmann durchgeführt wurde. Vorausgegangen war eine noch umfangreichere Untersuchung prähistorischer Kupferobjekte. Dabei stand man vor der Schwierigkeit, dass die technologischen Prozesse zur Gewinnung des Metalls die chemische Zusammensetzung tiefgreifend verändern und man nicht mehr so leicht das Erz mit dem Endprodukt vergleichen kann. Deshalb und wegen der begrenzten Analysenkapazität hat man nur Metallobjekte analysiert, klassifiziert, d. h. in Materialgruppen eingeteilt, und aus deren Verbreitung in Raum und Zeit Rückschlüsse auf die möglichen Herkunftsregionen gezogen. Bei Gold hätte man durchaus auch die Analyse von Naturgold einbeziehen können, was aber nicht geschah. Stattdessen wurde die gleiche Strategie angewandt unter der Annahme, dass die so erzielten Materialgruppen weit weniger vom Herstellungsprozess beeinflusst wurden als bei Kupfer.

Axel Hartmann hat auch einige Goldfunde aus dem Gräberfeld von Varna analysiert und herausgefunden, dass sie aus mehreren Goldsorten bestehen. Für einige Goldsorten könnte er sich durchaus eine Herkunft aus regionalen Goldvorkommen, er hat dabei vor allem an Rumänien gedacht, vorstellen. Es gibt aber auch eine Goldsorte mit messbarem Platingehalt und für diese hat er die Vermutung geäußert, dass sie aus der Kaukasusregion kommen könnte, also aus dem „Land des Goldenen Vlies“, Georgien. Wir werden sehen, dass diese Annahme heute relativiert werden muss.

Zunächst will ich aber einen kurzen Überblick über die Methoden geben, die heute für die Analyse von Gold zur Verfügung stehen. Am Anfang stand die Atomemissionspektrometrie, die um 1930 eingeführt wurde. Dies war die erste Methode, die die Analyse einer großen Anzahl von Elementen gleichzeitig in einer kleinen Probenmenge gestattete. Für Herkunftsbetrachtungen auf der Basis von Spurenelementmustern eine unabdingbare Voraussetzung. Sie war auch vergleichsweise nachweisempfindlich, zumindest gegenüber den damals verfügbaren anderen Analysemethoden. Sie wird auch heute noch in modifizierter Form für industrielle Metallanalysen eingesetzt. Für die Archäometrie hat sie aber an Bedeutung verloren.

Prinzipiell kommen auch Nuklearmethoden in Frage, wie Neutronen- oder Protonenaktivierung, die auch den Vorteil bieten, dass die Probe oder ein kleines Gesamtobjekt zerstörungsfrei analysiert werden kann. Sie stehen aber nur in wenigen Institutionen zur Verfügung und besonders die Neutronenaktivierung leidet unter dem Nachteil, dass das Matrixelement stark radioaktiv wird. Diese Radioaktivität klingt zwar mit knapp drei Tagen ab, so dass nach ein bis zwei Monaten gemessen werden kann. Bei ganzen Objekten muss man aber länger warten, bis die gesamte Radioaktivität abgeklungen ist. Besonders bei silberreichen Proben dauert das viel zu lange, um praktikabel zu sein.

Deshalb wird heute vorwiegend die Massenspektrometrie zur chemischen Analyse von Gold eingesetzt. Diese hat allerdings den Nachteil, dass die Probe in Form einer Lösung zugeführt werden muss, was bedeutet, dass einerseits eine Probe entnommen werden muss und andererseits dass die Probe auch verbraucht wird. Dafür ist sie noch deutlich nachweisempfindlicher für viele Elemente als die Atomemissionspektrometrie. Seit etwa zwanzig Jahren wird die Methode auch mit der Probeneinführung durch Laserablation gekoppelt. Dabei wird ein Laserstrahl auf die Probenoberfläche gelenkt, wo durch die hohe Energiedichte geringe Mengen des Probenmaterials verdampfen bzw. abplatzen (ablatieren). Das so flüchtig gemachte Probenmaterial kann mit einem Gasstrom in ein Massenspektrometer gelenkt und die Elementkonzentrationen und Isotopenverhältnisse gemessen werden (*Abb. 14*). Das hat den Vorteil, dass nur eine sehr kleine, mit freiem Auge kaum sichtbare Beschädigung des Objektes erfolgt. Nachteilig ist, dass das Objekt ins Labor gebracht werden muss, was oft nicht möglich ist. Ein Kompromiss zwischen beiden Anforderungen ist die Entnahme einer sehr kleinen Probe (*Abb. 15*), die anschließend mit dem Laserstrahl, der auf eine kleine Fläche von typischerweise 0,05 mm fokussiert wird, analysiert werden kann. Als weitere Alterna-

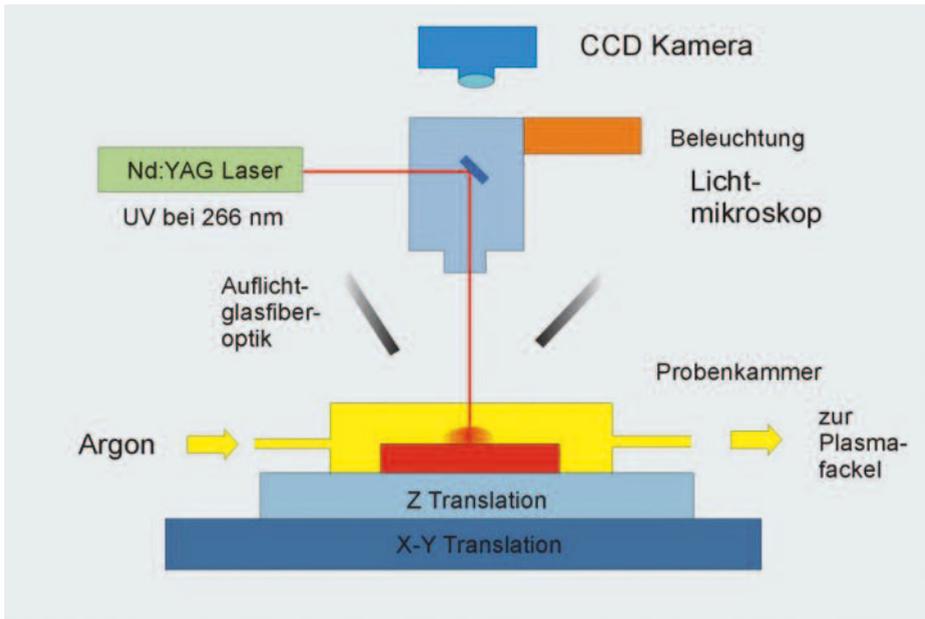


Abb. 14

Aufbau einer Messeinrichtung für Laserablation, gekoppelt mit einem Massenspektrometer mit Plasmaanregung (Zeichnung E. Pernicka).

tive verwenden wir gelegentlich den Abrieb mit einem Quarzstäbchen vom Rand eines Objektes. Damit lassen sich Proben bis 0,5 mg ebenfalls ohne sichtbare Beschädigung entnehmen. Diese müssen allerdings mit Säuren gelöst werden, so dass nicht alle Elemente, die mit Laserablation gemessen werden können, erfasst werden.

