

## Die Ausbreitung der Zinnbronze im 3. Jahrtausend

ERNST PERNICKA, HEIDELBERG

Die Verwendung des Kupfers läßt sich bis in das akeramische Neolithikum nachweisen, vermutlich ebenso die des Bleis. Die Gewinnung des Silbers, ein technologisch anspruchsvoller Prozeß, beginnt im 4. Jahrtausend (Pernicka 1990). Dennoch spricht man im allgemeinen von den Metallzeiten erst ab der Bronzezeit, deren Anfänge im östlichen Mittelmeerraum und in Vorderasien liegen und etwa um 3000 v. Chr. datiert werden. Wenn man über den beschreibenden Charakter dieses Begriffes, wie er ursprünglich eingeführt wurde, hinausgeht, stößt man unweigerlich auf immer wieder dieselben Fragen, die uns auch heute noch beschäftigen.

- Warum Zinnbronze?
- Wo wurde Zinnbronze erstmals hergestellt und wie breitete sich die Technologie aus? Gab es mehrere Entstehungszentren?
- War die Verwendung von Zinnbronze Ursache oder Produkt gesellschaftlicher Veränderungen?
- Woher stammt das Zinn?

Trotz intensiver Forschungsbemühungen seit dem letzten Jahrhundert sind alle diese Fragen noch immer in weiten Teilen ungeklärt. Im folgenden soll zumindest der gegenwärtige Stand der Diskussion zusammengefaßt werden.

### *Eigenschaften von Zinnbronze*

Als Erklärung für den Umschwung von Stein zu Bronze als wichtigsten Rohstoff für Waffen und Geräte werden meist technologische Argumente angeführt: Zinnbronze ist leichter zu verarbeiten, vor allem zu gießen, als Kupfer. Die Legierung hat einen niedrigeren Schmelzpunkt als reines Kupfer und sie neigt beim Guß weniger zur Blasenbildung. Denn Kupfer hat die für den Gießer unangenehme Eigenschaft, im geschmolzenen Zustand Sauerstoff aufzunehmen und beim Erkalten wieder abzugeben. Außerdem wird durch den verbleibenden Sauerstoffgehalt im Kupfer dessen Verformbarkeit beeinträchtigt. Es ist deshalb nützlich, dem geschmolzenen Kupfer sogenannte Antioxidantien beizugeben, die den Sauerstoff binden können. Zinn ist ein solches Material. Der Zinnzusatz härtet aber auch das Metall, sowohl im gegossenen Zustand als auch nach der Bearbeitung. Durch Kaltdeformation kann sogar die Härte von weichem (nicht abgeschrecktem) Stahl erreicht werden. Diese Eigenschaft könnte zur Herstellung von wesentlich verbesserten Werkzeugen und Waffen geführt haben. Weniger häufig werden ästhetische Gründe für die Einführung von Zinnbronze genannt, nämlich die als angenehm empfundene goldbraune Farbe der Legierung. Es gibt demnach viele gute Gründe, um Kupfer zu legieren. Das Problem ist jedoch, daß Kupfer und Zinn in der Natur nur selten zusammen in größeren Mengen auftreten. Zur Herstellung von Zinnbronze mußten deshalb in der Regel zwei Metalle, wohl meist aus verschiedenen Regionen, beschafft werden. Diese Situation vergrößerte die Abhängigkeit vom Fernhandel und erforderte sicher einen gewissen Grad der gesellschaftlichen Organisation.

Dennoch ist Zinnbronze ein so viel besserer Werkstoff als unlegiertes Kupfer, daß der Umschwung – sobald die Legierung einmal entdeckt war – eigentlich als selbstverständlich erscheint. Schwieriger ist es zu erklären, warum die Zinnbronze eine andere Kupferlegierung verdrängte, nämlich das Arsenkupfer<sup>1</sup>, das

<sup>1</sup> Im deutschen metallurgischen Sprachgebrauch wird zwar jede Legierung mit Kupfer als Hauptbestandteil, außer die mit Zink, „Bronze“ genannt, aber in der Archäologie wird mit Bronze praktisch ausschließlich die Legierung von Kupfer und Zinn gemeint. Um Mißverständnisse zu vermeiden, wird hier die archäologische Konvention verwendet.

zwar nicht identische, aber sehr ähnliche Eigenschaften aufweist wie Zinnbronze (Maréchal 1958; Charles 1967; Selimchanow 1974; Northover 1989; Budd/Ottaway 1991; Lechtman 1996). Die Verwendung von Arsenkupfer beginnt rund tausend Jahre vor der Zinnbronze am Beginn des 4. Jahrtausends nahezu zeitgleich in einem sehr großen Gebiet, das vom Iran (Susa: Tallon 1987) über den Kaukasus und rund um das Schwarze Meer (die zirkumpontische metallurgische Provinz nach Chernykh) bis nach Mitteleuropa (Sangmeister 1971; Schubert 1981; Obereder u.a. 1993) reicht.

Gelegentlich wird auch, wie etwa in der Levante (Shalev/Northover 1993; Tadmor u.a. 1995) und in Bosnien (Govedarica u.a. 1995), die Verwendung von Antimonkupfer beobachtet, das ähnliche Eigenschaften wie Arsenkupfer aufweist. Es ist unklar, ob alle diese Erscheinungen einen gemeinsamen kulturhistorischen Ursprung haben, aber mineralogisch sind sie leicht zu erklären: Viele Kupferlagerstätten enthalten Arsen und (seltener) Antimon als Begleitelemente, die bei der Verhüttung zumindest teilweise ins Kupfer gelangen. Es ist deshalb auch unklar, ob es sich bei Arsen- und Antimonkupfer um absichtliche Legierungen handelt oder um reine Zufallsprodukte, die durch die Erzbasis vorgegeben waren. In einigen Fällen scheint Arsenkupfer gezielt für bestimmte Formen, wie z.B. Dolchklingen, verwendet worden zu sein, während etwa die Niete oft aus unlegiertem Kupfer bestanden. Solche Befunde sprechen dafür, daß die unterschiedlichen Materialeigenschaften durchaus bekannt waren, wenn sie auch nicht durchgängig und konsequent ausgenutzt wurden. Reines Arsen (sog. Scherbenkobalt) oder Arsenverbindungen (Realgar und Auripigment) kommen zwar in der Natur vor, sind aber recht selten. Deshalb ist die absichtliche Herstellung von Arsenkupfer aus zwei verschiedenen Materialien unwahrscheinlich. Eher ist an eine mehr oder weniger gezielte Auswahl von arsenhaltigen Kupfererzen zu denken.

Wenn also mit Arsenkupfer ein wesentlich härteres Metall als unlegiertes Kupfer zur Verfügung stand, das außerdem relativ leicht zugänglich war, dann ist es nicht unmittelbar einsichtig, daß sich die Zinnbronze als Standardlegierung durchsetzte. Als Erklärung dafür wird meist die Giftigkeit der Arsenverbindungen zusammen mit ihrer Flüchtigkeit herangezogen (Charles 1967). Es ist zwar richtig, daß Arsenkupfer beim Erhitzen Arsen in Form von flüchtigem und giftigem  $As_2O_3$  verlieren kann (McKerrell/Tylecote 1972), aber das scheint nur bei sehr hohen Arsengehalten von mehr als 7% wirklich signifikant zu sein (Lechtman 1996). Die meisten prähistorischen Kupferlegierungen enthalten aber weniger Arsen. Außerdem hätte sich bei hoher Giftigkeit die Herstellung und der Gebrauch von Arsenkupfer kaum über rund tausend Jahre gehalten. Wenig wahrscheinlich dürfte auch eine Erschöpfung von arsenhaltigen Kupfervorkommen sein (Charles 1980; Schubert 1981). Manche Erzregionen, wie etwa der südliche Kaukasus oder Südspanien, sind bis heute durch einen hohen Arsenanteil gekennzeichnet. Der Schlüssel dürfte in dem scheinbaren Vorteil von Arsen liegen, daß es mit Kupfererzen vergesellschaftet ist. Eine Erzauswahl dürfte in gewissem Umfang zwar möglich gewesen sein, aber es war nicht vorherzusehen, welche Zusammensetzung das Metall haben würde. Außerdem ist es wegen der Flüchtigkeit des Arsens offenbar doch schwierig, Kupfer mit mehr als etwa 5% Arsen herzustellen<sup>2</sup>, so daß die erreichbare Härte der Legierung unter der einer üblichen Zinnbronze mit 10% Zinn liegt. Mit Zinn konnte man dagegen die gewünschte Legierung ganz gezielt mit vorhersehbaren Eigenschaften des Endproduktes herstellen. Schließlich sollte nicht außer acht gelassen werden, daß hohe Arsengehalte das Kupfer weiß färben, während Zinnzusatz zu der bekannten goldähnlichen Farbe führt. In einer breit angelegten Studie zur frühen Metallurgie in Mesopotamien<sup>3</sup> hat sich z.B. herausgestellt, daß keineswegs Gebrauchsgegenstände und Waffen aus Zinnbronze hergestellt wurden, wie man aufgrund der Materialeigenschaften erwarten würde, sondern vorwiegend Gefäße und Prunkobjekte. Daraus läßt sich erschließen, daß es keineswegs Härte und Zähigkeit waren, die die Zinnbronze begehrt machten, sondern wahrscheinlich die Farbe und vielleicht der intrinsische Wert eines Materials, das nicht leicht zugänglich war. Es ist daher wohl kein Zufall, daß die

<sup>2</sup> Zumindest enthalten mehr als 99,3% der analysierten prähistorischen Metallfunde in der Stuttgarter Datenbank weniger als 5% Arsen und 97,1% sogar weniger als 3%. Besonders arsenreiche Kupferobjekte treten zudem vorwiegend in Vorderasien auf.

