ERNST PERNICKA

ERZLAGERSTÄTTEN IN DER ÄGÄIS UND IHRE AUSBEUTUNG IM ALTERUM: GEOCHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR HERKUNFTSBESTIMMUNG ARCHÄOLOGISCHER METALLOBJEKTE*

Metalle spielen eine wichtige Rolle in der Geschichte der Menschheit. In gediegener Form waren sie möglicherweise schon dem paläolithischen Menschen bekannt. Sicher nachweisen läßt sich ihre Verwendung seit dem frühesten Neolithikum, mehr als 10000 Jahre vor heute. Später, mit zunehmender Kenntnis der pyrometallurgischen Gewinnungsverfahren von Metall aus Erzen, verdrängte das Kupfer und seine Legierungen den Stein als wichtigsten Rohstoff für Werkzeuge und Waffen. Diese Entwicklung geht einher mit der Entstehung komplexer Gesellschaften und höherer Kulturen. Sie wird reflektiert in dem von Christian J. Thomsen (1836) vorgeschlagenen Dreiperiodensystem (die Einteilung der Zivilisationsgeschichte in eine Stein-, Bronze- und Eisenzeit), das heute noch für die prähistorische Forschung Gültigkeit besitzt.

Aber trotz dieser herausragenden Stellung der Metalle in der Menschheitsgeschichte und in der prähistorischen Forschung sind die meisten wichtigen Fragen zur Frühgeschichte der Metallurgie noch nicht

* Dieser Artikel ist die etwas veränderte und aktualisierte Fassung einer von der Fakultät für Geowissenschaften der Universität Heidelberg angenommenen Habilitationsschrift. Er ist somit ursprünglich nicht für archäologisch ausgebildete Leser geschrieben. Die Motivation für diese Arbeit ist aber von einer archäologischen Fragestellung ausgegangen und richtet sich in ihren Schlußfolgerungen auch mehr an Archäologen, so daß mir eine Veröffentlichung an dieser Stelle gerechtfertigt erscheint. Es ist das Problem jeder interdisziplinären Forschung, ihre Ergebnisse so darzustellen, daß sich Wissenschaftler verschiedener Fachgebiete angesprochen fühlen. Dies gilt sicher in besonderem Maße für naturwissenschaftliche Untersuchungen in der Archäologie. Deshalb mag manches für den Fachspezialisten verkürzt und unausgewogen erscheinen; ich denke hier besonders an die einleitenden Kapitel. Dafür bitte ich um Nachsicht. Hier geht es nicht darum, den archäologischen Forschungsstand aus naturwissenschaftlicher Sicht neu zu schreiben, sondern die Möglichkeiten und Grenzen naturwissenschaftlicher Methoden am Beispiel der Herkunftsbestimmung von Metallen zu diskutieren. In diesem Zusammenhang sollen die ersten beiden Kapitel dem archäologisch Unkundigen eine Orientierungshilfe geben.

Die Anregung zu dieser Arbeit ging von meinem Kollegen am MPI für Kernphysik, Prof. G. A. Wagner aus, dem ich auch die Mitteilung einer Reihe unveröffentlichter Geländebeobachtungen verdanke. Herrn Prof. G. C. Amstutz (Mineralogisch-Petrographisches Institut der Universität Heidelberg) danke ich für seine wohlwollende Unterstützung und kritische Durchsicht dieser Arbeit und für die Überlassung einiger Proben von gediegen Silber. Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. F. Begemann und Frau Dr. S. Schmitt-Strecker (MPI für Chemie, Mainz) für die Erlaubnis, eine Reihe unveröffentlichter Bleiisotopendaten verwenden zu dürfen und für anregende Diskussionen. Herrn Dr. F. Kruse vom selben Institut danke ich für die Erstellung eines Rechnerprogrammes, mit dem die Berechnungen zur möglichen Mischung verschiedener Metallsorten durchgeführt wurden. Die Berechnung des Vertrauensbereiches bivariater Normalverteilungen wurde mit Hilfe des Programms RAPLOT durchgeführt, das mir Herr Dr. E. V. Sayre (Smithsonian Institution, Washington, D.C.) freundlicherweise zur Verfügung stellte. Herrn Prof. K. Kilian (Kommission für Allgemeine und Vergleichende Archäologie des Deutschen Archäologischen Instituts, Bonn) habe ich für Proben von Bleiobjekten aus Tiryns zu danken. Herrn Dr. H. Schickler (Württembergisches Landesmuseum, Stuttgart) verdanke ich viele interessante Einblicke in die Rolle der Metallurgie in den verschiedensten Kulturregionen und in die Forschungsgeschichte der Metallanalytik in der Archäologie. Er stellte außerdem dankenswerterweise die trojanischen Proben aus dem SAM-Projekt und seine Datenbank von Analysen archäologischer Metallobjekte für die Aufstellung in Abb. 44 zur Verfügung. Herr Dr. H. Lohmann (Ruhr-Universität Bochum) zeigte mir viele archäometallurgisch interessante Stellen in Südattika und Laurion. Ebenso wurde die Auffindung einiger alter Bergwerke auf der Insel Kea im Gelände durch I. Bassiakos (NRC Demokritos, Athen) tatkräftig unterstützt. Für die Beschaffung und Übersetzung einiger griechischer Veröffentlichungen danke ich den Herren Dipl.-Geol. S. Chalkias, Dr. A. Christoforidis (MPI für Kernphysik, Heidelberg) und Dr. M. Vavelidis (Mineralogisches Institut der Universität Thessaloniki). Außerdem haben am MPI für Kernphysik die Damen B. Bachmann, C. Lehr, M. Remor, U. Schwan, V. Träumer, H. Urmitzer und die Herren W. Bach, W. Grieser, D. Kaether auf vielfältige Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Schließlich soll die finanzielle Unterstützung der Stiftung Volkswagenwerk im Rahmen des Schwerpunktes »Archäometrie« dankend erwähnt werden, durch die viele Untersuchungen ermöglicht wurden, auf deren Ergebnissen diese Arbeit beruht.

beantwortet. Man weiß weder, welches Metall dem Menschen zuerst bekannt war, noch welches Metall wann und wo zuerst aus Erzen gewonnen wurde. Es ist auch weitgehend unbekannt, woher die z. T. beträchtlichen Metallmengen stammen, die gerade in rohstoffarmen Gebieten wie in Mesopotamien und dem Niltal besonders früh auftreten. Seit mehr als hundert Jahren beschäftigen sich Wissenschaftler verschiedener Disziplinen auch mit der Frage nach der Herkunft des Zinns in den frühen Hochkulturen der Alten Welt (Baer 1876). Sie ist bis heute ungelöst.

Diese lange Forschungstradition und das große Interesse, das prähistorischen Metallobjekten immer entgegengebracht wurde, hatte eine umfangreiche Literatur zur Frühgeschichte der Metallurgie zur Folge (Otto u. Witter 1952). Es mag daher wenig aussichtsreich erscheinen, gerade im ägäischen Raum, der archäologisch besonders intensiv erforscht wurde, wesentlich neue Erkenntnisse zu diesem Gebiet beizutragen. Bei näherer Betrachtung fällt aber auf, daß die frühe Metallurgie oft nur unter einem Aspekt, am häufigsten natürlich dem archäologischen, gesehen wurde. Die meisten archäologischen Untersuchungen basieren auf der stilkritischen Methode, wie sie von O. Montelius (1903) eingeführt wurde, d. h. die äußere Form von Metallobjekten und ihre räumliche und zeitliche Verbreitung dienten als Basis für die Rekonstruktion technischer Entwicklungen und weitgespannter Handelsbeziehungen. Daneben gibt es sprachwissenschaftlich orientierte Studien zur Metallurgie, die sich naturgemäß auf den östlichen Mittelmeerraum und Vorderasien beschränken. Außerdem existiert eine Reihe naturwissenschaftlicher Untersuchungen zur frühen Metallurgie, die vor allem analytisch-chemisch orientiert sind. Diejenigen, die auf der optischen Spektralanalyse basierten, wurden von Härke (1978) praktisch lückenlos zusammengestellt und kritisch gewürdigt. Im größten Unternehmen dieser Art (Junghans et al. 1960; 1968; 1974) wurden mehr als 20000 prähistorische Metallfunde aus ganz Europa analysiert. Aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung wurde eine »innere Typologie« aufgestellt, d. h. Gruppen gebildet und aus der geographischen Verbreitung dieser Metallsorten auf Produktionszentren und Handelswege geschlossen.

Weniger intensiv sind der alte Bergbau und die Verhüttungstechnologien erforscht. Die Pionierarbeit auf diesem Gebiet wurde von Much (1893) auf dem Mitterberg in Salzburg geleistet, die später von Zschocke und Preuschen (1932) wesentlich erweitert und ergänzt wurde. Die wichtigste Übersicht über alten Bergbau in Europa stammt von Davies (1935). Weniger zuverlässig sind die Angaben von Forbes (1963 und 1964).

Am Mitterberg konnte auch die frühe Aufbereitungs- und Verhüttungstechnologie weitgehend rekonstruiert werden (Czedik-Eysenberg 1958; Moesta 1986). Tylecote (1962 und 1976) gibt eine Übersicht über frühe metallurgische Techniken mit dem Schwergewicht auf der Verhüttung und Verarbeitung.

Zahlenmäßig am schwächsten vertreten sind geochemische Untersuchungen an Lagerstätten. Hier sind vor allem die Arbeiten von Neuninger et al. (1960; 1969) zu nennen, die einen Versuch darstellen, die ostalpinen Kupferlagerstätten im Hinblick auf die Herkunft von Kupferobjekten möglichst vollständig chemisch zu charakterisieren.

Alle angesprochenen Wissenschaftsbereiche haben wichtige Erkenntnisse zur frühen Metallurgie und zum Metallhandel in prähistorischer Zeit beigetragen, aber sie blieben oft auf ihr engeres Fachgebiet beschränkt. Denn immer noch ist in vielen stilkritischen Untersuchungen von »Kupfer« oder gar »Bronze« die Rede, obwohl keine Analysen der Objekte vorliegen, und viele Hypothesen zum frühen Metallhandel gehen einfach von heute bekannten Lagerstätten aus und übernehmen dabei oft recht unkritisch veraltete oder gar falsche Angaben über Erzvorkommen aus der Literatur. Andererseits lassen manche naturwissenschaftlichen Untersuchungen die archäologische und epigraphische Evidenz ganz außer acht und kommen dadurch gelegentlich zu archäologisch trivialen oder auch unwahrscheinlichen Schlußfolgerungen.

Seit einigen Jahren setzt sich deshalb immer mehr die Auffassung durch, daß nur ein interdisziplinärer Ansatz entscheidende Fortschritte zur Lösung der immer noch anstehenden Fragen zur prähistorischen Metallurgie bringen kann. Moderne Untersuchungen in dieser Richtung bewegen sich im Spannungsfeld zwischen Geowissenschaften, analytischer Chemie, Physik, Ingenieurwissenschaften und Archäologie. Dieses interdisziplinäre Forschungsgebiet wird neuerdings häufig »Archäometallurgie« genannt und

beschäftigt sich mit der Gewinnung, Verarbeitung und Verbreitung von Metallen von der Urgeschichte bis zur Neuzeit.
Die vorliegende Arbeit beschreibt eine solche Untersuchung im ägäischen Raum, wobei der Schwerpunkt auf den Gebieten der Lagerstättenforschung und der angewandten Geochemie liegt, die Fragestellung aber vorwiegend archäologisch bedingt ist. Sie lautet: »Woher stammen die frühen Metalle und die Kenntnis der Metallurgie im ägäischen Raum?«
Die Frage ist von nicht geringer Bedeutung für die prähistorische Forschung, und sie wurde auf sehr gegensätzliche Weise beantwortet. Traditionell wurde der ägäische Raum als Zwischenstation bei der Ausbreitung der Zivilisation aus Vorderasien nach Europa angesehen. Ausgehend von dem Postulat, daß alle Erscheinungen der Zivilisation in Vorderasien älter sind als in Europa (»ex oriente lux«), versuchte man, die Vorgeschichte Mitteleuropas mit den Kalendern (Königslisten) Mesopotamiens und Ägyptens in Zusammenhang zu bringen (Montelius 1899). Man bediente sich dabei der sogenannten Kulturkontakt-Methode, die auf dem stilistischen Vergleich von Keramik- und Metallobjekten in benachbarten Regionen beruht. Es wurden Leitformen definiert, deren Verbreitung in Raum und Zeit die »Diffusion« der Zivilisation widerspiegeln und dadurch Anhaltspunkte für die Datierung der europäischen Vorgeschichte liefern sollten (Childe 1957). Die Ägäis und besonders Troja waren ein wichtiger Angelpunkt in diesem Konzept. So wurde z. B. das Auftreten der frühesten Kupfergeräte auf dem Balkan auf den Einfluß der trojanischen Kultur zurückgeführt, die ihrerseits durch stilistische Verbindungen mit dem östlichen Mittelmeerraum in das 3. Jahrtausend v. Chr. datiert werden konnte.
Durch die ^{14}C-Datierung ist dieses diffusionistische Modell in vielen Einzelheiten in Frage gestellt worden. Es stellte sich z. B. heraus, daß die balkanischen Kupfergeräte wesentlich älter als Troja sind und deshalb nicht von dort importiert oder stilistisch inspiriert worden sein können. Besonders C. Renfrew (1973) hat diese und andere Unstimmigkeiten der Kulturkontakt-Chronologie aufgezeigt und für eine autonome Entwicklung der Metallurgie auf dem Balkan und in der Ägäis plädiert. Das würde aber implizieren, daß die komplexen Techniken der extraktiven Metallurgie mehrmals an verschiedenen Orten unabhängig entwickelt wurden, was zwar prinzipiell möglich erscheint, aber von vielen als unwahrscheinlich angesehen wird.
In diesem Widerstreit der Meinungen können geochemische Methoden eine neue Komponente einbringen und die Diskussion auf eine lagerstättenkundlich und metallurgisch gesicherte Basis stellen. Diese Idee ist zwar nicht grundsätzlich neu, aber die methodische Entwicklung geochemischer Analytik ist in den letzten zwei Jahrzehnten so rasch vorangeschritten, daß sich die Aussichten auf Beantwortung wenigstens eines Teils der alten Fragen entscheidend gebessert haben. Die Chancen dafür sollen in dieser Arbeit abgeschätzt werden. Zunächst wird aber im folgenden Kapitel der Rahmen dieser Untersuchung abgesteckt und eine Zusammenfassung der Vorgeschichte des ägäischen Raumes und die Entwicklung der Metallurgie nach dem derzeitigen Kenntnisstand gegeben.

I. Archäometallurgischer Rahmen

1. Die Anfänge der Metallurgie

Als frühestes von Menschenhand geformtes Metallobjekt wird oft ein Kupferanhänger aus der Shanidar-Höhle im nordöstlichen Irak (Abb. 1) angesehen, der in das frühe 9. Jahrtausend v. Chr. datiert wird (Solecki 1969). Der Anhänger war angeblich vollständig korrodiert. Wahrscheinlicher ist wohl, daß er nicht aus Metall bestand, sondern daß Malachit zu seiner Herstellung verwendet worden war. Denn es ist ausgesprochen schwierig, mit primitiven Methoden ein Loch in Kupfer zu bohren, wie Muhly (1987) anmerkte. Dagegen eignet sich Malachit ganz ausgezeichnet dafür. Perlen aus Malachit finden sich nicht selten im Neolithikum Vorderasiens, so etwa in Çayönü in Südostanatolien, das etwa eineinhalb Jahrtausende später datiert wird (Çambel u. Braidwood 1983). Von dort stammen auch die frühesten eindeutigen Metallfunde, vermutlich aus gediegen Kupfer (Muhly 1987). Weitere Funde von Kupferartefakten aus

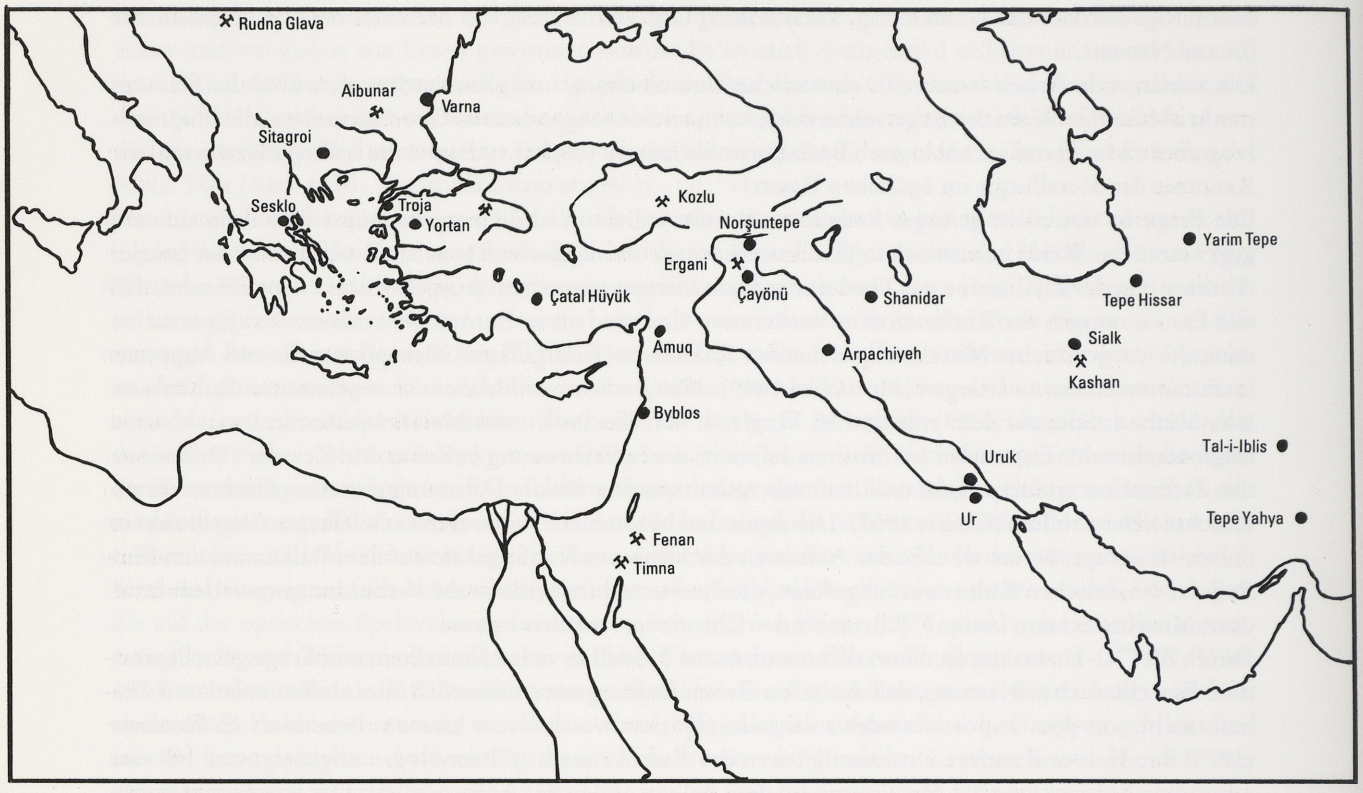


Abb. 1 Geographische Lage von Fundstellen, die im Zusammenhang mit früher Metallurgie stehen.

dem 7. und 6. Jahrtausend v. Chr. in Vorderasien (eine Übersicht geben Wertime 1973 und Muhly 1976) verstärken den Eindruck, daß der Beginn der Metallurgie in einem Gebiet zu suchen ist, das im Norden vom Schwarzen und dem Kaspischen Meer und im Süden und Westen vom Persischen Golf und vom Mittelmeer begrenzt wird.

In diesem Raum wurden auch die frühesten Anzeichen für Getreideanbau festgestellt (Braidwood 1958). Dort scheinen mit Beginn der Nacheiszeit Wildgetreidearten nicht nur gesammelt, sondern auch absichtlich ausgesät worden zu sein, an Stellen, wo sie von Natur aus nie gewachsen wären. Gleichzeitig wurden auch verschiedene Tierarten domestiziert. Die Herausbildung einer stabilen Landwirtschaft führte zu größeren, ständig bewohnten Dorfsiedlungen, deren Auftauchen in Vorderasien den Beginn der neolithischen Lebensweise kennzeichnet. Später kommt als weiteres Merkmal der Gebrauch von Keramik hinzu. Alle diese kulturellen Neuerungen bildeten die Grundlage für ein Anwachsen der Bevölkerungszahlen und ebneten den Weg zu komplexen Gesellschaften und höheren Kulturen.

Metalle spielten im Neolithikum eine geringe Rolle. Vor dem 6. Jahrtausend v. Chr. sind nur Kupferobjekte bekannt, die sehr wahrscheinlich aus gediegen Kupfer hergestellt wurden, das wohl auf der Suche nach nutzbaren Materialien gefunden wurde. Daß bestimmte Gesteine und Minerale, wie etwa Feuerstein, Obsidian, Steatit, Lapislazuli oder Türkis, systematisch gesucht und auch gehandelt wurden, zeigen weit von ihren geologischen Vorkommen entfernte Funde (Renfrew et al. 1966; Hermann 1968). Diese Materialien hatten entweder einen hohen Gebrauchswert (Feuerstein, Obsidian) oder waren wegen ihrer Farbe oder anderer auffälliger Eigenschaften begehrt. Gediegen Kupfer gehört wohl in die zweite Kategorie.

Es ist sehr wahrscheinlich, daß bei der Bearbeitung von gediegen Kupfer auch eine thermische Behandlung erfolgte, denn durch Kaltverformung wird Kupfer härter und spröder. Will man gediegen Kupfer durch einfaches Hämmern in eine neue Form bringen, bilden sich leicht Risse und Sprünge. Deswegen

muß es zwischen den einzelnen Verformungsschritten auf mindestens 200 °C erhitzt (getempert) werden, um seine ursprüngliche Weichheit und Duktilität wieder zu erreichen, wenn es z. B. zu einem dünnen Blech geformt werden soll. Belege dafür, daß neolithische Gesellschaften ohne Kenntnis der extraktiven Metallurgie Kupfer kalt verformt und getempert haben, finden sich außer in Çayönü (Muhly 1987) vor allem bei den indianischen Kulturen Nordamerikas, wo gediegen Kupfer aufgrund der reichen Vorkommen am Lake Superior seit dem 4. Jahrtausend v. Chr. in Gebrauch war (Clarke und Purdy 1982). Interessanterweise taucht Gold erst viel später als Kupfer auf. Mit Ausnahme der Grabbeigaben von Varna aus dem 5. Jahrtausend v. Chr. (Ivanov 1978; Biegel 1985; für Zweifel an der Datierung siehe z. B. Weißhaar 1982), die aus über 3000 Objekten (insgesamt mehr als 6 kg Gold) bestehen, gibt es vor 3000 v. Chr. nur wenige kleine Goldfunde.

Weitgehend unklar ist die nächste Entwicklungsstufe. Wertime (1973) nimmt an, daß die Gußtechnik und damit das Schmelzen von gediegen Kupfer zeitlich vor der Reduktion des Metalls aus seinen Erzen steht. Diese Annahme beruht hauptsächlich auf dem geringen Gehalt an Verunreinigungen in der Mehrzahl der frühen Kupferobjekte. Das Problem ist aber, daß die chemische Zusammensetzung von Kupferobjekten keine sichere Unterscheidung zwischen gediegen Kupfer und Kupfer, erschmolzen aus reinen Kupfererzen, erlaubt (Patterson 1971; Maddin et al. 1977; Rapp 1985). Da die Reduktion von oxidischen Erzen im Prinzip auch unterhalb der Schmelztemperatur durchgeführt werden kann, wäre auch eine umgekehrte Reihenfolge denkbar, zumal die frühesten Kupferobjekte auch aus sehr einfachen Formen bestehen, die nicht zwingend auf eine Herstellung durch Guß schließen lassen.

Andererseits ist eine zufällige Reduktion von Oxiderzen in einem offenen Feuer äußerst unwahrscheinlich, denn dabei können zwar relativ hohe Temperaturen erreicht werden, aber der Sauerstoffpartialdruck ist im allgemeinen relativ hoch. Verschiedene Autoren (z. B. Charles 1980) haben deshalb vorgeschlagen, daß als Farbpigmente verwendete Kupfererze in einem Töpferofen unabsichtlich reduziert worden sein könnten. Auf diese Weise wurden vielleicht kleine Tröpfchen metallischen Kupfers erzeugt, die Neugier und Lust an weiteren Experimenten geweckt hätten. Dies hätte schließlich den Weg zur extraktiven Metallurgie gewiesen.

Für diese Theorie spricht, daß Metallurgie und Keramikerzeugung offenbar eine gemeinsame Wurzel in der Beherrschung des Feuers zur Erreichung hoher Temperaturen und der Kontrolle der Brandatmosphäre haben. Es gibt keine extraktive Metallurgie ohne Keramiktechnologie. Dagegen spricht, daß es sehr viel leichter ist, in einem Töpferofen metallisches Kupfer zu schmelzen als aus Erzen zu reduzieren. Selbst unter günstigen Bedingungen (sehr reine Minerale, innige Vermengung mit Holzkohle) würden dabei wohl nur sehr fein verteilte Tröpfchen entstehen, die nicht immer als Metall erkennbar sind.

Ein anderer denkbarer Weg zur Verhüttung geht vom Tempern gediegenen Kupfers aus; ein Vorgang, der sich vermutlich oft wiederholte. Dabei könnte es gelegentlich zum Schmelzen des Metalls gekommen sein. Die Beobachtung, daß das Metall beim Erkalten die Form seines Behälters annimmt, könnte Interesse geweckt haben, weil dadurch Formen aus Metall zugänglich wurden, die durch Hämmern nur mühsam oder gar nicht erreicht werden konnten. Wenn nun gediegen Kupfer in einfachen Steinformen unter Holzkohlebedeckung zum Schmelzen gebracht worden wäre, könnten dabei auch kleinere Mengen von Oxiderzen, die etwa mit dem gediegenen Kupfer verwachsen waren, reduziert worden sein. Solch ein Vorgang ist auch gut in einem Töpferofen vorstellbar. Es könnte z. B. zuerst gediegen Kupfer in vorgefertigten Formen in einem Töpferofen aufgeschmolzen worden sein. Später wurde vielleicht entdeckt, daß auch die grünen Minerale mit oxidiertem Kupfer auf die gleiche Weise verarbeitet werden konnten, wenn die Form luftdicht verschlossen wurde und zusätzlich noch Holzkohlepulver, Dung oder ähnliche Materialien zugemischt wurden.

Alle diese Überlegungen sind natürlich spekulativ und müssen erst durch Bodenfunde bestätigt werden. Zur Zeit ist auch noch nicht klar, wann und wo die Reduktion von Erzen begann. Die frühesten sicheren Anzeichen für extraktive Metallurgie (Schlacken und Schmelzeinrichtungen) stammen ebenfalls aus Vorderasien. Am Çatal Hüyük wurden neben Kupferobjekten, die bis in die Mitte des 7. Jahrtausends v. Chr. zurückgehen (Mellaart 1967), auch geringe Mengen eines geschmolzenen Materials gefunden (etwa 5800 v. Chr.), das als frühestes Zeugnis für Kupferverhüttung gilt (Neuninger et al. 1964). Neben metalli-

schem Kupfer wurden in diesem Material aber nur Cuprit, Tenorit und Delafossit in einer Glasmatrix gefunden, nicht aber die für Schlacken typischen Eisensilikate. Es scheint sich deshalb nicht um eine metallurgische Schlacke im eigentlichen Sinn zu handeln, sondern um ein oxidisches Kupfererz, das unter reduzierenden Bedingungen erhitzt worden war. Da der Fund aus einer Brandschicht stammt, ist nicht ganz sicher, ob es sich um einen Schmelzversuch oder um das Zufallsprodukt eines Schadfeuers handelt, aber die Fundumstände sprechen für eine absichtliche Erhitzung von Kupfererzen.
Vom Yarim Tepe im nördlichen Irak stammen aus der Mitte des 6. Jahrtausends v. Chr. neben einigen Kupferobjekten auch Kupfererz mit bis zu 10% Eisen (Merpert u. Munchaev 1977). Wirklich gesicherte Zeugnisse von Kupferverhüttung sind deutlich später, um etwa 4000 v. Chr., von Tal-i-Iblis (Dougherty u. Caldwell 1966), vom Tepe Yahya (Lamberg-Karlovsky 1971) und vom Norşuntepe am oberen Euphrat (Hauptmann 1982) bekannt. Um diese Zeit dürfte auch der Abbau und die Verhüttung von Kupfererzen in Fenan, östlich des Toten Meeres, begonnen haben (Hauptmann et al. 1985).
Interessanterweise tauchen etwa zur gleichen Zeit – oder sogar noch etwas früher – Kupferobjekte auf dem Balkan auf, die den Beginn einer blühenden Kupfermetallurgie am Anfang des 4. Jahrtausends v. Chr. anzeigen. Unter diesen Objekten stechen besonders die mit einem Schaftloch versehenen sogenannten kreuzständigen Hacken hervor. Mehrere Untersuchungen haben ergeben, daß diese in einer offenen Gußform hergestellt und anschließend durch Hämmern in ihre endgültige Form gebracht wurden. Sie bestehen meist aus sehr reinem Kupfer, wie fast alle chalkolithischen Metallartefakte auf dem Balkan. Legierungen kamen erst Mitte des 3. Jahrtausends v. Chr. auf. Es wurde deshalb die Vermutung geäußert, daß sich auf dem Balkan eine eigenständige metallurgische Entwicklung vollzogen habe (Renfrew 1969), die auf der Verarbeitung von gediegen Kupfer basierte. Diese zunächst sehr kontrovers diskutierte Idee erfuhr durch die Entdeckung chalkolithischer Kupferbergwerke – die derzeit frühesten datierten Kupferbergwerke überhaupt – bei Rudna Glava (Jovanovič 1971) und Aibunar (Černych 1975) bedeutende Unterstützung. Offensichtlich hat man nicht nur gediegen Kupfer verarbeitet, sondern auch Kupfererze verhüttet.
Jedenfalls sind ab etwa 4000 v. Chr. die Kenntnisse der Kupfergewinnung so weit verbreitet und die metallurgischen Techniken so weit fortgeschritten, daß man an ein zufälliges Zusammentreffen nur schwer glauben mag und es vielleicht nur eine Frage der Zeit ist, bis man in Vorderasien noch frühere Hinweise auf Kupferverhüttung findet. Ein anderer interessanter Fund von Çatal Hüyük mag darauf hindeuten: Neben Kupfer wurde auch Blei gefunden, in Schichten, die etwa 700 Jahre älter sind als die oben diskutierten Schlackenreste. Es handelt sich um längliche Perlen aus Blei, die zusammen mit Kupferperlen zu einer Kette aufgereiht waren (Mellaart 1967). Wegen der großen Seltenheit von gediegen Blei darf man wohl annehmen, daß die Bleifunde vom Çatal Hüyük den frühesten Beleg für pyrometallurgische Metallgewinnung aus Erzen darstellen.
Weitere frühe Bleifunde stammen vom Yarim Tepe (6. Jahrtausend v. Chr., Merpert u. Munchaev 1977) und von Arpachiyeh (5. Jahrtausend v. Chr., Wertime 1973), beide im nördlichen Irak gelegen. Es ist durchaus möglich, daß nicht Kupfer, sondern Blei zuerst aus Erzen gewonnen wurde (Krysko 1979), denn Blei hat einen niedrigen Schmelzpunkt von 327° C und ist selbst in einem offenen Feuer relativ leicht zu verhütten (Tylecote 1962), weil die dabei beteiligten chemischen Reaktionen exotherm verlaufen. Wahrscheinlich wegen des geringen Gebrauchswertes von Blei für die damaligen Menschen hat die Bleigewinnung selbst keine Bedeutung erlangt, aber sie könnte vielleicht den Weg zur Kupfergewinnung gewiesen haben.

Zusammenfassend lassen sich also verschiedene entscheidende Schritte der metallurgischen Entwicklung in Vorderasien und in Europa erkennen:
1) Kaltverformung von gediegen Kupfer.
2) Bearbeitung von gediegen Kupfer unter Anwendung von thermischer Behandlung (Tempern) und gezieltem Härten durch Hämmern.
3) Schmelzen von gediegen Kupfer – vielleicht entdeckt durch Tempern bei hoher Temperatur – und Formgebung durch Abkühlung in vorgefertigten Formen. Dazu müßte gediegen Kupfer zusammen

mit der Form in einem Ofen unter reduzierenden Bedingungen erhitzt worden sein. Dieser Prozeß erinnert an die Herstellung von Keramik, und es ist sehr wahrscheinlich, daß Metallgewinnung und Keramikerzeugung eine gemeinsame pyrotechnologische Wurzel haben.

4) Reduktion von oxidischen Kupfererzen. Es ist möglich, daß dieser Prozeß gelegentlich schon beim Tempern von gediegen Kupfer stattfand. Aber eine gezielte Reduktion zur Erzeugung größerer Mengen von Kupfer muß in einem Ofen unter Bedingungen, die denen der Stufe 3 ähneln, stattgefunden haben. Dabei entsteht aber fast immer eine Schlacke, von der das Kupfer befreit und in einem zweiten Schmelzvorgang gereinigt werden mußte. Spätestens in diesem Stadium trennt sich die Metallurgie von der Keramikerzeugung durch die Entwicklung von speziellen Schmelzöfen.
5) Anwendung komplexer Gußtechniken in offenen und geschlossenen Formen.
6) Herstellung von Legierungen, im allgemeinen zuerst Arsenbronze, die später von Zinnbronze abgelöst wurde.
7) Verhüttung von Sulfiderzen unter abwechselnd oxidierenden und reduzierenden Bedingungen.

Ähnliche technologische Studien wurden schon früher definiert und als Zwischenstufen einer allgemeinen metallurgischen Entwicklung beschrieben (Wertime 1973; Renfrew 1973). Zum Teil wurden diese mit dem Aufbau der Lagerstätten in den ariden Gebieten Vorderasiens begründet (Charles 1980). Die Gefahr des Dogmatismus in der Form eines »technologischen Diffusionismus« ist dabei nicht zu übersehen. Denn die Übergänge zwischen den oben aufgezählten Entwicklungsschritten sind fließend und die Reihenfolge ist keineswegs technologisch zwingend. Zudem ist die Rolle des Bleis dabei noch völlig ungeklärt.

Die zeitliche Priorität der Metallverwendung liegt eindeutig bei den vorderasiatischen Kulturen, aber die Entwicklung verlief keineswegs in allen Regionen nach dem gleichen Schema. Inwieweit daraus eine mehrmalige unabhängige Entwicklung metallurgischer Technologien abgeleitet werden kann, bleibt dahingestellt. Es ist immerhin auffallend, daß mit Beginn des 4. Jahrtausends v. Chr. die extraktive Metallurgie außerordentlich weite Verbreitung gefunden hat, während davor offenbar nur Objekte aus gediegen Kupfer gefertigt wurden, sofern das Material identifiziert werden konnte. Dies könnte der Ausdruck einer Phase beschleunigter Entwicklung sein, wie sie z. B. beim Übergang zum Ackerbau beobachtet wird (»neolithische Revolution«). Es ist zu früh, aufgrund der derzeitigen Fundsituation von einer »metallurgischen Revolution« zu sprechen, weil jede neue Grabung den Befund noch wesentlich verändern kann. Aber es ist unverkennbar, daß sich eine sprunghafte Entwicklung abzeichnet, deren Ursachen weitgehend im Dunkeln liegen. Auf jeden Fall wird man aber wahrscheinlich selbst in Phasen einer beschleunigten Entwicklung von einem vielstufigen evolutionären Prozeß ausgehen müssen, in Übereinstimmung mit dem technikgeschichtlichen Theorem, daß alle bedeutenden Innovationen über viele kleine Zwischenschritte verlaufen.

2. Die Entwicklung der Metallurgie in der Ägäis

Das mit Inseln übersäte Ägäische Meer bildet das Zentrum einer geographisch einheitlichen Region. Ihre Charakteristika sind langgestreckte Küsten mit gut zugänglichen Stränden und kleine, fruchtbare Küstenebenen und Flußtäler, die in die benachbarten gebirgigen Landmassen hineingreifen. Die neolithische Lebensweise dürfte bereits im 7. Jahrtausend v. Chr. über Anatolien in diesen Raum gelangt sein und erhielt sich bis in die zweite Hälfte des 4. Jahrtausends v. Chr. Die neolithischen Bauerngemeinschaften bevorzugten die Flachlandgebiete wie die Ebene von Thessalien, aber die Inseln wurden zumindest aufgesucht und waren ab etwa 5000 v. Chr. bewohnt (Renfrew 1972). Kennzeichnend für diese Periode ist, daß die kulturelle Entwicklung in verschiedenen Kleinräumen getrennt erfolgte.