Es sei noch auf eine weitere Gruppe von Analysemethoden hingewiesen, die sich besonders bei Museumskuratoren großer Beliebtheit erfreut, nämlich die röntgenanalytischen Methoden. Als analytisches Signal wird Röntgenstrahlung verwendet, die von der Probe nach einer Anregung ausgesendet wird. Die Anregung kann auf verschiedene Weise erfolgen, durch

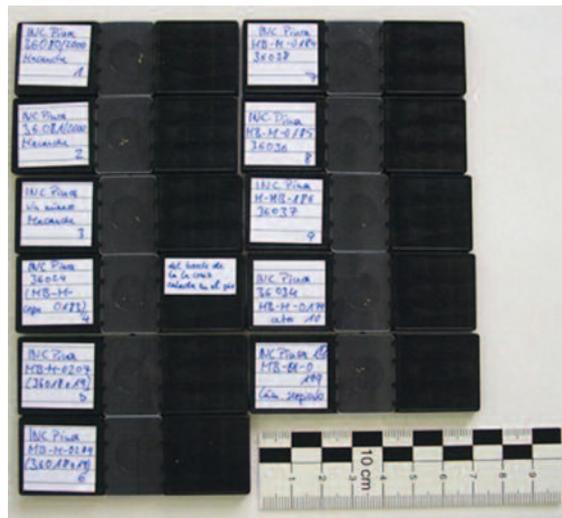


Abb. 15

Typische Probenmengen für die Analyse von Goldartefakten mittels Laserablation und Massenspektrometrie (Foto E. Pernicka).

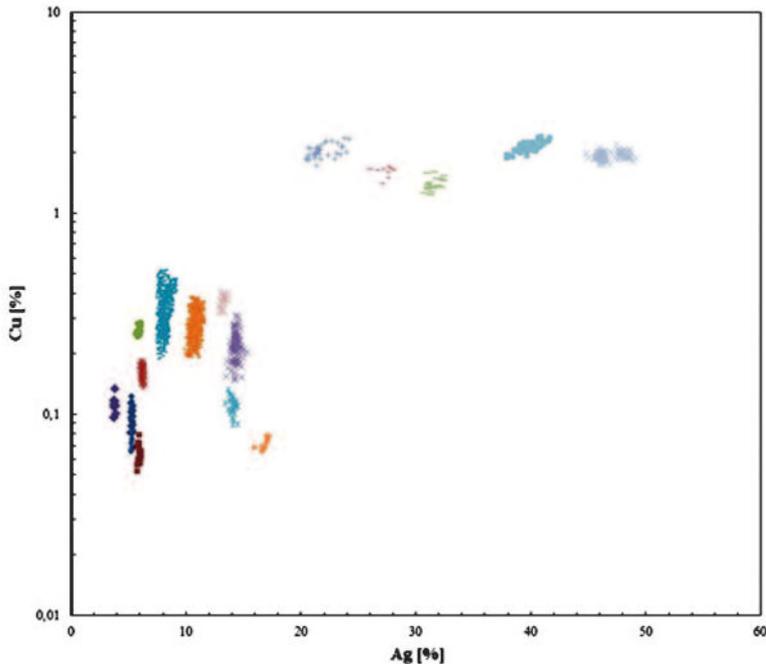


Abb. 16

Kupfer- und Silbergehalte in allen analysierten Goldobjekten aus dem chalkolithischen Gräberfeld von Varna, Bulgarien (nach LEUSCH et al. 2014).

Elektronen, Protonen oder durch Photonen, d. h. primäre Röntgenstrahlung oder Synchrotronstrahlung. Allen diesen Methoden gemeinsam ist, dass sie im Prinzip eine völlig zerstörungsfreie Analyse ermöglichen. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass sie nur die Oberfläche eines Objektes erfassen bis zu einer Tiefe von wenigen 0,01 mm. Für Kupfer und Kupferlegierungen ist sie wegen der Korrosion daher weitgehend ungeeignet, wenn man die Gesamtzusammensetzung ermitteln will. Bei Gold fällt das zwar nicht ins Gewicht, aber leider ist die Methode nicht besonders nachweisempfindlich, so dass meist nur Gold, Silber und Kupfer erfasst werden.

Dennoch ist auch eine solche Analyse der Legierungszusammensetzung nicht ganz wertlos, wie ein Beispiel aus Varna (*Abb. 16*) zeigen möge. Wir haben etwa dreitausend Goldobjekte untersucht, wovon die Mehrheit aus Perlen besteht, die mit unglaublicher Präzision offenbar in Serie hergestellt wurden, typologisch also ununterscheidbar sind. Dennoch kann man anhand der Analyse verschiedene Materialgruppen unterscheiden, die offenbar aus einem Arbeitsgang stammen. Andererseits gibt es verschiedene Formen von Perlen, die nun ebenfalls aus leicht unterschiedlich zusammengesetztem Gold bestehen und ebenfalls Serienherstellung andeuten. Zu beachten ist, dass auch in diesen Goldobjekten regelhaft Kupfergehalte auftreten, die tendenziell höher als im Naturgold sind.

Mit nur diesen beiden Elementen und wenigen anderen, wie Zinn und Platin, hatte Axel Hartmann noch versucht, auch die Herkunft des Goldes zu ermitteln. Er ging dabei davon aus, dass die Materialzusammensetzung in bestimmten Zeitabschnitten in unterschiedlichen Regionen unterscheidbar sein würde. Er analysierte gut datierte prähistorische Gold-

objekte und führte dann zunächst eine Häufigkeitsanalyse durch. Dabei stellte sich heraus, dass z. B. die Gehalte von Silber, Kupfer und Zinn in zwei etwa normalverteilte Gruppen gegliedert werden können, die er A1 und N nannte. Wenn man die Verbreitung dieser Materialgruppe betrachtet (Abb. 17), könnte man tatsächlich von einer Goldsorte sprechen, die für die Britischen Inseln und die Bretagne typisch ist, die auch kulturhistorisch zusammengehören. Da diese Materialgruppe auch in Dänemark gehäuft auftritt, denkt man natürlich an eine Transportverbindung, denn in Dänemark gibt es keine Goldvorkommen. Man könnte an den Austausch von Bernstein gegen Gold denken. Hartmanns Schlussfolgerungen sind zwar in der Archäologie kritisiert worden, aber die Daten haben Bestand, und es ist nicht zu leugnen, dass bestimmte Materialgruppen nicht regellos in Raum und Zeit verteilt sind.

Nun komme ich zu den Problemen bei der Herkunftsbestimmung von Gold, die mich zu meiner etwas pessimistischen Einleitung veranlasst haben. Das erste ist zunächst die Reinheit von Naturgold. Das bedeutet, dass für die Analyse eine sehr nachweisempfindliche Methode zur Verfügung stehen muss. Solche Methoden stehen erst seit den letzten zwei bis drei Jahrzehnten zur Verfügung. Die von A. Hartmann angewandte Methode war zu seiner Zeit die bestmögliche. Sie wird heute aber bezüglich der Anzahl der analysierbaren Elemente und dem erfassbaren Konzentrationsbereich weit übertroffen. Das ist wichtig und notwendig,