<sup>3</sup> Es handelt sich um ein von der Volkswagen-Stiftung gefördertes Projekt, dessen Ergebnisse demnächst vorgelegt werden (Hauptmann/Pernicka 1998).

frühesten Artefakte aus Zinnbronze in Mesopotamien, aber auch in Anatolien und Ägypten keine Gebrauchs-, sondern Prunkgegenstände sind<sup>4</sup>.

#### *Geologische Vorkommen von Zinn*

Es gibt vergleichsweise wenig Zinnminerale und nur zwei (Zinnstein,  $\text{SnO}_2$ , und Zinnkies,  $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ ) sind weltweit verbreitet, von denen wiederum nur Zinnstein wirtschaftlich wichtig ist. Reiner Zinnstein ist weiß. Er enthält aber fast immer etwas Eisen, so daß er meist braun oder schwarz gefärbt und damit recht unauffällig ist. Zinnkies ist meist grau und verwittert wie andere kupferhaltige Minerale grün. Obwohl die geochemische Häufigkeit von Zinn (die mittlere Konzentration in der Erdkruste) nahezu tausend Mal so hoch ist wie die von Gold, gibt es nur relativ wenige Zinnlagerstätten (Taylor 1979). Sie sind alle an granitische Magmen gebunden, aber nicht jeder Granit ist zinnführend. Die wichtigsten Produktionsgebiete liegen heute in Südostasien (Malaysia, Indonesien, Thailand) mit mehr als der Hälfte, West- und Zentralafrika (Nigeria, Zaire) und in Südamerika (Bolivien) mit jeweils ca. 15% der Weltjahresproduktion<sup>5</sup>. Lange Zeit war Cornwall führend in der Zinnerzeugung. Man schätzt die Gesamtproduktion auf etwa zwei Millionen Tonnen Zinn (Ahlfeld 1958). Ende des 19. Jahrhunderts nahm die Produktion stark ab und heute ist sie fast zum Erliegen gekommen. Zweitwichtigste Zinnregion in Europa war das sächsisch-böhmische Erzgebirge mit etwa einem Zehntel der Gesamtproduktion Cornwalls. Weniger bedeutend waren die Zinnvorkommen in der Bretagne, dem französischen Zentralmassiv und im Nordwesten der Iberischen Halbinsel. Im östlichen Mittelmeerraum und in Vorderasien, einschließlich des Kaukasus, sind keine Zinnlagerstätten im eigentlichen Sinn bekannt<sup>6</sup>. Ob kleinere Vorkommen, die aus heutiger Sicht nur von mineralogischem Interesse sind, in der frühen Bronzezeit ausgebeutet worden sein können, muß in jedem Einzelfall entschieden werden. Es kommt vor, daß in der Archäologie Berichte über das Auftreten von Zinnmineralen stark überschätzt werden. Als Beispiel mag die Veröffentlichung über die Entdeckung von Zinnkies in der Nähe von Bursa in Nordwestanatolien dienen (Çagatay u.a. 1981). Nur wenig später wurde dieses Vorkommen mit den Zinnbronzen von Troia in Verbindung gebracht (Kaptan 1983). In Wahrheit handelt es sich aber um ein silberreiches Blei-Zink-Vorkommen, das akzessorisch Zinnkies enthält. Das Erz wurde vermutlich zur Blei- und Silbergewinnung verwendet, während der Zinngehalt sehr wahrscheinlich unbemerkt blieb (Pernicka u.a. 1984).

#### *Herstellung von Zinnbronze*

Es gibt grundsätzlich drei Wege, Zinnbronze herzustellen, nämlich die Verhüttung von zinnhaltigen Kupfererzen, das Einbringen von Zinnstein in geschmolzenes Kupfer (Zementation) und das Zusammenschmelzen von metallischem Kupfer und Zinn. Die erste Methode kann für die routinemäßige Herstellung ausgeschlossen werden, weil damit eine Kontrolle der Legierungszusammensetzung nicht möglich ist. Das widerspricht aber dem Befund, daß offenbar seit Beginn der Bronzezeit ein Zinngehalt von etwa 10 bis 15% angestrebt

<sup>4</sup> Ähnliches gilt übrigens auch für Mitteleuropa, wo in den frühesten Phasen der Bronzezeit vorwiegend Schmuckstücke, wie Ringe, Ohrgehänge, Kugelkopfnadeln, Drahtspiralen und dergleichen, aus Zinnbronze bestehen, wie an dem Gräberfeld von Jelšovce gezeigt werden konnte (Bátora/Pernicka 1998). Selbst Waffen aus Zinnbronzen, wie z.B. die ältesten Dolche von Singen (Krause 1988), werden eher als Statussymbole und Prestigeobjekte interpretiert.

<sup>5</sup> Erst vor wenigen Jahren wurden neue ergiebige Lagerstätten in Brasilien entdeckt, die in dieser Aufstellung natürlich noch nicht berücksichtigt sind.

<sup>6</sup> Nach moderner Definition sind Lagerstätten Anreicherungen nutzbarer Minerale in der Erdkruste, die mit wirtschaftlichem Gewinn ausgebeutet werden können. Die Wirtschaftlichkeit ist starken Änderungen im Laufe der Zeit unterworfen, so daß im Altertum auch kleine Mineralvorkommen genutzt worden sein könnten. Allerdings ist in der geologischen und mineralogischen Literatur die Bezeichnung für Mineralvorkommen nach unten offen, d.h. auch winzige, nur im Mikroskop sichtbare Einschlüsse von Mineralen werden als Vorkommen bezeichnet. Das führt manchmal zu Mißverständnissen bei der Interpretation dieser Informationen durch Archäologen, wie z.B. bei einer Kartierung von Mineralvorkommen.

wurde (Spindler 1971). Zusätzlich gibt es bekanntlich eine große Zahl von Keilschrifttexten zur Metallverarbeitung aus dem 3. Jahrtausend v. Chr., in denen durchgängig zwei Materialien genannt werden (URUDU für Kupfer und AN.NA für Zinn), die zusammen Bronze (ZABAR) ergeben (Waetzoldt/Bachmann 1984).

Eine Mischung aus Zinn- und Kupfererzen könnte vielleicht zur Entdeckung der Zinnbronze geführt haben, denn es gibt – im Gegensatz etwa zu Bleiglanz<sup>7</sup> – keinerlei Hinweise, daß Zinnstein die Aufmerksamkeit des Menschen vor der Bronzezeit geweckt hätte. Außerdem könnte eine solche Erzmischung erklären, daß die frühesten Zinnbronzen noch recht variable Zinngehalte aufweisen. Andererseits ist es in diesem Fall schwieriger zu verstehen, wie es zur Entdeckung des metallischen Zinns kam. Es gibt zwar nur wenige frühe Artefakte aus Zinn (Zusammenstellungen bei Shell 1979; Roden 1985; Penhallurick 1986), aber sie beweisen immerhin die Kenntnis des Metalls ab der ersten Hälfte des 3. Jahrtausends v. Chr. Darüber hinaus ist die Assoziation von reichen Kupfererzen mit Zinnstein ziemlich selten, und Zinnkies kommt meist nur akzessorisch vor.