Nach dem bisher vorliegenden Fundmaterial zu schließen, setzt die Verwendung von Metallen in der Ägäis später ein als in Vorderasien und auf dem Balkan. Im späten Neolithikum und Chalkolithikum (Tab. 1) tauchen nur vereinzelt Kupferobjekte und ganz selten Objekte aus Gold auf. In Abb. 2 ist die geographische Verteilung dieser meist unscheinbaren Funde dargestellt.

Periode	Abkürzung	Kennzeichnung	Altersstellung (Jahre v. Chr.)
Spätes Paläolithikum	–	Jäger, Sammler, Fischfang	6500
Neolithikum	–	Ackerbau, Viehzucht, feste Siedlungen	ca. 5000
Spätneolithikum	–	regionale Differenzierung, Besiedlung der Inseln	ca. 4000
Endneolithikum/ Chalkolithikum	–	Anbau von Wein und Oliven (?), Auftauchen von Metall, protourbane Siedlungen	ca. 3000
Frühe Bronzezeit	FBZ	befestigte Siedlungen (»Städte«), Verwendung von Au, Ag, Cu, Sn, Pb	2200
Mittlere Bronzezeit	MBZ	kultureller Rückgang auf dem Festland und den Inseln, Palastkultur in Kreta	1600
Späte Bronzezeit	SBZ	mykenische Palastkultur, wirtschaftliche und kulturelle Vormachtsstellung im östlichen Mittelmeerraum, Zinnbronze wichtigster Werkstoff. Beginn d. schriftl. Überlieferung	1200
»Dunkles Zeitalter«	–	Bevölkerungsrückgang u. -bewegung, schriftlose Zeit	800
Eisenzeit	–	Renaissance der griechischen Kultur	

Tab. 1 Überblick über die wichtigsten Perioden der ägäischen Vorgeschichte. Diese Einteilung ist im wesentlichen Renfrew (1972) entnommen, wobei die mit »ca.« bezeichneten Zeitangaben gerundet wurden. Ein wichtiges Eckdatum für den Beginn der frühen Bronzezeit, nämlich der Beginn der Siedlung Troja I, wurde vor kurzem an Proben vom Beşiktepe mittels der Radiokohlenstoff- und Thermolumineszenzmethoden bestimmt (Wagner et al. 1986). Es stimmt mit 3000 v. Chr. gut mit dem aus archäologischen Gründen wahrscheinlichsten Zeitpunkt überein.

Das Fehlen eines geographischen Schwerpunktes der Funde und die große Varietät der Formen der spätneolithischen Metallobjekte werden meist als Hinweis interpretiert, daß die Anstöße zur Metallurgie in der Ägäis von Südosteuropa bzw. von Anatolien ausgingen. Auf welche Weise diese Anstöße vermittelt wurden, läßt sich wohl kaum feststellen. An erster Stelle wird man an den Transport von Metallobjekten (»Handel«) denken müssen. Aber in Sitagroi wurden in der Phase III (ca. 4000 v. Chr.) nicht nur einfache Kupfergeräte gefunden, sondern auch Schlacken (Renfrew 1972), so daß offensichtlich nicht nur Metallobjekte, sondern auch gewisse metallurgische Kenntnisse im späten Neolithikum in den ägäischen Raum gelangt sind. Auch auf der Kykladeninsel Kea scheint im 4. Jahrtausend v. Chr. bereits Kupfer verhüttet worden zu sein (Coleman 1977). Insgesamt aber hatte sich im 4. Jahrtausend Metall als Werkstoff in der Ägäis noch nicht durchgesetzt.

Um etwa 3000 v. Chr. kündigt sich eine grundlegende Veränderung der Verhältnisse an, die sich zunächst in Nordwestanatolien abzeichnet. In Troja, in Poliochni auf der benachbarten Insel Lemnos, in Thermi auf Lesbos und an anderen Orten tauchen in dieser Zeit in Reihen ausgerichtete Langhäuser an Straßen auf. Diese stadtähnlichen Ansiedlungen sind oft von Mauern umgeben, und als typisch kann die Verwendung von Metall gelten, wodurch der Beginn der ägäischen Frühbronzezeit (FBZ) markiert wird.

Von insgesamt etwa 350 datierbaren Metallfunden aus dieser Zeit, die als erste Phase der ägäischen Frühbronzezeit bezeichnet wird, stammen etwa 85% aus der Nordostägäis und der Rest größtenteils von Kreta. Typologisch und im Forminventar unterscheiden sich diese beiden Kulturkreise deutlich, so daß Branigan (1974) von zwei unabhängigen Metallurgiezentren am Beginn der Frühbronzezeit ausging.

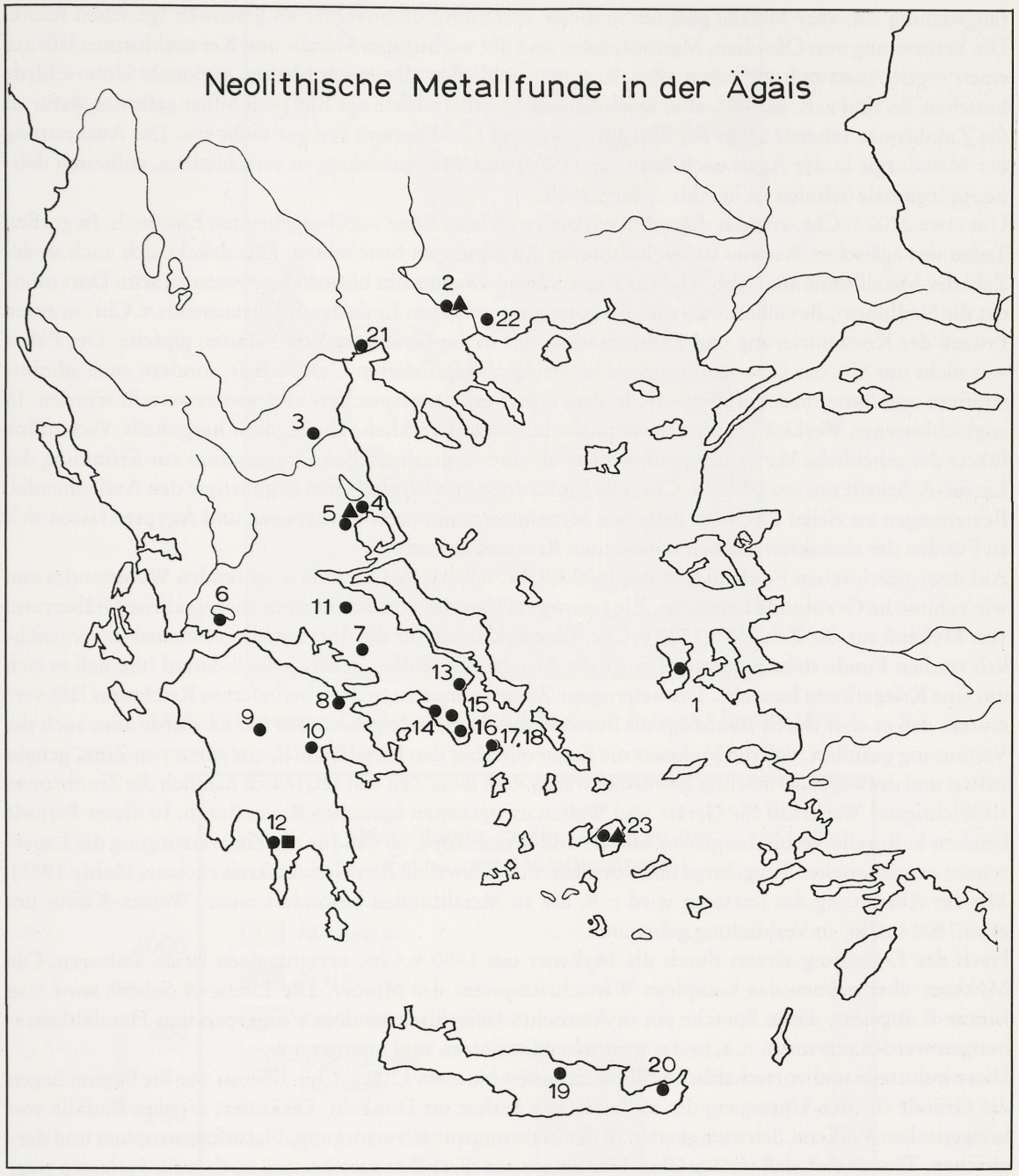


Abb. 2 Verbreitung neolithischer und chalkolithischer Metallfunde in der Ägäis (nach Branigan [1974] und McGeehan-Liritzis [1983], ergänzt durch Zachos [1987], Séfériadès [1985] und Hauptmann [1971]): 1 Emporio. – 2 Sitagroi. – 3 Pevkakia. – 4 Dhimini. – 5 Sesklo. – 6 »Mesolonghi«. – 7 Ag. Marina (Phokis). – 8 Korinth. – 9 »Peloponnes». – 10 Lerna. – 11 Levandia. – 12 Alepotrypa. – 13 Marathon. – 14 »Athen«. – 15 Sparta. – 16 Kitsos. – 17 Kephala. – 18 Paoura. – 19 Knossos. – 20 Mochlos. – 21 Goña. – 22 Dikili Tash. – 23 Zeushöhle, Naxos. – Dreiecke kennzeichnen Goldobjekte, runde Punkte solche aus Kupfer, Quadrate solche aus Silber.

Erst um die Mitte des 3. Jahrtausends v. Chr. kommt diese Entwicklung im gesamten ägäischen Raum zum Durchbruch. Der Aufschwung der Metallurgie setzt sich fort und erreicht mit mehr als 1500 Metallfunden in der zweiten Phase der Frühbronzezeit (etwa 2600-2300 v. Chr.) einen vorläufigen Höhepunkt. Zwar nimmt der trojanische Kulturkreis mit mehr als 75% der datierbaren Funde weiterhin eine Vor-

rangstellung ein, aber Metalle gehören in dieser Zeit zum Fundinventar im gesamten ägäischen Raum. Die Verbreitung von Obsidian, Marmoridolen und der wichtigsten Metall- und Keramikformen läßt auf einen regen Austausch zwischen allen Regionen schließen. Dennoch bleiben regionale Unterschiede bestehen. So sind z. B. ca. 40% aller kykladischen Metallartefakte aus Blei oder Silber gefertigt, dafür ist die Zinnbronze seltener als in der Nordostägäis, und Gold kommt fast gar nicht vor. Die Ausbreitung der Metallurgie in der Ägäis nach Branigan (1974) und ihre Aufteilung in verschiedene, stilistisch definierte regionale Schulen ist in Abb. 3 dargestellt.

Um etwa 2200 v. Chr. erleidet diese Aufwärtsentwicklung einen vorübergehenden Einbruch. In großen Teilen des ägäischen Raumes ist ein kultureller Rückgang zu beobachten. Das drückt sich auch in der Zahl der Metallfunde aus (Abb. 4). Nur Kreta scheint davon nicht betroffen gewesen zu sein. Dort mündet die Siedlungs-, Bevölkerungs- und Kulturexpansion gegen Ende des 3. Jahrtausends v. Chr. in einen Prozeß der Konzentrierung und Zentralisation, der in der Gründung von Palästen gipfelte. Der Palast war nicht nur Sitz des Oberhauptes einer hierarchisch gegliederten Gesellschaft, sondern auch administratives und ökonomisches Zentrum, in dem Güter erfaßt, gespeichert und wieder verteilt wurden. In angeschlossenen Werkstätten wurden exquisite kunsthandwerkliche Erzeugnisse hergestellt. Vermutlich führte der erhebliche Verwaltungsaufwand solch einer zentralistischen Organisation zur Erfindung der Linear-A-Schrift um etwa 1700 v. Chr. Die Einführung von Segelschiffen begünstigte den Außenhandel. Beziehungen zu vielen Orten im östlichen Mittelmeerraum, nach Vorderasien und Ägypten lassen sich an Funden der charakteristischen minoischen Keramik ablesen.

Auf dem griechischen Festland tritt um 1600 v. Chr. wieder eine Periode wachsenden Wohlstandes ein, wie zahlreiche Grabfunde bezeugen. Einzigartig ist aber das von Schliemann ausgegrabene Gräberrund von Mykenä aus der Zeit 1550-1500 v. Chr. Eine Erklärung für die dort zutage getretenen unvergleichlich reichen Funde steht noch aus. Die große Anzahl von Waffen deutet jedoch darauf hin, daß es sich um eine Kriegerkaste handelte. Die heterogene Zusammensetzung des überlieferten Reichtums läßt vermuten, daß er eher durch Raubzüge als durch Handel zustande gekommen ist. Es wurde aber auch die Vermutung geäußert, daß die Mykener die Kontrolle über den Metallhandel, vor allem von Zinn, gehabt hätten und deswegen so mächtig geworden wären. Um diese Zeit erst setzte sich nämlich die Zinnbronze als wichtigster Werkstoff für Geräte und Waffen im gesamten ägäischen Raum durch. In dieser Periode betehen kulturelle Verbindungen zu Mittel- und Westeuropa, so daß für die Zinnversorgung die Lagerstätten im sächsischen Erzgebirge und vor allem in Cornwall in den Gesichtskreis rücken (Muhly 1985). Mit der Aubeutung der letzteren wird z. B. die an Metallfunden besonders reiche Wessex-Kultur um etwa 1800 v. Chr. in Verbindung gebracht.

Nach der Eroberung Kretas durch die Mykener um 1450 v. Chr. verschmelzen beide Kulturen. Die Mykener übernehmen das komplexe Wirtschaftssystem der Minoer. Die Linear-A-Schrift wird von Linear-B abgelöst, deren Sprache ein mykenisches Griechisch ist. Die weitgespannten Handelsbeziehungen werden erweitert, u. a. in das westliche Mittelmeer, und intensiviert.

Diese kulturelle und wirtschaftliche Blütezeit dauert bis etwa 1200 v. Chr. Ebenso wie ihr Beginn liegen die Gründe für den Untergang der mykenischen Kultur im Dunkeln. Diskutiert werden Einfälle von kriegerischen Völkern, Schwierigkeiten in der Nahrungsmittelversorgung, Naturkatastrophen und dergleichen. Tatsache ist, daß viele größere Siedlungen um diese Zeit zerstört und noch mehr verlassen werden. Es gibt zwar eine gewisse Besiedlungskontinuität kleinerer Dorfgemeinschaften, aber die Palastorganisation bricht zusammen und mit ihr verschwindet auch die Verwendung der Schrift; es beginnt das »Dunkle Zeitalter«. Dieser kulturelle Rückschlag, der von einer Abnahme der Bevölkerungszahl begleitet ist, dauert bis zum Beginn der Eisenzeit um 800 v. Chr.

Demnach verlief die kulturelle und technologische Entwicklung in der Ägäis – ähnlich wie in anderen Kulturräumen – keineswegs stetig und gleichmäßig. Perioden des Fortschritts wechselten mit Zeiten der Stagnation und des Rückschritts und es gab regionale Unterschiede. Die traditionelle Erklärung für solche Phänomene beruht auf der Annahme von Bevölkerungsbewegungen. Neuerungen im technologischen Bereich, wie die Einführung der Metallurgie, werden auf Neuankömmlinge aus anderen, höherstehenden Kulturkreisen zurückgeführt. Entsprechend werden Rückschritte meist durch kriegerische Ein-

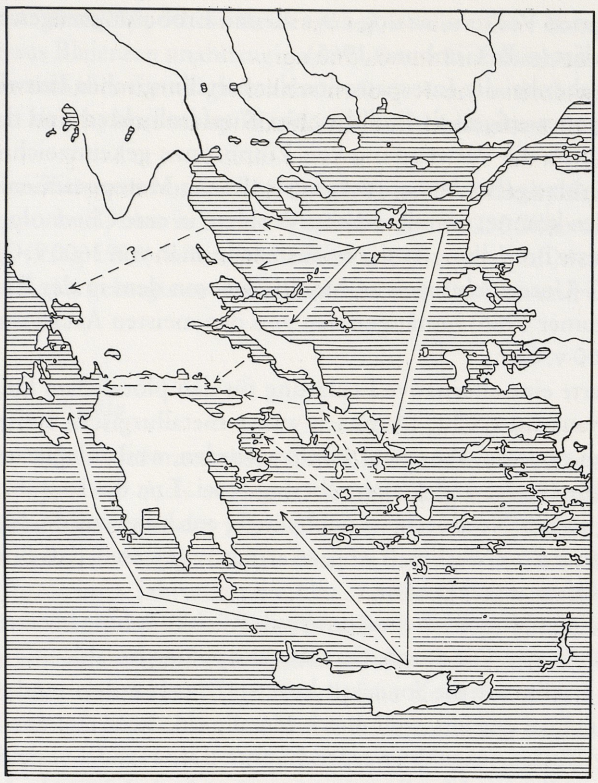


Abb. 3 Ursprung und Ausbreitung der Metallurgie in der Ägäis (nach Branigan 1974).

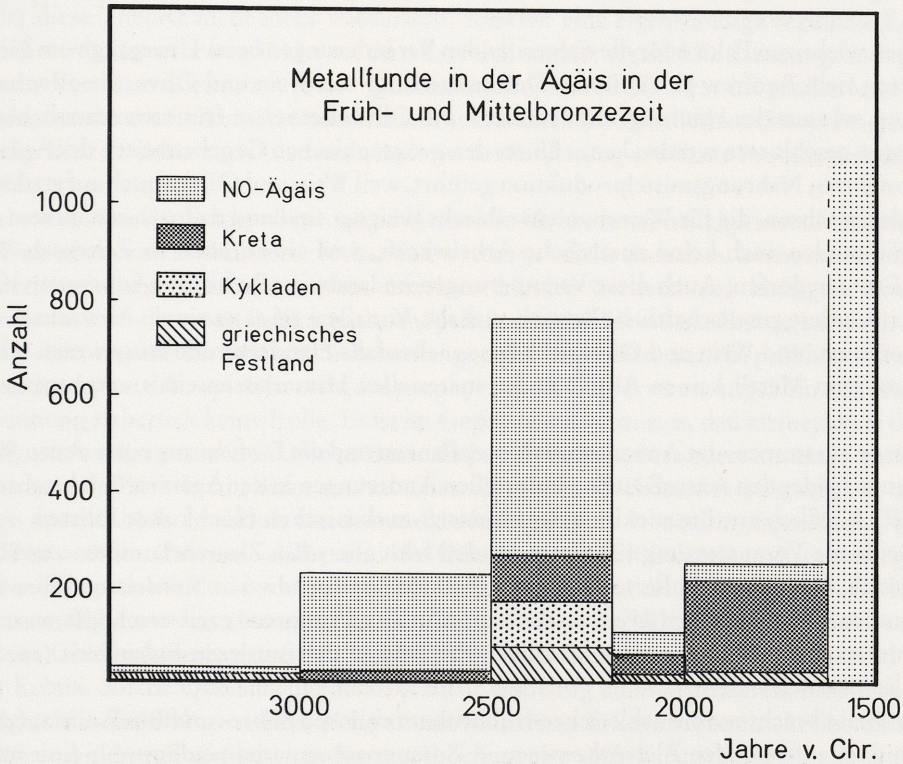


Abb. 4 Häufigkeit von Metallfunden in der Ägäis vor 1500 v. Chr.

fälle von weniger zivilisierten Völkern, analog etwa zu den Eroberungszügen der Mongolen und Turkvölker im Mittelalter, erklärt (z.B. Gimbutas 1965).
Solch ein Ansatz bereitet aber bei der Interpretation der metallurgischen Entwicklung in der Ägäis Probleme. Denn abgesehen von wenigen chalkolithischen Kupferobjekten sind deren Anfänge im trojanischen Kulturkreis v.a. durch die Verwendung von Zinnbronze gekennzeichnet. Bisher sind nirgends ältere Objekte aus Zinnbronze gefunden worden, auch nicht in Mesopotamien. Solange Troja nur durch Stilvergleich datiert werden konnte, mündete dieses Problem in eine Chronologiediskussion. Die Datierungsansätze für die früheste Besiedlung Trojas reichen denn auch von 3600 v. Chr. bis 2500 v. Chr. Thermolumineszenz- und ^{14}C-Untersuchungen an Materialien von dem in der Ebene von Troja gelegenen Beşiktepe (Wagner u. Kromer 1986) bestätigen den von den meisten Archäologen akzeptierten Beginn der Siedlung um etwa 3000 v. Chr.
Renfrew (1972) präsentierte eine alternative Erklärung für den plötzlichen kulturellen und technologischen Wandel im 3. Jahrtausend v. Chr. Demnach wären metallurgische Kenntnisse in der Ägäis über lange Zeit zwar vorhanden gewesen, aber nicht genutzt worden, weil unlegiertes Kupfer nicht unbedingt dem Stein als Werkstoff für Geräte und Waffen überlegen sei. Erst die Einführung der Zinnbronze, die nach Renfrews Meinung in der Nordostägäis unabhängig entdeckt wurde, hätte den Aufschwung der Metallurgie ausgelöst. Dieser neue Werkstoff wäre so attraktiv gewesen, daß eine schnell steigende Nachfrage eine erhöhte Produktion angeregt hätte.
Nach Renfrew stellt dies einen Modellfall einer positiven Rückkopplung in einem gesellschaftlichen Subsystem, nämlich der Technik, dar. Die durch diese Rückkopplung beschleunigten Veränderungen hätten auch andere Subsysteme erfaßt, wie die Sozialstruktur und das Handels- und Kommunikationssystem. Es trat eine soziale Differenzierung ein, weil durch Metalle eine neue Art von Reichtum erworben und Macht aufgrund besserer Waffen ausgeübt werden konnte. Der Handel veränderte sich, weil im Metall und vielleicht in den Rohstoffen zur Metallgewinnung erstmals ein lohnendes Handelsobjekt zur Verfügung stand, das überall begehrt, aber ungleichmäßig verbreitet war. Diese sekundären Veränderungen hätten ihrerseits auf den auslösenden Faktor, die Metallurgie, zurückgewirkt und die Nachfrage weiter erhöht.
Einen zweiten wichtigen Faktor für die tiefgreifenden Veränderungen beim Übergang vom Neolithikum zur Bronzezeit sieht Renfrew (1972) in der Domestizierung von Wein und Olive, die offenbar um 3000 v. Chr. gelang, wie aus der Häufung von Trauben- und Olivenkernen in frühbronzezeitlichen Fundzusammenhängen geschlossen werden kann. Unter den geographischen Gegebenheiten der Ägäis habe dies zu einer vermehrten Nahrungsmittelproduktion geführt, weil Wein und Oliven auch auf steilem Gelände und auf Böden wachsen, die für Weizenanbau schlecht geeignet sind und dadurch mit diesem nicht konkurrieren. Sie binden auch keine zusätzliche Arbeitskraft, weil sie zu anderen Zeiten als Weizen der Pflege und Ernte bedürfen. Auch diese Veränderungen im landwirtschaftlichen Subsystem hätten Auswirkungen auf andere gesellschaftliche Bereiche gehabt. Vor allem sei es zu einem Anwachsen der Bevölkerung gekommen, und Wein und Olivenöl könnten ebenfalls Handelsprodukte gewesen sein, die aber im Gegensatz zum Metall keinen Anteil an der materiellen Hinterlassenschaft vergangener Kulturen haben.
Beide Faktoren zusammen, der Anbau neuer Nutzpflanzen und die Einführung eines neuen Werkstoffes hätten den entscheidenden Anstoß zu den kulturellen Änderungen in der Ägäis im 3. Jahrtausend v. Chr. gegeben, die schließlich zur Entwicklung der minoisch-mykenischen Hochkultur führten.
Eine entscheidende Voraussetzung für dieses Modell fehlt aber: Ein Zinnvorkommen zur Herstellung von Zinnbronze. Deshalb spekulierte Renfrew (1967), daß es irgendwo in Nordostanatolien ein kleines Zinnvorkommen gegeben haben könnte, das schon in der Frühbronzezeit erschöpft war. Auf diese Weise könnte auch der Rückgang der Metallverarbeitung in der mittleren Bronzezeit (ca. 2000-1500 v. Chr.) erklärt werden.
In ähnlicher Weise brachte er die zahlreichen frühbronzezeitlichen Silber- und Bleifunde auf den Kykladen mit den dort auftretenden Bleivorkommen in Zusammenhang und plädierte für eine autochthone Entwicklung der kykladischen Blei-Silbermetallurgie (Renfrew 1967). Ähnlich wie bei der Kupfermetal-

lurgie auf dem Balkan wirft diese Hypothese die Frage auf, ob der relativ komplizierte zweistufige Prozeß der Silbergewinnung aus Bleierzen unabhängig von äußeren Einflüssen an verschiedenen Orten entdeckt wurde. Selbst wenn man dies für möglich halten würde, wäre es doch erstaunlich, daß eine derartige Erfindung gerade auf den kykladischen Inseln, die im Neolithikum noch sehr spärlich besiedelt waren, erfolgte.
Denn im Gegensatz zu den Zinnbronzen der Nordostägäis gehören die kykladischen Silberfunde nicht zu den frühesten überhaupt. In Byblos in Syrien wurden mehr als 230 Silberartefakte aus der Mitte des 4. Jahrtausends geborgen (Prag 1978). Um diese Zeit war Silber auch in Mesopotamien, Ägypen und Anatolien bekannt. In die Ägäis gelangte es erst im 3. Jahrtausend v. Chr. und wurde deshalb traditionell als Importprodukt angesehen.

3. Erzvorkommen in der Ägäis

In Diskussionen dieser Art spielen Informationen über Erzlagerstätten eine wichtige Rolle und oft wird von der Existenz einer Lagerstätte auch auf deren Ausbeutung in prähistorischer Zeit geschlossen. Umgekehrt werden manchmal aufgrund des vermeintlichen oder tatsächlichen Fehlens von nahegelegenen Erzen weitreichende Theorien aufgestellt. Ein Beispiel dafür ist die These Branigans (1966), daß die Bewohner der ägäischen Inseln im 3. Jahrtausend v. Chr. Zinn und Silber aus dem westlichen Mittelmeer bezogen hätten. Er ging davon aus, daß diese beiden Metalle in der Ägäis nicht vorkommen und betrachtete die in der Literatur beschriebenen Lagerstätten auf der Iberischen Halbinsel und in Italien als Anreize für ägäische Kontakte mit diesem Regionen. Solche Kontakte waren auch aufgrund typologischer Untersuchungen für möglich gehalten worden. Die Verwendung beider Metalle in der ägäischen Frühbronzezeit interpretierte er als Beweis dafür (»the tin and silver deposits of Spain, Sardinia, and Italy are the cause, and the Aegean influences on Italian metalworking are the effect, of a process which seems to have developed towards the end of the 3rd millennium B. C.«).
Vom selben Autor stammt die bisher umfassendste Studie zur frühen Metallurgie in der Ägäis (Branigan 1974), in der diese Theorie nicht mehr wiederholt, sondern eine eigenständige regionale Entwicklung angenommen wird, nunmehr begründet auf dem Erzreichtum der Ägäis! Die dabei zugrundegelegte Verbreitungskarte von Erzvorkommen (ohne Quellenangabe) vermittelt zwar im großen und ganzen ein richtiges Bild, beruht aber in Details offensichtlich auf falschen Informationen. Dieses Beispiel stellt keineswegs einen Einzelfall dar und illustriert nur die in der Einleitung erwähnte Problematik archäometallurgischer Untersuchungen.
Im allgemeinen ist aber die Frage, ob genügend Rohstoffe für eine unabhängige metallurgische Entwicklung in einem bestimmten Kulturraum vorhanden waren, gar nicht einfach zu beantworten. Zusammenfassende Berichte über Rohstoffreserven einzelner Länder basieren auf heutigen ökonomischen Gesichtspunkten, die selbstverständlich nicht auf prähistorische Perioden übertragbar sind. Denn es ist keineswegs sicher, ob eine aus heutiger Sicht umfangreiche Lagerstätte auch in prähistorischer Zeit ausgebeutet werden konnte. So spielten etwa die porphyrischen Kupfervererzungen für die prähistorische Kupfergewinnung sicherlich keine Rolle. Es ist im Gegenteil zu vermuten, daß kleine, heute oft als unbedeutend eingestufte Vorkommen für den prähistorischen Bergmann besonders attraktiv waren, der vorwiegend reiche, oberflächennahe Erze suchte. Dies führt schließlich zu der Möglichkeit, daß gewisse Vorkommen durch Abbau erschöpft wurden und deshalb gar nicht in metallogenetischen Übersichtsarbeiten erwähnt werden. Beispiele dafür sind die frühesten zur Zeit bekannten Kupferbergwerke von Rudna Glava in Jugoslawien und von Aibunar in Bulgarien, die nur als kleinere Magnetit- bzw. Barytvorkommen erwähnt werden (Dunning et al. 1982). Ähnlich verhält es sich mit den von Herodot beschriebenen Goldvorkommen auf den Inseln Thasos und Siphnos und dem von Strabo erwähnten Kupfer auf Euböa. Solche Quellen sind aber oft nicht eindeutig zu interpretieren, und man ist deshalb leicht geneigt, sie in Zweifel zu ziehen, wenn sie mit modernen Erkenntnissen nicht übereinstimmen.
Andererseits sind in metallogenetischen Karten üblicherweise auch Kleinstvorkommen und Indikationen verzeichnet, die ebenfalls ein falsches Bild in umgekehrter Richtung vermitteln können. So ist es



Abb. 5 Kupfervorkommen in der Ägäis.

nicht verwunderlich, daß die Einschätzungen des prähistorischen Rohstoffpotentials zur Metallgewinnung stark unterschiedlich ausfallen können. Während etwa Muhly (1973), der in seiner Arbeit über Produktion und Handel von Kupfer und Zinn in der Bronzezeit viele lagerstättenkundliche Quellen einbezieht, feststellt, daß in der Ägäis keine bedeutende Kupferlagerstätte existiert, verzeichnet Branigan (1974) insgesamt 55 Vorkommen, allerdings – wie schon erwähnt – ohne Quellenangabe. Gegenwärtig fallen in Griechenland Kupfererze nur als beibrechende Minerale der in Förderung stehenden Kieserz-Lagerstätten auf der Chalkidike an. Seit Ende des vergangenen Jahrhunderts wurden kupferhaltige Pyriterze bei Ermioni in der Argolis (Nordost-Peloponnes) abgebaut. Die Fördermenge betrug zwischen 2000 und 5000 t pro Jahr und ist seit 1977 eingestellt. In Westanatolien werden z. Z. ebenfalls keine Kupfererze gefördert.

Nichtwirtschaftliche Kupfervererzungen treten in einigen Ophiolitkomplexen zusammen mit Pyrit bei Evzoni an der Grenze zu Jugoslawien, ca. 35 km westlich von Grevena bei Perivoli im nördlichen Pindos-Gebirge, im mittleren Othrys-Gebirge und an der Südost-Spitze der Halbinsel Sithonia (Chalkidike) auf. In Nordostgriechenland sind mehrere porphyrische Kupfervererzungen bekannt, die bisher ebenfalls keine wirtschaftliche Bedeutung erlangt haben. Außerdem sind ca. 80 Kleinvorkommen und Indikationen bekannt (Abb. 5).

Anders ist die Situation bei Blei und Zink, wo nahezu 200 Einzelvorkommen bekannt sind sowie eine Reihe (ehemals) wirtschaftlicher Lagerstätten wie Laurion (Attika), Kassandra (Nordost-Chalkidike), Thasos (Ostmakedonien), Kirki (Thrakien) und Balya (Biga-Halbinsel) (Abb. 6). Für die Silbergewinnung kommen in der Ägäis praktisch nur Bleierze in Frage. Die Silbergehalte in anderen Sulfiderzen konnten in prähistorischer Zeit nicht genutzt werden, und nennenswerte Mengen von reinen Silbermineralen sind nicht bekannt.

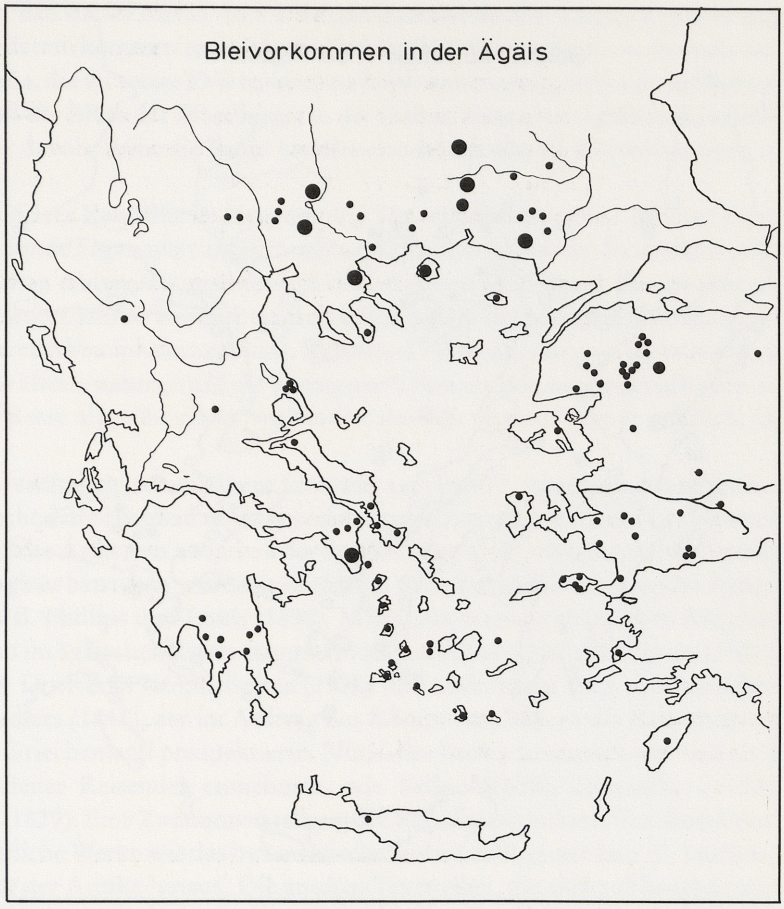


Abb. 6 Bleivorkommen in der Ägäis. Große Punkte stellen größere Lagerstättenbezirke dar.

In Nordgriechenland gibt es zahlreiche Goldvorkommen, vor allem in Mittel- und Ostmakedonien, die schon im Altertum weithin bekannt waren. Es handelt sich um Gold-Quarzgänge im Serbo-Makedonischen Grundgebirge, porphyrische Kupfervererzungen mit hohem Goldgehalt und Seifengold in kontinentalen Neogensedimenten und in rezenten Flußschottern im Bereich des Serbo-Makedonischen Massivs. Außerdem tritt Gold in tertiären Daziten und Andesiten auf der Biga-Halbinsel in Quarzgängen an mehreren Stellen im Menderes-Massiv und bei Izmir sowie als Seifengold in der Nähe von Sardes auf (Abb. 7).

Die Eintragungen in den Abbildungen 5-7 beruhen im wesentlichen auf der metallogenetischen Karte Griechenlands (Zachos u. Maratos 1965), auf Ryan (1960) und den türkischen MTA-Berichten über Blei-, Kupfer- und Zinklagerstätten (1972) und über Arsen-, Quecksilber-, Antimon- und Goldlagerstätten (1970) sowie auf Mack (1964), Dunning et al. (1982) und Feldhaus (1984). Sie stellen gewissermaßen eine Maximalzahl dar, die sicher nach unten revidiert werden muß. Die Methoden, mit denen man zu einer realistischen Abschätzung der Anzahl möglicher prähistorischer Erzquellen kommen kann, werden im Verlauf dieser Arbeit beschrieben.

Die Zusammenfassung der modernen lagerstättenkundlichen Information (Abb. 5-7) zeigt also, daß es im ägäischen Raum im Prinzip eine ausreichende Erzbasis für eine autochthone metallurgische Entwicklung gab. Dies gilt besonders für Blei und Silber, aber auch an Kupfererzen sollte es trotz des Fehlens größerer Lagerstätten keinen Mangel gegeben haben.

Einerseits liegt das an den relativ geringen Metallmengen, die zur Diskussion stehen. Die Masse der sicher datierbaren frühbronzezeitlichen Funde im ägäischen Raum dürfte 100 kg Kupfer kaum übersteigen. Selbst wenn man unterstellt, daß nur ein kleiner Bruchteil des damals in Gebrauch befindlichen



Abb. 7 Goldvorkommen im ägäischen Raum. Offene Kreise bezeichnen die in der antiken Literatur erwähnten Goldvorkommen.

Kupfers gefunden wurde, dann waren vielleicht wenige, höchstens einige Dutzend Tonnen im Umlauf. Da sicher nur Reicherze verarbeitet wurden, war zu deren Produktion nur eine Größenordnung von einigen hundert Tonnen Erz nötig.