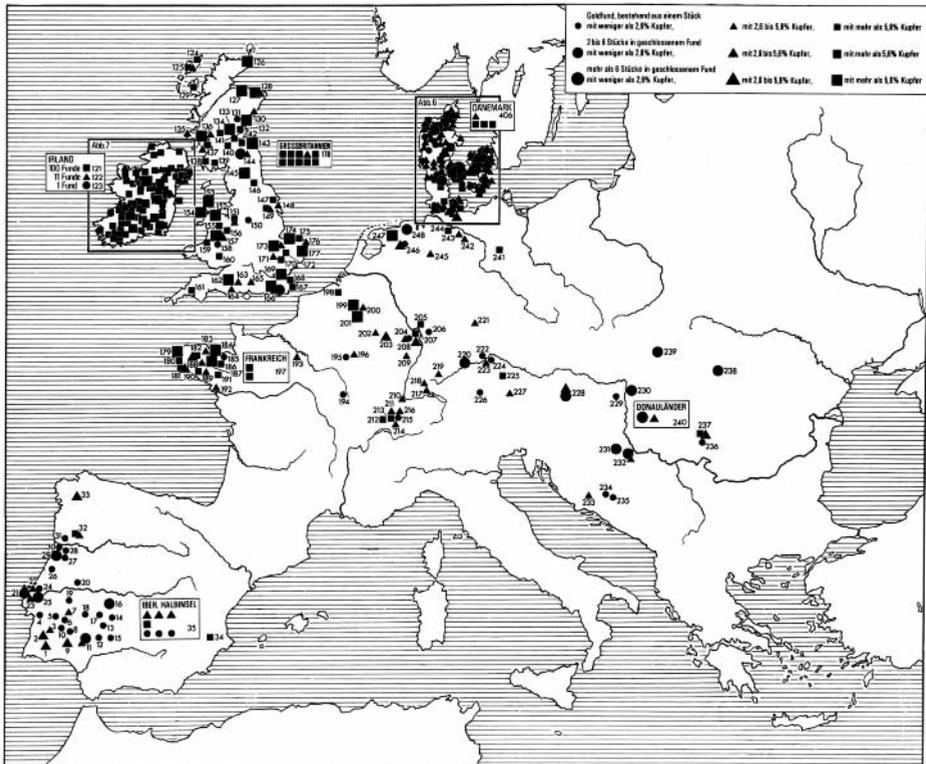


Abb. 17
Geographische Verbreitung der Goldsorte N (aus HARTMANN 1982).

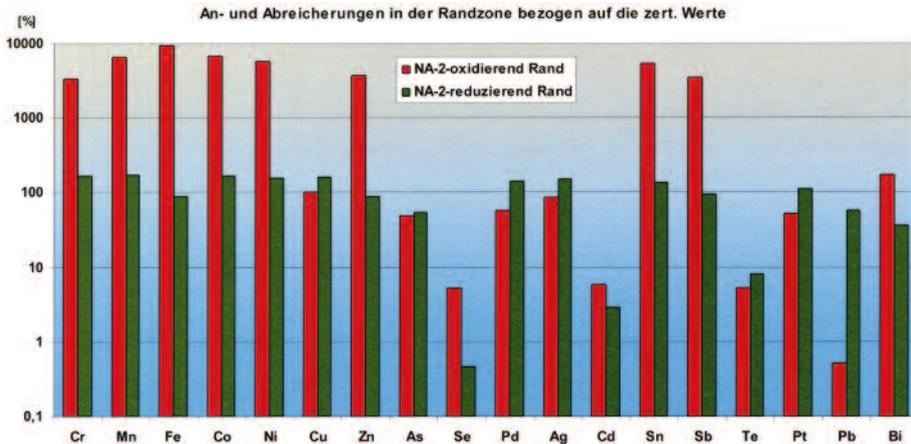


Abb. 18

Elementkonzentrationen eines Standardmaterials nach Schmelzen bei unterschiedlichen Redoxbedingungen. Die Werte sind auf die zertifizierten Konzentrationen bezogen (nach SCHMIDERER 2009).

denn ein Problem bei der Herkunftsbestimmung von Gold mit Hilfe des Spurenelementmusters ist die generell große Reinheit des Naturgoldes. Die Konzentrationen der meisten Spurenelemente liegen im Bereich von mg/kg oder niedriger. Nur Silber liegt typischerweise im Prozentbereich vor. Allerdings ist der Silbergehalt nur wenig aussagekräftig bezüglich der Herkunft des Goldes, denn einerseits liegen die Variationen innerhalb einer Lagerstätte im Bereich von mindestens einer Größenordnung, so dass ein einziges Element nicht genügend Diskriminierungspotential zwischen verschiedenen Lagerstätten hat. Darüber hinaus kann das weniger edle Silber beim Transport in Flüssen ausgelaugt werden, so dass es zu Inhomogenitäten sowohl im Mikro- als auch im Makrobereich kommt. Es gilt unter Lagerstättengeologen sogar die Faustregel, dass man umso näher an der Primärlagerstätte ist je höher der Silbergehalt im Flussgold ist, d. h. dass der Silbergehalt als Prospektionshilfe verwendet wird. Es ist deshalb schwer, aus der Analyse einzelner Flitter von Flussgold auf archäologische Objekte zu schließen, weil natürlich immer eine große Zahl solcher Flitter zusammengeschmolzen und dadurch das Gold chemisch homogenisiert wurde.

Nun besteht ein weiteres Problem darin, dass die Annahme, das Gold würde auf dem Weg von der Lagerstätte zum Endprodukt keiner chemischen Änderung unterliegen, leider nicht stimmt. Je nachdem, unter welchen Bedingungen Gold geschmolzen wird, werden die unedlen Begleitelemente oxidiert und damit entfernt (*Abb. 18*). Selbst wenn wir von der wahrscheinlicheren Annahme ausgehen, dass das Gold unter Holzkohlebedeckung und damit reduzierend geschmolzen wurde, gehen eine Reihe von Elementen verloren, besonders die flüchtigen, wie Selen, Cadmium und Tellur sowie Blei und Bismut.

Als weitere Komplikation hat sich die absichtliche oder unabsichtliche Legierung mit Kupfer herausgestellt. Naturgold hat typischerweise sehr niedrige Kupfergehalte von weniger als 0,1%. Dagegen findet man in den meisten archäologischen Goldartefakten höhere Kupfergehalte von bis zu einigen Prozent. Diese müssen nicht unbedingt als absichtliche Zugabe interpretiert werden. Es kann sich auch um Kupfererze handeln, die z. B. beim Waschen zusammen mit dem Gold angereichert wurden, weil auch sie ein höheres spezifisches Gewicht haben als die Silikate. Beim Schmelzen würde dann das Kupfer reduziert werden und kann so in das Gold gelangen. Eine andere Möglichkeit wäre die Verunreinigung beim Her-

stellungsprozess der Objekte, z. B. durch Gusstiegel, die für verschiedene Metalle verwendet werden. Aber auch absichtliche Legierung ist selbst bei sehr frühen archäologischen Objekten nicht auszuschließen. Silberhaltiges Kupfer ist blassgelb. Durch Zugabe von Kupfer kann die Farbe des Metalls wieder der warmen Goldfarbe näher gebracht werden.

Leider hilft bei Gold auch die Isotopenanalyse bisher nicht wirklich weiter. Gold hat nur ein stabiles Isotop, so dass hier aus prinzipiellen Gründen keine Isotopenverhältnisse gemessen werden können. Es bleiben die Isotopenverhältnisse des Bleis, die in den 1970er-Jahren zum Durchbruch bei der Herkunftsbestimmung von Buntmetallen geführt haben.