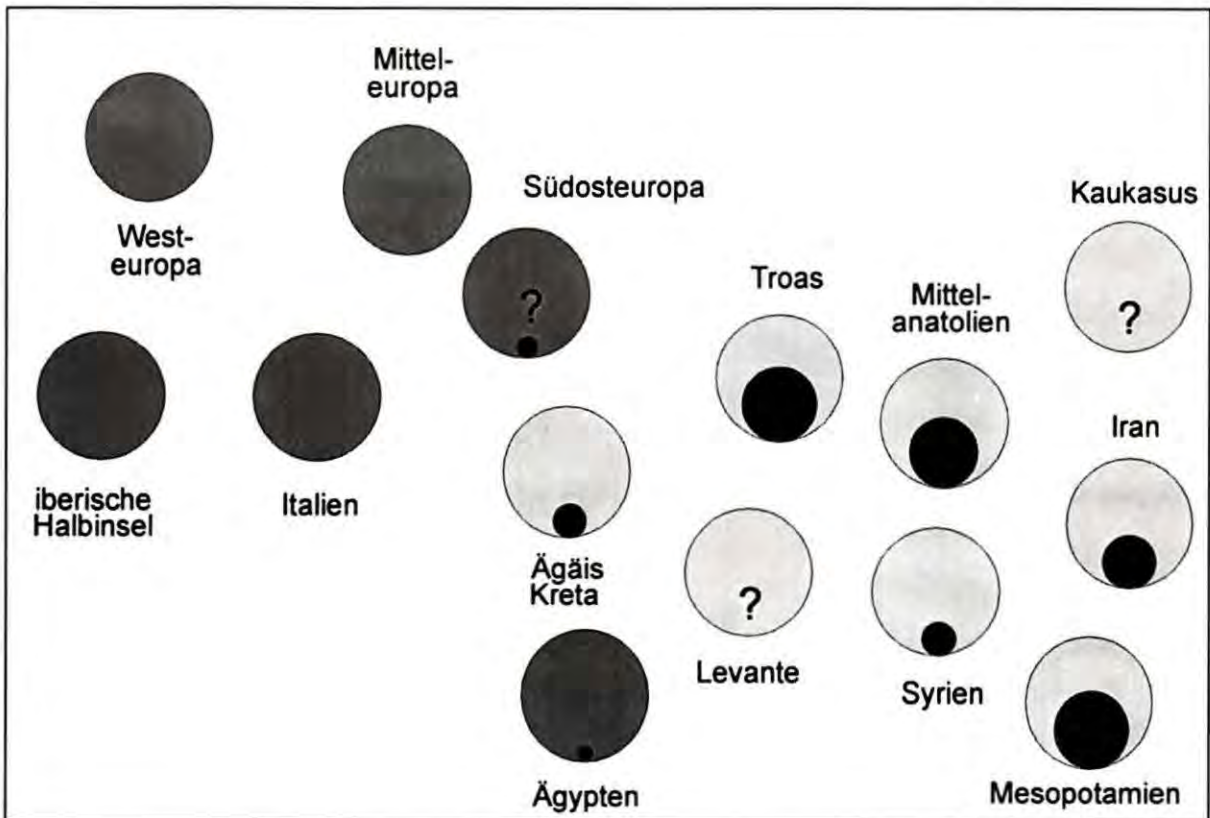
Zinnstein ist ein gegenüber Verwitterung sehr beständiges Mineral mit einem hohen spezifischen Gewicht. Diese Eigenschaften teilt es mit dem Gold, und deshalb nimmt man allgemein an, daß Zinn und Gold in der Bronzezeit vorwiegend aus alluvialen Vorkommen (Zinn- und Goldseifen) gewonnen wurden. Es erscheint durchaus realistisch, daß bei der Goldgewinnung oft auch Zinnstein anfiel, eine Idee, die schon Lucas (1962) äußerte, ohne daraus aber Konsequenzen für die Entstehung der Bronzemetallurgie zu ziehen. Wenn die meist kleinen Goldpartikel in einem Tiegel unter Holzkohle zusammengeschmolzen wurden, könnte es gelegentlich auch zur Reduktion von Zinnstein gekommen sein. Dies wäre ein alternativer und wohl auch plausiblerer Weg zur Entdeckung von metallischem Zinn, das in der Natur nur als große Rarität vorkommt. Das Mischen von verschiedenen Metallen ist dann naheliegend und könnte zur Entdeckung der Zinnbronze geführt haben, wobei vielleicht auch die Nachahmung von Gold eine Rolle gespielt hat.

Wegen der im Vergleich zu Kupfer und Bronze geringen Zahl von prähistorischen Zinnobjekten wird auch gelegentlich vorgeschlagen, daß nicht metallisches Zinn, sondern Zinnstein dem Kupfer zugeschlagen wurde (Spindler 1971; Charles 1967). Dieser Vorschlag erklärt aber weder wie man dazu gekommen sein könnte, Zinnstein dem Kupfer beizumischen, noch wird er durch die Text- und Bildquellen aus Mesopotamien und Ägypten unterstützt. Der Gewichtsunterschied zwischen metallischem Zinn und Zinnstein ist zwar gering, aber in den Keilschrifttexten werden die Gewichte der Ausgangs- und Endprodukte bei der Bronzeherstellung meist sehr genau angegeben. Sie lassen keinen Raum für Verluste. Außerdem wird Zinn oft zusammen mit Silber, Gold und Halbedelsteinen genannt. Es war offenbar ein wertvolles Material, was auf das Metall besser paßt als auf Zinnstein. Schließlich wurde Zinn offenbar auch zum Lötten eingesetzt (Craddock 1984), was nur mit metallischem Zinn möglich ist. Demnach ist die Herstellung von Bronze aus metallischem Kupfer und Zinn nach wie vor die wahrscheinlichste Technik zur Herstellung der Legierung.

### *Verbreitung der Zinnbronze*

Es ist seit langem bekannt, daß Zinnbronze zuerst in Vorderasien auftaucht. Eine neuere Zusammenstellung mit Angaben auch der älteren Literatur gibt Muhly (1985). Schematisch ist die Situation in Abb. 1a und b zusammengefaßt. Sie spiegelt die paradoxe Situation wider, daß die frühesten Zinnbronzen gerade in jenen Regionen auftreten, die keine Zinnlagerstätten aufweisen. Dieses Rätsel, das die Forschung seit mehr als hundert Jahren beschäftigt (von Baer 1876), ist bis heute ungelöst. Die meisten Arbeiten zu diesem Thema betreffen jedoch nur die mögliche Herkunft des Zinns. Dieser Aspekt ist zwar wichtig und wird im folgenden noch angesprochen, aber ebenso erstaunlich ist eine Tatsache, die aus Abb. 1, a,b nicht so klar ersichtlich ist: Die Einführung der Zinnbronze erfolgt in erstaunlich kurzer Zeit in der gesamten Alten Welt.

<sup>7</sup> Bleiglanz taucht gelegentlich in akeramischen neolithischen Kontexten in Vorderasien sowohl unbearbeitet als auch in Form von Perlen auf (Pernicka 1990).



● Anteil von Zinnbronzen im Fundbestand

● Gebiete mit Zinnvorkommen

Abb. 1a. Verbreitung der Zinnbronze in der westlichen Alten Welt vor etwa 2200 v. Chr. Nach einer Darstellung von McKerrell (1977), aber wesentlich modifiziert und ergänzt. Die Grundlage bildet die Stuttgarter Datenbank (Krause/Pernicka 1996), die wesentlich auf den Arbeiten von Junghans u.a. (1960; 1968; 1974) beruht. Die Angaben für die Troas stammen von Pernicka u.a. (1984; 1990) und Begemann u.a. (1992), die von Mittel-anatolien von Esin (1969), die von Ägypten von Cowell (1987), Lucas (1962) und Pernicka/Schleiter (1997) sowie die vom Iran von Eaton/McKerrell (1976). Von Mesopotamien und Syrien liegen nahezu 3000 unveröffentlichte Analysen vor (Hauptmann/Pernicka 1998).

Obwohl einige wenige Funde aus dem frühen 3. Jahrtausend bekannt sind (zusammengestellt und kritisch diskutiert von Muhly 1985), beginnt die regelhafte Verwendung um die Mitte desselben Jahrtausends, gekennzeichnet vor allem durch die Königsgräber von Ur und die Schatzfunde von Troia IIg. Dazu gehören aber auch eine Reihe von Fundorten, die von der Ägäis über Anatolien bis nach Susa reichen und sämtlich das Vorhandensein sozial differenzierter Gesellschaften vermuten lassen. Obwohl eine Koinzidenz unabhängiger Entwicklungen nicht ausgeschlossen werden kann, scheint es sich doch um eine gemeinsame Kulturercheinung zu handeln, die intensive Kontakte zwischen den einzelnen Regionen, verbunden mit Gütertausch, nahelegt. Zumindest für Mesopotamien ist Fernhandel durch Texte belegt. Im östlichen Mittelmeerraum scheint nur Ägypten nicht an dieser Entwicklung teilzunehmen. Dies ist ein weiteres Paradoxon, denn gerade in Ägypten, in der Ostwüste nahe dem Roten Meer, liegen die einzigen bekannten Zinnvorkommen der Region (Muhly 1973; 1993). Sie sind aber im Alten Reich offenbar nicht genutzt worden, denn aus dieser Periode sind nur wenige Bronzefunde aus Ägypten bekannt. Es handelt sich um zwei Gefäße aus Abydos (Cowell 1987) und ein unbestimmbares Metallstück von Tell el-Fara'in im Nildelta (Pernicka/Schleiter 1997). Im Mittleren Reich nimmt die Zahl der Zinnbronzen nur unwesentlich zu; systematisch scheinen sie erst im Neuen Reich ab der 18. Dynastie verwendet worden zu sein. Diese Auffassung wird durch die Zusammensetzung von blauen und grünen Pigmenten aus Wandmale-