Andererseits sind neben den zahlreichen kleineren Vorkommen und Imprägnationen von Kupfer (Abb. 5) noch die meisten Bleilagerstätten (Abb. 6) für eine mögliche Kupfergewinnung zu berücksichtigen, weil sie in vielen Fällen ebenfalls akzessorisch Kupferminerale führen. Schließlich gibt es eine große Zahl von Eisenerzvorkommen und -lagerstätten, die oft neben Mangan auch Blei, Zink, Kupfer, Arsen, Silber und Gold enthalten (Dunning et al. 1982), so daß theoretisch mehrere Hundert Vorkommen im ägäischen Raum für die Herkunft der chalkolithischen und frühbronzezeitlichen Metalle in Betracht zu ziehen sind.

Anders stellt sich die Situation in der späten Bronzezeit und noch mehr im klassischen Griechenland dar. In diesen Perioden ist die Masse der Kupfer- und Bronzefunde so groß, daß selbst mehrere Kleinvorkommen zu deren Produktion nicht ausgereicht hätten, und man eine gewissermaßen industrielle Kupferproduktion annehmen muß. Diese muß nicht in der Ägäis stattgefunden haben, denn weitreichende Handelsverbindungen waren bereits etabliert. Eine wichtige Handelsform von Kupfer scheinen damals die sogenannten »Ochsenhautbarren« von etwa 40-50 kg gewesen zu ein, die von Syrien bis Sardinien gefunden werden (Muhly 1977). Zwar ist die Herkunft dieser Barren unbekannt, und es ist nicht einmal sicher, ob sie von einem einzigen Produktionszentrum stammen. Aber die gesamte textliche und archäologische Evidenz macht ihre Entstehung im ägäischen Raum unwahrscheinlich. Auf den mykenischen Schrifttafeln wird Kupfer (oder vielleicht Bronze) zwar häufig erwähnt, aber es gibt keinen Hinweis auf dessen Herkunft.

Bei den antiken Schriftstellern spielen Themen wie Bergbau und Metallgewinnung nur eine untergeordnete Rolle. Dennoch wird z. B. Zypern häufig in Verbindung mit Kupferproduktion erwähnt. Plinius

(N.H. XXXIV 2.2) glaubt sogar, daß dieses Metall dort erstmals entdeckt wurde. Dagegen gibt es nur eine einzige Erwähnung von Kupfervorkommen in der Ägäis. Strabo (X.1.9) berichtet von ehemals reichen Kupfervorkommen auf Euböa, die zu seiner Zeit bereits erschöpft waren. Angesichts dieses Befundes fällt es schwer zu glauben, daß die Blüte der Metallurgie in der frühen Bronzezeit ohne fremde Einflüsse entstanden ist. Unabhängig davon bleibt die Frage bestehen, welche Rolle die Erzvorkommen in der Ägäis dabei gespielt haben.

Schriftliche Aufzeichnungen aus dieser Zeit (nur in Ägypten und Mesopotamien) geben darüber keine Auskunft, und archäologische Befunde liegen nur für Siedlungen und Gräberfelder vor. Es ist daher notwendig, die Erzvorkommen auf alten Abbau hin zu untersuchen und diesen zu datieren. Das ist aber oft schwierig, denn in den letzten hundert Jahren wurden vielfach selbst kleine Vorkommen beschürft und dabei möglicherweise Spuren älterer Abbauphasen zerstört. Größere Lagerstätten weisen meist mehrere solcher Phasen auf, von denen die älteste naturgemäß die geringsten Chancen hat, ungestört erhalten zu bleiben. Aber selbst wenn noch Reste alten Bergbaus vorhanden sind, ist es nicht immer möglich, sie zuverlässig zu datieren.

Deshalb ist es in solchen Fällen oft nützlich, auf die ältere Literatur aus dem 19. Jahrhundert und früher zurückzugreifen, weil darin mancher alte Bergbau noch in seinem ursprünglichen Zustand beschrieben ist. Das gilt besonders für die südliche Ägäis, wo zwischen der Spätantike und dem Beginn der Industrialisierung kein nennenswerter Bergbau betrieben worden sein dürfte. Eine Zusammenfassung der Arbeiten des 19. Jahrhunderts geben z. B. Phillips und Louis (1896). Mehr oder weniger detaillierte Angaben über Lagerstätten und Erzbergbau im ägäischen Raum stammen von Kordellas (1902), Phillipson (1901), Schmeisser (1906), Freise (1908), Doelter (1916), Schultze (1935) und anderen (s. Kap. 4). Besonders wertvoll ist der Bericht K. G. Fiedlers (1841), der im Auftrag des Königs von Bayern die Bodenschätze des damaligen Königreiches von Griechenland prospektierte. Nützliche Beobachtungen kann man auch aus den Darstellungen verschiedener Reisender entnehmen, wie Bellon (1555), Tournefort (1727), Lechevalier (1792) und Beaujour (1829). Eine Zusammenstellung der Reiseliteratur dieser Zeit findet man bei Van der Vin (1980). Mittelalterliche Werke wie das byzantinische Suda-Lexikon aus dem 10. Jahrhundert gehen kaum über das Wissen der Antike hinaus. Die antiken Textstellen, die sich auf Bergbau und Metallgewinnung beziehen, sind in dem enzyklopädischen Werk von R. J. Forbes (1963 und 1964) enthalten. Aus der älteren Literatur stammt die weitaus beste Übersicht über alten Bergbau von O. Davies (1935), der – um nur ein Beispiel zu nennen – Rudna Glava noch mit Kupfererzen verband und prähistorischen Kupferabbau im Gebiet um das benachbarte Majdanpek vermutete.

Schließlich gibt es noch die Möglichkeit einer indirekten Datierung alten Bergbaus, indem die chemische Zusammensetzung prähistorischer Metallobjekte, deren Alter genau bekannt ist, mit Erzen verschiedener Lagerstätten verglichen wird. Dieses Konzept wurde besonders in Mitteleuropa schon seit sehr langer Zeit verfolgt (s. Kap. II,3), ohne zu überzeugenden Ergebnissen zu gelangen. Das beruhte einerseits auf dem Mangel an empfindlichen und genauen Analyseverfahren, verbunden mit leistungsfähigen multivariaten Auswertungsmethoden und andererseits an den Veränderungen der chemischen Zusammensetzung bei der Verhüttung, die eine Zuordnung von einem Artefakt zu einer Lagerstätte prinzipiell erschweren.

Das erste Problem ist durch bedeutende Fortschritte in der instrumentellen Analytik und der elektronischen Datenverarbeitung weitgehend beseitigt, und die Kenntnisse über das Verhalten der verschiedenen Elemente bei der Verhüttung wurden wesentlich erweitert (s. Kap. II,4). Außerdem bietet sich durch die Verwendung von Bleiisotopenverhältnissen als Herkunftsparameter die Möglichkeit, das zweite Problem ganz zu umgehen (s. Kap. II,5).

Die verbesserten instrumentellen Möglichkeiten führten zu einem neuen Aufschwung der Analysentätigkeit an archäologischen Metallartefakten in der Hoffnung, die Nutzung bestimmter Lagerstätten nicht nur indirekt zu datieren, sondern auch deren Bedeutung an der Anzahl der Artefakte abzulesen, die ihnen in einer bestimmten Kulturperiode zugeordnet werden können. Dies könnte die Diskussion um Themen wie Metallurgie, Handel und Ideenaustausch (Kulturkontakte), die für Fragen nach der Entstehung früher Hochkulturen von entscheidender Bedeutung sind, auf völlig neue Grundlagen stellen.

II. Methoden der Archäometallurgie

1. Geländebeobachtungen

Die Geländebeobachtung ist für die archäometallurgische Beurteilung eines Mineralvorkommens ebenso wichtig wie für die lagerstättenkundliche. Neben der allgemeinen Beschreibung einer Mineralisation oder Lagerstätte stehen Beobachtungen zum Bergbau und zur Verhüttung im Mittelpunkt der Geländearbeit. Die Probenentnahme von Erzen ist vor allem darauf ausgerichtet, das Material zu finden, das die alten Bergleute gesucht und gefördert haben. Wenn bergbauliche Spuren vorhanden sind, sind das vor allem Erzreste in Abbautaschen, stehengelassene Erzpfeiler oder auf der Sohle liegende Erzbrocken. Oft sind die Stollen jedoch verschüttet, oder es sind überhaupt nur mehr Pingen zu erkennen, so daß man sich mit Material von der Halde, so vorhanden, zufrieden geben muß. Dies unterscheidet sich deutlich von der üblichen geochemischen Untersuchung einer Lagerstätte, bei der Proben in gleichen Abständen genommen werden, um etwa die Ausdehnung einer Lagerstätte, Zonierung, Erzreserven usw. zu bestimmen. Es ist deshalb schwierig, eine größere Anzahl archäometallurgisch relevanter Proben von einer Mineralisation zu ziehen, weil in den meisten Fällen das Reicherz vollständig abgebaut wurde.

Falls alter Bergbau vorliegt, sollte eine Vermessung und montanarchäologische Untersuchung erfolgen, um Befunde zu dokumentieren, die nach wenigen Jahren oder Jahrzehnten schon unzugänglich oder zerstört sein können. Dabei werden Streckenquerschnitte, Gezähespuren, Vortriebs- und Abbautechnik, Bewetterung und dergleichen aufgenommen. Nicht selten werden dadurch oder aufgrund des Vermessungsplanes verschiedene Abbauphasen erkannt (Taf. 82, 1. 2; 83, 1). Selbst eine grobe Datierung ist manchmal anhand der »Gesamttypologie« einer Grubenanlage möglich. Dabei bestehen allerdings noch viele Probleme. Eine allgemein gültige Typologie muß erst noch auf der Grundlage gut datierter Bergwerksanlagen erarbeitet werden. Im ägäischen Raum stand aber bis vor wenigen Jahren nur das antike Grubengebiet von Laurion für Vergleiche zur Verfügung, so daß nur die Begbautechnik der klassischen Antike einigermaßen bekannt und damit datierbar ist, während die anderen Perioden noch gänzlich unbestimmt sind. Zudem hat sich die Bergbautechnik bis in die Neuzeit nur wenig verändert, so daß es oft nicht einfach ist, venezianischen, byzantinischen und prähistorischen Bergbau zu unterscheiden. Erst die Verwendung von Sprengstoff und die zugehörigen Bohrlöcher geben einen sicheren terminus post quem.

Im Prinzip könnten Bergwerke, ähnlich wie Siedlungen, nach Keramikfunden, dem »Leitfossil« der Archäologie, datiert werden. Das Problem ist, daß man in einem Bergwerk selten Keramik findet, und wenn, dann ist sie oft archäologisch nicht datierbar. Denn die Keramiktypologie beruht im allgemeinen auf der Feinware, den technisch und stilistisch hochwertigen Erzeugnissen, die kaum in ein Bergwerk gelangten. Außerdem ist beim Vorhandensein mehrerer Abbauphasen die stratigraphische Zuordnung in einem Bergwerk ungleich schwieriger als in einer Siedlung.

Ein weiterer wichtiger Schwerpunkt der Geländearbeit ist die Aufnahme von Verhüttungsspuren (Schlakken, Öfen, Rösteinrichtungen, Winddüsen und dergl.), die nach Gesichtspunkten der Prozeßrekonstruktion erfolgt. Dazu gehören Mengenabschätzung, Notizen zur topographischen Lage, Probenentnahme von verschiedenen Schlackentypen, eventuell vorhandenen Zuschlägen und Erzresten sowie gebranntem keramischen Material zur Datierung. Außerdem empfiehlt es sich, auf Gebäudereste (Wohnhäuser, Befestigungen, Heiligtümer) zu achten. Schließlich ist auch die Rohstoffbasis der Umgebung von Interesse: Erze, Zuschlagstoffe, Baumbestand zur Herstellung von Holzkohle, Wasserversorgung, Baustoffe, Tone und andere Materialien, die für die Metallgewinnung nützlich und notwendig sind.

Im Idealfall schließt an eine solche Erkundung natürlich eine archäologische Grabung an. Dies ist bisher nur in wenigen prähistorischen Bergbaubezirken geschehen. Ausnahmen sind das Nordalpengebiet zwischen Mitterberg und Schwaz sowie Laurion in Attika.

2. Physikalische Datierungsmethoden

Wie schon erwähnt, ist eine Datierung von Bergwerken mit den traditionellen archäologischen Mitteln

nur selten möglich. Selbst wenn in der Umgebung Keramikbruchstücke gefunden werden, die sich archäologisch datieren lassen, ist ihre Beziehung zum Bergbau oder der Verhüttung oft unklar.
Viel häufiger als Keramik findet man in alten Bergwerken jedoch Holzkohle. Sie stammt vom Feuersetzen oder vom Geleucht des »Alten Mannes«. Auch Schlackenwürfe enthalten fast immer genügend Holzkohle für eine ^{14}C-Datierung. Ebenso wie bei der archäologischen Datierung mittels Keramikscherben muß natürlich ein Bezug zu der zu datierenden Tätigkeit bestehen, z. B. Holzkohleeinschlüsse in Schlacken. Die in dieser Arbeit erwähnten ^{14}C-Alter wurden von W. Bruns, B. Kromer und B. Münnich, Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg, bestimmt und mit Hilfe der Kalibrationskurven von Stuiver (1982) bzw. Pearson et al. (1983) in Kalenderalter umgerechnet.
Die konventionelle ^{14}C-Datierung durch Umwandlung des Kohlenstoffs in CO_2 und Messung der ^{14}C-Aktivität in einem Proportionalzählrohr erfordert mindestens 1 g Kohlenstoff. Durch die direkte Messung des $^{14}C/^{12}C$-Verhältnisses mit einem Beschleuniger können zwar wesentlich kleinere Proben gemessen werden, aber derzeit ist diese Methode noch nicht allgemein verfügbar und außerdem ist bei sehr kleinen Holzkohleproben die Gefahr der Kontamination sehr groß. Besonders für die Datierung von Schlacken aber auch Ofenlehm, Winddüsen, Grobkeramik und ähnlichen keramischen Erzeugnissen für die Verhüttung, die archäologisch nicht datierbar sind, stellt daher die Thermolumineszenzmethode eine geeignete Alternative dar.
Thermolumineszenz ist ein Leuchten, das beim Erhitzen elektrisch nicht leitender Materialien beobachtet wird, wenn sie vorher ionisierender Strahlung ausgesetzt waren. Durch die Erhitzung wird die Thermolumineszenz gelöscht. Der Vorgang kann aber wiederholt werden, wenn das Material neuerlich ionisierender Strahlung ausgesetzt wird. Dieses Phänomen kann deshalb zur Bestimmung des Zeitpunktes der Entstehung eines Minerals oder seiner letzten Erhitzung auf mehr als 500° C herangezogen werden, weil alle Mineralien der natürlichen Umgebungsstrahlung ausgesetzt sind, die im wesentlichen durch den Zerfall von ^{40}K, ^{238}U und ^{232}Th verursacht wird.
Die ersten Erfolge dieser Methode stellten sich bei der Datierung archäologischer Keramik ein (Aitken 1974) und später bei der Datierung von Sinterbildungen (Wintle 1978). Seit kurzem wird das Verfahren auch zur Datierung quartärer Sedimente eingesetzt, wobei das Löschen der Thermolumineszenz – die »Nullstellung der Thermolumineszenz-Uhr« – durch Ausbleichen der Sedimentteilchen im Sonnenlicht bewirkt wird (Wintle u. Huntley 1982).
Für die Archäometallurgie ist das Verfahren interessant, weil auch Schlacken bei ihrer Bildung Temperaturen von mehr als 500° C ausgesetzt und damit für Datierung prinzipiell geeignet sind. Das Hauptproblem besteht aber, ähnlich wie bei der Keramik, in der komplizierten Dosimetriesituation, die durch die verschiedenen Reichweiten von Alpha-, Beta- und Gammastrahlung bedingt ist. Der mineralogische Hauptbestandteil der meisten Schlacken, Fayalit, emittiert auch den Großteil der Thermolumineszenz. Die radioaktiven Elemente K, U und Th treten aber konzentriert zwischen den Fayalitkristallen in den fast immer vorhandenen Glasphasen auf, die fast keine Thermolumineszenz emittieren. Da die Reichweite der Alphastrahlung nur etwa 25 µm in Silikaten beträgt, variiert die Strahlungsdosis für die Fayalitkristalle je nach ihren Dimensionen. Man muß deshalb eine mittlere Dosis berechnen, deren Fehler schwer abzuschätzen ist. Da bei Schlacken aber meist überhaupt keine Anhaltspunkte für eine Datierung existieren, stellt ein Thermolumineszenzalter auch mit einem großen Fehler eine wichtige Information dar. Bei einem Versuchsprogramm an Schlacken bekannten Alters wurde eine Genauigkeit von ± 20% erreicht (Elitzsch et al. 1983). Diese Genauigkeit reicht bereits aus, um z. B. mittelalterliche, antike und prähistorische Schlacken zu unterscheiden.

3. Chemische Analysen

Die Idee, daß die chemische Zusammensetzung von archäologischen Metallobjekten eine Information über deren Herkunft enthalten könnte, läßt sich weit bis in das letzte Jahrhundert zurückverfolgen (Göbel 1842). Die damals zur Verfügung stehenden naßchemischen Analysemethoden reichten aber nicht aus und waren zu material- und zeitaufwendig, um in dieser Hinsicht Aussicht auf Erfolg zu haben.

Mit der Einführung der optischen Emissionsspektralanalyse (OES) wurde dieser Gedanke zunächst von Otto und Witter (1952) und von Pittioni (1957) wieder aufgegriffen mit dem Ziel, einzelne Objekte einer bestimmten Lagerstätte zuzuordnen. Man ging davon aus, daß zu Beginn der Metallverwendung Mischungen noch keine Rolle gespielt haben und beschränkte sich auf die Untersuchung frühbronzezeitlicher oder noch früherer Objekte. Beiden Gruppen war bewußt, daß dieses Ziel »nicht ohne ein Zusammenwirken von Geologie, Lagerstättenkunde und Metallurgie« erreicht werden könnte, und daß »nicht nur sehr viele Fundgegenstände auf ihre chemische Zusammensetzung hin geprüft, sondern ebenso auch die Erze aus den verschiedenen Lagerstätten und ferner vorgeschichtliche Schlackenfunde einer chemischen Untersuchung unterzogen werden müßten« (Otto u. Witter 1952).
Beide Gruppen behaupteten, daß die Zuordnung von Fertigobjekten zu den Ausgangserzen und damit eine unzweideutige Herkunftsbestimmung möglich sei. Trotzdem kamen sie zu verschiedenen Ergebnissen, z. B. bezüglich der Herkunft der sogenannten Ösenhalsringe, einer in der mitteleuropäischen Frühbronzezeit weit verbreiteten Fundgruppe, die allgemein als die typische Handelsform für Kupfer angesehen wird. Während Otto und Witter (1952) deren Ursprung in Thüringen (Saalfelder Revier) lokalisierten, stammten sie nach Ansicht der Wiener Gruppe (Neuninger u. Pittioni 1963) von einer nicht näher identifizierten Lagerstätte in der Slowakei. Dabei ermittelten beide Gruppen eine ähnliche Zusammensetzung für das typische »Ösenhalsringmetall«. Das Problem lag in der Schwierigkeit, verschiedene Lagerstätten aufgrund von Spurenelementen eindeutig zu identifizieren.
Die Einsicht in diese Problematik hat eine andere Gruppe um S. Junghans in Stuttgart (Junghans et al. 1960 und 1968) veranlaßt, nicht nach der Herkunft der Rohstoffe zu fragen, sondern eine Charakterisierung von Werkstätten zu versuchen. Man ging dabei von der Annahme aus, daß prähistorische Metallurgen, ähnlich den Töpfern, ihren Rohstoff immer aus denselben Quellen bezogen, allenfalls verschiedene Rohstoffe im gleichen Verhältnis mischten und den gleichen Schmelz- und Weiterverarbeitungsprozeß anwendeten.
Das Ziel dieser Untersuchung war, die Anfänge und Ausbreitung der frühen Kupfermetallurgie in Europa zu klären. Zu diesem Zweck wurden mehr als 22000 chalkolithische und frühbronzezeitliche Metallartefakte aus ganz Europa (auch aus dem ägäischen Raum) beprobt und analysiert. Die Analysenmethode war ähnlich der von Otto und Witter (1952), d. h. eine kleine Bohrprobe von etwa 40 mg wurde unter Luftabschluß zu einem Kügelchen geschmolzen und direkt in einer Kraterelektrode abgefunkt. Die Ergebnisse wurden nach ihrer Ähnlichkeit in Gruppen eingeteilt, deren Verbreitung in Raum und Zeit untersucht wurde.
Die daraus gezogenen archäologischen Schlußfolgerungen wurden heftig kritisiert, und teilweise wurde die ganze Methodik in Frage gestellt. Abgesehen von rein archäologischen Gesichtspunkten wurden dabei folgende Problembereiche angesprochen:

1) Repräsentativität der Proben: Wegen der in Metallen häufig anzutreffenden Inhomogenitäten wurde bezweifelt, ob eine kleine Probe für ein Gesamtobjekt repräsentativ sein kann (Slater u. Charles 1970). Es ist bekannt, daß bei Abkühlung bestimmter Legierungen entlang des Wärmegradienten Seigerungserscheinungen auftreten können. In erster Linie sind davon Kupferlegierungen mit hohen Bleigehalten betroffen (Hughes et al. 1982). Auch bei hochlegierten Arsenbronzen sind Anreicherungen von Arsen an der Oberfläche möglich (McKerrell u. Tylecote 1972). Abgesehen von wenigen Ausnahmen dürften sich aber die Inhomogenitäten im Makrobereich meist innerhalb weniger Prozente bewegen, so daß sie von Analysemethoden geringer Präzision nicht erfaßt werden. So sind z. B. die Ergebnisse von Junghans et al. (1954), Richards und Blin-Stoyle (1961) sowie Pittioni (1957) zu erklären, die jeweils größere Objekte auf inhomogene Zusammensetzung untersucht haben, ohne Hinweise darauf zu finden. Andere Untersuchungen (Charles 1973; Craddock 1976) bestätigen dies.
Unzweifelhaft treten aber häufig Inhomogenitäten im Mikrobereich an den Phasengrenzen von Kristalliten, aus denen ein Metall besteht, auf. Die minimal zulässige Probenmenge hängt nun von der Größe der Kristallite ab, die bei rasch abgekühlten Metallen selten einen Durchmesser von 0,1 mm überschreitet. Da selbst die größten frühbronzezeitlichen Objekte in ihrer Gußform rasch erkalteten,

sollte eine Bohrung von 10 mm Länge und 1 mm Durchmesser (das ergibt etwa 40-50 mg Probe) in jedem Fall repräsentativ sein. Im Stuttgarter Analysenprogramm betrug die Standardeinwaage 40 mg. Vergleiche mit kleineren Aliquots derselben Proben belegen, daß auch noch kleinere Einwaagen bis zu 3 mg repräsentativ sein können (Pernicka 1984).
Man kann daher zusammenfassend feststellen, daß Legierungsinhomogenitäten eine Herkunftsbestimmung nicht grundsätzlich unmöglich machen. Vom analytischen Standpunkt sind sie aber insofern zu beachten, als der Grad der Inhomogenität die Größe der zu entnehmenden Probe bestimmt. Da für die Analyse von Kupfer und Kupferlegierungen bisher meist relativ große Proben verwendet wurden, darf man wohl davon ausgehen, daß die meisten bisher veröffentlichten Analysen archäologischer Kupfer- und Bronzeobjekten an repräsentativen Proben vorgenommen werden.

2) Präzision und Richtigkeit der Analysen: Trotz der Kritik an den archäologischen Schlußfolgerungen in Otto und Witter (1952), erweckte der methodische Ansatz großes Interesse und es wurde an vielen Stellen begonnen, Analyseserien von Metallobjekten anzufertigen (Härke 1978). Später, im Zuge einer zunehmenden Ernüchterung in der Einschätzung der Möglichkeiten der Spurenelementanalyse zur Herkunftsbestimmung von Metallen, wurde selbst die Richtigkeit der Analysen angezweifelt. So wurde etwa vermutet, daß in Stuttgart unkontrollierte Verluste von flüchtigen Elementen bei der Probenvorbereitung stattgefunden haben könnten (Neuninger u. Pittioni 1962). Solche Zweifel erhielten zusätzliche Nahrung durch einen Interlaborvergleich (Chase 1974), der zeigte, daß die Analysenergebnisse verschiedener Labors viel weiter streuen als die Fehlerangaben der Einzelanalysen. Das ist eigentlich ein triviales Ergebnis. Ringversuche auf anderen Gebieten zeigen meist ähnlich große Streuungen. Die Frage ist nur, ob dennoch Analysenergebnisse aus verschiedenen Labors gemeinsam für eine Datenauswertung herangezogen werden können.
Die Antwort richtet sich im wesentlichen nach der erforderlichen Analysenpräzision, d. h. der Wiederholbarkeit einer Analyse in einem Labor, durchgeführt mit derselben Methode. Die notwendige Analysenpräzision wird aber ihrerseits durch die Fragestellung bestimmt. Erzlagerstätten unterscheiden sich oft um Größenordnungen in ihren Spurenelementgehalten. Allerdings variieren diese häufig auch innerhalb einer Lagerstätte um mehr als eine Größenordnung. Deshalb ist eine Diskriminierung von Erzlagerstätten – wenn überhaupt – auch mit einer wenig präzisen Methode zu erzielen. Soll aber z. B. festgestellt werden, ob zwei Objekte aus ein und derselben Tiegelcharge stammen, so ist eine wesentlich höhere Analysenpräzision notwendig. In diesem Fall ist die hinreichende Präszision durch die Inhomogenität der Metallobjekte gegeben; für Proben von mehreren Milligramm meist einige Prozent. Eine noch präzisere Analyse wäre demnach sinnlos. In den meisten Labors wurde versucht, möglichst präzise Analysen durchzuführen. Aber es gab einige – wie etwa die Gruppe um Pittioni –, die wegen der großen Streubreite von Spurenelementen in Erzlagerstätten eine halbquantitative Analyse, die nur ungefähr die Größenordnung der Konzentration erfaßt, für ausreichend hielten. Diese Analysen sind für einen Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Labors unbrauchbar. Das ist schade, denn gerade die Wiener Gruppe hat bei weitem die meisten Erzanalysen, vor allem aus Mitteleuropa, veröffentlicht. Sie können leider nur als grobe Orientierungshilfe dienen, aber nicht für eine Herkunftsdiskussion von Metallobjekten. Obwohl die meisten anderen mit der OES durchgeführten Metallanalysen nach heutigem Standard nicht sehr präzise sind (das liegt an der Meßtechnik mit einem lichtempfindlichen Film), sind sie doch in der Mehrzahl richtig, d. h. ohne systematischen Fehler (Pernicka 1984), und können daher durchaus zu einer gemeinsamen Datenbank zusammengefaßt werden.

3) Gruppierung der Analysenergebnisse: Während anfänglich die Analysenresultate mehr oder weniger intuitiv nach metallurgischen und lagerstättenkundlichen Gesichtspunkten sortiert wurden, begann man in Stuttgart, statistische Methoden zur Gruppierung einzusetzen (Junghans et al. 1954). Man untersuchte die Verteilung der Elementgehalte in den Artefakten und erkannte in Histogrammen Häufigkeitsmaxima mit angenäherter lognormaler Verteilung. Auf diese Weise konnten Konzentra-

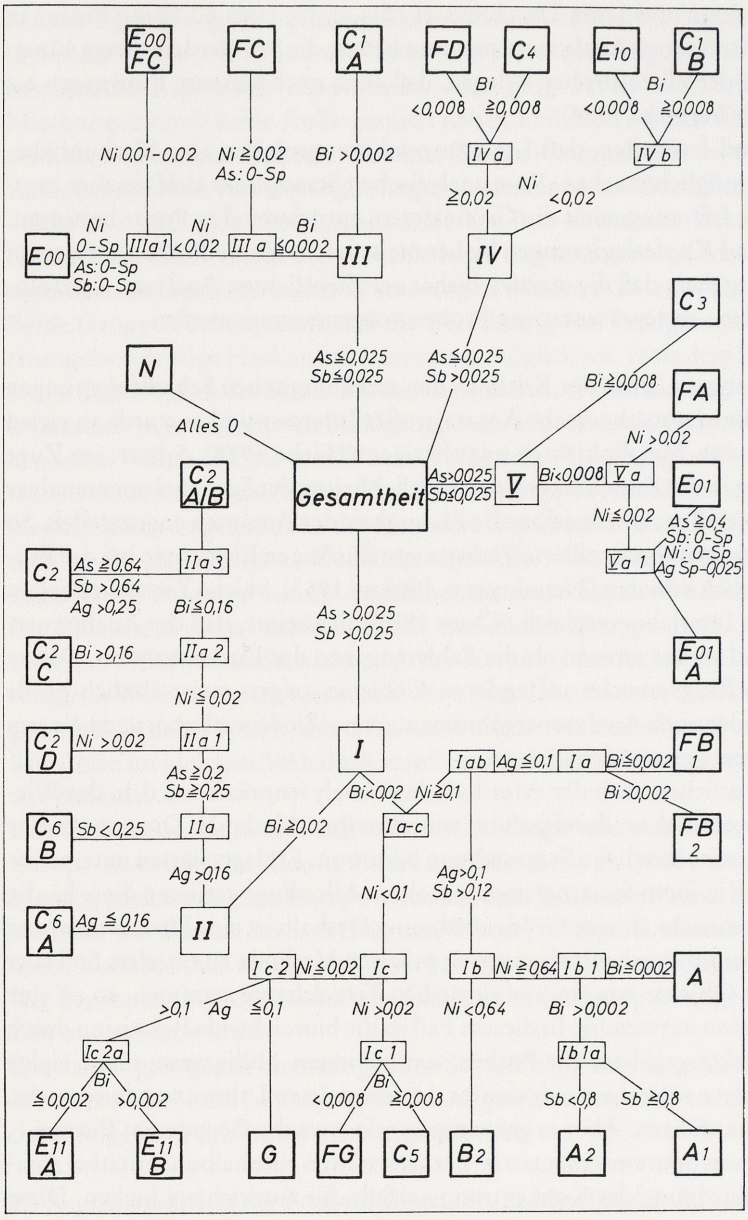


Abb. 8 Der Stuttgarter »Stammbaum«, ein Klassifikationsschema zur Gruppierung von Analysen bronzezeitlicher Kupfer- und Bronzeobjekte (aus Junghans et al. 1968). Die Zahlen sind Prozentangaben.

tionswerte für die Elemente As, Sb, Ag, Ni und Bi festgelegt werden, die die Spannweiten einzelner Häufigkeitsmaxima begrenzten. Die Gruppierung erfolgte durch Vergleich dieser Grenzwerte mit den Gehalten dieser Elemente im Artefakt (Abb. 8).

Die so erhaltenen Materialgruppen waren Gegenstand heftiger Auseinandersetzung. Danach war vor allem die Auswahl von z. T. flüchtigen und zur Segregation neigenden Elementen ein Fehler (Slater u. Charles 1970). Ebenso wurden die starren Grenzen kritisiert, die die Gruppierung zu sehr von Zufälligkeiten bei der Herstellung und Analyse eines Artefaktes abhängig machten (Waterbolk u. Butler 1965). Heute stehen mehrere multivariate statistische Methoden und leistungsfähige elektronische Rechenanlagen für die Lösung dieses Problems zur Verfügung (Sokal u. Sneath 1973).

4) Obwohl die von den Objekten entnommenen Proben fast immer sehr klein waren und ein Bohrloch leicht wieder verschlossen werden kann, wurde dennoch gelegentlich die Beschädigung der Objekte durch die Probenentnahme kritisiert.

Aus diesen Erfahrungen ergeben sich daher für heutige Analysen mehrere Randbedingungen, wenn man über den erreichten Stand hinausgehen will. Vom konservatorischen Standpunkt aus betrachtet, wäre natürlich eine vollkommen zerstörungsfreie Analyse ideal. Diese wäre zwar technisch durchführbar, ist aber de facto unmöglich, wenn das zu untersuchende Objekt korrodiert oder zu groß ist, oder von seinem Standort nicht entfernt werden darf. Bei korrodierten Objekten entfallen alle Untersuchungsmethoden, die nur eine dünne Oberflächenschicht erfassen, wie z.B. alle röntgenanalytischen Methoden oder die Rutherford-Rückstreuung. Zur Gesamtanalyse eines Objektes kommen vor allem die aktivierungsanalytischen Methoden in Frage, die aber nur bei kleinen Objekten von wenigen Zentimetern Durchmesser anwendbar sind. Schließlich sind fast alle diese Methoden an größere Geräte gebunden, die einen Transport des Objektes erfordern würden. Das ist häufig aus bürokratischen oder sogar gesetzlichen Gründen unmöglich, so daß in der Praxis die Analysen fast immer an kleinen Proben eines Objektes ausgeführt werden. Solche Proben dürfen in der Regel, wenn überhaupt, nur ein einziges Mal entnommen werden. Folglich sollten sie nach Möglichkeit erhalten bleiben, so daß deren Analyse vorzugsweise zerstörungsfrei durchgeführt werden sollte.

Die Nachweisgrenzen der optischen Emissionsspektralanalyse (OES) für die bisher meist analysierten Elemente (Fe, Co, Ni, Zn, As, Ag, Sn, Sb, Au, Pb, Bi) liegen zwischen 10 und 100 µg/g. Dies war offensichtlich ausreichend für die Analyse von Fertigobjekten, obwohl Co und Au in Kupferobjekten meist unter der Nachweisgrenze der OES liegen. Für die Analyse von Erzen und gegebenenfalls Schlacken ist aber eine höhere Empfindlichkeit – etwa um eine Größenordnung – erforderlich. Hier würde die OES schnell an ihre Grenzen stoßen. Andererseits ist die Empfindlichkeit und Nachweisstärke der OES relativ unempfindlich gegenüber der Matrixzusammensetzung. Dies ist besonders bei Erzanalysen ein großer Vorteil. Außer Kupfer und Kupferlegierungen wurden auch prähistorische Goldobjekte analysiert (Hartmann 1970 und 1982), wobei allerdings die Proben in gelöster Form auf die Elektroden gebracht wurden. Es konnten meist Cu, Ag, Sn, Pt und gelegentlich auch noch andere Elemente gemessen werden.

Zusammenfassend besteht das Analyseproblem in der Messung möglichst vieler, mindestens aber der bisher bestimmten (s.o.) Elemente im µg/g-Bereich in kleinen Metallproben von wenigen Milligramm. Die Analysen sollen möglichst präzise und genau sein. Für Erze und Schlacken ist eine zerstörungsfreie Analyse nicht notwendig, dafür eine höhere Empfindlichkeit im Vergleich zu Metallen. Da von diesen Materialien meist größere Mengen zur Verfügung stehen, kann man gegebenenfalls ein Anreicherungsverfahren vorschalten.

Durch diese einschränkenden Bedingungen bleiben von der Vielzahl instrumenteller Analysemethoden v.a. die Atomabsorptionsspektrometrie (AAS), die OES mit Plasmaanregung (ICP-OES, inductively coupled plasma-OES), die Neutronenaktivierunsanalyse (NAA) und die Massenspektrometrie mit Funkenanregung (SSMS, spark source mass spectrometry) zur Auswahl. Jede dieser Methoden zeichnet sich neben hoher Nachweisstärke aber auch durch bestimmte Schwächen aus. Bei den ersten beiden müssen die Proben in gelöster Form vorliegen, was bei manchen Matrizes Probleme verursacht. Mit der NAA können Pb und Bi nicht zerstörungsfrei bestimmt werden. Außerdem hängt die Nachweisstärke bei zerstörungsfreien Analysen stark von der Matrixzusammensetzung ab. Schließlich ist die Analysenpräzision der SSMS gering (etwa Faktor 3). Alle erwähnten Methoden sind schon in der Archäometallurgie eingesetzt worden. Ein Ringversuch jüngeren Datums (Rychner 1986) zeigt, daß sich die Situation im Interlaborvergleich wesentlich gebessert hat. Im Konzentrationsbereich unter 1% liegen die relativen Standardabweichungen bei ca. 40% statt bis zu 140% wie früher (Chase 1974). Deshalb sind vom analytischen Standpunkt die verschiedenen modernen Methoden im großen und ganzen gleichwertig. Unter Einbeziehung aller Aspekte, wie z.B. Probenerhaltung, bietet die Neutronenaktivierungsanalyse allerdings den Vorteil der zerstörungsfreien Analyse. Da Pb und Bi damit nicht analysiert werden können, stellt sich die Frage, ob auf deren Bestimmung verzichtet werden kann.