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 zu unterschiedlichen Diffusions- oder Reaktionsgeschwindigkeiten führen. Solche Fraktionierungseffekte sind umso größer, je größer die Massendifferenz zwischen den beteiligten Atomen oder Molekülen ist. Bei Atomen mit hoher Ordnungszahl und daher großer Masse wie Blei sind sie allerdings so klein, dass sie zumindest mit heute verfügbaren Methoden nicht messbar sind. Dennoch gibt es einige Elemente in diesem Bereich mit variabler Isotopenzusammensetzung. Ausschlaggebend dafür ist nur der radioaktive Zerfall bestimmter Nuklide mit langen Halbwertszeiten. Für die Archäometallurgie am wichtigsten ist der radioaktive Zerfall von Uran und Thorium über mehrere Zwischenprodukte zu Blei (Abb. 19). Dieses neu gebildete, radiogene Blei vermischt sich in der Natur mit dem schon vorhandenen, sodass sich die mittlere Bleiisotopenzusammensetzung der Erde ständig ändert. In einer Blei- oder Kupferlagerstätte wird aber durch natürliche Vorgänge das Blei von Uran und Thorium getrennt und in der Lagerstätte finden keine Änderungen der Bleiisotopenverhältnisse mehr statt. Es hängt nun vom geolo-

Isotopenverhältnisse des Bleis

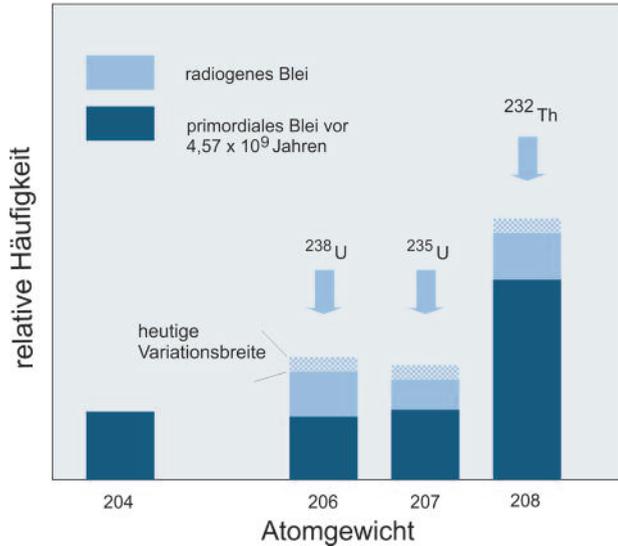


Abb. 19

Mittlere Isotopenzusammensetzung des Bleis bei Entstehung der Erde vor ca. 4,5 Milliarden Jahren und heute (nach PERNICKA 1990).

gischen Alter einer Erzlagerstätte und vom geochemischen Milieu (genauer, dem U/Pb und Th/Pb-Verhältnissen) ab, welche Bleisotopie sie aufweist. Für die Archäometrie wichtig ist, dass Erzlagerstätten dadurch unterscheidbar werden. Da chemische Reaktionen keine Änderung der Isotopenzusammensetzung bei schweren Elementen herbeiführen können, bildet sich das Bleisotopenverhältnis der Lagerstätte unverändert bis in das Endprodukt ab. Das gilt natürlich nur, wenn man davon ausgehen kann, dass Metalle unterschiedlicher Herkunft nicht vermischt wurden (Stichwort Wiederverwendung von Altmetall). Bei Blei, Kupfer und Bronze spielt dies besonders in den frühen Perioden kaum eine Rolle. Bei Gold ist diese Möglichkeit in jedem Fall bedenkenswert.

Naturgold enthält aber in der Regel sehr wenig Blei, typischerweise im mg/kg Bereich. Das ist zunächst einmal nicht einfach zu analysieren, weil von Goldobjekten wenig oder gar keine Probe entnommen werden darf. Darüber hinaus ist die Interpretation von Bleisotopenverhältnissen bei geringen Konzentrationen problematisch, weil die Kontaminationsgefahr, sei es in der Natur oder im Labor besonders groß ist und nicht immer sichergestellt werden kann, dass das Blei vom geologischen Ursprungsort des Goldes kommt. Falls Kupfer dem Gold zugefügt wurde, besteht die Möglichkeit, dass die Bleisotopenverhältnisse vom Kupfer dominiert werden, das meist höhere Konzentrationen an Blei aufweist. Insofern wird diese Methodik kaum die gleiche Rolle spielen für die Herkunftsbestimmung von Gold wie bei Blei, Silber und Kupfer bzw. Bronze. Dennoch kann sie manchmal mit Erfolg eingesetzt werden, wie das Beispiel des berühmten Halsreifes aus dem hallstattzeitlichen Grab von Vix in Frankreich (*Abb. 20*) zeigt. Die herstellungstechnische Untersuchung ergab, dass einige Teile gelötet waren. Das Lot bestand aus einer Legierung, die Blei enthielt, dessen Isotopenverhältnisse nach Südspanien verwiesen. Damit war zumindest die Herstellungsregion ermittelt, was für die archäologische Interpretation oft noch wichtiger ist als die Herkunft des Rohstoffes.



Abb. 20

Halsring von Vix (Musée du Châtillonnais, Châtillon-sur-Seine; Foto B. Armbruster).

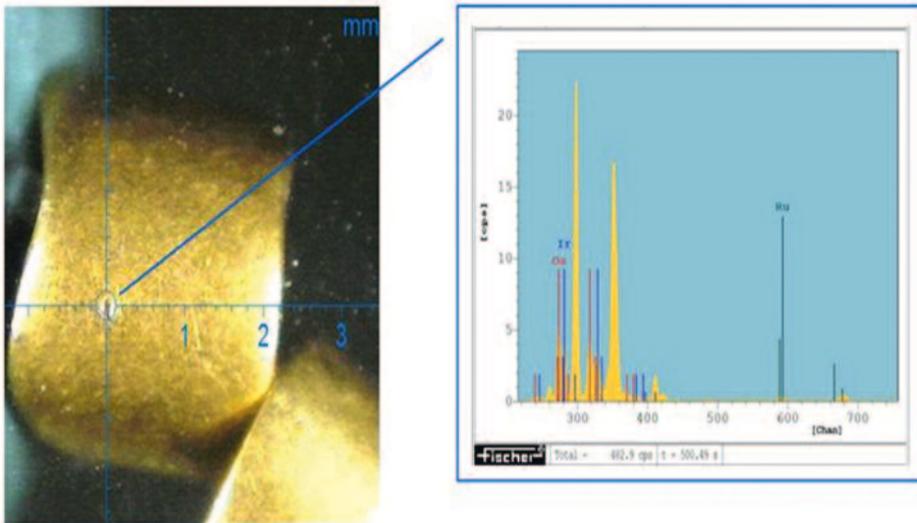


Abb. 21

Platinmetalleinschluss in einer Perle aus dem chalkolithischen Gräberfeld von Varna mit den Hauptbestandteilen Osmium und Ruthenium, wie die Röntgenfluoreszenzanalyse (rechts) zeigt. (Foto V. Leusch).

In den 1960er-Jahren wurden erstmals Einschlüsse von Platinmetallen (Ruthenium, Rhodium, Palladium, Osmium, Iridium, Platin) in lydischen Goldmünzen und in Goldobjekten aus Mesopotamien gefunden und es wurde sogleich eine Herkunftsbeziehung postuliert.

Leider ist aber die Anwesenheit solcher Einschlüsse allein nur ein sicherer Hinweis darauf, dass es sich um Flussgold handelt. Ähnliche Einschlüsse wurden mittlerweile in prähistorischem Gold aus vielen Regionen gefunden, u. a. haben wir sie auch in einigen Objekten aus Varna beobachten können (Abb. 21), sodass deren Anwesenheit keine Information über die Herkunft des Goldes liefert.