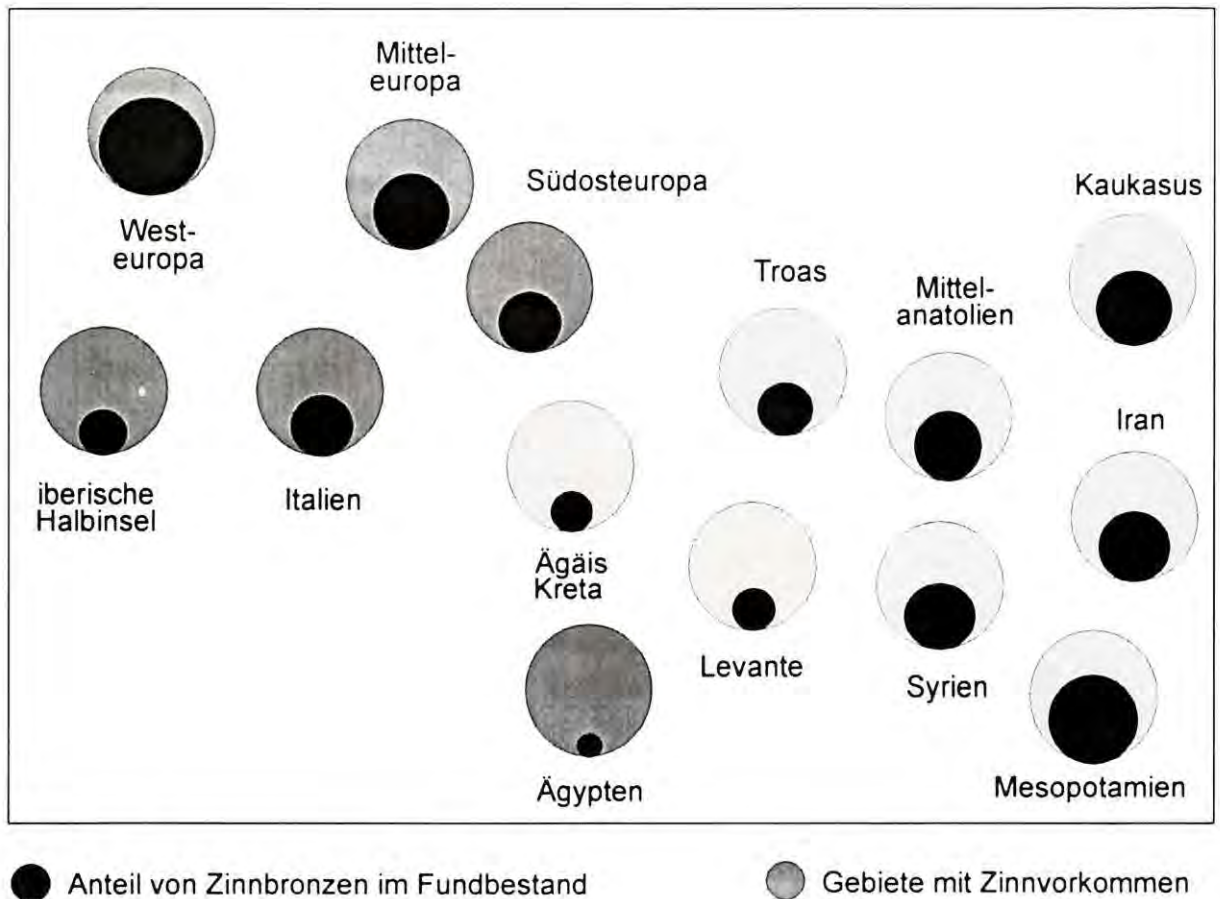


Abb. 1b. Verbreitung der Zinnbronze in der westlichen Alten Welt zwischen 2200 und 1800 v. Chr. Neben den bei Abb. 1a genannten Autoren wurden Spindler (1971) und Chernykh (1992) benutzt. Die Größe der eingezeichneten dunklen Kreise entspricht nicht maßstabsgetreu den Prozentanteilen. Sie spiegeln aber den allgemeinen Trend wider.

reien in gut datierten Gräbern unterstützt. Diese Pigmente wurden künstlich unter Zusatz von Kupfer hergestellt, wobei wohl vorwiegend Metallabfälle verwendet wurden. Vor der 18. Dynastie enthalten die Pigmente neben Kupfer oft auch Arsen, danach meist Zinn (Schiegl u.a. 1990).

Außerhalb der Ägäis und vielleicht außerhalb von Teilen Südosteuropas findet eine ähnliche Entwicklung zeitversoben um etwa 500 Jahre statt<sup>8</sup>. In der ersten Phase der Frühbronzezeit gibt es Zinn nur selten als Legierungspartner von Kupfer, während in Phase 3 die überwiegende Mehrheit der Metallobjekte in ganz Europa aus Zinnbronze besteht (Spindler 1971). Durch neuere Ergebnisse der Dendrochronologie hat sich der Zeitansatz der europäischen Frühbronzezeit etwas verschoben, so daß zwischen der regelhaften Verarbeitung von Zinnbronze in Vorderasien (Mitte des 3. Jahrtausends) und den Anfängen in Mitteleuropa nur zwei bis drei Jahrhunderte liegen. Aber nicht nur nach Westen, sondern auch nach Osten dehnte sich diese Legierungstechnologie über das Iranische Hochland (Heskel/Lamberg-Karlovsky 1980) und Zentralasien bis in das Indusdal (Wheeler 1968) aus. In den zinnreichen Gebieten von Südchina und Thailand wird Zinnbronze erstmals in der ersten Hälfte des 2. Jahrtausends v. Chr. verwendet (Bronson/White 1992). Es ist unklar, ob alle diese Erscheinungen ursächlich zusammenhängen, aber es ist zumindest auffällig, daß sich innerhalb eines relativ kurzen Zeitraumes von etwa einem halben Jahrtausend diese Legierung in ganz Eurasien durchsetzte. Die Ausbreitung erfolgte nicht zufällig – bald hier, bald

<sup>8</sup> Die Chronologie der Frühbronzezeit in Südosteuropa ist noch zu ungenau, um eine mögliche Ausbreitung der Zinnbronzetechnologie von Anatolien nach Mitteleuropa, analog dem Getreideanbau, überprüfen zu können. Spindler (1971) deutet eine solche Möglichkeit an, indem er die erste regelhafte Verwendung von Zinnbronze in Europa im Karpatenbecken lokalisiert.

da –, sondern nach einem klaren Muster mit einer relativ großen Ursprungsregion<sup>9</sup>. Zumindest im Westen der Alten Welt hatten die sich entwickelnden Regionen Berührung mit anderen, in denen Zinnbronze schon länger bekannt war. Es ist deshalb sinnvoll, die Ausbreitung der Zinnbronzetechnologie als einheitlichen Prozeß zu betrachten, der die Umwandlung der menschlichen Gesellschaft von einem einfachen zu einem höheren Organisationsgrad begleitet. Im einzelnen und bei detaillierter Betrachtung gibt es natürlich regionale Unterschiede und eigenständige Entwicklungen. So scheint z.B. der Zinnanteil in Metallobjekten in der Nähe von zinnreichen Gebieten allgemein höher gewesen zu sein, was auf eine lokale Produktion schließen läßt. Es bleibt aber die Frage, warum in solchen Regionen die Nutzung von Zinnlagerstätten weder viel früher noch viel später als in Vorderasien erfolgte.

### *Gesellschaftliche Rolle der Zinnbronze*

Obwohl die Zinnbronze einer ganzen Epoche ihren Namen gegeben hat, besteht mehrheitlich die Meinung, daß die großen gesellschaftlichen Veränderungen, die Ende des 4. Jahrtausends zuerst in Südmesopotamien faßbar werden und zu einer mehrschichtigen Siedlungshierarchie mit urbanen Zentren führen, nicht ursächlich mit der Einführung der Zinnbronze zusammenhängen (z.B. Nissen 1990; Hallo/Simpson 1971). Der neue Werkstoff wird nicht einmal als notwendige Voraussetzung für die Entwicklung der frühen Hochkulturen angesehen, wenn ihm auch beschleunigende Wirkung zugebilligt wird, etwa durch bessere Werkzeuge für den Monumental- und Schiffsbau sowie für Waffen.

Zumindest für die Ägäis stellte Renfrew (1972) dagegen die Einführung der Zinnbronze (zusammen mit dem Beginn der Ölgewinnung aus Oliven) als auslösenden Faktor für die weitreichenden gesellschaftlichen Veränderungen dar, die in der Frühbronzezeit sichtbar werden. Dies begründete er mit dem unstreitig frühen Auftauchen einer Vielzahl von Artefakten aus Zinnbronze besonders in der Nordostägäis, so daß man vermuten könnte, daß diese Legierung dort unabhängig entdeckt worden sein könnte. In der Tat schlug derselbe Autor vor (Renfrew 1967), daß es in der weiteren Umgebung von Troia ein kleines Zinnvorkommen gegeben haben könnte, das relativ bald wieder erschöpft war. Dieses in sich konsistente Entwicklungsmodell für die Ägäis schien so überzeugend zu sein, daß es bald weithin akzeptiert wurde und auch auf andere Regionen übertragen wurde. Die autonome kulturelle und technologische Entwicklung verschiedener Kulturregionen war einige Zeit lang das bevorzugte Erklärungsmodell gegenüber dem als Diffusionismus gebrandmarkten Modell der Übermittlung von wirtschaftlichen und sozialen Neuerungen durch Kulturkontakte, sei es direkt durch den Austausch von Personen oder indirekt durch den von neuen Gütern.