Dies hängt eng mit der Frage zusammen, welche Elemente für die Zuordnung von Metall zu Erz überhaupt in Frage kommen. Darüber gibt es keine einheitliche Meinung. In Stuttgart wurden elf Elemente analysiert, aber nur fünf (Ni, As, Ag, Sb, Bi) zur Gruppierung herangezogen (s. Abb. 8). Die ersten vier

davon bildeten auch die Grundlage zur Definition der »Leitlegierungen« von Otto und Witter (1952). Biek (1957) schlug eine ähnliche Elementkombination (P, Zn, As, Ag, Sn, Sb, Pb, Bi) zur Herkunftsbestimmung von Kupfer vor, während Britton (1963) die in Stuttgart verwendeten Elemente insgesamt als uncharakteristisch für Erzlagerstätten bezeichnete. Pittioni (1957) verwendete neun Elemente (Co, Ni, Zn, As, Sb, Ag, Sn, Pb, Bi) für seine »Relation Erzlagerstätte-Fertigobjekt« und fügte später Te und Au hinzu. Berthoud (1979) analysierte 31 Elemente in Kupferobjekten und -erzen (Al, Si, P, S, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, As, Se, Rb, Sr, Zr, Mo, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, Ba, Pt, Pb, Bi) und verwendete alle außer Zn, As, Cd, Sn, Sb, Pb und Bi für die Herkunftsdiskussion. Die letzteren betrachtete er als Legierungsbestandteile bzw. als mit ihnen assoziierte Verunreinigungen.
In dieser Situation scheint es nützlich zu sein, zunächst einmal die Kenntnisse über das Verhalten verschiedener Elemente bei der Verhüttung zusammenzustellen.

4. Verhalten verschiedener Spurenelemente bei der Metallgewinnung

a. Kupfer

Für die Zuordnung von Kupferobjekten zum Ausgangserz sind Veränderungen der chemischen Charakteristik bei der Verhüttung von entscheidender Bedeutung. Gewisse Veränderungen sind abzusehen, denn stark vereinfacht gesehen, ist es das Ziel der Verhüttung, die Hauptbestandteile des Erzes, neben Kupfer meist Eisen, Schwefel und Gangart voneinander zu trennen. Es ist zu erwarten, daß dabei auch Veränderungen im Spurenelementbereich eintreten. Die Frage ist, welche Elemente in diesem Prozeß dem Kupfer weitgehend folgen, so daß sich das jeweilige Element/Kupfer-Verhältnis nicht oder nur wenig ändert. Diese Elemente können als Erzindikatoren im Kupfer angesehen werden.
In erster Näherung hängt dies von der unterschiedlichen Reduzierbarkeit der Elemente ab, weil unabhängig von verfahrenstechnischen Umwegen und Zwischenschritten die Reduktion von oxidiertem Kupfer zum Metall entscheidend ist. Ein Maß für die Reduzierbarkeit ist die freie Bildungsenthalpie ($\triangle G^\circ$) der Oxide gemäß der allgemeinen Gleichung

$$M(w) + 0.25w\, O_2 \rightleftharpoons MO_{0.5w}$$

$$K = \frac{[MO_{0.5w}]}{[M(w)]\,[O_2]^{0.25w}}$$

wobei w die Wertigkeit der oxidierten Spezies ist.
In Abb. 9 ist die freie Bildungsenthalpie einiger Oxide in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Aus der Beziehung $\triangle G^\circ = -RT\ln K$, wobei R die Gaskonstante und T die absolute Temperatur ist, kann man erkennen, daß die Reduktion der jeweiligen Oxide um so leichter abläuft, je größer die Werte von $\triangle G^\circ$ sind. Nimmt man eine Reaktionstemperatur von 1200 °C, nahe dem Schmelzpunkt von Fayalit, für die alten Verhüttungsverfahren an und liest die $\triangle G^\circ$-Werte verschiedener Elemente bei dieser Temperatur ab, so läßt sich eine Reihenfolge nach der Leichtigkeit ihrer Oxidation aufstellen:

W,Mo,Zn,Fe > Sn > Co > Sb,Ni,As > Pb > Bi,Cu > Se,Te > Rh,Ir,Pd > Ag >> Au,Pt

In dieser Reihenfolge sollte demnach das Ausbringen der Elemente bei der Verhüttung von oxidischen Erzen ansteigen. Dies gilt aber streng genommen nur für die Reduktion von Oxiderzen ohne Schlackenbildung, z. B. die Reduktion von sehr reinem Malachit oder Cuprit. Die umgekehrte Reihenfolge ist für die Abreicherung der Elemente bei der Raffination von Schwarzkupfer zu erwarten (s. u.).
Wenn Schlacke und gegebenenfalls Kupferstein gebildet werden, erhöht sich die Anzahl der Phasen und damit der Freiheitsgrade, so daß Voraussagen aufgrund thermodynamischer Daten schwierig sind. Man kann zwar Verteilungskoeffizienten zwischen Kupfer und Schlacke für eine bestimmte Temperatur,

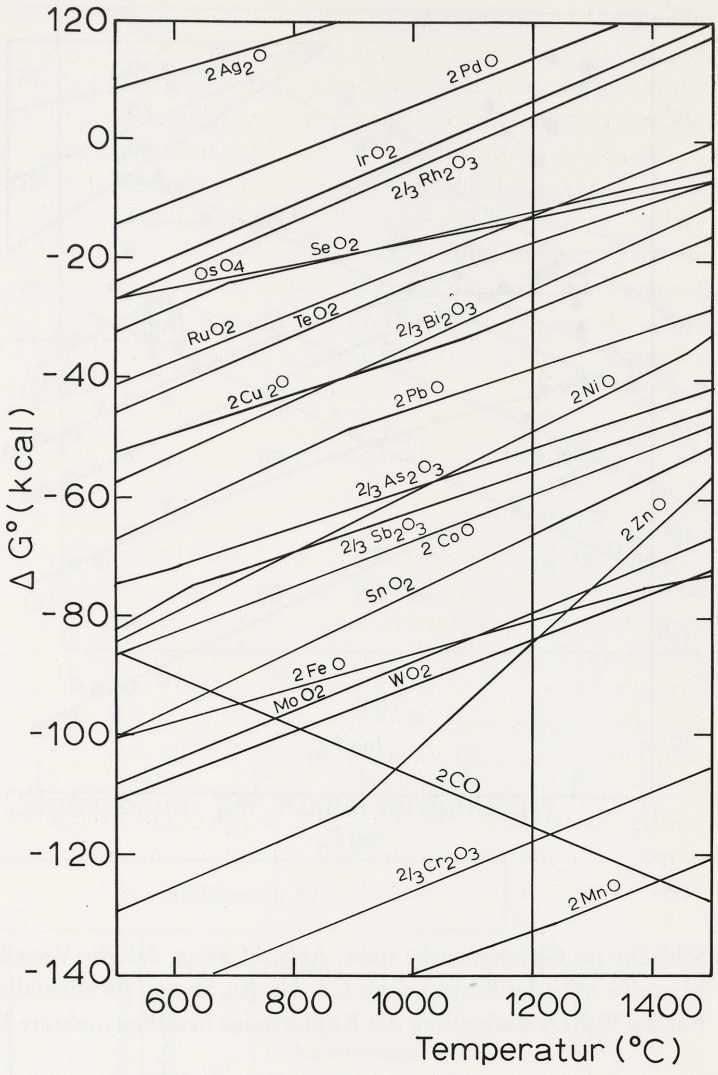


Abb. 9 Freie Bildungsenthalpien verschiedener Oxide, die im Zusammenhang mit Metalluntersuchungen von Bedeutung sind, in Abhängigkeit von der Temperatur (thermodynamische Daten aus Kubaschewski und Alcock 1979). Die Rangfolge der Oxidierbarkeit verschiedener Elemente wurde bei 1200° C (senkrechte Linie) abgelesen.

Schlacken-, Stein- und Gaszusammensetzung berechnen (Mackey 1982), aber die Absolutgrößen stimmen mit den beobachteten Prozeßdaten nur überein, wenn eine Korrektur für die Suspension einer Phase in der andern eingeführt wird. Die so z. B. für den Noranda-Prozeß berechneten Verteilungskoeffizienten $D_{Cu/S}$ = (% M im Kupfer)/(% M in der Schlacke) stimmen mit Ausnahme von Pb in etwa mit der oben angegebenen Reihung der Elemente überein. Die $D_{Cu/S}$-Werte für Co und Pb liegen bei 1×10^{-2}, d. h. beide Elemente werden im Noranda-Prozeß, der bei einem relativ hohen Sauerstoffpartialdruck durchgeführt wird, verschlackt. Die Werte aller anderen Elemente rechts von Co sind größer als 1. Sie bleiben daher im Kupfer. Experimentelle Untersuchungen (Yazawa 1980) bestätigen ebenfalls diese Reihung, die offensichtlich über einen großen Bereich des Sauerstoffpartialdruckes konstant bleibt (Abb. 10) und deshalb relativ unabhängig von der Art des Schmelzverfahrens ist.

Eine weitere wichtige Komponente ist der Partialdruck von SO_2, weil bei den üblichen Verhüttungstemperaturen das Gleichgewicht

$$Cu_2O + FeS \rightleftharpoons Cu_2S + FeO$$

weit auf der rechten Seite liegt ($K = 6.7 \times 10^4$ bei 1300 °C) und somit bei Anwesenheit von Schwefel Cu_2S, genauer eine Mischung von CuS und FeS (Kupferstein oder Matte), statt metallischen Kupfers mit der

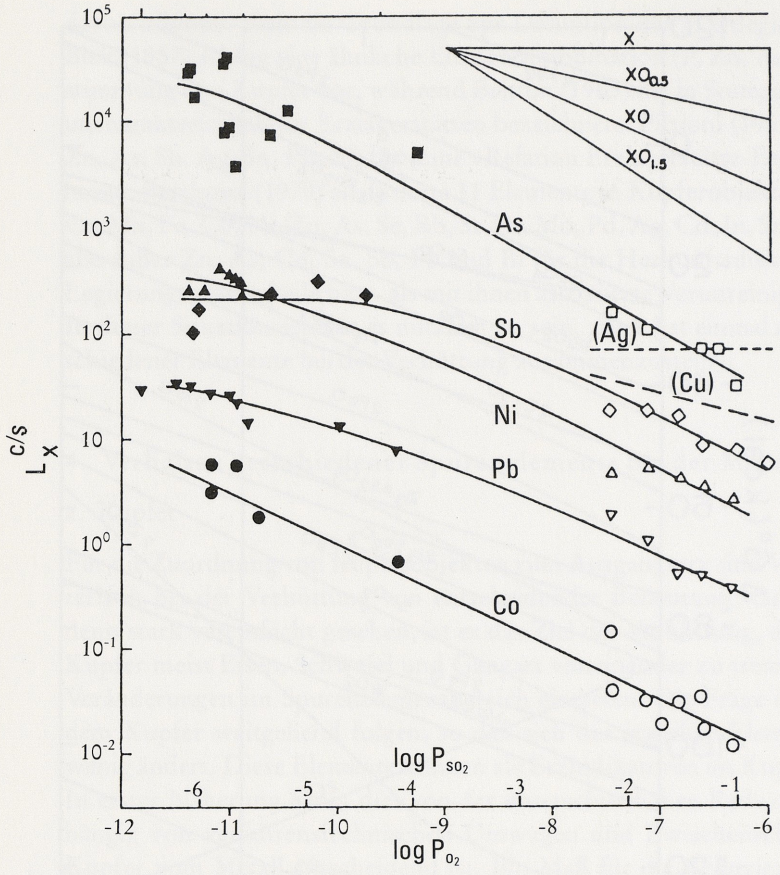


Abb. 10 Verteilungskoeffizienten einiger Elemente zwischen Kupfer und Schlacke in flüssigem Zustand in Abhängigkeit vom Sauerstoffpartialdruck (aus Yazawa 1980).

Schlacke im Gleichgewicht steht. Abb. 11 zeigt, daß die Verteilungskoeffizienten $D_{M/S}$ = (% M in der Matte/% M in der Schlacke) für Co, Ni, As, Sb und Pb ebenfalls größer als 1 sind.
Für die Weiterverarbeitung des Kupfersteins bestehen mehrere Möglichkeiten (Abb. 12):

1) Weitgehende Oxidation (Totrösten) und anschließende Reduktion unter Verschlackung von FeO (»Deutscher Prozeß«),

$$2\,FeS + 3\,O_2 \rightarrow 2\,FeO + 2\,SO_2 \quad \text{Röstung}$$
$$2\,Cu_2S + 3\,O_2 \rightarrow 2\,Cu_2O + 2\,SO_2$$
$$2\,FeO + SiO_2 \rightarrow Fe_2SiO_4$$
$$3\,Cu_2O + 3\,FeO \rightarrow 6\,Cu + Fe_3O_4 \quad \text{Reduktion}$$
$$Cu_2O + CO \rightarrow 2\,Cu + CO_2$$

2) Teilweise Röstung und anschließende Röstreaktion bei schwacher Windpressung (»Englischer oder Walliser Prozeß«),

$$2\,Cu_2S + 3\,O_2 \rightarrow 2\,Cu_2O + 2\,SO_2$$
$$2\,Cu_2O + Cu_2S \rightarrow 6\,Cu + SO_2 \quad \text{Röstreaktion}$$

3) Röstung und Röstreaktion bei starker Windpressung im Konverter.

Bei der Röstreaktion ist das Phasengleichgewicht zwischen Kupfer und Stein maßgeblich. Aus Abb. 13 ist ersichtlich, daß auch hierbei die bisher diskutierten Elemente ins Kupfer gehen. Berechnungen (Makkey 1982) bestätigen dies mit der Einschränkung, daß Se und Te im Stein konzentriert werden.

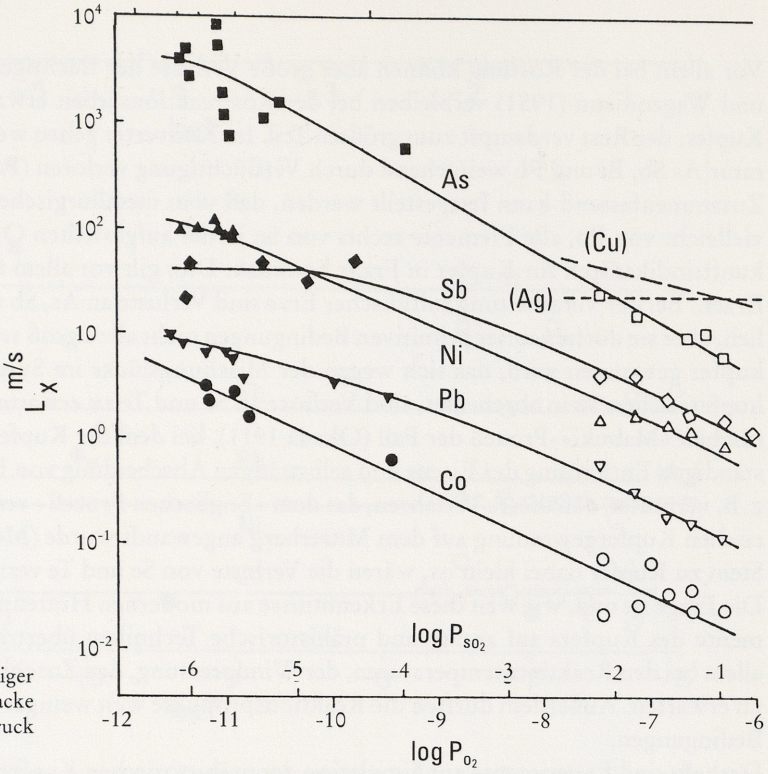


Abb. 11 Verteilungskoeffizienten einiger Elemente zwischen Kupferstein und Schlacke in Abhängigkeit vom Sauerstoffpartialdruck (aus Yazawa 1980).

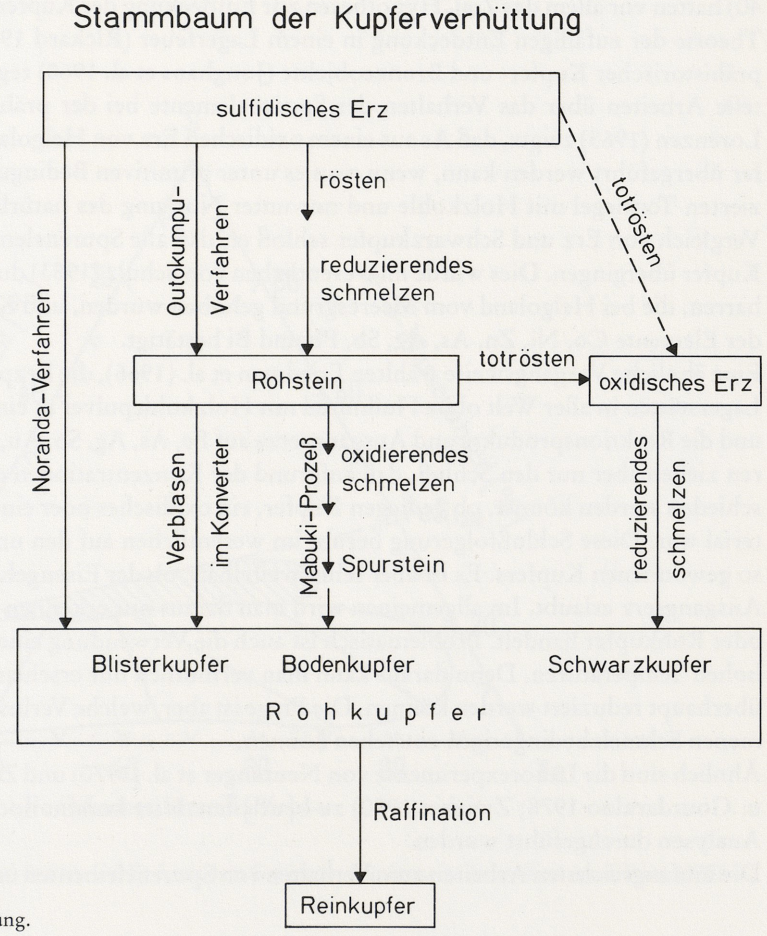


Abb. 12 Stammbaum der Kupferverhüttung.

Vor allem bei der Röstung können aber große Verluste der flüchtigen Elemente entstehen. Nach Tafel und Wagenmann (1951) verbleiben bei der Röstreaktionsarbeit etwa 65% des Sb und 13% des Bi im Kupfer, der Rest verdampft zum größten Teil. Im Konverter gehen wegen der höheren Reaktionstemperatur As Sb, Bi und Pb weitgehend durch Verflüchtigung verloren (Fabian 1978).
Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß vom metallurgischen Standpunkt aus, mit Ausnahme vielleicht von Pb, alle Elemente rechts von Sn in der aufgestellten Oxidationsreihe prinzipiell als Herkunftsindikatoren für Kupfer in Frage kommen. Dies gilt vor allem für die Gewinnung aus oxidischen Erzen. Bei der Verarbeitung sulfidischer Erze sind Verluste an As, Sb und Bi durch Verflüchtigung möglich, aber sie dürften unter primitiven Bedingungen nicht allzu groß sein. Nur wenn sogenanntes Bodenkupfer gewonnen wird, das sich wegen der Mischungslücke im System Cu-Fe-S (Abb. 14) aus einem kupferreichen Stein abscheidet, sind Verluste an Se und Te zu erwarten. Dies wäre z. B. bei dem altjapanischen »Mabuki«-Prozeß der Fall (Okada 1911), bei dem der Kupferstein oxidierend bis zur fast vollständigen Entfernung des Eisens und selbsttätigen Abscheidung von Kupfer geschmolzen wird. Es wird z. B. vermutet, daß dieses Verfahren, das dem »Englischen Prozeß« verwandt ist, bereits bei der prähistorischen Kupfergewinnung auf dem Mitterberg angewandt wurde (Moesta 1986). Da das Verhältnis von Stein zu Kupfer dabei klein ist, wären die Verluste von Se und Te vermutlich vernachlässigbar.
Die Frage ist nun, wie weit diese Erkenntnisse aus modernen Hüttenprozessen bezüglich der Begleitelemente des Kupfers auf antike und prähistorische Techniken übertragbar sind. Unterschiede sind vor allem bei den Reaktionstemperaturen, der Windpressung, den Zuschlägen und den Refraktärmaterialien zu erwarten. Außerdem dürften die Reaktionsprodukte weit weniger equilibriert sein als unter heutigen Bedingungen.
Deshalb sind Experimente zur Simulation der prähistorischen Kupfergewinnung eine wichtige zusätzliche Informationsquelle. Die ersten Untersuchungen dieser Art (Crushing 1894; Coghlan 1939 und 1939-40) hatten vor allem das Ziel, Hypothesen zur Entdeckung der Kupfergewinnung zu testen, wie etwa die Theorie der zufälligen Entdeckung in einem Lagerfeuer (Rickard 1932). Erst die Stuttgarter Analysen prähistorischer Kupfer- und Bronzeobjekte (Junghans et al. 1960) regten Diskussionen und experimentelle Arbeiten über das Verhalten der Spurenelemente bei der prähistorischen Kupfergewinnung an. Lorenzen (1965) zeigte, daß As aus einem oxidischen Erz von Helgoland quantitativ in das Schwarzkupfer übergeführt werden kann, wenn man es unter primitiven Bedingungen in einem in einer Mulde plazierten Tontiegel mit Holzkohle und nur unter Nutzung des natürlichen Luftzuges erhitzt. Aus dem Vergleich von Erz und Schwarzkupfer schloß er, daß alle Spurenelemente des Erzes unverändert in das Kupfer übergingen. Dies wurde im wesentlichen von Schulz (1983) durch den Vergleich von Rohkupferbarren, die bei Helgoland vom Meeresgrund gehoben wurden, und Kupfererz von Helgoland aufgrund der Elemente Co, Ni, Zn, As, Ag, Sb, Pb und Bi bestätigt.
Eine ähnliche Vorgangsweise wählten Friedman et al. (1966), die Erzproben von etwa 130 verschiedenen Lagerstätten in aller Welt ohne Flußmittel mit Holzkohlepulver in einem elektrischen Ofen reduzierten und die Reaktionsprodukte und Ausgangserze auf Fe, As, Ag, Sb, Au, Pb und Bi analysierten. Die Autoren ziehen aber nur den Schluß, daß aufgrund der Konzentrationen dieser Elemente in Artefakten entschieden werden könnte, ob gediegen Kupfer, ein oxidisches oder ein sulfidisches Erz das Ausgangsmaterial war. Diese Schlußfolgerung beruht im wesentlichen auf den unterschiedlichen Eisengehalten des so gewonnenen Kupfers. Es ist aber sehr zweifelhaft, ob der Eisengehalt in Kupfer Rückschlüsse auf das Ausgangserz erlaubt. Im allgemeinen wird man daraus nur erkennen können, ob es sich um raffiniertes oder Rohkupfer handelt. Problematisch ist auch die Verwendung eines geschlossenen Graphittiegels bei hohen Temperaturen. Denn daraus kann man vermutlich nur ersehen, welche Elemente auf diese Weise überhaupt reduziert werden können. Die Frage ist aber, welche Verluste durch die sicherlich unvollkommenen Schmelzbedingungen entstehen können.
Ähnlich sind die Laborexperimente von Neuninger et al. (1970) und Zwicker und Mitarbeitern (Zwicker u. Gourdarzloo 1978; Zwicker 1980) zu beurteilen. Hier kommt noch hinzu, daß nur halbquantitative Analysen durchgeführt wurden.
Die umfangreichsten Arbeiten zum Verhalten von Spurenelementen unter primitiven Verhüttungsbedin-

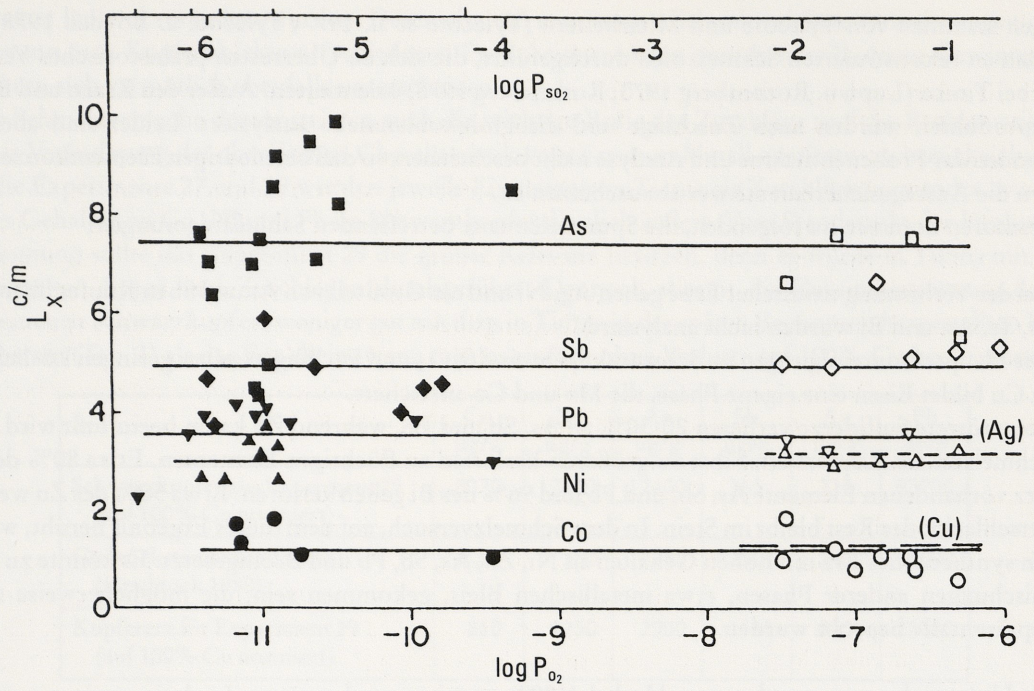


Abb. 13 Verteilungskoeffizienten einiger Elemente zwischen Kupfer und Kupferstein in flüssigem Zustand in Abhängigkeit vom Sauerstoffpartialdruck (aus Yazawa 1980).

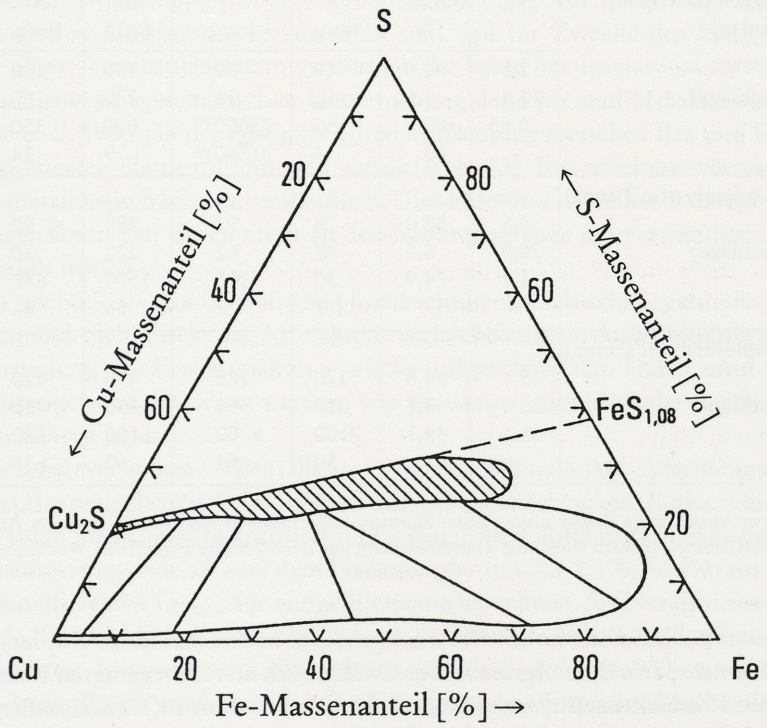


Abb. 14 Bereich der Mischungslücke im System Cu-Fe-S mit dem Gebiet der Kupfersteine (schraffiert, aus Fabian 1978).

gungen stammen von Tylecote und Mitarbeitern (Tylecote et al. 1977; Tylecote u. Boydell 1978). Sie wurden an rekonstruierten Schmelzöfen durchgeführt, die sich an Überresten prähistorischer Verhüttung bei Timna (Lupu u. Rothenberg 1970; Rothenberg 1978) orientierten. Außer den Erzen und Reaktionsprodukten wurden auch Zuschläge und die Holzkohlenasche analysiert. Leider sind aber die Methoden der Probenentnahme und Analyse nicht beschrieben, so daß bei niedrigen Elementkonzentrationen die Aussagesicherheit schwer abzuschätzen ist.
Die Autoren kommen zu folgenden, die Spurenelemente betreffenden Schlußfolgerungen:

1) Bei der Verhüttung oxidischer Erze gehen Ag, Ni und ein Großteil von As und Sb in Kupfer über (Co, Se, Te, Au und Bi wurden nicht analysiert).
2) Die Hauptverunreinigungen im Schwarzkupfer sind S, O_2 und Fe. Wegen seiner geringen Löslichkeit in Cu bildet Eisen eine eigene Phase, die Mn und Co anreichert.
3) Totgeröstete Sulfiderze verlieren 20-30% an As, Sb und Pb, während Zn kaum beeinflußt wird.
4) Schmelzen auf Kupferstein führt zu größeren Verlusten an flüchtigen Elementen. Etwa 80% der im Erz vorhandenen Elemente As, Sb, und Pb und 96% des Bi gehen verloren. Etwa 50% des Zn werden verschlackt, der Rest bleibt im Stein. In dem Schmelzversuch, auf dem dieses Ergebnis beruht, wurde ein synthetisches Erz mit hohen Gehalten an Ni, Zn, As, Sb, Pb und Bi eingesetzt. Es könnte zu Entmischungen anderer Phasen, etwa metallischen Bleis, gekommen sein, die möglicherweise nicht repräsentativ beprobt wurden.

Diese Untersuchungen wurden von Merkel (1982) erweitert und ergänzt. In drei von insgesamt 32 Schmelzversuchen wurden alle Eingangs- und Ausgangsmaterialien analysiert. Das erlaubt, die Konzentrationsänderungen einiger als Herkunftsindikatoren in Frage kommender Elemente zu berechnen (Tab. 2).

Experiment 21 (Kupfererz von Calabona, Sardinien)	kg	Cu %	Co µg/g	Ni µg/g	As µg/g	Sb µg/g	Ag µg/g	Pb µg/g
Erz	2,5	30,0	10	20	150	100	20	400
Charge (Erz + Zuschläge)	13,4	5,6	51	36	270	60	5	100
Schwarzkupfer	0,55	89	50	(3000)*	600	350	87	300
Ausbringen (%)	–	65	4	(340)*	9	24	71	12
Experiment 27 (Kupfererz von Timna)								
Erz	5,5	32,0	76	92	190	< 20	160	2700
Charge (Erz + Zuschläge)	28,5	6,2	42	62	220	30	>13	620
Schwarzkupfer	1,1	74,9	80	190	1500	670	690	660
Ausbringen (%)	–	47	7	12	26	86	<205	4
Experiment 29 (Kupfererz von Timna)								
Erz	5	14,8	120	185	430	<20	34	3700
Charge (Erz + Zuschläge)	26	3,4	210	390	430	<20	7	20000
Schwarzkupfer	1,1	49,3	2500	8700	6100	180	110	46200
Ausbringen (%)	–	61	50	94	60	>38	66	10

Tab. 2 Berechnung des Ausbringens einiger ausgewählter Elemente bei primitiven Schmelzbedingungen. Analysedaten von Merkel (1982). – * In diesem Schmelzversuch wurde ein Thermoelement von der Schmelze angegriffen, wodurch sich der Nickelgehalt erhöhte.

Mit Ausnahme von Pb, das einen hohen Verteilungskoeffizienten (Schlacke/Kupfer) hat, stimmt das Ausbringen der Elemente mit der aufgrund ihrer Oxidierbarkeit vorhergesagten Reihenfolge überein. Die Element/Kupfer-Verhältnisse ändern sich um einen Faktor 0,5 bis 16. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, daß die drei Schmelzversuche verschiedene Stadien eines Lernprozesses zur möglichst realistischen Rekonstruktion der prähistorischen Kupfergewinnung bei Timna darstellen, bei dem verschiedene

Parameter laufend verändert wurden. Dennoch muß man vermutlich mit solchen Veränderungen rechnen, wenn man Kupferobjekte verschiedenen Produktionszentren zuordnen will, deren Gewinnungsverfahren sich vermutlich ebenfalls unterscheiden.
Diese Schmelzversuche demonstrieren auch die wichtige Rolle der Zuschläge und die Problematik, sie bei der Veränderung der chemischen Charakteristik vom Erz zum Metall qantitativ zu berücksichtigen. Für die Experimente 27 und 29 wurden jeweils Eisenerze von Timna als Zuschläge verwendet, was sich in den Gehalten an Co, Ni und Pb im Schwarzkupfer deutlich äußert. Vom Standpunkt der Herkunftsbestimmung sollte das Experiment 29 die größte Relevanz besitzen, denn es wurde in Timna mit dort gesammelten Erzen und Zuschlägen durchgeführt. Dennoch stimmt die Zusammensetzung des so gewonnenen Schwarzkupfers weniger gut mit dem in Timna in der späten Bronzezeit hergestellten Kupfer überein (Tab. 3) als das Erz allein, wenn man es einfach ohne Verluste auf 100% Cu hochrechnet.

	Co µg/g	Ni µg/g	As µg/g	Sb µg/g	Ag µg/g	Pb µg/g
Schwarzkupfer aus Experment 29 (auf 100% Cu normiert)	5070	17600	12400	365	223	93700
Gußrückstände aus Timna (Craddock 1980)	n.b.	350	1250	250	240	3600
Kupfererz für Experiment 29 (auf 100% Cu normiert)	810	1250	2900	<135	230	25000

Tab. 3 Vergleich von experimentell hergestelltem Schwarzkupfer (Merkel 1982) und prähistorischen Gußrückständen von Timna. Außerdem ist die auf 100% Cu normierte Zusammensetzung des im Experiment verwendeten Kupfererzes aufgeführt (n.b. bedeutet »nicht bestimmt«).

Der Grund dafür ist wahrscheinlich in einer zu reduzierenden Atmosphäre im Schmelzversuch zu suchen, die zu einem Schwarzkupfer mit 43% Fe führte. Dies zeigt vor allem, wie schwierig die Rekonstruktion prähistorischer Gewinnungsverfahren ist und daß für Zwecke der Herkunftsbestimmung Metallrückstände eines Verhüttungsplatzes vermutlich das beste Bezugsmaterial darstellen. Das ist aus einer kürzlich erschienenen systematischen Untersuchung der Erze und Metallobjekte von Timna zu entnehmen (Leese et al. 1986), in der eine gute Übereinstimmung zwischen Erz und Fertigprodukt für einige der hier diskutierten Elemente gefunden wurde (Abb. 15). Das scheinbar verschiedene Verhalten von As und Sb ist metallurgisch schwer verständlich. Dieser Befund ist vielleicht darauf zurückzuführen, daß die Antimongehalte in den Erzen meist an der Nachweisgrenze der verwendeten Methode (AAS) lagen. Das gleiche gilt für Co.
Aber selbst wenn solche Rückstände, meist Kupfereinschlüsse in Schlacken, gefunden werden, sind sie in vielen Fällen dennoch nicht direkt mit Artefakten vergleichbar, denn das Rohkupfer wurde zumindest einmal – zur Herstellung des Fertigobjektes – wieder aufgeschmolzen. Dabei kann z.B. Fe aus dem Schwarzkupfer ausseigern oder oxidiert werden, was wieder zu einer Veränderung der Spurenelementzusammensetzung führen kann.
Das ist aus den Schmelzversuchen – ebenfalls an Erzen aus Timna – von Tylecote und Boydell (1978) ersichtlich, die zu Ofenschlacken (d.h. im Schmelzofen erkaltete Schlacken) führten, die Kupfer in Form von Tröpfchen, Fladen und Lamellen enthielten. Das lamellare Kupfer mit ca. 25% Fe unterschied sich in seiner Zusammensetzung deutlich von dem Fladenkupfer mit 0,3-2,1% Fe. Daraus lassen sich ungefähre Verteilungskoeffizienten $D_{Fe/Cu}$ für einige Elemente berechnen. Sie betragen etwa > 250, 50, 5, 1, 0,5 und ≈ 0 für Mn, Co, Zn, As und Ag. Folglich kann z.B. der Co-Gehalt des Kupfers allein durch Aufschmelzen und sauberes Abtrennen des Eisens bei einem Fe-Gehalt von 20% bis zu einem Faktor 10 geändert werden. In der Praxis werden solch hohe Eisengehalte im Kupfer wahrscheinlich selten erreicht worden sein, und es ist vor allem schwierig, nur durch Aufschmelzen Eisen von Kupfer quantitativ zu trennen (Merkel 1982).