Die Platinmetalle sind noch seltener als Gold und kommen in der Natur meist zusammen und oft in metallischem Zustand vor. Sie gehören ebenfalls zu den Edelmetallen, sind also verwitterungsbeständig, und haben außerordentlich hohe Schmelzpunkte und hohe spezifische Gewichte. Sie bilden aber niemals zusammen mit Gold Lagerstätten, sodass ein gemeinsames Auftreten in archäologischen Objekten nur dadurch erklärt werden kann, dass Gold und Platinmetalle bei der Verwitterung verschiedener Gesteine in Flüsse gelangt sind, wo sie, ähnlich wie Gold, in Seifen angereichert werden. Beim Schmelzen von Gold bleiben die Platinmetallkörner wegen ihres hohen Schmelzpunktes intakt. Sie bestehen im Wesentlichen aus Osmium, Ruthenium und Iridium, die alle in Gold unlöslich sind. Nur Palladium und Platin sind in Gold löslich und können dementsprechend beim Schmelzen ins Gold gelangen. Bereits Hartmann hat messbare Platingehalte in Goldobjekten als Hinweis auf die Verwendung von Flussgold interpretiert und im Fall von Varna hat er für das platinhaltige Gold eine Herkunft aus dem Kaukasus vorgeschlagen.

Hier zeigt sich allerdings die Beschränkung des Analysenvergleichs von Artefakten alleine: Man kann nur aus der regionalen Häufung einer bestimmten Goldsorte die Existenz einer entsprechenden Lagerstätte in dieser Region vermuten. Aus der Abwesenheit einer Häufung kann man allerdings nicht eine Ausschließung ableiten. Anders als Axel Hartmann

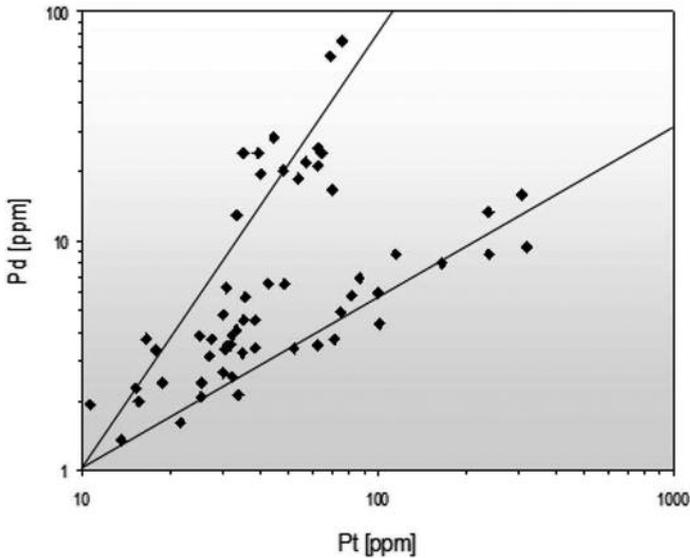


Abb. 22
Palladium- und Platinkonzentrationen in einer Auswahl der Goldfunde aus dem
chalkolithischen Gräberfeld von Varna.

haben wir in Bulgarien zusammen mit Kollegen aus dem geologischen Institut der Universität Sofia in Ostbulgarien auf Gold prospektiert und tatsächlich Naturgold gefunden, das auch zusammen mit Platinmetallen vorkommt. Es gibt daher solches Gold durchaus in der Nähe von Varna.

Ob es zwischen diesen Vorkommen und den frühen Goldobjekten von Varna tatsächlich Beziehungen gibt, muss man an Hand der Spurenelemente feststellen, die aber derzeit noch in Arbeit sind. Immerhin können wir anhand der Konzentrationen von zwei Platinmetallen, Palladium und Platin, die in Gold löslich sind, feststellen, dass wohl mehr als eine Lagerstätte genutzt wurde. Denn das Pd/Pt-Verhältnis ist nach bisheriger Erfahrung kennzeichnend für eine Lagerstätte und wir finden zwei verschiedene Verhältnisse in den Goldobjekten von Varna (Abb. 22).

Es hat nun Versuche gegeben, die Zusammensetzung nicht des Goldes sondern der Platinmetalleinschlüsse als Anzeiger für die Herkunft zu verwenden. Bereits die ersten Untersuchungen dazu haben ergeben, dass deren Zusammensetzung in weiten Bereichen schwankt und zwar in ein und demselben Objekt. Damit ist es nicht einmal möglich, Materialgruppen zu bilden, weil die Voraussetzung dafür fehlt. Die Schwankungsbreite innerhalb einer Materialgruppe muss kleiner sein als zwischen ihnen. Für die Herkunftsdiskussion sind diese Einschlüsse leider ebenfalls nicht zu verwenden.

In einem weiteren Versuch, die Platinmetalleinschlüsse für die Herkunft des Goldes zu befragen, haben wir die Isotopenverhältnisse des Osmiums gemessen. Osmium ist ein weiteres schweres Element, das eine variable Isotopenzusammensetzung hat wegen des radioaktiven Zerfalls von ^{187}Re und ^{190}Pt . Die moderne Lasertechnik ermöglicht die Analyse solcher kleiner Einschlüsse durch die so genannte Ablation, wie bereits erläutert. Leider ist das Ergebnis ähnlich wie bei der chemischen Zusammensetzung, wie es sich anhand einer Untersuchung von so genannten Regenbogenschüsselchen erwiesen hat.

Es handelt sich um keltische Goldmünzen, die in Mitteleuropa verbreitet waren und vom dritten Jahrhundert v. Chr. an geprägt wurden. Der Name entstand aufgrund der charakteristischen Schüsselform und dem Aberglauben, dass die Goldstücke von einem Regenbogen herabtropfen und am Fuße des Regenbogens auf der Erde zurückgeblieben seien. Am Beginn des dritten Jahrhundert gab es eine starke Vermehrung der Emission zusammen mit dem Auftreten von Platinmetalleinschlüssen im Gold. Es wurde daher vorgeschlagen, dass dieses Gold von der Bezahlung keltischer Söldner stammen könnte, die im Gefolge der Eroberung Alexanders nach Anatolien kamen. So heuerte der Thronfolger Bithyniens, Nikomedes I., 278 v. Chr. 20000 keltische Söldner an, um gegen seinen Bruder in Thronstreitigkeiten zu kämpfen. Das kleinasiatische Gold ist gekennzeichnet durch viele Platinmetalleinschlüsse, wie schon die frühen lydischen Goldmünzen, aber auch die Goldprägungen unter Alexander dem Großen zeigen. Andererseits enthält auch das Rheingold solche Einschlüsse und wahrscheinlich auch andere Flüsse in Mitteleuropa.

Zunächst gab es das enttäuschende Ergebnis, dass – ähnlich wie die chemische Zusammensetzung – innerhalb mehrerer Einschlüsse in ein und derselben Münze die Variationsbreite der Osmiumisotopenverhältnisse so groß ist wie zwischen mehreren Münzen (*Abb. 23*). Auch auf diese Weise ist scheinbar weder eine Klassifikation noch eine Herkunftsbestimmung anhand der Materialzusammensetzung möglich. Eine genauere Analyse der Daten zeigt aber, dass das Verteilungsmuster der Osmiumisotopenverhältnisse charakteristisch sein könnte (*Abb. 24*). Die beste Übereinstimmung des Musters der untersuchten Regenbogenschüsselchen ergab sich mit einer Goldmünze von Kyzikos, einer Stadt am Südufer des Schwarzen Meeres, die bereits ab dem 6. Jahrhundert v. Chr. Elektronmünzen prägte und wohl zum Einflussbereich Bithyniens gehörte. Damit konnte die Hypothese unterstützt werden, dass zumindest ein Teil der keltischen Regenbogenschüsselchen aus kleinasiatischem Gold bestehen, wenn auch die genaue Herkunft nicht ermittelt wurde. Dennoch ist diese Methode nicht allgemein anwendbar, weil sie voraussetzt, dass mehrere, am besten mehr als zehn, Platinmetalleinschlüsse in einem Objekt vorhanden sind, damit das Verteilungsmuster berechnet werden kann.