Durch die Entwicklung der Bleisotopenmethode zur Herkunftsbestimmung von Metallen (Brill/Wampler 1965; Grögler u.a. 1966; Gale/Stos-Gale 1982) entstand die Möglichkeit, dieses Modell einem Test zu unterziehen, indem die Schlüsselvoraussetzung des Modells, nämlich die unabhängige Entdeckung der Zinnbronze in Nordostanatolien, überprüft werden konnte. In diesem Fall sollte die Mehrheit der Metallobjekte, zumindest aber die aus Zinnbronze, in ihrer Isotopenzusammensetzung mit den Erzen desselben Gebietes übereinstimmen. Aus Abb. 2 ist ersichtlich, daß genau das Gegenteil der Fall ist. Für die überwiegende Mehrheit der Kupfer- und Bronzeartefakte aus der Nordostägäis lassen sich Erze aus der Region als Ausgangsstoffe mit Sicherheit ausschließen. Damit fällt nicht unbedingt das ganze Modell in sich zusammen, aber der auslösende Faktor für die kulturelle Dynamik in der Ägäis in der Mitte des 3. Jahrtausends dürfte doch in einer Stimulierung von außen zu suchen sein. Wenn man die Verbreitung der Zinnbronze betrachtet (Abb. 1a), kommt dafür nur ein Einfluß aus Vorderasien in Betracht, so wie es früher immer vermutet worden war. Da auch in der Ägäis die Artefakte aus Zinnbronze überwiegend zur Kategorie der Prunk- und Luxusgegenstände zählen, dürften sie eher als Begleiterscheinung der sich formierenden regionalen Eliten aufzufassen sein, denn als Auslöser für deren Bildung.

<sup>9</sup> Die meisten „neolithischen“ Zinnbronzen in Europa (z.B. Schickler 1981; Glumac/Todd 1991) stammen aus unklaren Fundzusammenhängen, wie von Pernicka u.a. (1997) diskutiert.

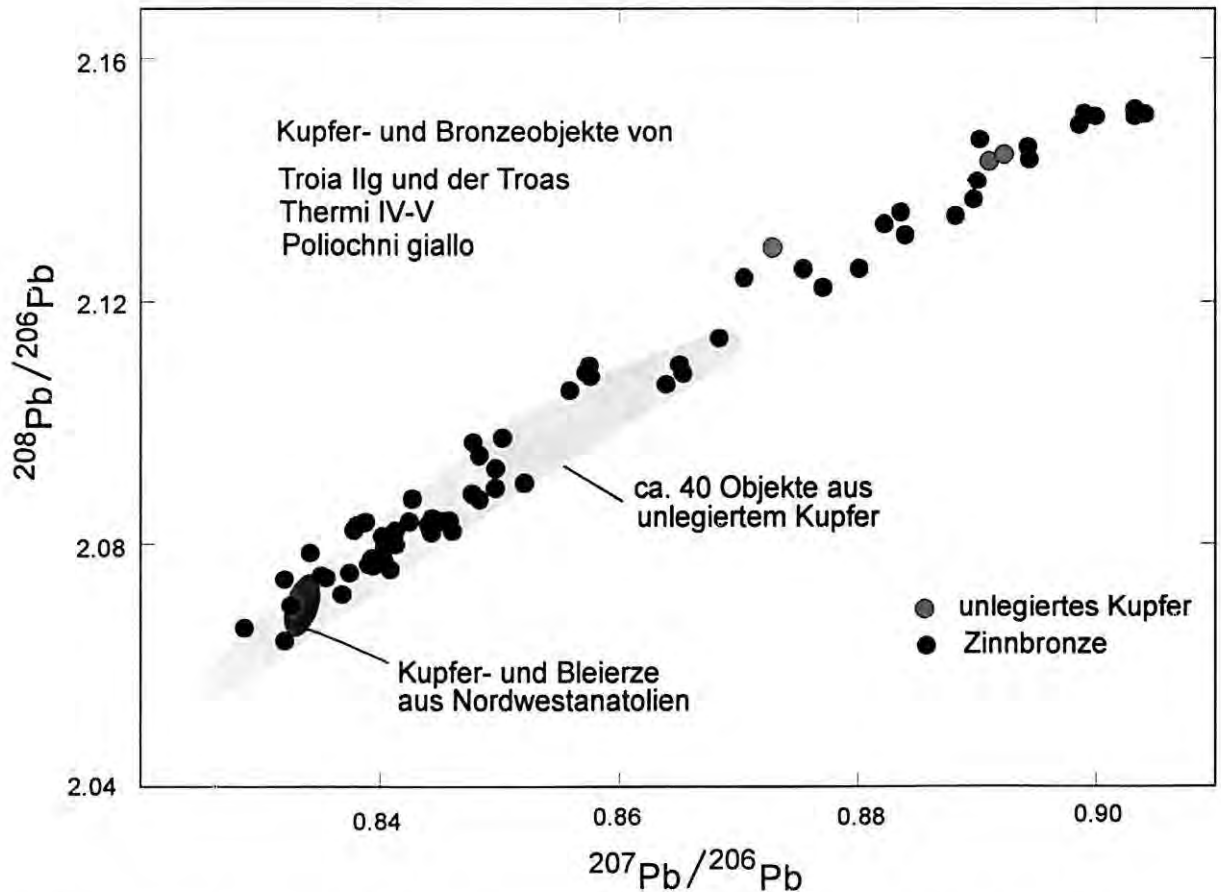


Abb. 2. Bleiisotopenverhältnisse in Kupfer- und Bronzeobjekten aus der nordöstlichen Ägäis, die zeigen, daß die überwiegende Mehrzahl der frühbronzezeitlichen Metallartefakte nicht von Erzen aus Nordwestanatolien abstammen kann. Da Blei hauptsächlich mit dem Kupfer in die Zinnbronze gelangt, ist der Import zumindest von Kupfer nachgewiesen, obwohl es Kupfervorkommen in Nordwestanatolien gibt. Deshalb liegt auch der Import von Zinn nahe, entweder als Rohmetall oder in Form fertiger Bronzeobjekte, denn Zinn wurde in dieser Region trotz intensiver Suche nicht gefunden. Die Daten stammen von Pernicka u.a. (1984; 1990) und Begemann u.a. (1992). Arsenkupfer wurde als unlegiertes Kupfer eingestuft. Zinnbronzes enthalten mehr als 1% Zinn, unabhängig von den Konzentrationen der anderen Elemente, die aber meist niedrig waren.

### Herkunft des Zinns

Im Laufe der Forschungsgeschichte wurden mindestens zwei Dutzend Vorschläge für die Herkunft des Zinns in der frühen Bronzezeit des östlichen Mittelmeerraums gemacht. Einige davon haben sich als geologisch unhaltbar erwiesen, andere sind aus archäologischen Gründen unwahrscheinlich<sup>10</sup>. Deshalb ist es nicht verwunderlich, daß neue Erkenntnisse über das Vorkommen von Zinnmineralen, besonders in der Türkei, mit großem Interesse aufgenommen werden (z.B. Kaptan 1983). Ein ähnliches Vorkommen wie das von Soğukpınar bei Bursa wurde wenig später bekannt (Çagatay u.a. 1989), und prompt wurde auch dieses neue, wieder nur mineralogisch interessante Vorkommen von Sulucadere im Gebiet des Bolcardağ (Taurus) mit der frühbronzezeitlichen Bronzeherstellung in Verbindung gebracht (Yener/Özbal 1987). Es handelt sich um eine kleine Erzlinse, die vorwiegend aus Blei- und Zinkmineralen mit akzessorischem Fahlerz besteht. Das Fahlerz enthält mikroskopische Entmischungen von Zinnkies. Die Analyse einer Erz-

<sup>10</sup> In einem besonders extravaganten Vorschlag leiteten vor gar nicht so langer Zeit Dayton/Dayton (1986) die Zinnbronze in Südmesopotamien aus dem sächsisch-böhmischen Erzgebirge ab.



probe ergab ca. 24% Pb, 4% As, 1,5% Sb, 0,4% Ag und nur 0,2% Sn (Wagner u.a. 1989<sup>11</sup>). Ein solches Erz würde bei der Verhüttung Blei ergeben. Der Zinngehalt würde im Altertum mit Sicherheit unbemerkt geblieben sein.