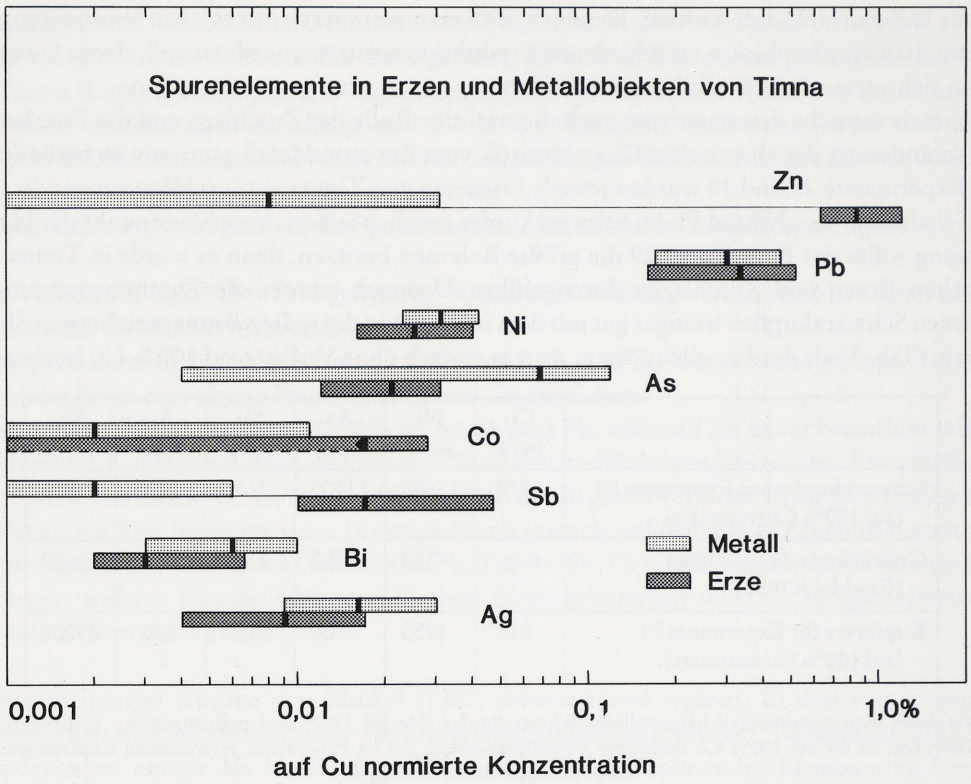


Abb. 15 Variationsbereiche verschiedener Spurenelemente in Erzen und Metallobjekten (meist Gußrückständen) von Timna (nach Analysen von Leese et al. 1986).

Leichter ist es, durch einfaches Aufblasen von Luft auf geschmolzenes Kupfer einen gewissen Raffinationsgrad zu erreichen. Es ist sogar möglich, daß das Kupfer durch Eintauchen frischen Astholzes in das geschmolzene Metall gereinigt wurde. Diesen Vorgang nennt man »Polen« und er war bis vor kurzem auch in der modernen Kupferraffination üblich.

Zum Vehalten der Verunreinigungen von Kupfer bei der Raffination gibt es eine umfangreiche Literatur (Gmelin 1955). Allgemein spielt dabei die Oxidierbarkeit der Elemente die wichtigste Rolle (s.o.). Andere Faktoren sind Löslichkeiten, Siedepunkte der Metalle und Oxide, Verbindungsbildung usw. Im allgemeinen gelten Au, Ag, Se und Te als sehr schwer entfernbar. Ni, As, Sb und Bi lassen sich ohne Zusätze nur teilweise entfernen, v.a. wenn sie gemeinsam vorliegen, weil dann die in Kupfer löslichen Nickelarsenide und -antimonide gebildet werden, die auch Bi aufnehmen. Co, Zn, Sn und Pb können leicht entfernt werden.

Im Rahmen seiner Rekonstruktionsversuche führte Merkel (1983) auch einige Experimente zur Kupferraffination durch, deren Ergebnisse in Abb. 16 dargestellt sind. McKerrell und Tylecote (1972) zeigten außerdem, daß hohe Gehalte an As und Sb durch Aufschmelzen und intensive Heißverformung an Luft um einen Faktor 10 bzw. 5 verringert werden können. Bei einer Raffination im Tiegel sind solche deutlichen Veränderungen nicht zu erwarten, weil auch die Kupferverluste sehr hoch sein würden.

Merkel (1982) kommt aufgrund seiner Schmelzversuche zu dem Schluß, daß raffiniertes Kupfer praktisch keine Lagestättencharakteristik mehr enthielte. Diese Schlußfolgerung ist wahrscheinlich zu pessimistisch, denn die bisherigen Analysen von Kupferobjekten lassen deutliche, oft regional eingrenzbare Gruppen aufgrund der Elemente Ni, As, Ag und Sb erkennen, die möglicherweise doch lagerstättenbedingt sind. Dabei enthalten die meisten frühbronzezeitlichen Objekte weniger als 1% Fe (Junghans et al. 1974), so daß sie wohl zum größten Teil aus raffiniertem Kupfer bestehen.

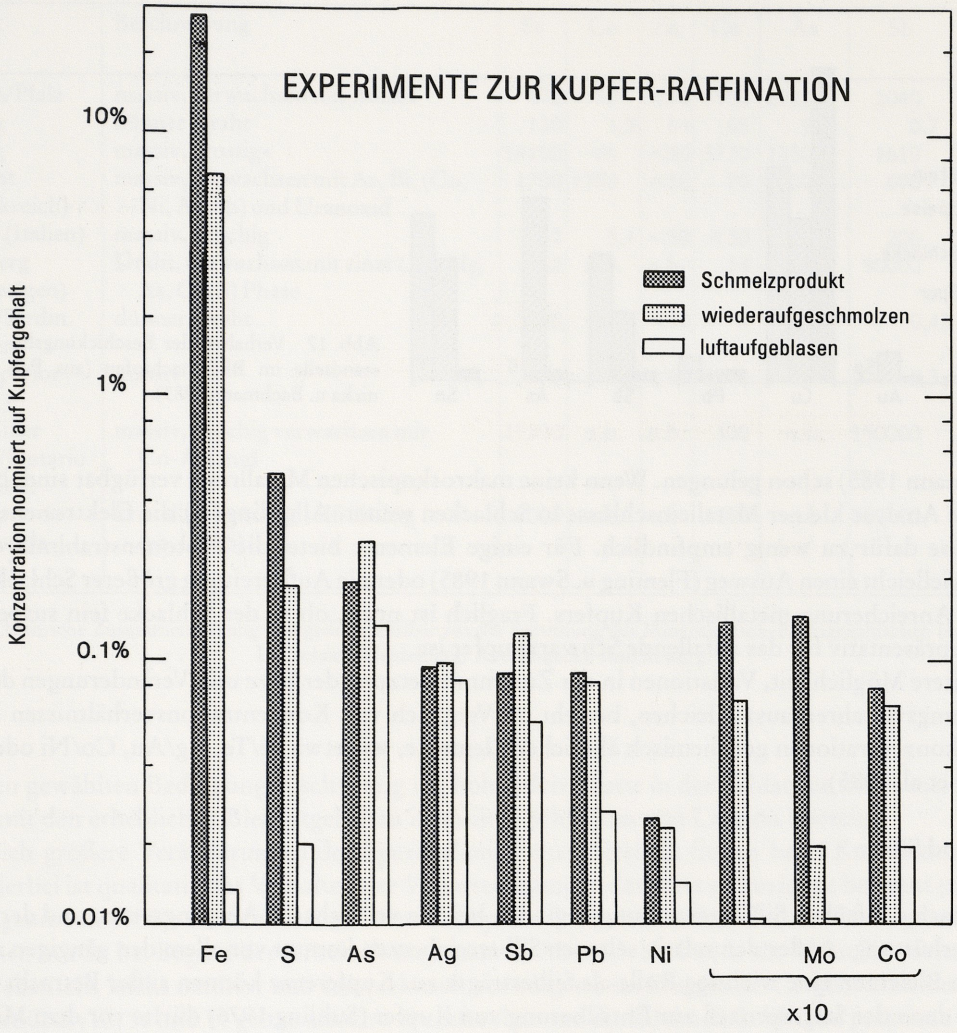


Abb. 16 Verhalten verschiedener Elemente bei der Kupferraffination (nach Ergebnissen von Merkel 1983).

Vom metallurgischen Standpunkt sind deshalb für die Zuordnung von Metall zum Erz im Prinzip, mit Ausnahme von Pb, alle Elemente von Bedeutung, die leichter reduzierbar sind als Co (s. o.). Co und die flüchtigen Elemente As, Sb und Bi können unter bestimmten Bedingungen abgereichert sein. Es ist aber offenbar wenig zielführend, wie von Berthoud (1979) versucht, Elemente, deren Verhältnisse zu Kupfer um mehrere Größenordnungen verändert werden, in den Vergleich von Erzen und Fertigprodukten einzubeziehen, weil die Prozeßbedingungen zu variabel und deshalb die Umrechnungsfaktoren mit viel zu großen Unsicherheiten belastet sind. Für die Analyse bedeutet dies, daß Fortschritte im wesentlichen durch empfindlichere und genauere Bestimmungen der Elemente, die bisher auch der OES zugänglich waren, zu erhoffen sind. Neue Aspekte bietet vielleicht die Analyse von Te und den Platinmetallen (PGE).

Das Hauptproblem für die Herkunftsbestimmung von Kupfer ist die mögliche Variation der Erzzusammensetzung innerhalb einer Lagerstätte und die Unkenntnis über die Zusammensetzung der Zuschläge. Deshalb ist die Beprobung möglicher Zuschlagstoffe in der Umgebung alter Gruben eine wichtige Komponente der Feldarbeit. Dieses Problem könnte möglicherweise wenigstens teilweise umgangen werden, wenn die Zuordnung nicht zum Erz, sondern zu Metallrückständen alter Verhüttungsplätze vorgenommen wird. In Ansätzen ist dies für Timna (Leese et al. 1986), Helgoland (Schulz 1983) und den Oman

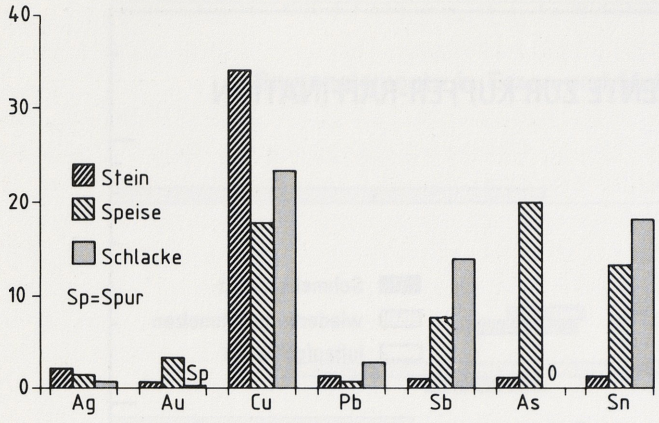


Abb. 17 Verhalten der Beschickungsbestandteile im Bleischachtofen (aus Pernicka u. Bachmann 1983).

(Hauptmann 1985) schon gelungen. Wenn keine makroskopischen Metallreste verfügbar sind, hilft vielleicht die Analyse kleiner Metalleinschlüsse in Schlacken weiter. Allerdings ist die Elektronenstrahlmikroanalyse dafür zu wenig empfindlich. Für einige Elemente bietet die Protonenstrahlmikroanalyse (PIXE) vielleicht einen Ausweg (Fleming u. Swann 1985) oder die Aufbereitung größerer Schlackenmengen zur Anreicherung metallischen Kupfers. Fraglich ist noch, ob in der Schlacke fein suspendiertes Metall repräsentativ für das anfallende Schwarzkupfer ist.
Eine weitere Möglichkeit, Variationen in der Zusammensetzung der Erze und Veränderungen durch das Gewinnungsverfahren auszugleichen, besteht im Vergleich von Konzentrationsverhältnissen statt der Absolutkonzentrationen geochemisch ähnlicher Elemente, wie etwa Se/Te, Ag/Au, Co/Ni oder As/Sb (Seeliger et al. 1985).

b. Blei und Silber

Fragen nach der frühen Silbergewinnung beginnen bei den verfügbaren Ausgangserzen und deren möglicher Verhüttung. Außer den relativ seltenen Silberreicherzen kommt vor allem den gängigen und verbreiteten Bleierzen eine wichtige Rolle als Silberträger zu. Kupfererze können außer Betracht gelassen werden, denn der Seigerprozeß zur Entsilberung von Kupfer (Suhling 1976) dürfte vor dem Mittelalter keine große Rolle gespielt haben. Die Kupellation hingegen, das oxidierende Schmelzen von Blei zur Silbergewinnung, wurde im klassischen Altertum bereits mit großer Perfektion ausgeübt, und es ist sehr wahrscheinlich, daß dieses Verfahren bereits in der frühen Bronzezeit bekannt war.
Die Gewinnung von Blei verläuft vor allem aus zwei Gründen einfacher als die von Kupfer: Erstens lassen sich Bleierze leichter anreichern, so daß verhältnismäßig reiche Konzentrate zur Verhüttung gelangen, und zweitens ist die Affinität des Bleis zu Schwefel geringer als die des Eisens, so daß gleich auf Blei geschmolzen werden kann, anstatt wie bei Kupfer zuerst einen Stein anzureichern.
Im allgemeinen werden die Bleierze weitgehend geröstet und anschließend im Schachtofen zu Blei reduziert. Bei der Röstung kann ein Teil des As und Sb verlorengehen, wie schon bei Kupfer erwähnt. Im Schachtofen werden, wie bei einem reduzierenden Prozeß zu erwarten, die wichtigsten Begleitelemente des Bleis Cu, As, Sn, Sb, Bi und die Edelmetalle zusammen mit dem Blei abgetrennt (Abb. 17). Zn geht zum Teil in die Schlacke oder wird als Metall verdampft. Cu bildet bei Anwesenheit von Schwefel einen Stein, sonst wird es vom Blei aufgenommen.
Zur Rekonstruktion der antiken und prähistorischen Bleiverhüttung wurden bislang nur wenige Versuche durchgeführt. Tylecote (1962) konnte zeigen, daß Bleiglanz auch unter primitiven Bedingungen in einer Bodenmulde ohne vorhergehende Röstung relativ leicht zu Blei reduziert werden kann, wenn auch mit geringer Ausbeute. Über erste Schmelzversuche von ungerösteten Bleierzen in einem rekonstruierten antiken Schmelzofen berichtete Hetherington (1980). Sie zeigen erstens, daß bei einem guten Erzkonzentrat die Menge der benötigten Zuschläge viel kleiner als bei Kupfererzen ist und zweitens, daß es

Proben-nummer	Fundort	Beschreibung	Fe	Co	Zn	Cu	As	Sb	Hg	Pb	Bi
A 57	Imsbach/Pfalz	massiv, verwachsen mit Bornit	410	330	<50	6100	2520	2040	50000	12	400
153	Freiberg	dünner Draht	130	1,5	64	65	9	0,7	1040	25	<20
–	Freiberg	massiv, »rostig«	14100	<6	<50	5770	2330	1610	7050	80	390
175	Allemont (Frankreich)	massiv, verwachsen mit As, Bi, (Co, Ni, As, Sb) und Uranoxid	1700	1700	<50	70	9200	690	3700	8,5	<20
171	Klausen (Italien)	massiv, brüchig	930	5,4	<50	<50	8	200	220	176	7500
196	Kongsberg (Norwegen)	Draht, verwachsen mit einer (Ag, Hg, As, Co, S) Phase	52	n.b.	n.b.	14	n.b.	90000	90000	28	<20
201	Tuviois/Sardin. (Italien)	dünner Draht	45	1,0	<50	4	0,14	0,43	210	31	<20
218	Lake Superior (USA)	massiv	174	3,6	<60	2000	13	0,3	7200	1,4	<20
17	Silver Miller Mine/Ontario (Kanada)	massiv, brüchig verwachsen mit Co-Arsenid	19500	n.b.	n.b.	300	n.b.	150000	n.b.	18	610
463	Mine Japonese/ La Florida (Chile)	kristallin, brüchig, sulfidhaltig (ca. 17%S)	3000	n.b.	n.b.	3000	n.b	200000	n.b.	22	<20

Tab. 4 Chemische Zusammensetzung von gediegen Silber aus der Sammlung des Mineralogisch-Petrographischen Institutes der Universität Heidelberg. Alle Angaben sind in µg/g.

unter den gewählten Bedingungen schwierig ist, hohe Bleiverluste in den Schlacken zu vermeiden. Dies stimmt mit den erheblichen Bleirestgehalten in antiken Schlacken von Laurion überein.

Wesentlich größere Veränderungen der Spurenelementcharakteristik finden beim Kupellationsprozeß statt. Hierbei ist qualitativ das Verhalten der Verunreinigungen des Bleis schon lange bekannt (z. B. Tafel und Wagenmann 1953); danach werden beim Treibprozeß As und Sb zum Teil verflüchtigt oder gehen zusammen mit Sn bei Beginn der Arbeit als sogenannter Abstrich als Oxide ab. Wenn Zn vorhanden ist, wird es ebenfalls leicht oxidiert und sammelt sich vorwiegend im Flugstaub. Cu geht kontinuierlich in die Glätte über; Bi, Se und Te gelten als schwer entfernbar und die Edelmetalle bleiben praktisch vollständig im Silber. Kupellationsexperimente mit dotierten Bleilegierungen (Pernicka u. Bachmann 1983) zeigten, daß das Bi/Ag-Verhältnis etwa um einen Faktor 5 und das Cu/Ag-Verhältnis etwa um einen Faktor 200 reduziert wird, wenn Rohblei direkt auf Silber verarbeitet wird. Durch Nachsetzen von Blei können Cu und Bi allerdings sehr weitgehend entfernt werden. Nach dieser Untersuchung verhalten sich Te und Sb ähnlich wie Blei und werden demnach praktisch vollständig vom Silber getrennt.

Jedenfalls ist dadurch eine Unterscheidung von gediegen Silber möglich, das häufig Verunreinigungen von flüchtigen oder leicht oxidierbaren Elementen enthält (Patterson 1971). In Tabelle 4 sind neue Analysen an gediegen Silber von verschiedenen Vorkommen zusammengestellt.

Die wichtigsten Kriterien für die Identifizierung von gediegen Silber sind demnach die Gehalte an Hg und Pb. Hinzu kommen in vielen Fällen Co, Ni, As, Sb, Bi und gelegentlich auch U, die in primären Lagerstätten vom Typ Cobalt (Ontario) mit gediegen Silber als Metalle, Arsenide und Sulfide verwachsen sind (Taf. 83,2). Gelegentlich tritt Uranoxid hinzu. Es wäre noch zu untersuchen, ob diese Elemente auch bei einem allfälligen Aufschmelzen wenigstens zum Teil im Silber verbleiben. Dann würden auch geringe Gehalte von Hg zusammen mit Pb-Gehalten von weniger als 200 µg/g schon kennzeichnend für gediegen Silber sein.

Zusammenfassend kommen die Elemente As, Se, Ag, Sn, Sb, Te, Bi, Au und die PGE sowie mit Einschränkungen Cu und vielleicht Tl, als Herkunftsindikatoren für prähistorisches und antikes Blei in Frage, wenn es nicht entsilbert wurde. Aus Glätte zurückgewonnenes (gefrischtes) Blei enthält keine chemische Herkunftsinformation. Für die Herkunft von Silber stehen nur Au, die PGE, mit Ausnahme

von Os und Ru, die bei der Kupellation ebenfalls oxidiert werden, und in gewissem Maße auch Cu und Bi zur Verfügung.
Bezüglich der Analysemethode ist hier anzumerken, daß für die Analyse von Bleiobjekten die NAA ebenfalls sehr gut geeignet ist und sich schon bewährt hat (Wyttenbach u. Schubiger 1973), aber zweckmäßigerweise durch die AAS zur Bestimmung von Bi und allenfalls Te und Tl ergänzt wird. Für Silberobjekte gilt das gleiche, wenn auch die lange Halbwertzeit des ^{110m}Ag (250 d) meist eine radiochemische Trennung erforderlich macht.

c. Gold

Im Prinzip sollte Gold ein ideales Material für Herkunftsbestimmung sein, denn im Altertum wurde es ausschließlich in gediegener Form gewonnen. Die Konzentrationen von Begleitelementen in gediegen Gold zeigen starke Variationen von einer Region zur anderen (Warren u. Thompson 1944), wobei die Unterschiede mehr Bezug zu einer metallogenetischen Provinz haben als zum Lagerstättentyp.
Trotz dieser vielversprechenden Voraussetzungen haben mehr als 5000 Analysen prähistorischer Goldobjekte (Hartmann 1970; 1982) eine ähnlich kritische Aufnahme erfahren wie die Analysenserien an Kupferobjekten. Die Behauptung, daß Gold vom Paktolos bei Sardes in größeren Mengen nach Mesopotamien exportiert wurde (Young 1972; Whitemore u. Young 1973), ist nicht bestätigt worden (Meeks u. Tite 1980). Sie beruhte auf der Anwesenheit von Platinmetalleinschlüssen in Sardischen Münzen und Goldobjekten von Ur. Es stellte sich aber heraus, daß solche Einschlüsse in sehr vielen Seifengoldvorkommen zu finden sind und daß sie zu variabel zusammengesetzt sind, um selbst als Herkunftsindikator zu dienen. Dies mag einerseits daran liegen, daß schon in der Frühbronzezeit dem Gold gelegentlich Kupfer zulegiert wurde – vermutlich, um natürlichen hellgelben oder weißen Au/Ag-Legierungen eine goldähnliche Farbe zu verleihen – und andererseits an der geringen Nachweisstärke der OES. In den Objekten konnten in der Regel nur Ag, Cu, Sn, Pb und Pt und nur selten noch andere Elemente analysiert werden. Von diesen sind nur Ag, Sn und Pt möglicherweise für die Herkunftsbestimmung brauchbar. Denn Pb kann zusammen mit dem Cu ins Gold gelangt sein oder sogar von einer Läuterung durch Kupellation stammen. Die Gewinnung und Reinigung von Silber durch Kupellation war wahrscheinlich schon in der Frühbronzezeit bekannt (s. Kap. II, 4 b) und es wäre denkbar, daß sie auch zur Läuterung von Gold verwendet wurde. Der früheste textliche Hinweis darauf stammt aus dem Sinkasid-Palast in Uruk. Dort wird auf einer Tontafel aus dem frühen 2. Jahrtausend v. Chr. von »gereinigtem Gold« gesprochen (Waetzold 1985). Die Trennung von Gold und Silber, die ebenfalls eine radikale Veränderung der Spurenelementcharakteristik zur Folge hat, ist vermutlich erst in der Eisenzeit gelungen (Hanfmann u. Waldbaum 1970).
Mit der NAA ist noch eine Reihe anderer Elemente faßbar, die für die Herkunftsdiskussion sicher nützlich wären, wie Se, Te, Ru, Os, Ir, Co, Ni, Hg u. a. Andererseits bereitet die Analyse von geringen Mengen Cu, Sn und Pt in einer Goldmatrix erhebliche Schwierigkeiten, so daß die NAA eine gute Ergänzung zu den Ergebnissen der OES bilden würde.

5. Isotopenanalyse

Obwohl in den vergangenen Jahren die Analysentechnik verbessert und die Kenntnisse über das Verhalten der Spurenelemente bei der pyrometallurgischen Metallextraktion wesentlich erweitert wurden, wird die Zuordnung von Metall zur Lagerstätte wohl nur in wenigen Fällen aufgrund der chemischen Zusammensetzung allein möglich sein. Der wichtigste Grund für den neuen Optimismus bezüglich der Herkunftsbestimmung von Metallartefakten ist die Einführung der Isotopenanalyse, vor allem des Bleis.
Es ist bekannt, daß sich die relative Häufigkeit der vier stabilen Bleiisotope durch den radioaktiven Zerfall von Uran und Thorium laufend verändert. Je nach dem Verhältnis U/Pb und Th/Pb im Ausgangsreservoir ändern sich die Häufigkeiten der Isotope ^{206}Pb, ^{207}Pb und ^{208}Pb verschieden schnell. Bei der Bildung einer Bleilagerstätte werden U und Th fast vollständig getrennt und die Veränderung kommt zum

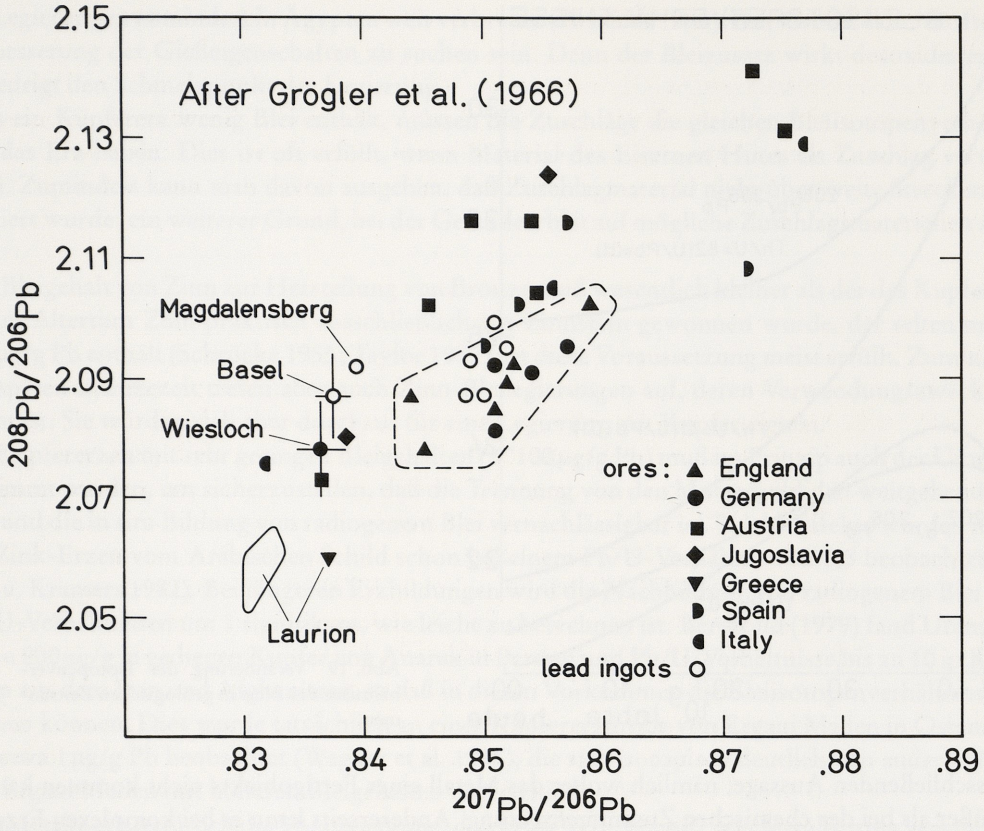


Abb. 18 Einer der ersten Versuche, archäologische Bleiobjekte mit Hilfe der Bleiisotopenverhältnisse bestimmten Lagerstätten zuzuordnen (Daten von Grögler et al. 1966). Es ging um die Frage, ob römische Bleibarren von mitteleuropäischen Fundorten von englischen Lagerstätten (gestricheltes Feld) stammen. Aufgrund der Bleiisotopenverhältnisse war dies für die Mehrheit der untersuchten Barren möglich, aber nicht eindeutig zu beweisen.

Stillstand. Von diesem Zeitpunkt an bleibt die isotopische Zusammensetzung des Bleierzes konstant, unabhängig von den chemischen Veränderungen (z.B. Remobilisierung, Verwitterung oder eben pyrometallurgische Prozesse), denen es ausgesetzt sein mag. Dies ist bekanntlich die Grundlage für eine Methode zur Altersbestimmung in der Geologie (Houtermans 1960).

Für die Herkunftsbestimmung ist vor allem wichtig, daß das Blei mit seiner isotopischen Zusammensetzung ein lagerstättenspezifisches Charakteristikum enthält, das unverändert bis zum Fertigobjekt erhalten bleibt. Dies wurde unabhängig von Grögler et al. (1966) und Brill und Wampler (1965) erkannt, die erstmals versuchten, antike Bleiartefakte bestimmten Bergbauregionen oder Lagerstätten zuzuordnen. Sie wählten dazu das Dreiisotopendiagramm $^{208}Pb/^{206}Pb$ gegen $^{207}Pb/^{206}Pb$, das fast die gesamte Varianz der Daten und die kleinsten Fehler enthält (Abb. 18). Diese Art der Darstellung wird auch heute allgemein verwendet.

Abb. 18 zeigt auch ein grundsätzliches Problem auf. Während theoretisch Unterschiede in den Bleiisotopenverhältnissen bis zu 100% möglich sind (Abb. 19), werden in der Praxis sehr viel kleinere Unterschiede gemessen, weil die meisten Lagerstätten in Mitteleuropa und dem Mittelmeerraum in jüngeren Formationen auftreten. Im allgemeinen treten daher meist Unterschiede von etwa 8-10% auf. Da außerdem die beiden aufgetragenen Isotopenverhältnisse deutlich korreliert sind, müssen die Messungen mit hoher Präzision durchgeführt werden, um signifikante Aussagen zu erhalten. Heute beträgt der relative Meßfehler üblicherweise ± 0,1% und weniger.

Die Diskriminationsmöglichkeiten hängen daher im wesentlichen von der Variation innerhalb einer Lagerstätte ab. Sie beträgt z.B. für Laurion nur etwa 0,5% (Gale et al. 1980). Dadurch ist die Sicherheit

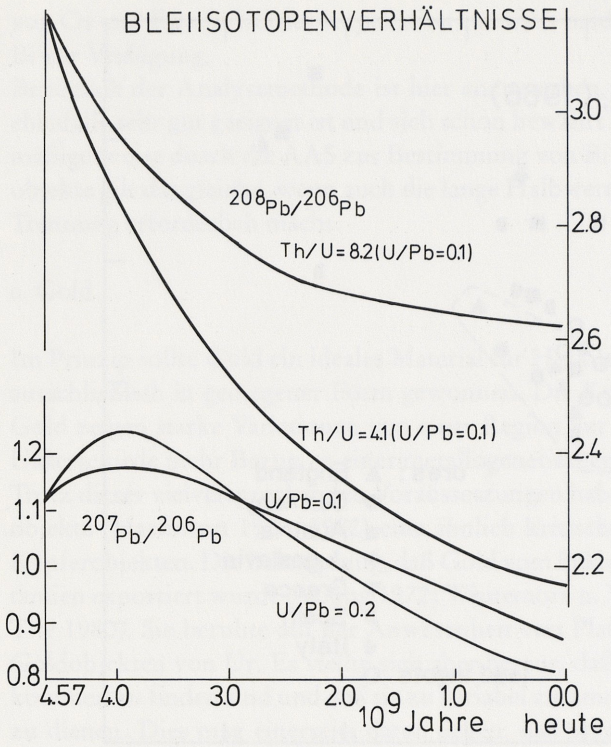


Abb. 19 Veränderung der Isotopenverhältnisse des Bleis in geologischen Zeiträumen.

der ausschließenden Aussage, nämlich woher das Metall eines Fertigobjekts nicht kommen kann, sehr viel größer als bei der chemischen Zusammensetzung. Andererseits kann es bei komplexen Erzgenesen zu weit größeren Variationen kommen, z. B. etwa 1,5% für die Lagerstätte von Iglesiente auf Sardinien (Boni u. Köppel 1985) oder gar 15% für die Bleilagerstätten des Mississippi Valley (Farquhar u. Fletcher 1984).

Die Methode ist aber nicht nur auf Bleierze und Bleiartefakte beschränkt. Da zur routinemäßigen Messung nur etwa 10^{-7} g Blei eingesetzt werden und die massenspektrometrische Analyse bei entsprechendem Aufwand noch an 10^{-9} g Blei und weniger durchgeführt werden kann, ist diese Methode auf eine große Auswahl archäologischer und kunsthistorischer Objekte anwendbar, ohne diese durch eine zu große Probenentnahme zu zerstören. So wurden bisher bereits Untersuchungen an Silber, Kupfer und Kupferlegierungen, Gold, Eisen, Glas, keramischen Glasuren, Pigmenten und Tinten durchgeführt. Dabei ist allerdings zu bedenken, daß höchstens die Herkunft des Bleis in diesen Materialien bestimmt werden kann, die oft nicht notwendigerweise identisch mit der des Materials ist.

Um dies beurteilen zu können, ist die Kenntnis der chemischen Zusammensetzung notwendig. Denn bei Silber kann man mit einiger Sicherheit davon ausgehen, daß das darin enthaltene Blei von der Lagerstätte des Silbers stammt. Aber die Bleigehalte betragen selbst nach den prähistorischen Gewinnungsverfahren oft nur wenige 100 ppm. Die häufig geübte Praxis, dem Silber kleine Mengen an Kupfer zuzulegieren, kann daher die isotopische Zusammensetzung des Bleis verändern. Das gleiche gilt für Gold, dessen Bleigehalte in prähistorischen und antiken Objekten meist zwischen 10 und 100 ppm liegen. Hier fehlen allerdings noch weitgehend Informationen über die Bleigehalte in gediegen Gold, allfällige Variationen der Bleiisotopenverhältnisse in Goldvorkommen und das Verhalten von Blei bei der Bildung alluvialer Lagerstätten.

Für die Anwendung zur Herkunftsbestimmung von Kupfer und Bronze sind mehrere Voraussetzungen notwendig:

1) Das Blei muß als Begleitelement des Kupfers aus dem Erz stammen und darf nicht zulegiert sein. Dies ist zwar in der frühen Bronzezeit meist der Fall, aber Ausnahmen kommen vor, wie z. B. in Luristan und Khuzistan (Malfoy u. Menu 1987). In der späten Bronzezeit dagegen sind Pb/Cu- und Pb/Cu/

Sn-Legierungen zumindest in Ägypten weit verbreitet (Pernicka 1986). Der Grund dafür dürfte in der Verbesserung der Gießeigenschaften zu suchen sein. Denn der Bleizusatz wirkt desoxidierend und erniedrigt den Schmelzpunkt der Legierung.

2) Falls ein Kupfererz wenig Blei enthält, müssen die Zuschläge die gleichen Bleiisotopenverhältnisse wie das Erz haben. Dies ist oft erfüllt, wenn Material des Eisernen Hutes als Zuschlag verwendet wird. Zumindest kann man davon ausgehen, daß Zuschlagmaterial nicht über weite Strecken transportiert wurde; ein weiterer Grund, bei der Geländearbeit auf mögliche Zuschlagsmaterialien zu achten.
3) Der Bleigehalt von Zinn zur Herstellung von Bronze muß wesentlich kleiner als der des Kupfers sein. Da im Altertum Zinn praktisch ausschließlich aus Zinnstein gewonnen wurde, der selten mehr als 100 µg/g Pb enthält (Schröcke 1955; Taylor 1979), ist diese Voraussetzung meist erfüllt. Zumindest ab der späten Bronzezeit treten aber auch Zinn-Bleilegierungen auf, deren Verwendungszweck unbekannt ist. Sie würden sich aber durchaus für eine Legierung mit Kupfer eignen.
4) Bei Kupfererzen mit sehr geringen Bleigehalten (< 100 µg/g Pb) muß im Prinzip auch der Urangehalt bestimmt werden, um sicherzustellen, daß die Trennung von den Mutternukliden weitgehend genug war und die in situ Bildung von radiogenem Blei vernachlässigbar ist. Solche Effekte wurden in Kupfer/Zink-Erzen vom Arabischen Schild schon bei einem Pb/U-Verhältnis von 8,3 beobachtet (Bokhari u. Kramers 1982). Bei jüngeren Erzbildungen wird die Nachbildung von radiogenem Blei erst ab Pb/U-Verhältnissen um 1 signifikant, wie leicht zu berechnen ist. Berthoud (1979) fand Urangehalte bis zu 800 µg/g in gediegen Kupfer von Anarak in Persien und Pb/U-Verhältnisse bis zu 10 in Kupfererzen aus dem Iran und Afghanistan, so daß in diesen Vorkommen die Bleiisotopenverhältnisse stark streuen können. Dies wurde tatsächlich an einer Kupfererzprobe von Ergani Maden in Ostanatolien mit etwa 1 µg/g Pb beobachtet (Wagner et al. 1986), die sich isotopisch deutlich von anderen Proben von Ergani Maden mit höheren Bleigehalten unterschied.