Es bleibt daher im Grunde nur die Analyse einer möglichst großen Anzahl von Spurenelementen und die Hoffnung, dass sich Muster ergeben, die sich in Raum und Zeit häufen, ähnlich wie es Hartmann vorgegeben hat. Durch die Analyse von modernem Flussgold werden sich im Laufe der Zeit wohl auch Hinweise auf die Herkunft ermitteln lassen.

Auf einen Nebenaspekt will ich kurz eingehen, den man als spin-off bezeichnen könnte, nämlich die Prüfung der Echtheit von archäologischen Goldobjekten. Wir haben Gold von Troia untersucht, das in geringen Mengen noch im Berliner Museum für Vor- und Frühgeschichte vorhanden ist. Dabei stellte sich heraus, dass dieses Gold ein einheitliches Pd/Pt-Verhältnis hat und die Gehalte beider Elemente in weiten Bereichen streuen, fast bis zu 0,08 % Platin. Im Schmuckmuseum Pforzheim gibt es ein Ohrgehänge, das aus dem Antikenhandel stammt und ebenfalls aus Troia stammen soll. Die Analyse zeigte, dass das Pd/Pt-Verhältnis ähnlich ist und ebenfalls verbunden mit hohen Platingehalten. Da modernes Gold kaum Platin enthält, weil es wegen seines hohen Wertes immer technisch abgetrennt wird, ist allein der hohe Platingehalt ein Anzeichen für Echtheit. Dass zusätzlich auch das Pd/Pt-Verhältnis zu dem sicher echten Troia-Gold passt, deutet darauf hin, dass das Ohrgehänge tatsächlich zu diesen bedeutenden Funden gehört.

Zum Abschluss möchte ich noch ein Beispiel erläutern, bei dem eine Herkunftsbeziehung von archäologischem Gold mit einer bestimmten Lagerstättenregion zumindest sehr wahrscheinlich gemacht werden konnte. Es handelt sich um die Goldauflagen auf der Himmelscheibe von Nebra (*Abb. 25*). Sie liefert die älteste astronomisch korrekte Darstellung des Nachthimmels, datiert etwa 1600 vor Christus. Sie hat einen Durchmesser von ungefähr 32 cm und wiegt etwa 2,5 kg. Eine wichtige Frage neben der Echtheit der Scheibe, die mit ihrer konkreten Bildarstellung einzigartig ist in der frühen Bronzezeit Mitteleuropas, war die Her-

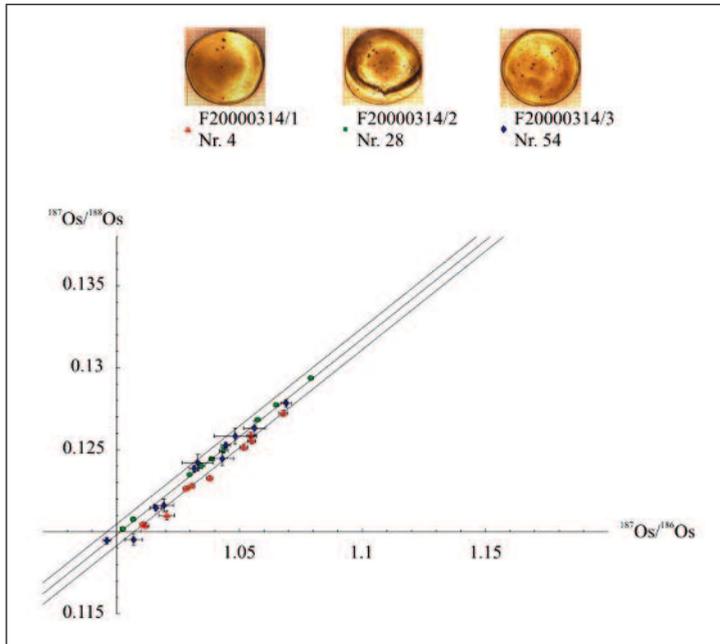


Abb. 23

Osmiumisotopenverhältnisse in drei keltischen Goldmünzen (Regenbogenschüsselchen) (Foto S. Junk).

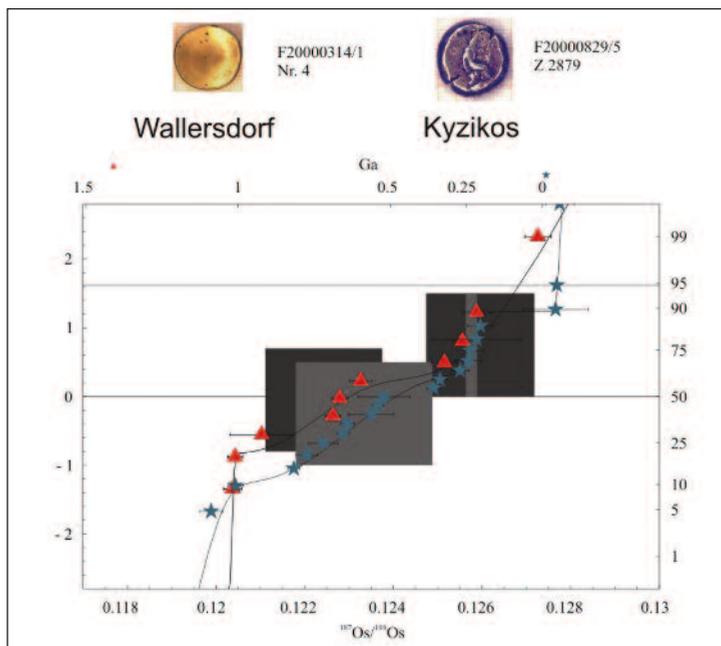


Abb. 24

Vergleich der Streuung von Osmiumisotopenverhältnissen in einer keltischen Goldmünze von Wallersdorf in Bayern und und einer zeitgleichen Münze aus Kyzikos in Nordwestanatolien (nach JUNK/PERNICKA 2003).



Abb. 25

Die Himmelsscheibe von Nebra, die älteste astronomisch korrekte Darstellung des Nachthimmels (Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt, Juraj Lipták).

kunft des gesamten Objektes und auch der Rohmaterialien. Mit einer Kombination von Spurenelementmustern und Bleiisotopenverhältnissen haben wir die Herkunft des Kupfers identifiziert. Es kommt aus den Ostalpen, wahrscheinlich aus dem Salzburger Land, aus dem prähistorischen Bergbau vom Mitterberg bei Bischofshofen.

Mittlerweile haben wir auch die Herkunft des Zinns mit Hilfe der Zinnisotopenverhältnisse identifizieren können. Anders als die meisten Archäologen vermutet haben, stammt es nicht aus dem Erzgebirge, wo große Zinnlagerstätten existieren, sondern aus Cornwall, der größten Zinnlagerstätte in Europa.