Gleichzeitig war erstmals ein Zinnsteinvorkommen in der Türkei bei Kestel (Prov. Niğde) gemeldet worden (Çagatay u.a. 1989), das ebenfalls im Taurusgebiet, aber in einem anderen geologischen Milieu liegt. Dieses gelangte durch die Publikation von Yener u.a. (1989) zu einiger Berühmtheit, weil nun unmißverständlich die Behauptung aufgestellt wurde, daß das lange gesuchte Zinnvorkommen der frühen Bronzezeit gefunden sei. In der Tat konnte man auf eine Bergwerksanlage verweisen, die durch Holzkohlefunde auf 2100–2900 v. Chr. datiert werden konnte. Darüber hinaus liegt in Sichtweite des Bergwerks eine frühbronzezeitliche Siedlung (Göltepe). Dennoch wurden Zweifel an der Interpretation als Zinnbergwerk laut (Hall/Steadman 1991; Muhly u.a. 1991), die vor allem durch die äußerst geringen Zinngehalte in dem anstehenden Erz bedingt waren. Bis heute ist keine Probe gefunden worden, die mehr als 1,4% Zinn enthält (Earl/Özbal 1996). Selbst das zinnreichste Material, Reste von gepulvertem Material vom Göltepe, weist einen Mittelwert von nur 0,45% Zinn auf. Der Zinnstein von Kestel tritt offenbar in einer Hämatitvererzung auf, und die Frage ist bis heute unbeantwortet, wie man erklären könnte, daß frühbronzezeitliche Bergleute erkannten, daß in dem braunen Eisenerz ein anderes braunes Mineral enthalten ist, das für die Bronzeherstellung verwendet werden kann, in einer Zeit, als Zinnbronze gerade erst aufkam. Darüber hinaus scheint der Zinnstein nur in kleinen Korngrößen vorzukommen. Mehr als die Hälfte der von Earl und Özbal untersuchten Proben bestand aus feinkörnigem Material mit weniger als 74 µm (0,074 mm) Durchmesser. Solches Material fällt nicht durch sein hohes spezifisches Gewicht auf, sonst das wichtigste Erkennungszeichen für Zinnstein. Schließlich ist das Bergwerk in Kalkstein angelegt, der selbst kein Zinn enthält. Zinnstein kommt nur zusammen mit der Eisenvererzung und vielleicht als dedritische Spaltenfüllung zusammen mit feinkörnigem limonitischem Material („roter Letten“) vor<sup>12</sup>. Insgesamt setzt deshalb die Gewinnung von Zinn aus den Erzen von Kestel erhebliche geologische und metallurgische Erfahrung voraus, die zu Beginn des 3. Jahrtausends wohl kaum vorhanden war<sup>13</sup>. Hinzu kommt, daß Kestel selbst im Altertum keine große Bedeutung gehabt haben kann, denn im frühen 2. Jahrtausend ist der Import von mindestens hundert Tonnen Zinn aus Syrien durch Texte vom Kültepe belegt (Larsen 1982). Man müßte annehmen, daß nach einer bedeutenden Periode der Zinngewinnung der Bergbau zum Erliegen kam und völlig vergessen wurde. Bei keinem anderen Zinnvorkommen scheint dies der Fall zu sein.

Eine scheinbar endgültige Bestätigung der Zinnproduktion bei Kestel ergaben frühbronzezeitliche Tiegelfragmente vom Göltepe, die als Schmelztiegel für Zinn interpretiert wurden (Yener/Vandiver 1993). Die Basis für diese Interpretation bilden kleine Bereiche auf der Innenseite der Tiegel, die dünn (ca. 0,1 mm) verglast sind. Diese dünne Glasurschicht enthält 0,1 bis 3 µm große Einsprenglinge von Zinnoxid. Es ist zwar nicht auszuschließen, daß dieser Befund durch die Reduktion von Zinnstein zustande kam, aber sehr überzeugend ist er nicht. Er könnte ebenso durch Zusammenschmelzen von losen Goldkörnern entstanden sein, denn in Kestel tritt auch Gold auf (Muhly u.a. 1991). Da Gold auch in kleinen Mengen auffällt, wäre eine frühbronzezeitliche Goldgewinnung eine plausible Alternative zur Erklärung des gesamten Komplexes.

Die Frage nach der Herkunft des Zinns in der frühen Bronzezeit Vorderasiens ist daher nach Ansicht des Verfassers keineswegs geklärt und nach wie vor offen. Wenn man Kleinstvorkommen innerhalb der Kernregion früher Zinnbronzeverwendung außer acht läßt, erhebt sich grundsätzlich die Frage, ob das Zinn vom Westen oder vom Osten dorthin gelangte. Dazu läßt sich derzeit nur feststellen, daß eine Herkunft ganz allgemein aus dem Osten aus folgenden Gründen wahrscheinlicher ist:

- Nach Westen ist ein zeitliches Gefälle bei der Ausbreitung der Zinnbronze recht gut belegt; die Verhältnisse im Osten sind dagegen noch unklar. Zumindest scheint Zinnbronze in der Induskultur spätestens in der Akkadzeit verwendet worden zu sein.

<sup>11</sup> In dieser Publikation ist der Zinngehalt in Tab. 2 nicht angegeben, weil er für die Herkunftsdiskussion von Metallen uninteressant war. Er war auch so niedrig, daß er der Beschreibung als silberhaltiges Bleierz nicht widersprach.

<sup>12</sup> Deshalb sind Berechnungen, die zu einer Gesamtproduktion von einigen hundert Tonnen Zinnsteinkonzentrat (Willies 1990) führen, wohl unrealistisch.

<sup>13</sup> Yener/Vandiver (1993) gehen von einem Beginn der Bergbautätigkeit um 3000 v. Chr. aus.

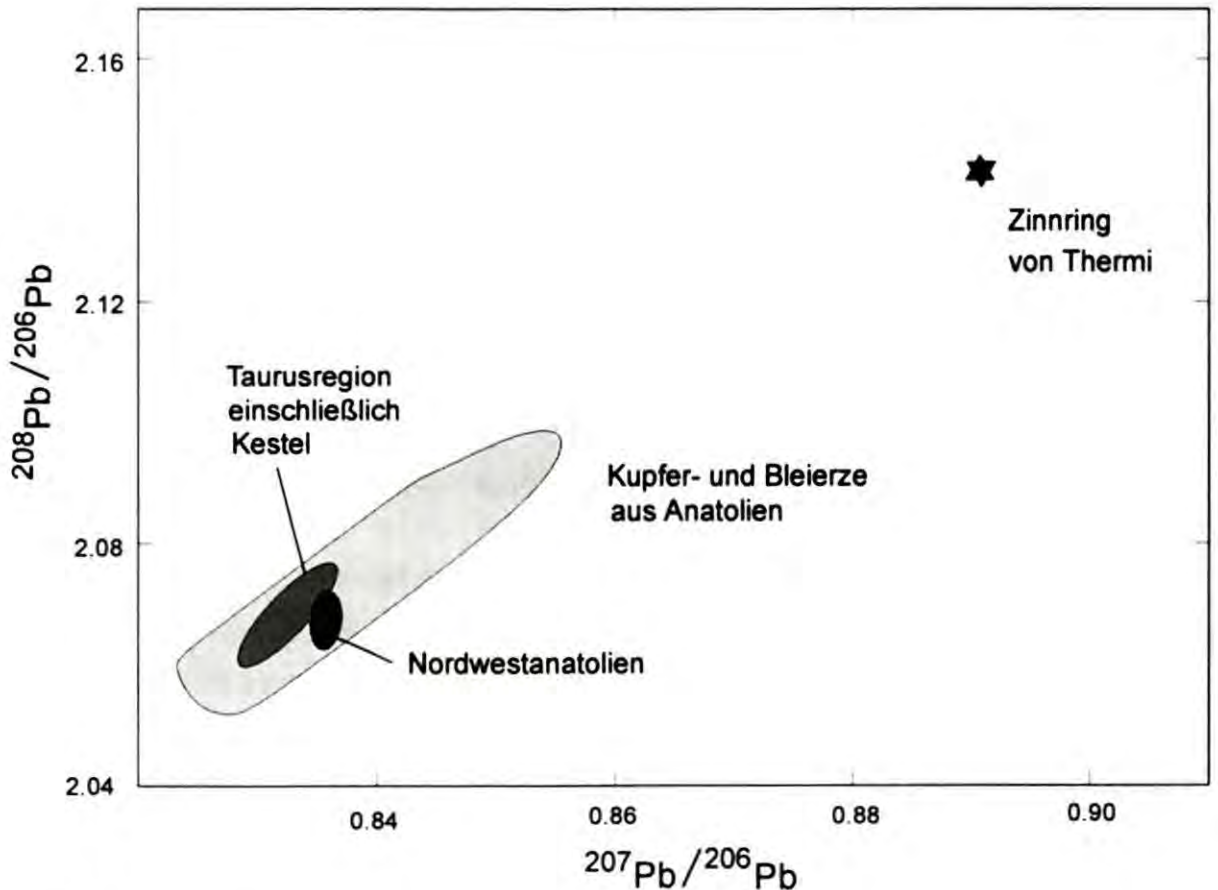


Abb. 3. Bleiisotopenverhältnisse in Kupfer- und Bleierzen aus Anatolien (Pernicka u.a. 1990) und im einzigen frühbronzezeitlichen Zinnobjekt aus dem östlichen Mittelmeerraum, dem Zinnring von Thermi (Begemann u.a. 1992). Die Taurusregion mit Kestel nach Daten von Yener u.a. (1991) ist zusätzlich eingetragen. Es ist offensichtlich, daß das Zinn von Thermi weder von Kestel noch von einer anderen bisher untersuchten Lagerstätte in Anatolien stammt.