Für alle Metalle gilt natürlich die Voraussetzung, daß keine Vermischung von Metallsorten verschiedener Herkunft stattfand. Es wird allgemein angenommen, daß in den frühesten Phasen der Metallverwendung bis einschließlich der Frühbronzezeit diese Voraussetzung erfüllt war. Dies war die Basis der großen Analysenprogramme wie dem von Stuttgart. Im Prinzip ist auch der gegenteilige Standpunkt, nämlich daß gerade in Zeiten, da nur wenig Metall zur Verfügung stand, Altmetall wieder eingeschmolzen wurde, vertretbar. Dieser Punkt wird in Kapitel IV,2 noch näher besprochen.

Die im folgenden diskutierten Bleiisotopendaten stammen zum größten Teil von F. Begemann und S. Schmitt-Strecker, Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz, und von N. H. Gale, Institute of Geology, University of Oxford.

III. Alter Erzbergbau in der Ägäis

Trotz des mehrdimensionalen Ansatzes zur Charakterisierung von Erzen und Artefakten ist es bei der Vielzahl der in Frage kommenden Erzvorkommen möglich, daß es zu Überlappungen der geochemischen Charakteristika kommt. In solchen Fällen besteht vielleicht Aussicht, aufgrund der Feldbeobachtungen eine Unterscheidung zu treffen, nämlich dann, wenn z. B. für eine Lagerstätte alter Bergbau nachgewiesen werden kann. In diesem Kapitel soll deshalb eine möglichst umfassende Übersicht über alten Bergbau im ägäischen Raum gegeben werden, um zu einer realistischen »archäometallurgischen Lagerstättenkarte« zu gelangen.

Solch eine Zusammenstellung beruht natürlich in erster Linie auf modernen lagerstättenkundlichen Erkenntnissen, die in vielen Fällen durch eigene Geländeuntersuchungen im Hinblick auf archäometallurgische Gesichtspunkte ergänzt wurden. Die Feldarbeiten wurden im Rahmen eines von der Stiftung Volkswagenwerk unterstützten Projektes durchgeführt, das zuerst von W. Gentner und später von G. A. Wagner geleitet wurde. So weit wie möglich wurde auch die archäometallurgische Literatur bis hin zu antiken Autoren einbezogen und kritisch bewertet. Geochemische und mineralogische Daten werden

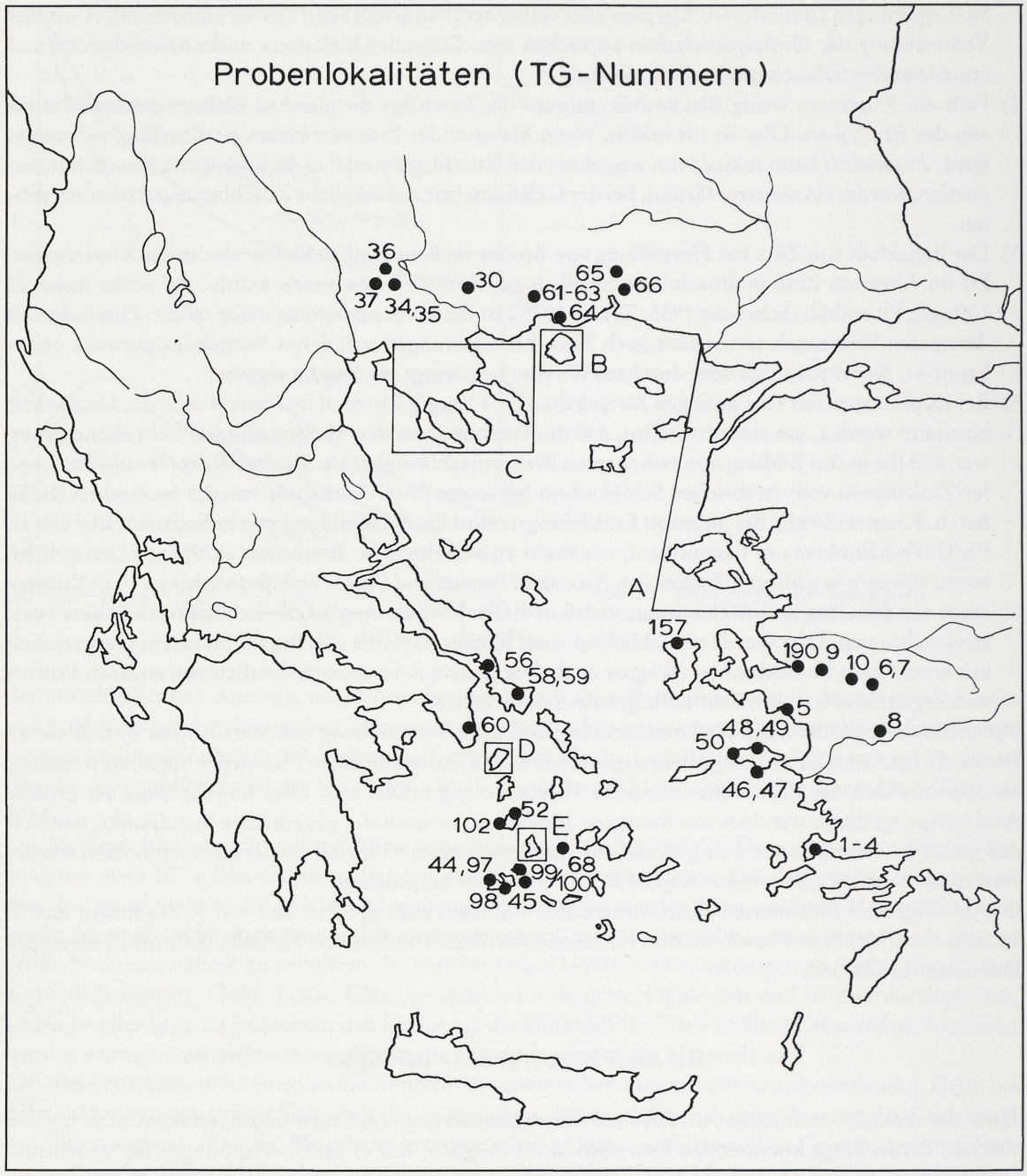


Abb. 20 Geographische Lage der untersuchten Erzvorkommen im ägäischen Raum mit den entsprechenden Nummern aus dem Türkei-Griechenland (TG)-Survey. Die Bereiche A-E sind in den Abb. 21-23, 26 und 27 vergrößert dargestellt.

bei jedem Kapitel, soweit vorhanden, angefügt mit Ausnahme der Bleiisotopenverhältnisse. Diese werden nur in Abbildungen dargestellt.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde der Bearbeitungsraum in drei Regionen geteilt, die ungefähr auch verschiedenen Kulturräumen entsprechen, wobei die Grenzen natürlich fließend sind:

a) Westanatolien einschließlich der vorgelagerten Inseln und türkisch Thrakien,
b) nördliche Ägäis einschließlich Thessalien,
c) Südgriechenland und kykladische Inseln.

Kreta blickt zwar auf eine eigene kulturhistorische Entwicklung zurück, aber es wird weder im Altertum noch heute als metallreich angesehen. In der metallogenetischen Karte Griechenlands sind einige Kupfervorkommen , vor allem im Westen der Insel verzeichnet und ein Vorkommen gemischter Sulfiderze südlich von Rethimnon. P. Faure (1966) nennt 19 Kupfervorkommen und hält bronzezeitliche Blei- und Silbergewinnung auf Kreta für wahrscheinlich. Diese Angaben halten aber einer ernsthaften Überprüfung nicht stand (Wheeler et al. 1975). Einige kleine Kupfervererzungen wurden allerdings bestätigt. Sie scheinen sich im wesentlichen auf die von O. Davies (1935) genannten zu beschränken. Die Angaben dieses Autors haben sich auch sonst als sehr zuverlässig erwiesen, zumindest, was Erzvorkommen und Bergbauspuren anbelangt. Demnach gibt es im Westteil von Kreta, besonders im Gebiet von Kantanos, einige Quarzgänge mit Sulfiderzen und Malachit, die z. T. auch beschürft wurden. Schlacken zeigen auch Kupfergewinnung im kleinen Maßstab an. Sie dürften aber kaum vorantik sein. Wegen der geringen Erzmengen scheint eine Selbstversorgung Kretas bezüglich Kupfer selbst in der Bronzezeit äußerst unwahrscheinlich zu sein. Ebenso steht eine Bestätigung der in der Literatur gelegentlich erwähnten Silber- und/oder Bleivorkommen noch aus.

Die im Rahmen des oben erwähnten Projektes aufgesuchten Erzvorkommen und Verhüttungsplätze wurden fortlaufend unter der Bezeichnung TG (für Türkei/Griechenland) numeriert (Abb. 20). Diese Stellen werden näher beschrieben, bzw. es wird auf detaillierte Veröffentlichungen hingewiesen. Im Interesse einer Gesamtübersicht wurden auch Informationen aus Veröffentlichungen über Erzvorkommen und Schlackenhalden einbezogen, die nicht selbst aufgesucht worden waren. In diesen Fällen wurde die archäometallurgische Signifikanz bzw. ihre archäometallurgische »Höffigkeit« aufgrund der Literaturangaben und allgemeiner archäologischer Gesichtspunke bewertet. Bei einem Projekt dieses Umfangs ist es wohl kaum möglich, einen im Wortsinn endgültigen Bericht zu liefern, aber dennoch darf wohl behauptet werden, daß der ägäische Raum mittlerweile zu den archäometallurgisch bestuntersuchten Kulturregionen zählt.

1. Blei und Silber

a. Westanatolien

Rhodos

Nach Plinius (Nat.Hist. XXXIV,175) und Dioscorides (V.103) sollen auf der Insel Rhodos Bleierze abgebaut worden sein. Eine moderne Bestätigung solcher Vorkommen steht noch aus.

Gümüşlük (TG 1-TG 4)

Auf dem westlichen Ende der Bodrum-Halbinsel gibt es mehrere kleine Blei-Zink-Kupfer-Vorkommen zwische Gümüşlük und Kadikalesı (Wagner et al. 1986): Die Vererzung geht auf eine Kontaktmetamorphose von Kalkstein durch junge Quarzmonzonite, Granodiorite und Dazite zurück. Die Oxidationszone reicht bis zu einer Teufe von mindestens 40 m und enthält neben Brauneisen Manganoxide, Cerussit und sekundäre Kupferminerale.

Im 19. und 20. Jahrhundert ging an mehreren Stellen am Boz Dag episodisch Bergbau um. Paton und Myres (1896) beschrieben einen großen Schacht, der wahrscheinlich mit dem 10x20m großen Tagebau bei Büyük Kuyu (TG 3B) identisch ist, und große Mengen von Schlacken sowie einen »Silberofen« bei Kadı Kalesı. Obwohl diese Vorkommen ganz in der Nähe der antiken Stadt Myndos liegen, werden sie von den klassischen Schriftstellern nicht erwähnt. Daraus und aus dem modernen Namen (gümüş = Silber) schließt Davies (1932b), daß der Bergbau byzantinisch oder mittelalterlich sei. Bei Begehungen 1975 und 1985 (Wagner et al. 1986) wurden keine eindeutigen Reste eines älteren Bergbaus gefunden.

Kayaçık (TG 8)

Nördlich von Aydın und Umurluk soll es mehrere kleine Bleivorkommen in den Çakmakgediği-Bergen geben (Ryan 1960), die z. T. in moderner Zeit abgebaut wurden. Etwa 6 km nördlich von Kayaçık sind auf dem Osthang des Uçkoz Tepe einige kleine Prospektionsstollen erhalten. Die Halden enthalten Bleiglanz. Älterer Bergbau war nicht zu sehen (Wagner 1975).

Gümüş Dag (TG 11)

Nach Auskunft der Dorfbewohner von Gümüş, 5 km westlich von Tekin, dem antiken Magnesia, soll es viele

alte Bergwerke auf dem Gümüş Dag geben. Einige Stollenmundlöcher sind etwa 1 km westlich des Gipfels tatsächlich zu sehen (Wagner 1975), allerdings ohne offensichtliche Vererzung. Forbes (1971) erwähnt einen »Gumusch Dagh (Silver Mountain) near Bayındır on the Tmolus range in the neighbourhood of the ancient Tralles«, auf dem silberreicher Bleiglanz gewonnen worden sein soll. Aydın, das antike Tralles, ist zwar 40 km von Gümüş entfernt, aber es könnte dieselbe Stelle gemeint sein. Leider gibt Forbes seine Quelle nicht an und die Ortsangabe ist ebenfalls nicht vertrauenerweckend (der Tmolus und Bayındır liegen jeweils noch einmal 50 km weiter entfernt). Allerdings wird auch von Ryan (1960) ein Silbervorkommen bei Gümüş erwähnt. Wenn es tatsächlich existiert, dürfte es aber gerade wegen des Namens eher im Mittelalter oder später genutzt worden sein.

Gümüldür (TG 5)

Die Blei-Zink-Lagerstätte von Gümüldür liegt etwa 30 km südlich von Izmir. Die Vererzung ist an eine Brekzienzone am Kontakt zwischen Kalkstein im Hangenden und Glimmerschiefer im Liegenden gebunden. Die vorhandenen Reserven werden auf 1,3 Millionen Tonnen geschätzt (Apaydin und Erseçen 1981). Neben modernen stillgelegten Abbauarbeiten dürften auch ältere Spuren vorhanden sein. In der älteren archäometallurgischen Literatur wird die Stelle nicht erwähnt. Bei Forbes (1971) ist sie ohne Kommentar in einer Liste von Blei-Silber-Vorkommen in Anatolien enthalten, die für antiken Abbau in Frage kommen könnten. Es gibt in der Nähe der Lagerstätte auch Schlackenhalden unbekannten Alters (Wagner 1975).

Kurudere (TG 10)

Etwa 50 km westlich von Izmir sind etwas südlich von Kurudere ein Tagebau und einige Prospektionsstollen angelegt. Die Vererzung besteht aus Bleiglanz, Zinkblende, Bornit, Kupferkies und Pyrit. Nebengestein ist Glimmerschiefer. Alter Bergbau ist nicht belegt, aber wahrscheinlich (Wagner 1975).

Kemalpaşa (TG 9)

Zwischen den Ortschaften Kızılüzüm und Çınar, 3 km westlich von Kemalpaşa, wurde etwa 1970 auf einem kleinen Hügel ein kleiner Schurf angelegt, der älteren Stollen folgte. Die Vererzung besteht aus Bleiglanz und Baryt in Kalkstein. Schlacken unbekannten Alters liegen verstreut herum (Wagner 1975).

Samos (T 46-TG 50)

Auf der Insel Samos wurden fünf verschiedene Blei-Zink-Vorkommen aufgesucht. Mit Ausnahme von Zestos (TG 48) handelt es sich um schichtparallele Vererzungen in Schiefer-Marmor-Wechsellagen. Die beiden Vorkommen im Süden der Insel, Spatharei (TG 46) und Sikea (TG 47) sind durch moderne Stollen erschlossen. Der Abbau ist aber wie überall auf der Insel stillgelegt. Es gab dort keine Anzeichen für alten Bergbau.

Die Grube von Zestos (TG 48A) folgt einem 30-60 cm mächtigen, diskordanten Erzgang (Streichen 13 °N, Fallen 75 °W) im Marmor. Sie wurde um die Jahrhundertwende von einer belgischen Firma eröffnet, wobei der Vortrieb alten Strecken folgte (Forbes 1971). Im tieferen Teil der Grube dürfte diese alte Anlage z. T. noch erhalten sein, wenn auch wegen der Sprengarbeiten bei der Ausräumung keine Gezähespuren an den Stößen mehr erhalten sind. An einer Stelle ist eine alte, mit Versatz gefüllte Strecke noch sichtbar. Sie hat einen querliegenden elliptischen Querschnitt von etwa 100 x 70 cm. Die Vererzung besteht aus Bleiglanz, Pyrit und Malachit in Brauneisen.

Etwa 10 m unterhalb von TG 48A wurden in dem dicht bewachsenen Gelände ein verfüllter, moderner Schacht (TG 48B) und weitere 50 m darunter ein altes Stollenmundloch (TG 48C) gefunden, das nach wenigen Metern verstürzt war.

Die Vorkommen von Ampelos (TG 49) sind auf der geologischen Karte von Samos (1:50000) eingetragen. Insgesamt wurden vier Stollen befahren. Anstehende Vererzung ist kaum mehr zu sehen. Auf der Halde wurde vor allem Pyrit, Zinkblende, Kupferkies und Bleiglanz gefunden. Alter Bergbau konnte nicht sicher nachgewiesen werden.

Im Umkreis der Ortschaft Drakei (TG 50) gibt es einige kleinere Vererzungen mit wenig silberhaltigem Bleiglanz (s. Tab. 6) bei Paliomylos (TG 50A), Kalives (TG 50B), Kamarotou (TG 50C) und Agios Isidoros (TG 50D). Bei der letzten Stelle trifft ein etwa 10 m langer Stollen an seinem Ende mit einem Schacht zusammen. Der hintere Teil des Stollens weist Gezähespuren auf; ein sehr schwacher Hinweis auf alten Bergbau. Weder innerhalb noch außerhalb des Stollens wurde datierbares Material gefunden.

In der antiken Literaur gibt es mehrere Hinweise auf ein Geophanium genanntes Vorkommen von Gold und/oder Silber auf Samos (Davis 1935). Es ist in den Erzählungen mit dem Hera-Tempel und drei Idolen von Schafen verbunden, von denen eines aus Gold, eines aus Silber und eines aus Kupfer bestand. Sie sollen der Sage nach von Mandrabulus nach der Entdekkung des Edelmetalls geopfert worden sein. Diese oder eine ähnliche Geschichte erscheint bei einigen Autoren des 4. Jahrhunderts v. Chr. und geht vermutlich auf eine einzige Quelle zurück. Es ist aber zweifelhaft, ob diese Angaben mit altem Bergbau in Verbindung zu bringen sind.

Lesbos (TG 51)

Etwa 6 km östlich der Stadt Mithymna an der Nordküste der Insel liegt unterhalb des Dorfes Argenos ein kleines Sulfiderzvorkommen. Es handelt sich um

hydrothermale Quarzgänge in rötlichen Daziten. Die Vererzung besteht aus Bleiglanz, Kupferkies, Zinkblende und Pyrit. Das Vorkommen wurde um die Jahrhundertwende von einer belgischen Gesellschaft abgebaut und 1926 stillgelegt. Moderne Stollen sind direkt am Strand bei einer »Zesto Nero« genannten Stelle und dem sich dahinter erhebenden Bergrücken (Koufo Vouno) sichtbar. Der moderne Abbau hat mehrere alte Galerien angeschnitten. Von einer dieser Galerien konnte man durch Aufhacken der Firste in eine andere Strecke gelangen, die die untere in einem Abstand von nur 30 cm zwischen Firste und Sohle überquerte. Diese auch im alten Bergbau unübliche Praxis läßt auf mindestens zwei verschiedene Abbauphasen vor der modernen Wiederaufnahme schließen. Zu diesem Ergebnis kommt auch Davies (1935), der in einem der alten Galeriensysteme Keramikfragmente aus dem 6. Jahrhundert v. Chr. fand. Demnach dürfte es eine archaische und eine mittelalteriche Abbauphase geben, wie der mittelalterliche Name von Mithymna, Molyvos, nahelegt. Trotz intensiver Suche wurden 1983 in der näheren Umgebung des Bergwerkes weder Keramik noch Schlacken gefunden.

Die metallogenetische Karte von Griechenland (Zachos u. Maratos 1965) verzeichnet ein Blei-Zink-Vorkommen (Nr. 121) bei Thermi an der Ostküste von Lesbos, allerdings ohne Literaturangabe. Dort liegt auch eine Troja I-zeitliche Siedlung, in der Metall verarbeitet wurde, wie Gußformen und Schmelztiegel belegen (Lamb 1936). Deshalb wurden besondere Anstrengungen unternommen, um dieses Vorkommen zu lokalisieren. Die aufgrund von Hinweisen von Dorfbewohnern von Thermi aufgefundenen Vererzungen und Schlackenfunde ca. 3 km südwestlich von Thermi bei den Lokalitäten Louloudia (TG 119A,D und E), Lagaria tou Fournou (TG 119B) und Lagadi tis Toksani (TG 119C) enthielten aber kaum Blei. Bei den Vererzungen handelt es sich um Brauneisen; die Schlacken stammen von einer Eisengewinnung (Tab. 5). An keramischem Material wurden nur archäologisch undatierbare Düsenfragmente und Wandstücke grober Gebrauchskeramik gefunden.

	SiO_2	FeO	Al_2O_3	MgO	CaO	K_2O	Summe
TG 119A-1	11,9	67,0	3,0	1,5	6,1	<0,1	89,5
TG 119B-1	20,6	54,7	5,2	1,6	10,6	1,4	94,1
TG 119B-2	10,1	75,2	2,7	1,2	3,6	<0,1	92,8
TG 119C	33,8	11,6	7,3	2,8	27,2	1,5	84,2
TG 119D	27,9	30,9	7,1	2,5	17,9	1,0	87,3
TG 119F	51,3	13,5	14,9	3,4	7,5	1,5	92,1

Tab. 5 Zusammensetzung von Schlackenstreufunden im Gebiet von Thermi (TG 119) auf der Insel Lesbos. TG 119F ist ein Oberflächenfund aus dem Bereich des frühbronzezeitlichen Siedlungshügels. Alle Proben enthielten weniger als 0,1% CuO, ZnO und PbO. Angaben in Prozent.

Biga Halbinsel

Im Sommer 1983 wurden in Nordwestanatolien 36 Erzvorkommen aufgesucht (Abb. 21); davon liegen 19 Blei-Zink-Vorkommen innerhalb des geographischen Rahmens dieser Arbeit. Sie sind bereits detailliert beschrieben (Pernicka et al. 1984), so daß im folgenden nur die archäometallurgisch bedeutenden noch einmal aufgeführt werden.

Die größte Blei-Zink-Lagerstätte der Region ist eindeutig Balya (TG 18), die zweifellos auch in der Antike ausgebeutet wurde. Wiegand (1904) identifizierte Balya mit dem antiken Pericharaxis, einer hellenistischen und römerzeitlichen Bergwerksstadt. Auch untertage sind die für die klassische Antike typischen rechteckigen Streckenquerschnitte häufig zu beobachten (Taf. 82,1.2; 83,1). Zumindest seit damals muß dieses Bergwerk episodisch in Betrieb gewesen sein, wie zahlreiche Nacharbeitungen bezeugen. Die Vermutung liegt nahe, daß solch eine große und an der Geländeoberfläche gut sichtbare Lagerstätte schon früher bekannt war. Forbes (1971) behauptet ohne Beleg, daß ein Großteil des Silbers von Troja II von Balya stammt.

Die Geländeuntersuchungen (Pernicka et al. 1984) führten zwar nicht zu einem eindeutigen Nachweis prähistorischen Bergbaus, aber es wurden Hinweise darauf gefunden, wie eine antike Nachuntersuchung am Stoß einer älteren Strecke mit unregelmäßig ovalem Querschnitt (Taf. 82,1.2), korkenzieherartige Gesenke, die mit prähistorischem Bergbau in Verbindung gebracht werden (Taf. 84,1), und eine Umfassungsmauer einer möglicherweise vorantiken Befestigungsanlage auf einem Hügel gegenüber dem Bergwerk (Taf. 84,2).

Für fünf weitere Lokalitäten wurde durch Thermolumineszenz- oder ^{14}C-Datierung mindestens antike Bearbeitung nachgewiesen. Es sind dies: Altınoluk (TG 12), Karaaydın (TG 14), Küserlık (TG 145), Arapuçandere (TG 150) und Bekten (TG 151). Auf der Schlackenhalde von Güre (TG 130A) ist so viel hellenistische und kaiserzeitliche Keramik zu finden, daß an einer Bleigewinnung in der Antike kaum gezweifelt werden kann. Die chemischen Charakteristika dieser und einiger anderer Bleierze aus der nordöstlichen Ägäis sind in Tab. 6 zusammengestellt.

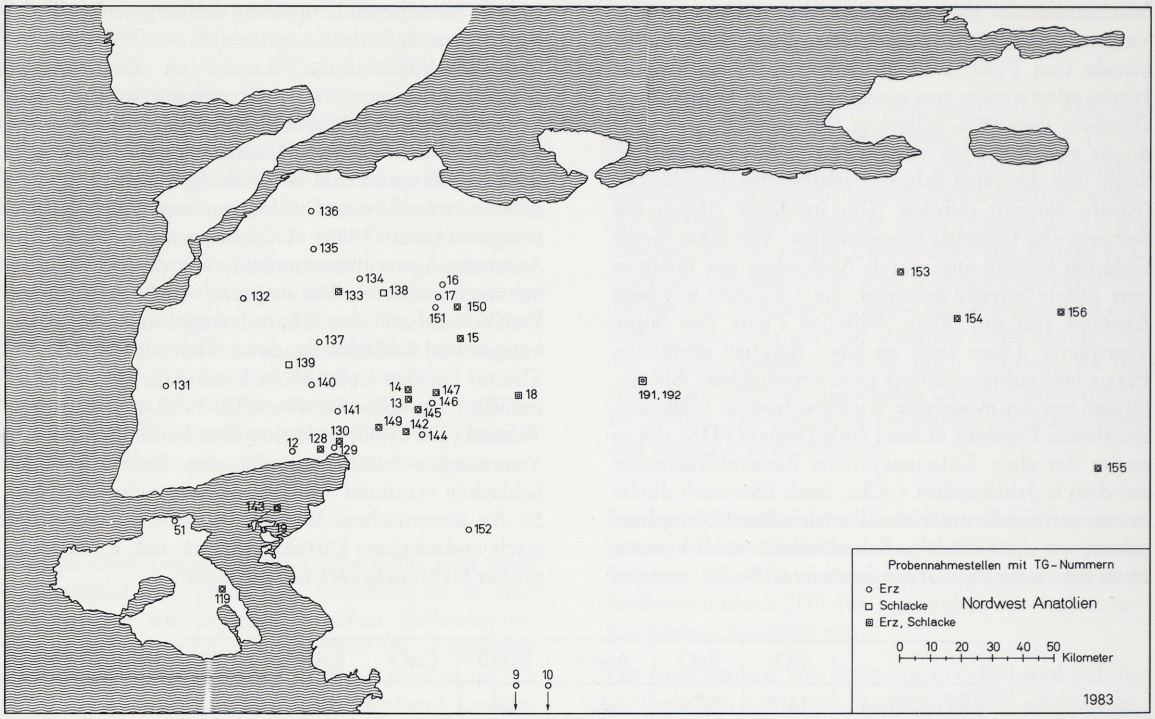


Abb. 21 Untersuchte Erzvorkommen in der nordöstlichen Ägäis mit TG-Nummern.

b. Nördliche Ägäis

In Nordgriechenland sind ungefähr 100 Einzelvorkommen von Bleierzen bekannt, die sich im wesentlichen auf sechs Reviere konzentrieren:

Kirki (TG 20, TG 21)

Im Bereich nördlich von Kirki und Essimi, etwa 20 km nordnordwestlich von Alexandropolis, liegen zahlreiche, meist gangförmige Kieserzvorkommen in räumlicher Nachbarschaft zu hydrothermal alterierten Andesiten und Subvulkaniten. Zwei Vererzungstypen können unterschieden werden: Eine schichtgebundene vulkanosedimentäre mit Pyrit, Zinkblende und Bleiglanz und eine epigenetische im Zusammenhang mit vulkanischen Intrusionen, die zusätzlich Kupferkies führt (Ashworth et al. 1985). Die beiden wichtigsten Lagerstätten Ag. Philippos (TG 20) und King Arthur (TG 21) wurden seit Ende des vergangenen Jahrhunderts untersucht und sporadisch abgebaut. Bis 1965 sollen insgesamt 15000 t Erz gefördert worden sein. 1974 bis 1980 wurden 160000 t Sulfiderz, vor allem Bleiglanz und Zinkblende, gewonnen (Feldhaus 1984). Danach wurde der Bergbau wieder gestundet. Über ältere Arbeiten ist wenig bekannt, wenngleich topographische Bezeichnungen wie »Maden Dere« osmanische Bergbautätigkeit vermuten lassen. Der Silbergehalt im Bleiglanz liegt um 800 µg/g (Mastoris 1979). Weiter nordöstlich im Gebiet um Essimi werden in dispersen Vererzungen bis zu 1700 µg/g Ag im Bleiglanz gefunden (Katirtzoglou 1986).

Thermi

30 km nordöstlich von Xanthi nahe der bulgarischen Grenze sind Blei-Zink-Gangvererzungen auf einem Gebiet von etwa 40 km^2 bekannt (Zachos u. Maratos 1965). Es handelt sich wahrscheinlich um die Fortsetzung des Maden-Reviers in Südbulgarien. Dort wird die Erzbildung mit rhyolithischen Intrusionen während des Miozäns in Verbindung gebracht (Bogdanov 1982). Es dominieren Bleiglanz, Zinkblende, die fast immer von Pyrit, Kupferkies, Arsenkies u. a. begleitet werden. Die bei Thermi auf Halde liegenden Schlakken unbekannten Alters weisen hohe Silbergehalte bis zu 125 g/t auf (Papastamataki 1985). Im Maden-Distrikt wurden Münzen von Tassos (= Thasos?) aus dem 14. Jahrhundert n. Chr. in alten Galerien gefunden (Bogdanov 1982). Unter türkischer Herrschaft wurde der Bergbau weiter betrieben. Eine eingehende archäometallurgische Untersuchung dieses Gebietes wäre äußerst wünschenswert.

		Cu µg/g	As µg/g	Sb µg/g	Ag µg/g	Au µg/g	Bi µg/g	Se µg/g	Pb %	Au/Agx10^6
Samos										
TG 48A-3	Zestos	73	15,7	930	500	<0,04	9,1	<50	n.b.	<80
TG50A	Drakei	7300	230	1900	1710	0,22	0,4	n.b.	63,7	130
TG50B-1	Drakei	26000	265	14100	2930	0,23	104	n.b.	71,8	78
TG50B-2.1	Drakei	4500	18,8	1600	880	<0,08	75	60	n.b.	<91
TG50B-2.2	Drakei	22700	385	15100	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Chios										
TG157A-3	Kambia	740	8,3	1450	950	<0,08	1,3	60	n.b.	<84
Lesbos										
TG51-1	Argenos	360	1,7	280	340	<0,03	<1	<50	n.b.	<88
TG51-2	Argenos	13000	790	100	162	45	20	n.b.	27,1	280000
Biga-Halbinsel										
TG12C-4	Altınoluk	126	<0,01	139	370	0,19	<1	<50	n.b.	510
TG12D-2	Altınoluk	2900	1,8	138	220	0,4	<1	<50	n.b.	1800
TG12D-1	Altınoluk	2000	<1,5	203	380	0,4	<1	<50	n.b.	1050
TG12D-7	Altınoluk	660	<1	157	255	0,08	<1	<50	n.b.	310
TG12D-1-1	Altınoluk	1950	<1,4	156	400	0,62	<1	<50	n.b.	1550
TG18D-2	Balya	66	1000	1640	1340	1,0	9,6	<50	n.b.	750
TG18E	Balya	750	545	1800	1190	0,02	111	<50	n.b.	17
TG18D-1	Balya	246	6,2	655	1360	1,9	11,7	<50	n.b.	1400
TG18E-1	Balya	690	336	1250	1400	–	720	<50	n.b.	n.b.
TG134A-1	Koçayayla	395	27,7	52	133	0,12	3,8	<50	n.b.	900
TG142H-1	Kozçagız	195	0,23	1255	2180	<0,05	10,2	<50	n.b.	<23
TG143B-2	Maden Adası	480	29,1	1030	990	<0,05	24	90	n.b.	<50
TG144D-1	Halılar	81	<0,3	600	640	0,25	201	65	n.b.	<390
TG146A-1	Bağirkaç	76	<1,7	210	245	<0,03	4,5	85	n.b.	<120
TG147A-1	Kiraçoba	700	7,95	520	560	<0,04	196	60	n.b.	<71
TG150A-1	Arapuçandere	390	<0,03	215	600	0,09	267	<50	n.b.	150
TG151-1	Bekten	275	0,1	12,8	2140	<0,02	4040	<50	n.b.	<9
TG152-1	Menteşdere	–	<0,95	84,0	162	0,08	146	13	n.b.	490
TG155C	Gümüşköy	51	4,85	1090	1235	<0,05	3,5	<50	n.b.	<40

Tab 6 Spurenelemente in Bleierzen aus verschiedenen Vorkommen in der östlichen und nordöstlichen Ägäis.

Thasos

In einem küstennahen Streifen im Westen der Insel kommen in Marmoren metasomatische Galmei-Vererzungen vor, die Smithsonit, Cerussit, Anglesit und andere Oxidationsminerale der Buntmetalle enthalten. Es handelt sich um Verwitterungslagerstätten, die bis 1914 in Förderung standen und in den letzten Jahren wieder intensiv prospektiert wurden. In der Antike war Thasos vor allem wegen seines Goldreichtums bekannt (s. Kap. III,3 b), aber auch die Buntmetallagerstätten wurden zumindest seit der hellenistischen



Abb. 22 Die Insel Thasos mit alten Berbau- und Verhüttungsplätzen (nach Wagner u. Weisgerber 1988).

Periode abgebaut (Pernicka et al. 1980). In Abb. 22 sind die antiken Gruben und Verhüttungsplätze eingetragen, deren Datierung durch Keramikfunde oder physikalische Altersbestimmungsmethoden gesichert ist. Prähistorischer Bergbau auf Hämatit wurde bei Tsinnes (TG 94) nachgewiesen. Eine zusammenfassende Darstellung der Archäometallurgie von Thasos in einem Beiheft der Zeitschrift des Deutschen Bergbaumuseums »Der Anschnitt« ist in Druck (Wagner u. Weisgerber 1988). Die Lagerstätten von Thasos wurden zuletzt von M. Vavelidis (1984) eingehend untersucht. Es zeigte sich, daß silberhaltige Bleierze heute nur mehr in sehr kleinen Mengen bei Marlou anstehen. Insgesamt sind die thasischen Bleierze durch einen sehr niedrigen Silbergehalt gekennzeichnet (Tab. 7), so daß prähistorische Silbergewinnung zumindest fraglich ist.

	Cu µg/g	As µg/g	Sb µg/g	Ag µg/g	Au µg/g	Bi µg/g	Pb %	Au/Agx10^6
Vouves								
TG24-1	13	46	903	396	0,00085	0,2	42,5	2,1
TG24-4	16	9780	194	4,52	0,0018	50	15,8	40
TG24-6	80	3000	340	18	<0,1	0,1	46,6	<550
TG24-11	46	3580	173	14,3	0,0006	<0,8	6,5	42
TG24-20	6	23600	<30	15,8	0,0007	1,9	53,4	44
Agios Eleftherios								
TG25-1	10	151	38	370	0,0047	0,4	25,1	13
Koumaria								
TG26-2	54	101	101	560	0,0019	1,4	27,7	3,4
TG26-3	62	48	450	78,8	0,0017	0,6	18,6	22
TG26-8	1500	530	450	60,0	0,0071	<4	2,92	120
TG26-8 Baryt	n.b.	n.b.	n.b.	25,6	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Sotiros								
TG28-1.1	23	1100	44	<22	<0,1	0,8	74,6	n.b.
TG28-1.2	6	1190	<2,5	1,47	0,00053	0,6	43,4	360
TG28-2o	4	340	1,9	11,8	0,0043	0,5	73,9	360
TG28-2m	2	540	<2	59	0,0005	0,7	65,8	8,5
TG28-2u	3	2770	3,6	280	0,017	<4	45,3	61
Kourlou								
TG73/9-3	8	890	83	29,4	0,0019	0,2	4,21	65
TG73/13-1	n.b.	n.b.	n.b	0,45	0,0021	n.b.	n.b.	4700
TG73/22-1	34	160	1050	890	0,0023	<0,5	44,5	2,6
Marlou								
TG74A-1	n.b.	n.b.	n.b.	7,5	0,0021	n.b.	n.b.	280
TG74A-2	n.b.	n.b.	n.b.	3,4	0,0004	n.b.	n.b.	120
TG74A-3	n.b.	n.b.	n.b.	122	0,0072	n.b.	n.b.	59
TG74A-4	n.b.	n.b.	n.b.	6,5	0,0006	n.b.	n.b.	92
TG74A-6.1	n.b.	n.b.	n.b.	9,0	0,004	n.b.	n.b.	440
TG74A-6.2	n.b.	n.b.	n.b.	0,95	0,0013	n.b.	n.b.	1400
TG74A-6.3	<15	2100	320	77	<0,4	0,5	58,1	<5000
TG74A-7	<10	1100	880	62	9,9	0,3	59,5	160000
TG74A-8	30	1100	360	22	<0,3	0,2	47,2	<14000
TG74A-9	35	2600	950	120	5	<0,4	n.b.	42000
TG74A-10	<16	1600	460	74	<0,3	<0,2	n.b.	<4000
TG74/6-2	n.b.	n.b.	n.b.	125	0,0022	n.b.	n.b.	18
TG74/8-1	n.b.	n.b.	n.b.	129	0,0008	n.b.	n.b.	6,2
TG74/10-1.2	n.b.	n.b.	n.b.	187	0,0004	n.b.	n.b.	2,1
TG74/11-1.1	n.b.	n.b.	n.b.	1510	0,00023	n.b.	n.b.	0,15
TG74/11-2	n.b.	n.b.	n.b.	500	0,0005	n.b.	n.b.	1,0
TG74/26-1.2	n.b.	n.b.	n.b.	220	0,01	n.b.	n.b.	45
Padia								
TG78-1	30	680	55	0,3	0,0003	0,3	47,9	1000

Tab. 7 Spurenelemente in Bleierzen von Thasos. – n.b. = nicht bestimmt.