Aber das Gold hat sich bislang einer Herkunftsbestimmung entzogen. Zunächst haben wir röntgenanalytische Verfahren eingesetzt, wie die Rasterelektronenmikroskopie (Abb. 26) und die protoneninduzierte Röntgenfluoreszenzanalyse. Diese hat zumindest gezeigt, dass nicht alle Goldauflagen auf der Scheibe identisch zusammengesetzt sind. So hat das als Boot interpretierte bogenförmige Objekt am unteren Rand eine andere Zusammensetzung als die restlichen Objekte. Diese bestehen aus einer Goldsorte, die der von Hartmann A3 genannten entspricht, also mit etwa 23 % Silber, 0,3 % Kupfer und mit häufigem Auftreten von Zinn. Wegen einer spektralen Überlagerung von Silber und Zinn war die Analyse von Zinn zunächst nicht zerstörungsfrei möglich. Deshalb wurde das Gold auf der Scheibe zusätzlich im Berliner Elektronensynchrotron (BESSY) mit Hilfe der Synchrotron-Röntgenfluoreszenzanalyse untersucht und es stellte sich heraus, dass es noch zwei weitere Goldsorten auf der Scheibe gibt. Der Horizontbogen und ein versetzter Stern enthalten etwas mehr Zinn als die anderen Objekte. Die Interpretation liegt nahe, dass diese drei verschiedenen Goldsorten zu verschiedenen Zeiten aufgebracht wurden.

Wenn wir nun die Zusammensetzung des Goldes der ersten Phase (nur Sonne, Mond und Sterne) betrachten, so finden wir, dass dieses A3 Gold sein Hauptverbreitungsgebiet in Südosteuropa, genauer in Siebenbürgen, hat. Deshalb haben wir zunächst vermutet, dass das Gold auf der Himmelsscheibe von Nebra wohl von dort stammt, denn Siebenbürgen weist mit dem so genannten Goldenen Viereck einen der größten Goldlagerstättendistrikte in Europa auf. Im Laufe der Forschungen zum kulturhistorischen und naturräumlichen Umfeld der Himmelsscheibe von Nebra haben wir eine große Zahl von Goldvorkommen in Europa mit Laserablations-Massenspektrometrie untersuchen können, insgesamt mehr als 2000 Analysen, und so eine wesentlich bessere Grundlage für die Herkunftsdiskussion des Goldes geschaffen, als es die Analysen von Hartmann sind, die sich aber durchaus als nützlich erwiesen haben. In England haben wir uns besonders auf Cornwall konzentriert, weil Cornwall zwar besonders für Zinn bekannt ist, aber eine beträchtliche Menge Gold führt. Da das Sonnenblech der Himmelsscheibe von Nebra bei der illegalen Fundbergung teilweise abgerissen wurde, stand ein kleiner Teil der Sonnenscheibe für die Analyse mit derselben Methode zur Verfügung. Ein Vergleich mit allen bisher analysierten Naturgoldproben ergab die beste Übereinstimmung mit dem Gold von Cornwall (Abb. 27), und zwar besonders mit dem alluvialen Gold des Flusses Carnon (EHSEER et al. 2011). Von den acht zum Vergleich herangezogenen Elementen passen Kupfer und Platin nicht ideal zwischen den Streubereich der Naturgoldproben. Das Kupferproblem wurde bereits angesprochen, und platinhaltige Mikronuggets sind wesentlich seltener als die von Gold. Da Gold in Platin löslich ist, würde beim Schmelzen eine größere Anzahl von gold- mit wenigen platinhaltigen Nuggets homogenisiert und der Durchschnittsgehalt an Platin steigt gegenüber den „normalen“ Goldnuggets an. Es handelt sich also um ein Problem der Repräsentativität, das prinzipiell zu lösen wäre, wenn man



Abb. 26

Die Himmelsscheibe von Nebra in einem speziellen Rasterelektronenmikroskop mit außergewöhnlich großer Probenkammer (Foto C.H. Wunderlich).

selbst viele Nuggets vor der Analyse zusammenschmelzen würde. So viel Gold zu waschen ist aber sehr zeitaufwändig. Dennoch sind wir dem Ziel einer Herkunftsbestimmung doch sehr nahe gekommen, und es gibt uns Zuversicht im Hinblick auf die Herkunftsbestimmung des Goldes von Varna.

Zum Abschluss sei noch eine Methode erwähnt, die zwar nicht zur Herkunftsbestimmung dient aber zur Datierung von Gold. Sie beruht darauf, dass Gold im festen Zustand die außergewöhnliche Eigenschaft besitzt, das Edelgas Helium speichern zu können. Beim Erhitzen bzw. Schmelzen wird das Helium verflüchtigt. Nun enthält Gold zwar wenig aber messbare Konzentrationen der radioaktiven Elemente Uran und Thorium, die beim Zerfall Alphastrahlung emittieren, die zu Helium wird. Es ist leicht einsehbar, dass die Heliummenge umso mehr zunimmt, je länger der Zeitpunkt der letzten Schmelze zurückliegt. Wenn man die Uran- und Thoriumkonzentrationen bestimmen kann, lässt sich sogar ein Alter berechnen, wenn auch mit sehr großer Unsicherheit (EUGSTER et al. 2009). Immerhin ist die Methode prinzipiell für eine Datierung geeignet und für eine Echtheitsanalyse von besonderem Wert.

Zusammenfassend bleibt: Die Herkunftsbestimmung von Gold ist immer noch schwierig, aber ich denke, dass wir in die richtige Richtung gehen. Wir haben Fortschritte bei der Definition der Elemente gemacht, die für die Klassifikation besonders nützlich sind und wir sind auf dem Weg, die wichtigsten Goldvorkommen in Europa wenigstens im Ansatz zu charakterisieren. Wenn aber der Gesichtskreis wesentlich erweitert wird über die Alte Welt hinaus, wie es vor kurzem beim Hortfund von Gessel geschah, der angeblich aus Mittelasien stammen soll, wird eine Herkunftsaussage ohne solide Datenbasis reine Spekulation. Für die Datierung von Gold stehen noch viele Experimente aus. Das Hauptproblem dabei ist der hohe Preis von Gold.

Wir haben noch nicht das Problem der tendenziell höheren Kupfergehalte in den archäologischen Artefakten gegenüber den Naturgoldvorkommen gelöst, aber bei Gehalten von mehr als 5 % ist es wahrscheinlich, dass Kupfer zugegeben wurde. In solchen Fällen können wir die Methodik verwenden, die sich zur Herkunftsbestimmung von Kupfer bereits bewährt hat. Die Möglichkeit und Grenzen der Analyse von Platinmetalleinschlüssen sind möglicherweise noch nicht erreicht. Hier gibt es noch Forschungsbedarf. Die Analysetechnik der Laserablation gekoppelt mit ICP-MS wird ebenfalls weiter entwickelt werden, so dass auch Museumskuratoren Serienanalysen offen gegenüber stehen können.

Literaturauswahl

- BACHMANN, Hans-Gert 2006: *Mythos Gold. 6000 Jahre Kulturgeschichte*. München 2006.
- EHSE, Anja/BORG, Gregor/PERNICKA, Ernst 2011: Provenance of the gold of the Early Bronze Age Nebra Sky Disk, central Germany: geochemical characterization of natural gold from Cornwall. *European Journal of Mineralogy* 23(6), 2011, 895–910.
- EUGSTER, Otto/KRAMERS, J./KRÄHENBÜHL, U. 2009: Detecting forgeries among ancient gold objects using the U,Th-4He method. *Archaeometry* 51, 672–681.
- EUGSTER, Otto/PERNICKA, Ernst/BRAUNS, Michael/SHOKOLYUKOV, Alex/OLIVE, Valerie/ROELLIN, Stefan 2009: Helium, uranium and thorium analyses of ancient and modern gold objects: estimates of their time of manufacturing. In: M. F. Guerra and T. Rehren (eds.), *Authentication and Analysis of Goldwork*. *Archaeosciences* 33, 2009, 59–65.
- GRÖGLER, Norbert/GEISS, Johannes/GRÜNENFELDER, Michael/HOUTERMANS, Friedrich G. 1966: Isotopenuntersuchungen zur Bestimmung der Herkunft römischer Bleirohre und Bleibarren. *Zeitschr. f. Naturforsch.* 21a, 1966, 1167–1172.
- HARTMANN, Axel 1978: Ergebnisse der spektralanalytischen Untersuchung äneolithischer Goldfunde aus Bulgarien. *Studia Praehistorica* 1–2, 1978, 27–45.