- Obwohl die Textquellen keine Auskunft über die Herkunft des Zinns in Mesopotamien geben, scheint es doch aus großer Entfernung sowohl über den See- als auch den Landweg aus dem Osten gekommen zu sein (Moorey 1994).
- Exotische Materialien wie Lapislazuli und Karneol belegen den Bezug von Gütern aus Zentralasien, wo Zinnlagerstätten nachgewiesen sind (Penhallurick 1986), darunter auch welche mit Kupfer (Cleuziou/Berthoud 1982; Stech/Pigott 1986)<sup>14</sup>.
- Die Bleiisotopenverhältnisse in den frühbronzezeitlichen Bronzeartefakten (Abb. 2 u. 3) enthalten auch eine Information über das geologische Alter des Bleis, das wohl mit dem Kupfer in die Legierung gelangte. Demnach muß man für Objekte, die rechts oben im Diagramm liegen, mit geologisch sehr altem (präkambrischem) Blei rechnen. Solch alte Krustensegmente sind in Anatolien und in den jungen Faltengebirgen von den Alpen bis zum Zagros und Hindukusch nicht zu erwarten. Sie sind aber in Ägypten, auf der Arabischen Halbinsel, in Nordwestindien und wahrscheinlich auch im nördlichen Zentralasien vorhanden. Die Lagerstätten von Cornwall und dem Erzgebirge sind dagegen paläozoisch, d.h. nicht alt genug, um den ganzen Streubereich in Abb. 2 zu erklären.

<sup>14</sup> In einem von der Volkswagen-Stiftung geförderten Projekt der Eurasien-Abteilung des Deutschen Archäologischen Instituts, des Deutschen Bergbau-Museums und des Max-Planck-Instituts für Kernphysik wird derzeit die vorislamische Zinnengewinnung in Zentralasien mit dem Schwerpunkt in Usbekistan und Tadschikistan untersucht.

## Literaturverzeichnis

- Ahlfeld 1958: F. Ahlfeld, Zinn und Wolfram. Die metallischen Rohstoffe II (Stuttgart 1958).
- von Baer 1876: K.E. von Baer, Von wo das Zinn zu den ganz alten Bronzen gekommen sein mag? *Archiv Anthr.* 9, 1876, 263.
- Bátora/Pernicka 1998: J. Bátora/E. Pernicka, Chemische Zusammensetzung der Kupferartefakte aus dem frühbronzezeitlichen Gáberfeld von Jelšovce, Südwestslowakei. In: A. Hauptmann/E. Pernicka/T. Rehren/Ü. Yalcın (Hrsg.), *The Beginning of Metallurgy. Der Anschnitt, Beih.* 8 (Bochum 1998 im Druck).
- Begemann u.a. 1992: F. Begemann/S. Schmitt-Strecker/E. Pernicka, The Metal Finds from Thermi III-V: A Chemical and Lead Isotope Study. *Stud. Troica* 2, 1992, 219–239.
- Brill/Wampler 1965: R.H. Brill/J.M. Wampler, Isotope ratios in archaeological objects of lead. In: *Application of Science in the Examination of Works of Art* (Boston 1965) 155–166.
- Bronson/White 1992: B. Bronson/J.C. White, Radiocarbon and Chronology in Southeast Asia. In: R.W. Ehrich (Hrsg.), *Chronologies in Old World Archaeology I* (Chicago, London) 491–515.
- Budd/Ottaway 1991: P. Budd/B.S. Ottaway, The Properties of Arsenical Copper Alloys: Implications for the Development of Eneolithic Metallurgy. In: P. Budd/B. Chapman/C. Jackson u.a. (Hrsg.), *Archaeological Sciences 1989* (Oxford 1991) 132–142.
- Çağatay/Pehlivan 1988: A. Çağatay/N. Pehlivan, Celaller (Niğde-Çamardı) kalay cevherlesmesinin mineralojisi. *Jeoloji Mühendisliği* 32/33, 1988, 27–31.
- Çağatay u.a. 1981: A. Çağatay/Y. Altun/B. Arman, Mineralogy of the Madenbelenitepe (Soğukpınar-Bursa) tin mineralisation. *Bull. Mineral Resources and Explor. Inst. Turkey* 92, 1981, 25–34.
- /–/– 1989: –/–/–, Mineralogy of the tin bearing Bolkardağ Sulucadere (Ulukisla-Niğde) lead-zinc mineralization. *Türkiye Jeoloji Bul.* 32, 1989, 15–20.
- Charles 1967: J.A. Charles, Early Arsenical Bronzes – A Metallurgical View. *Am. Journal Arch.* 71, 1967, 21–26.
- 1980: –, The coming of copper and copper-base alloys and iron: A metallurgical sequence. In: T.A. Wertime/J.D. Muhly (Hrsg.), *The coming of the Age of Iron* (New Haven, London) 151–183.
- Chernykh 1992: E.N. Chernykh, *Ancient metallurgy in the USSR* (Cambridge 1992).
- Cleuziou/Berthoud 1982: S. Cleuziou/T. Berthoud, Early Tin in the Near East. *Expedition* 25, 1982, 14–19.
- Cowell 1987: R.M. Cowell, Scientific Appendix I, Chemical Analysis. In: W.V. Davies (Hrsg.), *Catalogue of Egyptian Antiquities in the British Museum VII. Tools and Weapons I, Axes* (London 1987) 96–118.
- Craddock 1984: P.T. Craddock, Tin and Tin Solder in Sumer: Preliminary Comments. *MASCA Journal* 3, 1984, 7–9.
- Dayton/Dayton 1986: J.E. Dayton/A. Dayton, Uses and Limitations of Lead Isotopes in Archaeology. In: J.S. Olin/M.J. Blackman (Hrsg.), *Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Archaeometry Symposium* (Washington, D.C. 1986) 13–41.
- Earl/Özbal 1996: B. Earl/H. Özbal, Early Bronze Age Tin Processing at Kestel/Göltepe, Anatolia. *Archaeometry* 38, 1996, 289–303.
- Eaton/McKerrell 1976: E.R. Eaton/H. McKerrell, Near Eastern Alloying. *World Arch.* 8, 1976, 169–191.
- Esin 1969: U. Esin, Kuantitatif Spektral Analiz Yardımıyla Anadolu'da Başlangıcından Asur Kolonileri Çağına Kadar Bakır ve Tunç Madenciligi. *Taş Matbaası* (Istanbul 1969).
- Gale/Stos-Gale 1982: N.H. Gale/Z.A. Stos-Gale, Bronze Age copper sources in the Mediterranean. *Science* 216, 1982, 11–19.
- Glumac/Todd 1991: P.D. Glumac/J.A. Todd, Eneolithic copper smelting slags from the middle Danube basin. In: E. Pernicka/G.A. Wagner (Hrsg.), *Archaeometry '90* (Basel, Boston, Berlin) 155–164.
- Govedarica u.a. 1995: B. Govedarica/E. Pernicka/K.-F. Rittershofer, Neue Metallanalysen aus dem Westbalkangebiet. In: P. Petrović/S. Đurđeković (Hrsg.), *Ancient Mining and Metallurgy in Southeast Europe* (Belgrade, Bor) 265–279.
- Grögler u.a. 1966: N. Grögler/J. Geiss/M. Grünenfelder/F.G. Houtermans, Isotopenuntersuchungen zur Bestimmung der Herkunft römischer Bleirohre und Bleibarren. *Zeitschr. Naturforsch.* 21a, 1966, 1167–1172.
- Hall/Steadman 1991: M.E. Hall/S.R. Steadman, Tin and Anatolia: another look. *Journal Mediterranean Arch.* 4, 1991, 217–234.
- Hallo/Simpson 1971: W.W. Hallo/W.K. Simpson, *The Ancient Near East. A History*. Harcourt Brace Jovanovich (Orlando 1971).
- Hauptmann/Pernicka 1998: H. Hauptmann/E. Pernicka (Hrsg.), *Die Metallindustrie Mesopotamiens von den Anfängen bis zum 2. Jahrtausend v. Chr.* (Heidelberg 1998).
- Heskel/Lamberg-Karlovsky 1980: D. Heskel/C.C. Lamberg-Karlovsky, An alternative sequence for the development of metallurgy: Tepe Yahya, Iran. In: T.A. Wertime/J.D. Muhly (Hrsg.), *The coming of the Age of Iron* (New Haven, London) 229–265.
- Junghans u.a. 1960: S. Junghans/E. Sangmeister/M. Schröder, Metallanalysen kupferzeitlicher und frühbronzezeitlicher Bodenfunde aus Europa. *SAM 1* (Berlin 1960).
- /–/– 1968: –/–/–, Kupfer und Bronze in der frühen Metallzeit Europas. *SAM* 2,1–3 (Berlin 1968).
- /–/– 1974: –/–/–, Kupfer und Bronze in der frühen Metallzeit Europas. *SAM* 2,4 (Berlin 1974).