	Cu µg/g	As µg/g	Sb µg/g	Ag µg/g	Au µg/g	Bi µg/g	Pb %	Zin %	Fe %
TG34B-1 Bleiglanz	175	177	5000	3100	0,32	1,2	n.b.	n.b.	n.b.
TG34B-2.1 oxid. Bleierz	690	625	10700	680	<0,4	0,7	22,2	n.b.	n.b.
TG34B-2.2 Bleiglanz	250	<4	5700	3030	0,17	0,4	73,5	n.b.	n.b.
TG34B-2.3 Zinkblende	630	122	87	<60	<0,3	<0,1	0,04	54,4	7,6

Tab. 8 Spurenelementgehalte in Sulfiderzen von Pontokerasia (TG34). TG34B ist eine kleine Erzhalde neben einer Schlackenhalde mit vielen antiken Keramikfragmenten.

Angistron (TG 31-TG 33)

Nördlich von Siderokastro, nahe der bulgarischen Grenze, sind gangförmige Vererzungen von Magnetkies, Arsenkies, Pyrit und kleinere Mengen Bleiglanz, Zinkblende und Kupferkies mit teilweise mächtigen Oxidationszonen bekannt (Zachos u. Maratos 1965). Es wird von alten Stollen berichtet, die aus der Antike stammen sollen, ebenso wie zwei Halden metallreicher Schlacke (1-3% Pb+Cu) von je etwa 40000 t. Entsprechend dem hohen Anteil von Arsenkies im Ausgangserz enthalten die Schlacken häufig auch mehrere Prozent Arsen (Papastamataki 1975), vermutlich in Form von Eisenarseniden (Speise). Die Bildung von Speise bei der Buntmetallverhüttung ist unerwünscht, da sie einen Teil der Edelmetalle aufnimmt, der kaum zurückzugewinnen ist. Heute kann Arsen beim Rösten durch hohe Temperaturen oder Chlorzusatz entfernt werden, aber trotzdem ist ein Arsengehalt im Erz wertmindernd. Allerdings kann aus dem Auftreten von Speise in Schlackenhalden keine Datierung abgeleitet werden. Deshalb wären weitere Untersuchungen dieser Vorkommen wünschenswert.

Pontokerassia (TG 34, TG 35)

In den Krusia Bergen nordöstlich von Kilkis wird von teils sehr mächtigen hydrothermalen Gangvererzungen rund um Pontokerassia berichtet (Zachos u. Maratos 1965). In der Gemarkung Gianni Karidia, südöstlich von Pontokerassia, tritt in der Nähe eines Kontakts einer granitischen Intrusion im Schiefer ein Quarzgang auf. In den Schiefer ist entlang des Quarzganges ein 80-100 cm hoher Stollen mit trapezförmigem Querschnitt angelegt (TG 34A). Im Inneren sind Gezähespuren erkennbar. Zur Zeit der Begehung (Frühjahr 1982) stand der Stollen teilweise unter Wasser. Er setzt sich aber noch mindestens 20 m ohne sichtbare Seitenstrecken fort. Westlich dieses Stollens liegt eine Schlackenhalde (TG 34B) von 10000-20000 t. Es handelt sich zum größten Teil um glasige Fließschlacken, wie sie für Bleigewinnung typisch sind. Zahlreiche Keramikbruchstücke auf dieser Halde deuten auf klassische und hellenistische Verhüttung hin. Etwa 200 m westlich sind Reste einer Erzhalde mit Eisenoxiden, Bleiglanz, Zinkblende, Pyrit, Arsenkies und Kupferkies erhalten (Tab. 8). Nach Aussage der Dorfbewohner gehörte die Halde zu einem Stollen, der durch Wegebau und Feldarbeit verschüttet wurde.

Südlich und westlich des Dorfes wurden mehrere Schwärme von Quarzgängen und eine weitere Erzhalde beobachtet. In der Gemarkung »Megalo Karagatsi« wurde ein weiterer alter Stollen (TG 34B) befahren, der einer 20 cm mächtigen schichtparallelen Vererzung im Schiefer folgte. Außer Eisen-Mangan-Oxiden war feinkörniger Bleiglanz erkennbar. Die Höhe des Stollens betrug wiede etwa 100 cm, Gezähespuren und Lampennischen waren deutlich erkennbar. Etwa 5 m vom Mundloch entfernt kreuzte eine Strecke im rechten Winkel, die an beiden Enden verstürzt war. Der Rest der Grube war ersoffen.

Rund um Pontokerassia sind antike Keramikbruchstücke und verstreute Schlacken zu finden, so daß das antike Bergbaurevier möglicherweise weit größer war, als die noch erhaltenen Reste vermuten lassen. Dies wird durch Aussagen der Dorfbewohner über weitere verschüttete Stollen und eingeebnete Halden unterstützt.

Chalkidiki (TG 38, TG 39, TG 42, TG 106-116)

Der Bergbaudistrikt von Kassandra im nordöstlichen Teil der Halbinsel Chalkidiki ist der derzeit einzige in Förderung stehende Buntmetallbergbau Griechenlands. Als »Kassandra-Lagerstätten« wird eine Gruppe von Kieserzlagerstätten im nordöstlichen Teil der Halbinsel Chalkidiki bezeichnet, die einer O-W streichenden Störungszone folgen (Abb. 23). Es sind dies von West nach Ost die »Erzpfeiler« von Warwara, Piavitza (TG 106B), Mavres Petres (TG 38A), Morphouli, Litareka und Chevalier, die als linsenförmige metasomatische Verdrängungskörper im altkristallinen Marmor charakterisiert werden. Der Erzkörper von Madem Lakkos (TG 38 C) folgt einer von der Hauptstörung abzweigenden Fiederstörung. Nach Neubauer (1957) steht die Lagerstätte in Zusammenhang mit einer Aplitapophyse, die die altkristallinen Marmorschollen durchschlägt und von einem oligozänen Granodiorit ausgeht. An der Oberfläche ist ein mächtiger eiserner Hut ausgebildet, der über 2 km zu verfolgen ist. Die Erzführung im oberen Lagerstättenbereich besteht überwiegend aus Pyrit, Bleiglanz, Zinkblende und Manganoxiden, während mit zunehmender Teufe höher temperierte Mineralparagenesen (Kupferkies, Magnetkies, Magnetit und untergeordnet Wismutglanz) hinzutreten (Nicolaou 1966). Die metasomatische Lagerstätte von Olympias (TG 39A)

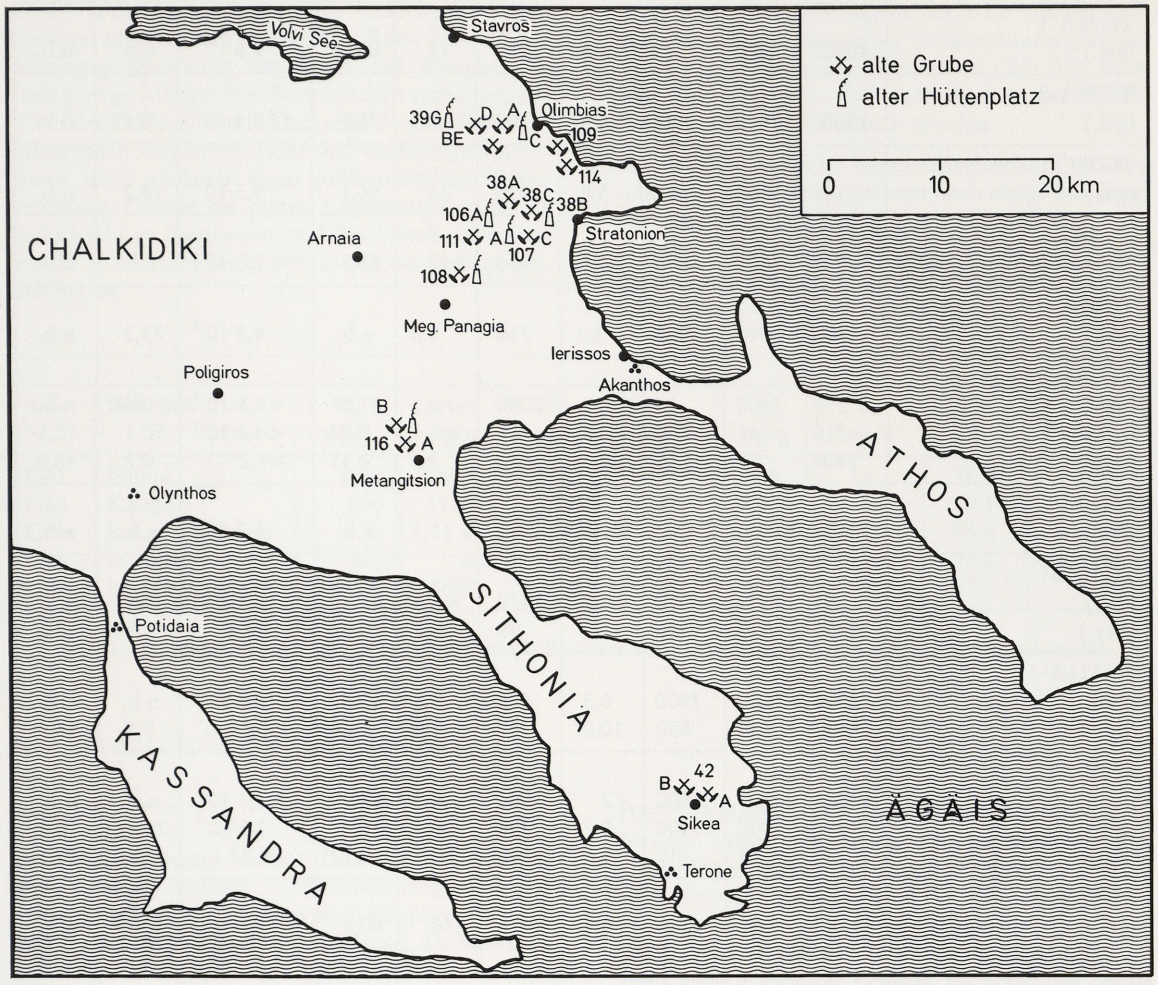


Abb. 23 Alte Bergbau- und Verhüttungsplätze auf der Halbinsel Chalkidiki (nach Wagner et al. 1986a).

wurde 1969 nach intensiver Prospektion aufgrund zahlreicher alter Schächte und Stollenmundlöcher entdeckt. Der linsenförmige Erzkörper ist an den tiefsten Marmorhorizont der Kerdilion-Folge im Kontakt zum Biotitgneis gebunden. Zusammen mit einem Aplit tritt hier eine 12-14 km mächtige Lage von Sulfiderzen mit ähnlicher Paragenese wie bei Madem Lakkos auf. Die Sulfiderze der Kassandra-Region sind durch relativ hohe Goldgehalte gekennzeichnet (Tab. 9).

Im Umkreis der großen Lagerstätten sind an mehreren Stellen Quarzgänge mit Sulfiden bekannt, die fast durchwegs Stollenmundlöcher und Schächte unbekannten Alters aufweisen (Walter 1977). In den meisten Fällen dürfte es sich wohl um neuzeitliche Prospektionen handeln (Wagner et al. 1986). Die Kassandra-Region ist auch durch riesige Halden von Bleischlacken (Tab. 10) gekennzeichnet, die wahrscheinlich zum größten Teil aus der mittelalterlichen Produktion stammen, als P. Bellon (1555) 600 Schmelzöfen in Betrieb sah.

Außer den genannten Revieren ist noch eine Kieslagerstätte in einer vulkanosedimentären Gesteinsabfolge bei Polykastron, etwa 50 km nordwestlich von Thessaloniki, zu erwähnen, die erst kürzlich entdeckt worden ist (Feldhaus 1984). Über alten Bergbau ist in dieser Gegend wenig bekannt. Immerhin fand Davies (1932a) einige Kilometer weiter nordwestlich bei Ljumnica und Ošin (heutige Namen nicht bekannt) kleine Halden von Bleischlacke unbekannten Alters und bei Sevrian (= Vorinou?) viele Stollen und Halden, die er für möglicherweise mittelalterlich hielt.

Außer diesen bekannten Blei-Zink-Lagerstätten kommen grundsätzlich auch Manganvererzungen mit örtlich erhöhten Buntmetallgehalten für antiken und prähistorischen Abbau in Frage. Solche meist hydrothermal gebildete Lagerstätten treten als Verdrängungskörper vorwiegend in Kalken und Marmoren sowie gangförmig auch in anderen Gesteinstypen im Bos Dag nördlich von Drama und im Gebiet zwischen dem Nestos und der bulgarischen Grenze auf (Podufal

Probennummer (Hauptmineral)	As µg/g	Sb µg/g	Cu µg/g	Au µg/g	Ag µg/g	Bi µg/g	Pb %	Au/Ag	Zn %	Fe %
TG38A-1 (gal.)	46500	7300	79	4,6	1790	12	65,0	$2{,}6\cdot10^{-3}$	n.b.	n.b.
TG38A-8 (gal.)	15000	2600	29	0,6	1760	7,5	75,9	$3{,}4\cdot10^{-4}$	0,13	n.b.
TG38C-1 (gal.)	180	1100	520	5,6	1020	23	56,1	$5{,}5\cdot10^{-3}$	18,2	n.b.
TG38C-2 (Flotationskonzentrat)	6200	3500	9100	0,12	930	340	65,5	$1{,}6\cdot10^{-3}$	n.b.	n.b.
TG39A (gal.)	4600	840	960	3,1	710	0,6	n.b.	$4{,}3\cdot10^{-3}$	23,3	n.b.
TG39A-2										
(gal.)	250	2400	38	<0,1	2090	0,5	81,9	$<4{,}8\cdot10^{-5}$	0,98	n.b.
(sphal.)	210	44	650	<0,3	65	<0,1	0,24	$<4{,}6\cdot10^{-3}$	50,1	10,9
(pyr.)	1400	22	39	28,1	<23	3,4	0,41	>1,2	0,2	46,6
TG40 (Sulfide)	113000	41800	27000	102	1790	11,5	n.b.	$5{,}7\cdot10^{-2}$	n.b.	n.b.
TG109B1										
(gal.)	53	1100	4100	<0,2	1470	<0,1	81,4	$1{,}4\cdot10^{-4}$	n.b.	n.b.
(pyr.)	25000	320	1300	15,1	98	5,7	0,73	0,15	3,9	43,0
TG111A-1										
(gal.)	1500	1600	1900	0,3	400	1,5	40,3	$7{,}5\cdot10^{-4}$	n.b.	n.b.
(pyr.)	6400	280	550	10,0	27	1,5	0,68	0,37	0,1	47,4
TG114-1										
(gal.)	13000	31500	1800	<2	1560	4,3	67	$<1{,}3\cdot10^{-3}$	n.b.	n.b.
(sphal.)	1400	4000	1400	0,7	200	0,4	1,7	$3{,}5\cdot10^{-3}$	28,8	3,1
(pyr.)	22700	79	410	18,6	40	0,6	0,12	0,47	n.b.	39,3
TG42A-1 (gal.)	<2	840	240	0,12	930	340	80,6	$1{,}2\cdot10^{-4}$	n.b.	n.b.
TG42A-2 (gal.)	21	890	250	0,4	850	44	84,2	$4{,}7\cdot10^{-4}$	n.b.	n.b.

Tab. 9 Spurenelementgehalte in Sulfiderzen von der Chalkidiki; gal. = Galena (Bleiglanz), sphal. = Sphalerit (Zinkblende), pyr. = Pyrit.

Probe Lokalität Textur	TG106A-1.2	TG106A-2.1 Piavitza-Skouries plattig, z.T. blasig	TG106A-2.3	TG107A-2.2 Kolumpouki plattig	TG116B-3 Axantas glasig
SiO_2	20,2	37,7	34,8	17,8	36,6
FeO	46,9	26,9	26,3	23,6	14,1
Al_2O_3	4,2	3,5	4,2	4,0	7,8
CaO	3,3	2,8	3,6	2,6	6,9
MgO	1,45	1,21	n.b.	n.b.	n.b.
Na_2O	n.b.	n.b.	0,22	0,28	0,25
K_2O	1,45	1,55	1,39	0,92	1,82
MnO	n.b.	n.b.	20,6	1,27	0,13
ZnO	12,0	3,4	1,81	15,3	1,18
CuO	0,17	0,03	1,10	0,20	0,20
PbO	1,40	2,0	1,72	20,1	23,0
As	n.b.	n.b.	0,0085	0,15	1,38
Sb	n.b.	n.b.	0,0026	0,58	0,36
Summe	91,1	79,1	94,7	86,8	93,8

Tab. 10 Zusammensetzung von Bleiverhüttungsschlacken von der Halbinsel Chalkidiki (Angaben in Prozent).

1972). Außerdem kommen im südlichen Lekani-Gebirge, nördlich von Kavala, eine Reihe kleiner Verwitterungslagerstätten von Eisen und Mangan, die auch geringe Mengen von Buntmetallen enthalten, vor (Chalkias 1985). Kleine Schlackenhalden mit Blei- und gelegentlich Kupfervormacht und englichtige Stollen lassen alten, vielleicht sogar prähistorischen Abbau vermuten. Gerade bei diesen Lagerstätten ist es oft nicht leicht zu bestimmen, welches Metall gewonnen wurde. In vielen Fällen könnte es sich um Gold gehandelt haben.

Auch im Gebiet des Pangäon, der in der antiken Literatur vor allem wegen seines Goldreichtums gerühmt wird, treten silberreiche Bleierze auf (Tab. 11). Es ist sehr wahrscheinlich, daß auch diese in der Antike bekannt waren und abgebaut wurden.

Die metallogenetische Karte Griechenlands (Zachos und Maratos 1965) verzeichnet noch einige Sulfiderzvorkommen an der Ostflanke des Pilion Gebirges östlich von Volos, die z.T. im vergangenen Jahrhundert mit Stollen untersucht wurden. Von älterem Bergbau ist in dieser Gegend nichts bekannt.

Probe	Lokalität	Cu µg/g	As µg/g	Sb µg/g	Ag µg/g	Au µg/g	Bi µg/g	Pb %	Au/Ag x 10^6
TG61	Filippi	2000	21600	2400	1700	3,25	14	76,9	1900
TG64	Kalapoti	690	1150	6800	3500	0,27	1,0	80,1	77
TG65	Kalotihon-Psare	71	8,2	190	290	0,040	1,0	85,4	140
TG66	Iasmos	420	6,0	205	235	0,21	1,5	78,0	890
TG83-1	Mati/Pangäon	339000	3000	760	260	1,13	5,2	27,6	4300

Tab. 11 Konzentrationen einiger Spurenelemente in Bleierzen von verschiedenen Vorkommen in Nordgriechenland.

c. Südgriechenland und Kykladen

Attika

In Südgriechenland nimmt Laurion (TG 60) die beherrschende Stellung – archäometallurgisch, lagerstättenkundlich und ehemals auch ökonomisch gesehen – ein. Im Südostteil der Halbinsel Attika stehen auf einer Fläche von etwa 80 km^2 zahlreiche, meist unregelmäßig begrenzte, linsenförmige Erzkörper an, die zum Liegenden hin schlauch- und gangförmige Verlängerungen aufweisen. Der Großteil der Erzkörper ist in Marmoren, vorwiegend im Kontakt zu Glimmerschiefer, ausgebildet. Die Vererzung besteht vorwiegend aus Zinkblende, Pyrit, Bleiglanz und untergeordnet Kupferkies. Außerdem tritt eine Vielzahl anderer Minerale auf, vor allem durch Oxidation entstandene Blei-Zink-Kupfer-Karbonate, die ein beliebtes Ziel mineralogischer Untersuchungen sind. In ihrer grundlegenden Beschreibung des Lagerstättendistrikts gehen Marinos und Petrascheck (1956) von einer hydrothermal-metasomatischen Erzbildung aus. In einer alternativen Interpretation nahm Leleu (1966) eine primäre vulkano-sedimentäre Erzbildung an, deren Metallinhalt ausgelaugt und bei Verkarstungsvorgängen wieder angereichert wurde. Lokale hydrothermale Paragenesen werden auf eine Remobilisierung im Zuge einer Granitintrusion bei Plaka zurückgeführt.

Zur Bergbaugeschichte von Laurion gibt es eine außerordentlich große Zahl von Veröffentlichungen (Weisgerber u. Heinrich 1983). Von den älteren Arbeiten seien stellvertretend nur Boeckh (1818), Kordellas (1871), Ardaillon (1897) und Binder (1895) genannt. Neuere zusammenfassende Beiträge stammen von Conophagos (1980) und Kalcyk (1982). Eine Übersicht über die modernen und z.T. noch laufenden Untersuchungen in und über Laurion gibt Jones (1982). Erst in jüngster Zeit wurde besonders bei Thorikos auch vorantiker Bergbau nachgewiesen (Mussche 1974; Spitaels 1984). Insgeamt wurden in Laurion etwa 2-3 Millionen Tonnen Blei gefördert. Derzeit ist der Abbau eingestellt, aber die Vorräte sollen noch einige Millionen Tonnen an armem Erz betragen.
Trotz der langandauernden modernen Produktionsphase sind noch an vielen Stellen Reste des antiken Bergbaus und der Erzaufbereitungsanlagen erhalten (Taf. 85,1.2). Die für antike Verhältnisse gigantischen Ausmaße des Bergbaureviers sind aus Abb. 24 zu ersehen. Ganz allgemein wurden die Erzkörper in der Antike mit meist rechteckigen Schächten erschlossen, von denen aus horizontale Querstrecken mit rechtekkigem oder trapezförmigem Querschnitt aufgefahren wurden. Im Detail sind aber viele Fragen zur Technik des antiken Bergbaus in Laurion ungeklärt, da eine montangeologische Untersuchung nie durchgeführt wurde.

Die Frage nach dem Beginn des Bergbaus in Laurion war lange Zeit heftig umstritten. Durch die Ergebnisse der belgischen Ausgrabungen bei Thorikos ist es nun gesichert, daß die Bergbautätigkeit bis in die frühe Bronzezeit zurückreicht (Spitaels 1984). Möglicher-

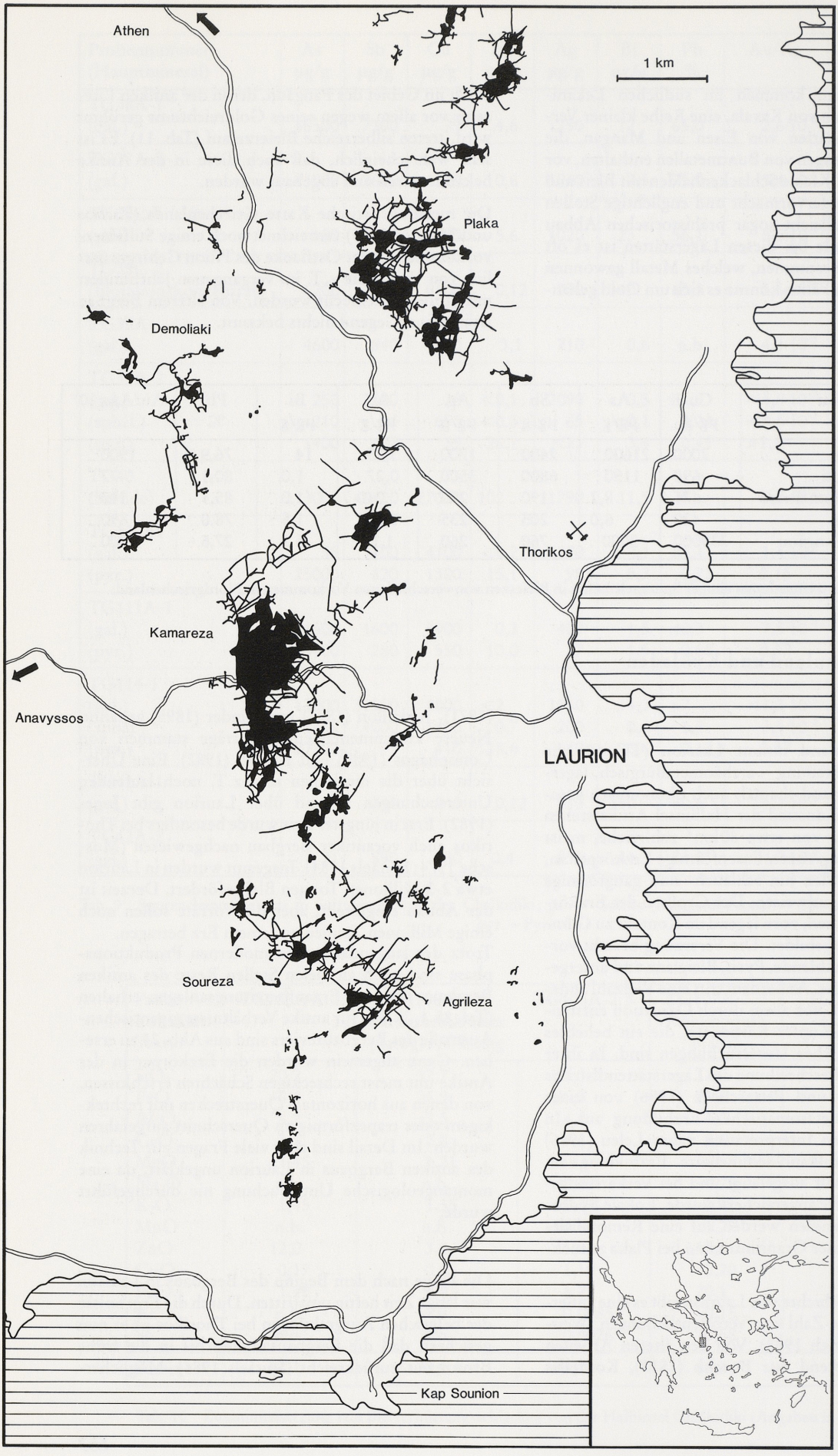


Abb. 24 Vermessungsplan der antiken Bergwerksanlagen in Laurion (nach Conophagos 1980). Es handelt sich nicht um eine detailgetreue Wiedergabe. Wichtig ist nur die außerordentlich große Fläche, die von Bergwerksanlagen bedeckt ist.

weise sind auch im Südwesten von Attika, in der Gemarkung Thimari noch Spuren vorantiken Abbaus erhalten. Dort folgte ein heute verlassener moderner Kleinbergbau offensichtlich älteren Tagesbrüchen und Galerien, die zum größten Teil zerstört wurden. Die Vererzung besteht vorwiegend aus Brauneisen mit großen Fluoritkristallen und ist an einen nach Süden steil einfallenden, O-W streichenden Kontakt von Schiefer im Hangenden und Marmor im Liegenden gebunden. Die Anlage eines steilen Gesenks, ein Stollenmundloch mit etwa ellipsenförmigem Querschnitt (Taf. 86,1) scheint für die antike Abbautechnik untypisch zu sein. Seit der römischen Kaiserzeit war Südattika aber fast unbewohnt und wurde nur gelegentlich von Hirten aufgesucht. Deshalb drängt sich der Schluß auf, daß es sich hier um vorantiken Bergbau handelt. Zudem liegt eine von ganz wenigen gesicherten frühbronzezeitlichen Keramikfundstellen in dieser Gegend nur etwa 500 m weit von der Grube entfernt (Lohmann, mündliche Mitteilung 1984).

Peloponnes

Im Kommentar zur metallogenetischen Karte von Griechenland (Zachos u. Maratos 1965) werden einige kleine Blei-Zink-Vorkommen vor allem an der Ostflanke des Taigetos erwähnt. Cooke et al. (1972) haben diese Vorkommen aufgesucht und sie wegen ihrer geringen Größe, vor allem ihrer geringen Gehalte an Buntmetallen, als archäometallurgisch uninteressant klassifiziert. Im Süden der Halbinsel Mani fanden Fiedler (1841) und Davies (1935) Bleischlacken und alte Bergwerke. Im Südosten der Peloponnes auf dem Kap Malea hat Davies (1935) alte Gruben in der Nähe des Meeres gesehen. Die Erzführung bestand vorwiegend ans Brauneisen. Auch Schlacke mit 37% Fe kommt vor. In Analogie zu ähnlichen Vorkommen auf den Kykladen (s.u.) könnten hier möglicherweise auch Buntmetalle gewonnen worden sein. Eine nähere archäometallurgische Untersuchung wäre angebracht.

Makronissos

Auf dieser langgestreckten, Laurion vorgelagerten Insel sind bei Paläa Metallia, Ag. Georgios und Aspros Kavos Blei-Zink-Vorkommen bekannt (Zachos u. Maratos 1965). Bei Leonardi sind auch Spuren einer bronzezeitlichen Siedlung erhalten, wo in frühbronzezeitlichen Schichten auch Bleiglätte gefunden wurde (Spitaels 1984). Die Insel ist heute unbewohnt. Wenn alter Bergbau umgegangen sein sollte, könnte er mit einiger Wahrscheinlichkeit prähistorisch sein. Eine Untersuchung würde sich daher wegen der günstigen Voraussetzungen lohnen; weder in der Antike noch in moderner Zeit scheint dort intensiver Bergbau betrieben worden zu sein.

Euböa

Bei Almiropotamos im Südteil der Insel (s. Abb. 25) sind auf dem Megalo Vouno genannten Bergrücken mehrere z.T. schichtgebundene Vererzungen in Marmor eingelagert. Sie wurden von der »Siphnos-Euböa«-Bergwerksgesellschaft durch einen etwa 200 m langen Stollen entlang einer Kluft und mehrere Schächte erschlossen (TG 56 A), wobei anscheinend ältere Anlagen aufgesprengt wurden (Karageorgiou 1955). Außer oxidierten Eisenmineralien sind Zinkblende und Bleiglanz vorhanden. Etwa 500 m weiter nordöstlich liegen noch einige kleinere Gruben, die vielleicht auch auf ältere Vorgängerarbeiten zurückgehen (TG 56B). Unterhalb der Gruben, auf dem Ag. Demetrios genannten Felsvorsprung, liegen außerordentlich viele Obsidianfragmente (Jacobson 1964), aber es ist unsicher, ob sie mit dem Bergbau in Zusammenhang stehen.

An der Südostspitze von Euböa treten bei Kallianou (TG 57-TG 59) mehrere vererzte diskordante Quarzgänge in Chloritschiefer auf (Petrascheck u. Marinos 1955). Die Vererzung besteht aus Bleiglanz, Pyrit und Kupferkies in stark wechselnden Anteilen. Untergeordnet kommt Zinkblende, selten Bornit, Argenit, Fahlerz und gediegen Gold mit wechselnden Silbergehalten vor. Gold ist allerdings nur mikroskopisch zu identifizieren und tritt meist in Form von kleinen (< 5µm) Einschlüssen in Pyrit, Kupferkies und Quarz auf. Agiorgitis und Becker (1975) fanden auch im Bleiglanz hohe Goldgehalte. Der rezente Bergbau wurde 1938 eingestellt. Am Strand nördlich von Kallianou ist eine Schlackenhalde mit Keramikfragmenten angeschnitten, die angeblich aus byzantinischer Zeit stammen soll. Diese Schlacken stammen von einer Kupferverhüttung und sind z.T. ähnlich glasig-blaugrün wie die von Skouries (TG 108) auf der Chalkidike. Weitere Schlackenhalden sind noch weiter östlich bei Schizali zu finden (Wagner 1975). Dabei handelt es sich wahrscheinlich zum Teil um Eisenschlacken (Papastamataki 1985).

Kea

In der bedeutenden bronzezeitlichen Siedlung von Aghia Irini (TG 124A) wurden viele Bleiobjekte gefunden. Obwohl es wegen der Nähe zu Laurion denkbar ist, daß Erze von dort auf Kea verhüttet wurden, wäre es dennoch interessant zu wissen, ob Bleierze auf der Insel selbst vorkommen. Geht man allein nach der metallogenetischen Karte (Zachos u. Maratos 1965), wäre die Frage gelöst. Denn in ihr werden Blei und Silber auf Kea verzeichnet. Allerdings beruht diese Information nur auf nicht näher bezeichneten Archiven des griechischen Wirtschaftsministeriums. In einer neueren Arbeit über die Geologie von Kea (Davis 1972), in der nur Eisenerze erwähnt werden, wird diese Angabe zumindest nicht bestätigt.

Berichte in der älteren Literatur über Kea beginnen mit Theophrast (De lapidibus 52), der behauptet, daß die im Altertum geschätzteste rote Farbe (miltos) von Kea gekommen sei. Es ist offensichtlich, daß damit Rötel gemeint war (Caley u. Richards 1956). Fiedler (1841)

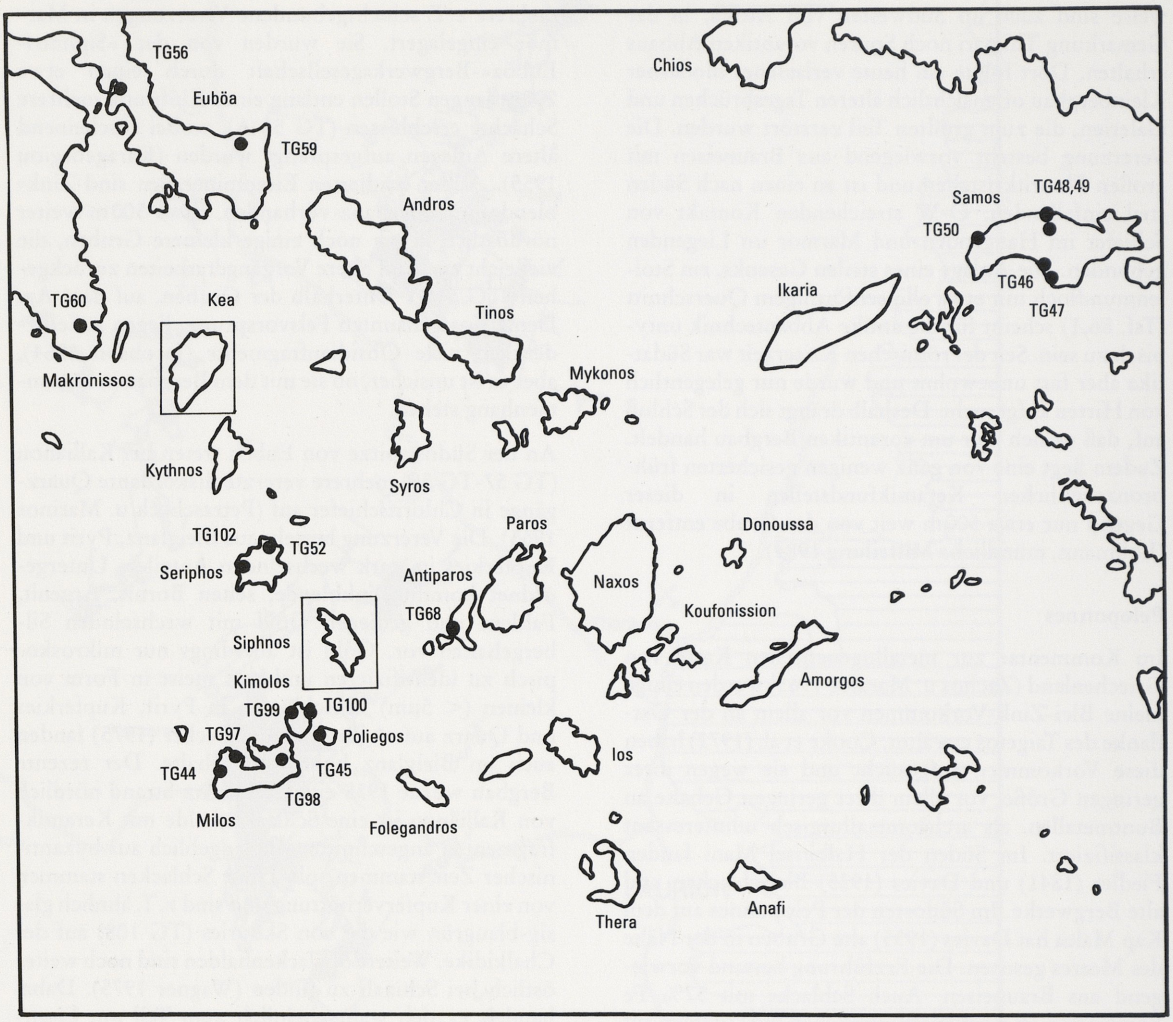


Abb. 25 Aufgesuchte Erzvorkommen in Südgriechenland und auf den Kykladen. Die Inseln Kea und Siphnos sind in den Abb. 26 und 27 vergrößert dargestellt.

aber, der auf der Insel weder Bleierze noch größere Vorkommen von Rötel sah, brachte einige Funde von Bleiglätte im Hafen von Kea mit dieser Stelle in Zusammenhang und vermutete, daß mit der roten Farbe Mennige (Pb_3O_4) gemeint sei. Landerer (1849) wiederholt diese Vermutung und die umständliche Begründung, daß in der Antike Bleiglätte von Laurion wegen Holzmangels auf Kea zu Mennige verarbeitet worden sei, fast wörtlich. Unlogischerweise wiederholt er aber auch die vermutlich auf Tournefort (1727) zurückgehende Behauptung, daß im Süden von Kea gegenüber von Kythnos silberhaltiger Bleiglanz auftrete.