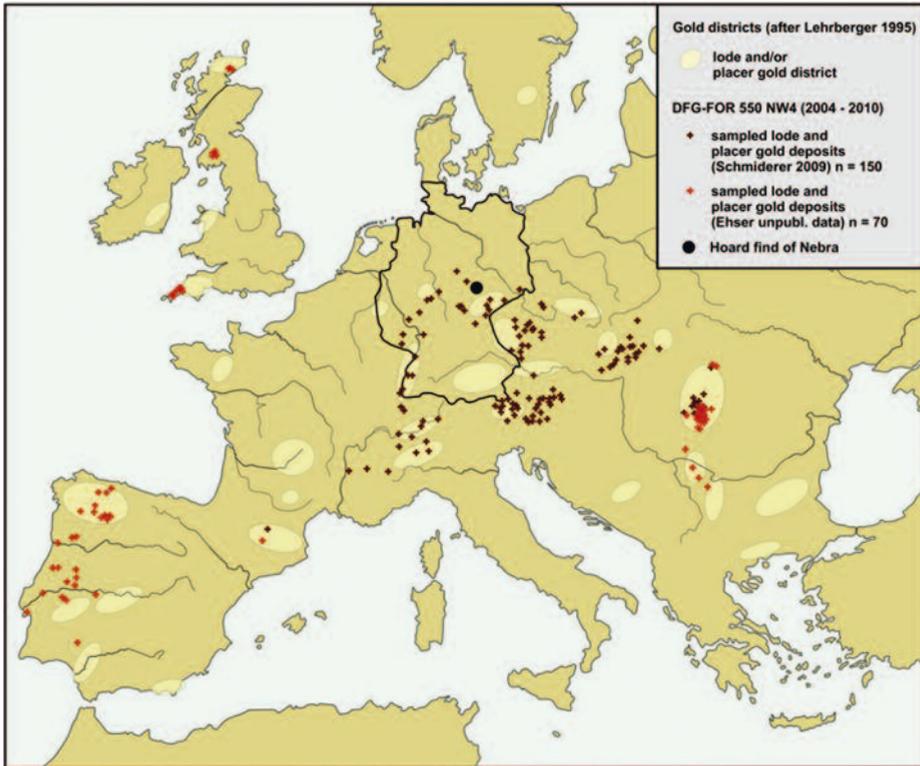


Abb. 27

Regionen mit Goldvorkommen und Probenlokalitäten für Vergleichsanalysen (Zeichnung G. Borg).

- HARTMANN, Axel 1970: Prähistorische Goldfunde aus Europa. Studien zu den Anfängen der Metallurgie (SAM), Band 3. Berlin 1970.
- HARTMANN, Axel 1982: Prähistorische Goldfunde aus Europa II. Studien zu den Anfängen der Metallurgie (SAM), Band 5. Berlin 1982.
- HAUSTEIN, Mike/GILLIS, Carol/PERNICKA, Ernst 2010: Tin isotopy – a new method for solving old questions. *Archaeometry* 52, 2010, 816–832.
- IVANOV, Ivan 1978: Die Schätze der Warnaer chalkolithischen Nekropole. Sofia 1978.
- JUNK, Stephan A./PERNICKA, Ernst 2003: 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.
- KLEMM, Rosemarie/KLEMM, Dietrich D. 2013: Gold and Gold Mining in Ancient Egypt and Nubia. *Geoarchaeology of the Ancient Gold Mining Sites in the Egyptian and Sudanese Eastern Deserts*. Springer 2013.
- LEUSCH, Verena/PERNICKA, Ernst/ARMBRUSTER, Barbara 2014: Chalcolithic gold from Varna – Provenance, circulation, processing, and function. In: Meller, H., Risch, R., Pernicka, E. (eds.): *Metalle der Macht – Frühes Gold und Silber/Metals of power – Early gold and silver*. 6. Mitteldeutscher Archäologentag vom 17. bis 19. Oktober 2013 in Halle (Saale)/6th Archaeological Conference of Central Germany, October 17–19, 2013 in Halle (Saale), Tagungen des Landesmuseums für Vorgeschichte Halle (Saale) Band 11, 2014, 165–182.

- MELLER, Harald/BERTEMES, François (Hrsg.) 2010: Der Griff nach den Sternen. Intern. Symposium Halle (Saale) 16.–21. Februar 2005. Tagungen des Landesmuseums für Vorgeschichte 05.
- MELLER, Harald/AVETISYAN, Pavel (Hrsg.) 2011: Archäologie in Armenien. Veröffentlichungen des Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt – Landesmuseum für Vorgeschichte, Band 64, 2011.
- PERNICKA, Ernst 1986: Archäometrie: 200 Jahre Anwendung analytischer Methoden in der Archäometrie. Kultur & Technik 3, 1986, 180–191.
- PERNICKA, Ernst 1990: Gewinnung und Verbreitung der Metalle in prähistorischer Zeit. Jahrb. RGZM 37, 1990, 21–129.
- SCHMIDERER, Alexander 2009: A. Schmiderer, Geochemische Charakterisierung von Goldvorkommen in Europa. Dissertation, Martin-Luther Univ. Halle-Wittenberg (Halle [Saale]).
- SCHLOSSER, Sandra/KOVACS, R./PERNICKA, Ernst/GÜNTHER, Detlef/TELLENBACH, Michael 2009: Fingerprints in gold. In: Markus Reindel and Günther Wagner (eds.), *New Technologies for Archaeology: Multidisciplinary Investigations in Palpa and Nasca, Peru*. Heidelberg, 2009, 409–436.
- STÖLLNER, Thomas/GAMBASCHIDZE, Irina/HAUPTMANN, Andreas/MINDIAŠVILI, G./GOGOČURI, G. & STEFFENS, Georg, Goldbergbau in Südostgeorgien – Neue Forschungen zum frühbronzezeitlichen Bergbau in Georgien. In: S. Hansen, A. Hauptmann, I. Motzenbäcker & E. Pernicka (Hrsg.), *Von Mai kop bis Trialeti. Akten des Symposiums Berlin 1.–3. Juni 2006. Kolloquien zur Vor- und Frühgeschichte* 13, Bonn 2010, 103–138.
- WOLF, Danilo/BORG, G./PERNICKA, Ernst/MELIKSETIAN, Khachatur/KUNZE, R./BOBOKHYAN, Arsen 2011: Geoarchäologische Untersuchungen der Goldvorkommen von Sotk und Fioletovo, Armenien. In: Harald Meller und Pavel Avetisyan (Hrsg.): *Archäologie in Armenien. Veröffentlichungen des Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt – Landesmuseum für Vorgeschichte*, Band 64, 51–68.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Ernst Pernicka
 Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie gGmbH
 an der Universität Heidelberg
 D5, Museum Weltkulturen,
 68159 Mannheim

Institut für Geowissenschaften
 Universität Heidelberg
 Im Neuenheimer Feld 234–236
 69120 Heidelberg