- Kaptan 1983: E. Kaptan, The significance of tin in Turkish mining history and its origin. *Bull. Mineral Resources and Explor. Inst. Turkey* 95/96, 1983, 106–114.
- Krause 1988: R. Krause, Die endneolithischen und frühbronzezeitlichen Grabfunde auf der Nordstadtterrasse von Singen am Hohentwiel. Grabfunde von Singen am Hohentwiel, 1. Forsch. u. Ber. Vor- und Frühgesch. Baden-Württemberg 32 (Stuttgart 1988).
- Krause/Pernicka 1996: R. Krause/E. Pernicka, Das neue Stuttgarter Metallanalysenprojekt „SMAP“. *Arch. Nachrbl.* 1, 1996, 274–291.
- Larsen 1982: M.T. Larsen, Caravans and Trade in Ancient Mesopotamia and Asia Minor. *Bull. Soc. Mesopotamian Stud.* 4, 1982, 33–45.
- Lechtman 1996: H. Lechtman, Arsenic Bronze: Dirty Copper or Chosen Alloy? A View from the Americas. *Journal Field Arch.* 23, 1996, 477–514.
- Lucas 1962: A. Lucas, *Ancient Egyptian Materials and Industries*<sup>4</sup> (London 1962).
- Maréchal 1958: J.R. Maréchal, Etude sur les propriétés mécaniques des cuivres à l'arsenic. *Métaux Corrosion Industries* 33, 1958, 377–388.
- McKerrell 1977: H. McKerrell, The Use of Tin-Bronze in Britain and the Comparative Relationship with the Near East. In: A.D. Franklin/J.S. Olin/T.A. Wertime (Hrsg.), *The Search for Ancient Tin* (Washington, D.C.) 7–24.
- McKerrell/Tyelcote 1972: H. McKerrell/R.F. Tyelcote, The Working of Copper-Arsenic Alloys in the Early Bronze Age and the Effect on the Determination of Provenance. *Proc. Prehist. Soc.* 38, 1972, 209–218.
- Moorey 1994: P.R.S. Moorey, *Ancient Mesopotamian Materials and Industries* (Oxford 1994).
- Muhly 1973: J.D. Muhly, Copper and Tin. The Distribution of Mineral Resources and the Nature of the Metals Trade in the Bronze Age. *Transact. Connecticut* 43, 1973, 157–535.
- 1985: –, Sources of Tin and the Beginning of Bronze Metallurgy. *Am. Journal Arch.* 89, 1985, 275–291.
- 1993: –, Early Bronze Age Tin and the Taurus. *Am. Journal Arch.* 97, 1993, 239–253.
- Muhly u.a. 1991: J.D. Muhly/F. Begemann/Ö. Öztunalı/E. Pernicka/S. Schmitt-Strecker/G.A. Wagner, The bronze metallurgy of Anatolia and the question of local tin sources. In: E. Pernicka/G.A. Wagner (Hrsg.), *Archaeometry '90* (Basel, Boston, Berlin 1991) 209–220.
- Nissen 1990: J.J. Nissen, *Grundzüge einer Geschichte der Frühzeit des Vorderen Orients*<sup>2</sup> (Darmstadt 1990).
- Northover 1989: J.P. Northover, Properties and use of arsenic-copper alloys. In: A. Hauptmann/E. Pernicka/G.A. Wagner (Hrsg.), *Old World Archaeometallurgy. Anschnitt, Beih.* 7, 1989, 111–118.
- Obereder u.a. 1993: J. Obereder/E. Pernicka/E. Ruttkey, Die Metallfunde und die Metallurgie der kupferzeitlichen Mondsee-Gruppe. Ein Vorbericht. *Arch. Österreich* 4,2, 1993, 5–9.
- Penhallurick 1986: R.D. Penhallurick, *Tin in Antiquity* (London 1986).
- Pernicka 1990: E. Pernicka, Entstehung und Ausbreitung der Metallurgie in prähistorischer Zeit. *Jahrb. RGZM* 37, 1990, 21–129.
- Pernicka/Schleifer 1997: E. Pernicka/M. Schleifer, Untersuchung der Metallproben vom Tell el-Fara'in (Buto). In: Th. von der Way, *Tell el-Fara'in – Buto I. Ergebnisse zum frühen Kontext während der Jahre 1983–1989. Arch. Veröff. DAI Kairo* 83, 1997, (im Druck).
- Pernicka u.a. 1984: E. Pernicka/T.C. Seeliger/G.A. Wagner/F. Begemann/S. Schmitt-Strecker/C. Eibner/Ö. Öztunalı/I. Baranyi, Archäometallurgische Untersuchungen in Nordwestanatolien. *Jahrb. RGZM* 31, 1984, 533–599.
- 1990: E. Pernicka/F. Begemann/S. Schmitt-Strecker/A.P. Grimanis, On the composition and provenance of metal artefacts from Poliochni on Lemnos. *Oxford Journal Arch.* 9, 1990, 263–297.
- 1997: E. Pernicka/F. Begemann/S. Schmitt-Strecker/H. Todorova/I. Kuleff, Prehistoric copper in Bulgaria: Its composition and provenance. *Eurasia Ant.* 3, 1997 (im Druck).
- Renfrew 1967: C. Renfrew, Cycladic metallurgy and the Aegean Early Bronze Age. *Am. Journal Arch.* 71, 1967, 2–26.
- 1972: –, *The emergence of civilization: The Cyclades and the Aegean in the third millennium B.C.* (London 1972).
- Roden 1985: C. Roden, Montanarchäologische Quellen des ur- und frühgeschichtlichen Zinnbergbaus in Europa – Ein Überblick. *Anschnitt* 37, 1985, 50–80.
- Sangmeister 1971: E. Sangmeister, Aufkommen der Arsenbronze in SO-Europa. *Actes du VIIIe Congrès International des Sciences Préhistoriques et Protohistoriques 1* (Beograd 1971) 131–138.
- Schickler 1981: H. Schickler, 'Neolithische' Zinnbronzen. In: H. Lorenz (Hrsg.), *Studien zur Bronzezeit. Festschrift für Wilhelm Albert v. Brunn* (Mainz 1981) 419–445.
- Schiegl u.a. 1990: S. Schiegl/K.L. Weiner/A. El Goresy, Zusammensetzung und Provenienz von Blau- und Grünpigmenten in altägyptischer Malerei: Ein Beitrag zur exakten Chronologie in Ägypten. *Erzmetall* 43, 1990, 265–272.
- Schubert 1981: E. Schubert, Zur Frage der Arsenlegierungen in der Kupfer- und Frühbronzezeit Südosteuropas. In: H. Lorenz (Hrsg.), *Studien zur Bronzezeit. Festschrift für Wilhelm Albert v. Brunn* (Mainz 1981) 447–459.
- Selimchanow 1974: I.R. Selimchanow, *Enträtselte Geheimnisse der alten Bronzen* (Berlin 1974).
- Shalev/Northover 1993: S. Shalev/P.J. Northover, The metallurgy of the Nahal Mishmar hoard reconsidered. *Archaeometry* 35, 1993, 35–47.

- Shell 1979: C.A. Shell, The Early Exploitation of Tin Deposits in South West England. In: M. Ryan (Hrsg.), *The Origins of Metallurgy in Atlantic Europe. Proc. Fifth Atlantic Coll. (Dublin 1979)* 251–263.
- Spindler 1971: K. Spindler, Zur Herstellung der Zinnbronze in der frühen Metallurgie Europas. *Acta Praehist. et Arch.* 2, 1971, 202–253.
- Stech/Pigott 1986: T. Stech/V.C. Pigott, The Metals Trade in Southwest Asia in the Third Millennium BC. *Iraq* 48, 1986, 39–64.
- Tadmor u.a. 1995: M. Tadmor/D. Kedem/F. Begemann/A. Hauptmann/E. Pernicka/S. Schmitt-Strecker, The Nahal Mishmar hoard from the Judean Desert: technology, composition, provenance. *'Atiqot* 27, 1995, 93–146.
- Tallon 1987: F. Tallon, *Métallurgie susienne I: De la fondation de Suse au XVIIIe siècle avant J.-C.* (Paris 1987).
- Taylor 1979: R.G. Taylor, *Geology of Tin Deposits* (Amsterdam, Oxford, New York 1979).
- Waetzoldt/Bachmann 1984: H. Waetzoldt/H.-G. Bachmann, Zinn- und Arsenbronzen in den Texten aus Ebla und aus dem Mesopotamien des 3. Jahrtausends. *Oriens Ant.* 23, 1984, 1–18.
- Wagner u.a. 1989: G.A. Wagner/F. Begemann/C. Eibner/J. Lutz/Ö. Öztunalı/E. Pernicka/S. Schmitt-Strecker, Archäometallurgische Untersuchungen an Rohstoffquellen des frühen Kupfers in Ostanatolien. *Jahrb. RGZM* 36, 1989, 637–686.
- Wheeler 1968: M. Wheeler, *The Indus Civilization* (Cambridge 1968).
- Willies 1990: L. Willies, An Early Bronze Age tin mine in Anatolia, Turkey. *Bull. Peak District Mines Hist. Soc.* 11, 1990, 91–96.
- Yener/Özbal 1987: K.A. Yener/H. Özbal, Tin in the Turkish Taurus mountains: the Bolkardağ mining district. *Antiquity* 61, 1987, 220–226.
- Yener/Vandiver 1993: K.A. Yener/P.B. Vandiver, Tin Processing at Göltepe, an Early Bronze Age Site in Anatolia. *Am. Journal Arch.* 97, 1993, 207–238.
- Yener u.a. 1989: K.A. Yener/H. Özbal/E. Kaptan/A.N. Pehlivan/M. Goodway, Kestel: An Early Bronze Age source of tin ore in the Taurus mountains, Turkey. *Science* 144, 1989, 200–203.
- 1991: K.A. Yener/E.V. Sayre/E.C. Joel/H. Özbal/I.L. Barnes/R.H. Brill, Stable lead isotope studies of central Taurus ore sources and related artifacts from eastern Mediterranean Chalcolithic and Bronze Age sites. *Journal Arch. Scien.* 18, 1991, 1–37.