Diese Fehlinterpretation hat Eingang in die archäologische Literatur gefunden und hat dort weitere Verwirrung gestiftet (Kroll 1932). Miltos wurde nämlich öfter mit Mennige oder Minium gleichgesetzt (Weissbach 1932), die wieder allgemein zur Bezeichnung des Zinnobers gebraucht wurden. So kommt es, daß Bürchner (1921) über das antike Kea schreibt, daß »der gewonnene Zinnober ausschließlich an Athen geliefert werden sollte«.

Nach Hauttecoeur (1896) wurde von der griechischen Regierung eine Konzession für Bleibergbau auf Kea gegeben. Philippson (1901) spricht von Gängen mit silbehaltigem Bleiglanz in Marmor auf dem Petrussa genannten Südteil von Kea, ohne sie selbst gesehen zu haben. Freise (1907) wiederholt Landerers (1849) Angaben, wie aus der falschen Schreibweise für Kanessos (statt Karessos) ersichtlich ist. Papavasiliou (1909) erwähnt ebenfalls silberhaltige Bleierze auf Kea ohne nähere Ortsangabe. Auch Davies (1935) bezieht sich nur auf die ältere Literatur und berichtet, daß er dieses Vorkommen nicht lokalisieren konnte. Vermeule (1964) rechnet mit Blei- und Silbergewinnung auf Kea seit dem 3. Jahrtausend v. Chr. ohne weitere Begrün-



Abb. 26 Archäometallurgische Fundstellen auf der Insel Kea.

dung. Buchholz (1972) nimmt diese Bemerkung auf und – hier schließt sich der Kreis – führt die Stelle bei Theophrast (De Lapidibus 52) als Bestätigung an.

Dagegen betonen Gale et al. (1984), daß es keinen Beweis für die Existenz von Bleierzen auf Kea gäbe. Darüber hinaus verweisen sie auf eine unpublizierte geologische Kartierung von V. Avdis und eigene Geländeaufnahmen, die gezeigt hätten, daß weder Blei- noch Silbererze auf Kea vorkommen. In der 1972-73 von E. N. Davis angefertigten geologischen Karte von Kea sind ebenfalls keine Bleivorkommen verzeichnet.

In Wirklichkeit gibt es tatsächlich ein Bleiglanzvorkommen an der Südspitze von Kea, bei Faros (TG 123B), gegenüber von Kythnos, wie es Tournefort (1727) beschrieben hat (Abb. 26). Dies konnte 1983 im Verlauf einer archäometallurgischen Begehung auf der Insel Kea festgestellt werden. Es handelt sich um einen diskordanten Gang im Marmor (Taf. 87,1.2), der außer Bleiglanz auch Zinkblende, Pyrit und Cerussit (Taf. 86,2) führt. Die Vererzung ist an eine verkieselte Brekzie gebunden und enthält Fluorit, Calcit, Ankerit und Brauneisen als Gangart. Der Erzgang ist etwa 2 m mächtig und an der Oberfläche auf einer Länge von

Probe	Cu	As	Sb	Ag	Au	Au/Agx10^6
TG123B-3.0	81	<5	104	245	0,008	33
TG123B-3.1	210	1,65	94	308	0,052	169
TG123B-3.2	35	1,84	136	373	<0,016	<43
TG123B-3.3	13,5	3,46	133	352	<0,018	<51
TG123B-3.4	63	2,67	126	192	<0,016	<83
TG123B-3.5	38	3,54	126	192	0,020	104

Tab. 12 Konzentrationen einiger Spurenelemente in Bleiglanzproben von Faros/Kea (TG123B). Alle Angaben sind in µg/g.

etwa 20 m zu verfolgen. Durch einen rezenten Kleinbergbau ist er auf eine Tiefe von mindestens 20 m völlig ausgeerzt. Ein Stollen, der nicht begangen werden konnte, führt anscheinend noch weiter in die Tiefe.

In der Nähe des Erzganges lag ein kleines Stück Glanztonkeramik, das darauf hindeutet, daß dieses Vorkommen bereits in der Antike bekannt war. Allerdings enthält der heute auf der Halde liegende Bleiglanz zu wenig Silber, um für antike Silbergewinnung in Frage zu kommen (s. Tab. 12). Andere Hinweise auf antike oder prähistorische Nutzung wurden auf der stark verkarsteten Oberfläche nicht gefunden.
In der näheren Umgebung stehen weitere Vererzungen bei Nikoleri, auch Platy Yalos genannt (TG 123A), Faros-Nord (TG 123C) und Spasmata (TG 123D) an. Sie wurden alle im Zuge des modernen Bergbaus, der vermutlich um die letzte Jahrhundertwende umging, beschürft. Ältere Abbauphasen waren ohne detaillierte Untersuchung nicht erkennbar.
Interessant ist in diesem Zusammenhang die Erwähnung des Vorkommens durch Tournefort (1727). Es ist anzunehmen, daß er durch Hinweise aus der Bevölkerung darauf aufmerksam gemacht wurde, und folglich schon damals dort Bergwerksanlagen existierten.

Kythnos

Auf der Südspitze der Insel Kythnos (Abb. 25) ist ein kleines Bleivorkommen in metasomatisch imprägnierten Vulkaniten bekannt (de Smeth 1975). Begleitminerale sind Baryt und Eisenoxide. Das Vorkommen scheint schon früher bekannt gewesen zu sein (Hauttecoeur 1897), aber es zeigt keine Spuren bergmännischer Erschließung (Patrearcheas 1985). Philippson (1901) und Davies (1935) berichten über alten Bergbau an anderen Stellen der Insel, wo hauptsächlich Eisenerze anstehen (s. auch Kap. III,2c). In der antiken Literatur wird Kythnos selten erwähnt. Zu dieser Zeit war die Insel eher durch ihre landwirtschaftlichen Produkte, vor allem Käse, bekannt als durch Bodenschätze.

Serifos

Die Insel ist vor allem wegen ihrer Eisenerze im Südteil bekannt (Marinos 1951), wo früher auch Kupfererze gefördert wurden (Philippson 1901; Hauttecoeur 1900). Aber auch Bleierze wurden im Norden von Serifos bei Moutoula (TG 52A) in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts abgebaut (s. Abb. 25). Diese Vererzung ist an einen Kontakt von Schiefer und Marmor in der Nähe einer Granodioritintrusion gebunden. Erzminerale sind grobkristalliner Bleiglanz, Zinkblende und Pyrit. Den alten Bergbau hat schon Fiedler (1841) gesehen und die vom Stollenmundloch aus sichtbaren Teile treffend als »Säulenhalle« beschrieben. Der Eindruck wird durch stehengelassene Erzpfeiler in einer etwa 30 m^2 großen Abbaukammer erweckt, von der drei horizontale Strecken wegführen. Der Querschnitt ist unregelmäßig, etwa rechteckig und 80-100 cm hoch. An der Firste und an den Stößen sind überall Gezähespuren (Spitzhacke?) zu erkennen. Mehrere Lampennischen scheinen mit demselben Gezähe ausgehauen worden zu sein. Sie wirken dadurch wie mit einer Kralle ausgekratzt. Etwa 100 m über dieser Stelle sind weitere, z.T. noch niedrigere Stollen und ein Schacht erhalten (TG 52B). Das Alter dieses Bergbaus ist ebenso unbekannt wie das der Kupfergewinnung (s. Kap. III,2c) im Südwesten der Insel. Schon Philippson (1901) stellte die Vermutung an, daß der Bergbau in die prähistorische Zeit zurückreichen könnte, weil Serifos im klassischen Altertum sprichwörtlich arm war und in römischer Zeit als Verbannungsort für römische Adelige diente.

Siphnos

Die silberführenden Erzvorkommen von Siphnos treten entlang eines Gürtels im Zentrum der Insel (Abb. 27) auf und weitere mit erhöhten Goldgehalten an der Südostküste (s. Kap. III,3 c). Bei den ersteren handelt es sich um Verwitterungsbildungen im hangenden Marmor, der einer Wechsellagerung von Schiefer und Marmor aufsitzt (Vavelidis et al. 1985). Der Mineralbestand ist vielfältig. Neben Bleiglanz, Zinkblende, Pyrit und Kupferkies kommen Silbererze wie Stephanit, Silberglanz und Rotgüldigerz, gelegentlich sogar gediegen Silber, vor. Es waren vor allem diese Erze, die Siphnos im Altertum berühmt gemacht haben. Nach Herodot (III, 57) war Siphnos im 6. Jahrhundert v. Chr. »die reichste aller Inseln. Gold- und Silberbergwerke gab es dort, und von dem Zehnten des erzielten Gewinnes hatten sie ein Schatzhaus in Delphi errichtet, wie es nur die reichsten Städte haben«. Diese Aussage wird durch die durch Ausgrabungen freige-

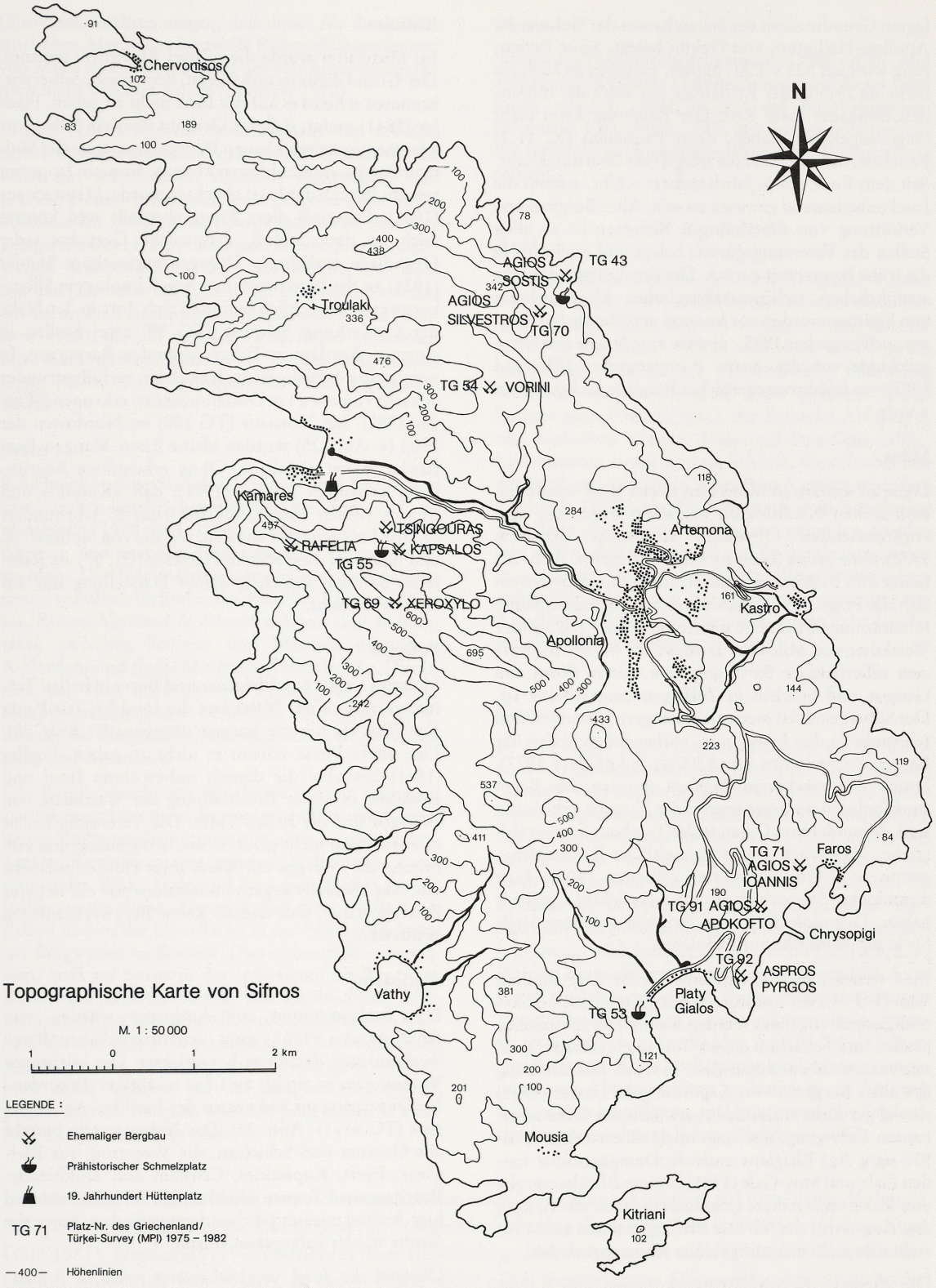


Abb. 27 Archäometallurgische Fundstellen auf der Kykladeninsel Siphnos mit TG-Nummern (nach Wagner u. Weisgerber 1985).

legten Grundmauern des Schatzhauses der Siphnier im Apollon-Heiligtum von Delphi belegt. Seine Errichtung wird auf 525 v. Chr. datiert. Erhalten ist auch ein mehr als 29 m langer Relieffries, ein Werk der führenden Bildhauer ihrer Zeit. Der Reichtum kann nicht lange angehalten haben, denn Pausianias (X, 11,2) berichtet, daß das Meer die Bergwerke überflutet habe. Seit dem Ende des 5. Jahrhunderts v. Chr. scheint die Insel unbedeutend gewesen zu sein. Alter Bergbau und Verhüttung von silberhaltigen Bleierzen ist an allen Stellen des Vererzungsgürtels belegt und reicht bis in die frühe Bronzezeit zurück. Die Ergebnisse einer sehr ausführlichen archäometallurgischen Untersuchung von Siphnos wurden vor kurzem veröffentlicht (Wagner u. Weisgerber 1985); ebenso eine Studie der Keramikfunde von Ag. Sostis (Gropengießer 1986 und 1987), wo frühbronzezeitlicher Bergbau nachgewiesen wurde.

Milos

Diese an nutzbaren Mineralen reiche Insel wurde seit dem frühen Neolithikum vor allem wegen des dort vorkommenden Obsidians aufgesucht (Renfrew 1972). Eine große Siedlung bei Phylakopi (s. Abb. 25) belegt ihre Bedeutung in der Bronzezeit, und es erhebt sich die Frage, ob den Bewohnern auch andere Mineralvorkommen bekannt waren. So wurde z. B. an der Westküste von Milos bei Triades (TG 44) bis vor kurzem silberhaltiger Baryt abgebaut, der in Form von Gängen und Stöcken in Tufflagen eingeschaltet ist. Der Silbergehalt ist meist an Kerargyrit gebunden und schwankt in den heute noch vorhandenen Teilen der Lagerstätte zwischen 5 und 200 µg/g Ag (Mack 1977). Durch den modernen Tagebau wurden alte Bergwerksanlagen aufgesprengt, die z. T. noch erkennbar sind. Besonders am Ostende des Tagebaus liegen zahlreiche, vermutlich spätbronzezeitliche Keramikfragmente und Obsidiansplitter (Wagner 1982). Eine durchlochte Steinscheibe könnte als Schlägel gedient haben. Demnach dürfte der Bergbau an dieser Stelle bis in die Vorantike zurückreichen.

Eine weitere, sehr ausgedehnte Grube liegt am Kap Vani (TG 97), wo Ende des vergangenen Jahrhunderts Manganerze abgebaut worden waren. Die zahlreichen Stollen und Schächte, die im Tuff noch erhalten sind, stammen wohl aus dieser Zeit. In seiner Beschreibung des alten Bergbaus von Kap Vani geht Davies (1935) darauf gar nicht ein, sondern erwähnt nur einen abgebauten Barytgang, der auch noch silberreichen (570-935 µg/g Ag) Bleiglanz enthielt. Demgegenüber fanden Gale und Stos-Gale (1981) in einer Bleiglanzprobe von Milos ohne nähere Lokalitätsangaben nur 70 µg/g Ag. Angesichts der Varietät der Lagerstätten auf Milos stellt dies nicht unbedingt einen Widerspruch dar.

Die ehemals reichen Barytvorkommen von Kavos, Pikridou und Agrilies (TG 98A) sind inzwischen nahezu vollständig abgebaut, so daß es schwierig sein dürfte, allenfalls vorhandenen älteren Abbau nachzuweisen.

Kimolos

Im Mittelalter wurde diese Insel Argentière genannt. Der Grund dafür ist unbekannt, denn reiche Silbervorkommen scheint es auf der Insel nicht zu geben. Fiedler (1841) meint, daß das Gerücht über ein Silbervorkommen mit einer kleinen Pyritvererzung an der Südostküste zusammenhängen könnte, die nicht lange vor seinem Besuch der Insel abgebaut wurde. Hauttecoeur (1901) diskutiert diese Frage ebenfalls und kommt auch zu dem Schluß, daß solche Gerüchte jeder Grundlage entbehren. Dagegen verzeichnet Sonder (1924) an der Nordwestküste von Kimolos ein Silberbergwerk. Tatsächlich befinden sich dort in der Nähe der Gemarkung Venturis (TG 99) zwei Stollen in einem diskordant in Tuffen lagernden Barytgang. In unmittelbarer Nähe ist auch noch ein verfüllter runder Schacht von etwa 1 m Durchmesser zu erkennen (Wagner 1982). Bei Monastir (TG 100) im Nordosten der Insel (s. Abb. 25) wurden kleine Eisen-Mangan-Erzstöcke rezent abgebaut. Ohne erkennbare Begründung behauptet Forbes (1971), daß »Kimolos und Thasos Minen hatten, die bis zum 8. Jahrhundert (v. Chr.) ausgebeutet wurden, wie die von Siphnos...«, und nennt an dieser Stelle Herodot (III, 57) als Referenz, der sich jedoch in seiner Darstellung nur auf Siphnos bezieht.

Poliegos

Mehrere Lagen von Bleiglanz und Baryt in hellen Tuffen wurden an der Westküste der Insel bei Tris Panagias (TG 45) bis vor kurzem abgebaut (s. Abb. 25). Eine ältere Phase scheint es nicht zu geben. Fiedler (1841) besuchte die damals unbewohnte Insel und erwähnte in seiner Beschreibung der Westküste von Poliegos nur die hellen Tuffe. Die Vererzung hat er offensichtlich nicht gesehen und seine Befragung von Hirten, die Poliegos zur Weide ihrer Herden aufsuchten, war ebenfalls negativ; normalerweise ein sicheres Zeichen dafür, daß damals keine Bergwerksanlagen existierten.

Antiparos

Die Erzlagerstätten auf Antiparos wurden von Anastopoulos (1963) samt den neuzeitlichen Bergwerksanlagen detailliert beschrieben. Das wichtigste Vorkommen ist ein bis zu 1,5 m mächtiger diskordanter Quarzgang im Südwesten der Insel bei Ag. Georgios (TG 68) (s. Abb. 25). Das Nebengestein besteht aus Gneisen und Schiefern, die Vererzung aus Bleiglanz, Pyrit, Kupferkies, Covellin und Zinkblende. Enige tausend Tonnen silberhaltiger Bleiglanz wurden hier Anfang unseres Jahrhunderts gefördert, bevor die Grube wieder aufgegeben wurde.

Obwohl die Insel vergleichsweise reich an Bodenschätzen ist, gibt es keine Hinweise darauf, daß sie vor dem 19. Jahrhundert ausgebeutet wurden. So liegt z. B. eines von insgesamt drei Obsidianvorkommen im ägäischen Raum auf Antiparos, aber Analysen von

Obsidianartefakten zeigen, daß dieser für den prähistorischen Menschen wertvolle Rohstoff überwiegend von Milos stammte, während der von Antiparos praktisch nicht beachtet wurde (Renfrew 1972).

Fiedler (1841), der die Insel besucht hat, schreibt nichts über das Bleiglanzvorkommen, ebenso wie die sonst gut informierten Autoren Hauttecœur und Davies. Dennoch läßt sich alter Bergbau nicht völlig ausschließen, denn auf Antiparos und der kleinen vorgelagerten Insel Despotikon sind um die Jahrhundertwende frühbronzezeitliche Gräberfelder entdeckt worden (Tsountas 1898), und von Despotikon stammt ein vermutlich frühbronzezeitliches Stück Blei (Renfrew 1967), das auf der Bodenoberfläche zusammen mit Keramikfragmenten der Grotta-Pelos-Kultur (erste Hälfte des 3. Jahrtausends v. Chr.) gefunden wurde.

Syros

Schichtgebundene Sulfidvererzungen auf Syros sind erst kürzlich beschrieben worden (Melidonis u. Constantinides 1979 und 1983), wobei zwei Typen – disperse und massive Vererzungen – unterschieden wurden. Die hier interessierenden massiven Sulfide treten vor allem im Süden der Insel bei Komito, Tourlos, Rozos, Vari und Azolimno auf und sind an Kontakte zwischen Schiefer und Marmor gebunden. Außerdem sind einige Mineralisationen bei Ag. Dimitrios, ca. 2 km nördlich von Ermoupolis, bekannt. Hauptbestandteile der Vererzung sind Pyrit, Zinkblende und Bleiglanz mit akzessorischen Kupfermineralen und Arsenkies.

Die Bergbaugeschichte von Syros scheint sehr weit zurückzureichen, denn die modernen Prospektionsarbeiten sind angeblich immer von alten Gruben ausgegangen, die aufgesprengt wurden (Melidonis u. Constantinides 1983). Gale und Stos-Gale (1981) fanden frühbronzezeitliche Keramik in alten Stollen bei Rozos und an der Oberfläche in der Nähe aufgelassener Bergwerke bei Komito. Dies ist besonders interessant, weil auf Syros in der befestigten Siedlung von Kastri und dem Gräberfeld von Chalandriani frühbronzezeitliche Blei- und Silberobjekte gefunden wurden, die mit den Erzvorkommen in Zusammenhang stehen könnten. Syros ist somit die einzige Kykladeninsel außer Siphnos, auf der Bleiglanzvorkommen, prähistorischer Bergbau und eine prähistorische Siedlung zusammen belegt sind.

Thera

Wegen des Vulkanausbruchs um etwa 1500 v. Chr. sind archäometallurgische Untersuchungen auf dieser Insel kaum möglich, aber es gibt ein Bleivorkommen (Murad u. Hubberten 1975) mit hohem Silbergehalt, das vielleicht noch archäometallurgische Rückschlüsse erlaubt.

Anafi

Mehrere kleine Vorkommen von Bleiglanz wurden von Melidonis (1963) beschrieben. Die wahrscheinlich optimistische Schätzung der Gesamtvorräte von nur 600 t Erz mit einem Gehalt von etwa 10% Pb+Zn unterstreicht die geringe wirtschaftliche Bedeutung selbst für antiken Bergbau. Zum gleichen Schluß kommt auch Fiedler (1841), der keinerlei Abbauspuren entdecken konnte. Gale und Stos-Gale (1981) beobachteten einige rezente Schürfe, die offenbar nur der Exploration dienten. Dieselben Autoren schreiben Buchholz (1973) ein Zitat zu, nach dem Bleiobjekte und Teile eines Kupellationsofens gefunden worden sein sollen, aber Anafi wird von Buchholz nur als eine von mehreren Kykladeninseln mit Bleierzvorkommen aufgezählt. Die Funde von Blei und Fragmenten von Kupellationstiegeln beziehen sich auf ein Zitat Landerers (1876) über Siphnos.

Tinos

Es gibt einige ältere Literaturhinweise auf Vorkommen von Schlacken und Silbererzen auf Tinos, die von Davies (1935) zusammengefaßt sind. Moderne geologische Untersuchungen (Melidonis 1980) bestätigen das Vorkommen von Silbererzen an zwei Stellen: bei Lardiades im Nordwesten und bei Apigania an der Südwestküste von Tinos. An beiden Stellen sind die Erzminerale an hydrothermale Quarzgänge in Marmor bzw. Phyllitschiefer gebunden. An Primärmineralen nennt Melidonis (1980) vor allem Fahlerze, Cu-, Pb- und Zinksulfide und gediegen Gold mit 20% Ag in Form von Einschlüssen in Pyrit. Insgesamt identifizierte er mehr als 70 verschiedene Erzminerale, darunter auch gediegene Metalle (Au, Ag, Cu, Te) als Sekundärbildungen. Beide Vorkommen sind zu klein, um für modernen Abbau in Frage zu kommen. In Apigania scheint aber irgendwann eine bergmännische Exploration stattgefunden zu haben (Melidonis 1980).

Die Metallogenetische Karte verzeichnet außerdem noch Sulfiderzvorkommen auf den Inseln *Mykonos*, *Folegandros* und *Donoussa*. Zumindest für Folegandros werden diese Angaben bezweifelt (Gale u. Stos-Gale 1981). Stephanos (1905) berichtet über silberhaltige Bleivorkommen auf der kleinen Insel Koufonission südöstlich von Naxos, in deren Nähe nicht näher beschriebene Steinwerkzeuge aufgefunden wurden. Eine moderne geologische Bestätigung des Vorkommens steht noch aus. Nach einer Fußnote bei Davies (1935) sollen in der Antike auf *Andros* am Kap Selenitis silberhaltige Bleierze abgebaut worden sein. Eine Beschreibung oder Erläuterung fehlt, so daß diese Angabe schwer zu beurteilen ist. Phi-

lippson (1901) sah auf Mykonos einen Bergbaubetrieb, der einen Gang von Schwerspat und Cerussit angefahren hatte und bemerkte, daß das Erz einen »beträchtlichen Silbergehalt« aufwies. Neben den meisten der in diesem Abschnitt erwähnten Kykladeninseln mit Vorkommen von silberhaltigem Bleiglanz oder Baryt zählt Papavasiliou (909) noch *Sikinos* und *Pholegandros* auf (Tab. 13).

2. Kupfer

In der Ägäis sind relativ wenige Kupfervorkommen bekannt. Deshalb wird in einigen Fällen auch die Möglichkeit einer Kupfergewinnung aus Sulfiderzlagerstätten mit akzessorischen Kupfermineralen diskutiert, sofern sie für alten Abbau in Frage kommen.

a. Westanatolien (s. Abb. 19 und 21)

Bülbüller (TG 6)

Etwa 70 km ostsüdöstlich von Izmir und 15 km westlich von Ödemis liegt 2 km nördlich des Dorfes Bülbüller eine kleine Vererzung, die an Quarzgänge im Glimmerschiefer gebunden ist. Erzminerale sind Pyrit, Kupferkies und Magnetkies. Von einem Abbau unbekannten Alters sind zugeschüttete Schächte und Abraumhalden sichtbar. Das Primärerz enthält durchschnittlich nur 2,5% Cu, so daß antiker Abbau unwahrscheinlich sein dürfte (Wagner 1975).

Seki (TG 7)

Etwa 1 km östlich des Dorfes Bülbüller ist ein rot und gelb verwitternder Gang im Glimmerschiefer sichtbar, der durch einen Stollen aufgeschlossen ist (Wagner 1975).

Biga Halbinsel

Die Kupfervorkommen auf der Biga-Halbinsel machen sich vor allem durch Schlackenhalden bemerkbar, die insgesamt auf ca. 170000 t Gesamtmenge geschätzt werden (Pernicka et al. 1984). Die Halden von Avcılar (TG 128), Dogancılar (TG 133), Yuvalar (TG 138) und Kozcağız (TG 142) enthalten Bruchstücke von hellenistischer bis spätantiker Keramik, wie z.T. mittels Thermolumineszenzdatierung festgestellt wurde. Besonders das größte Vorkommen, Yuvalar (TG 138), ist möglicherweise auch in prähistorischer Zeit genutzt worden. Erstaunlicherweise wird dieses Vorkommen weder in der antiken noch in der modernen archäometallurgischen Literatur erwähnt. Muhly (1973) nennt vor allem Heybeli Ada, eine Insel im Marmarameer, die in der Antike Demonesus genannt wurde, als bekannteste Kupfermine in dieser Region, wo auch noch Reste alten Bergbaus zu sehen sein sollen. Forbes (1971) nennt auf einen Hinweis von Strabo (10.1.9, Cap. 447) zusätzlich ein Vorkommen bei dem antiken Cysthene. De Jesus (1980) verzeichnet – offensichtlich nur aufgrund der Angaben von Ryan (1960) und MTA (1972) – bei Camyurt (TG 136), Balçılar (TG 135), Gümüşçati und Doğançılar (TG 133) antiken oder prähistorischen Kupferbergbau, von denen die ersten beiden aufgrund des Feldbefundes ausgeschieden werden können. Dies zeigt, wie schwierig die archäometallurgische Bewertung solcher Prospektionsberichte ist.

Balya (TG 18)

Kupferkies und Bournonit kommen zwar vor und ihr Anteil soll mit steigender Teufe zunehmen (MTA 1972), aber im Bereich des alten Bergbaus wurden Kupferminerale nur in Spuren gefunden. Keine der zahlreichen Schlackenhalden in der Umgebung des Bergbaus wies nennenswerte Kupfergehalte auf. Antike oder prähistorische Kupfergewinnung ist deshalb wenig wahrscheinlich.

Tahtaköprü (TG 156)

Für dieses weiter im Osten, in der Provinz Bursa gelegene kleine Vorkommen an einem Kontakt zwischen Granit und Kalkstein ist durch Holzkohle aus einem alten Versatz spätantiker Bergbau (5. Jahrhundert n. Chr.) belegt (Pernicka et al. 1984).

Örenlıköy (TG 191)

Diese kleine Schlackenhalde von ursprünglich etwa 7000 t konnte mittels Thermolumineszenz als zumindest römerzeitlich eingestuft werden (Wagner et al. 1986).

	Cu µg/g	As µg/g	Sb µg/g	Ag µg/g	Au µg/g	Bi µg/g	Pb %	Au/Agx10^6
Attika								
A4	820	0,7	340	350	0,003	31	68,7	8,6
A5	1970	16,3	100	200	0,009	110	31,4	45
A6	290	580	260	310	0,035	<0,5	59,5	110
B2	310	4200	1300	1240	0,260	2	38,0	210
B4	950	0,9	16	720	0,055	1310	43,0	76
B5	400	3,5	28	800	0,020	1650	57,0	25
C3 (E7)	1420	5,0	9150	4400	0,050	60	84,6	11
C3 (W110)	910	45	10700	4760	0,070	1000	80,4	15
D1	940	860	700	790	0,020	500	22,1	25
TG60a-1	200	180	2400	1900	0,005	3	82,5	2,6
S12	180	3,1	390	500	0,005	130	86,3	10
Euböa								
TG56	23	2400	11700	2300	0,090	n.b.	65,9	39
TG59C	360	8,1	230	885	1,66	1310	80,3	1900
TG59E	310	12,0	325	475	0,165	110	86,6	350
Kea								
TG123B-1	81	<1	104	245	0,0076	<2	83,5	31
Seriphos								
TG52A	20	55	550	760	0,010	290	83,9	13
TG52B-1	40	950	2400	2400	0,060	<0,3	81,0	25
SER1*	95	812	289	1000	0,001	–	–	1
SER2*	530	262	938	3359	0,05	–	–	15
Siphnos								
TG43-10	3000	<1000	3100	3010	0,19	<2	83,9	63
TG43-11	3000	64000	6000	198	1,62	<6	58,9	8200
TG43-13	6000	<1000	40000	670	0,19	<3	38,3	280
TG43-19	5000	8000	18000	4500	1,16	<6	67,6	260
TG43-22	3000	13000	236000	1700	0,04	<5	25,6	24
TG43-36/1	139000	1000	204000	1900	0,11	<3	34,5	58
TG43-36/1	53000	68000	15000	2500	0,08	<8	48,1	32
Milos								
TG44-8	1900	302	1100	765	3,2	<0,2	43,5	4200
Poliegos								
TG45-2	26	4	130	87	<0,1	<0,3	61,2	<1200
POL1*	26	0,1	175	93	0,002	–	–	22
Antiparos								
AP3*	414	14	471	689	0,196	–	–	280
AP9*	643	4	135	300	0,085	–	–	280
Syros								
SYR2*	25	43	301	384	0,008	–	–	21
SYR3*	47	0,1	2444	722	0,001	–	–	1,4
SYR18*	57	122	382	644	0,09	–	–	140
Thera								
Ph30*	55	18	291	320	0,001	–	–	3,1
Ph91*	36	1	989	998	0,04	–	–	40
Kythnos								
GX*	857	6	293	384	0,003	–	–	7,8

Tab 13 Spurenelementgehalte in Bleierzen von Südgriechenland und den Kykladen. Die mit einem Stern gekennzeichneten Proben wurden von Gale und und Stos-Gale (1981) analysiert.

	Cu %	As µg/g	Sb µg/g	Co µg/g	Ni µg/g	Ag µg/g	Au µg/g	Fe %	Zn µg/g	Se µg/g
TG 3A-3.2	26,5	130	600	16	62	20	<0,5	3,2	8650	<5
TG 15B-1	36,1	3	3	20	<20	150	<0,01	29,7	2600	<8
TG 16A-2	34,1	8	<2	10	<20	260	0,05	27,9	4300	92
TG 129A	23,3	730	33	70	56	28	0,80	23,3	1000	9
TG 133A-2.1	12,3	3000	275	12	<20	20	0,70	19,9	2100	15
TG 133A-2.2	33,6	370	78	8,3	<23	5	<0,03	8,5	860	18
TG 138-4	4,0	105	5	390	97	<11	0,49	55,4	3200	4
TG 138-7	16,3	123	8	240	140	33	<0,4	33,0	9100	17
TG 143B-2	29,1	53800	67	37	<60	81	0,03	37,2	10800	5
TG 144F-1	26,8	6	2	12	<56	96	0,04	25,3	900	83
TG 150A-2	17,7	370	7	143	80	67	0,54	35,2	6700	<4
TG 153B-2.2	3,9	1000	3500	<5	n.b.	3500	0,36	0,8	8700	<20
TG 153D-1	29,5	6100	15800	<13	n.b.	14500	n.b.	12,8	38000	<30
TG 153E-1.2	18,8	100000	500	<2	n.b.	144	1,2	21,4	137000	<12
TG 154C	0,94	<5	<3	82	<32	138	<0,04	28,3	20900	74
TG 156A-1.1	51,5	<1	<1	18	46	564	4,0	8,6	400	186
TG 156A-1.2	9,2	44	<2	77	170	470	4,3	8,7	960	174
TG 188A-1	34,3	7	1,3	48	33	60	0,37	6,6	2580	220
TG 188B-1	11,2	10,5	2,0	13	<9	<0,1	<0,07	0,56	121	1,4
TG 188B-4	10,3	91	6,8	12	24	238	2,08	3,70	108	19
TG 188D	2,58	31,3	1,7	20	<19	34	0,83	11,0	136	7,7
TG 189A-1	5,49	19,5	1,8	54	62	<0,8	<0,045	2,85	905	<1
TG 189A-3	5,79	425	6,3	8,3	<18	3,1	0,14	20,7	85	<0,8
TG 189A-4	0,58	39,5	16,3	3,9	<21	6,1	0,021	12,8	940	<1
TG 191	17,8	17930	340	53	81	1720	<0,7	3,7	410	320
TG 192-2	20,2	13	2,4	32	140	415	9,1	12,2	220	18
TG 192-3	25,5	6	1,6	240	103	1240	2,1	9,3	86600	53

Tab. 14 Spurenelementkonzentrationen in handverlesenen Kupfererzkonzentraten aus der Nordostägäis.

Serçeören Köy (TG 192)

Dieses Kupfervorkommen in der Nähe von Örenlıköy (TG 191) liegt in einer kontaktmetamorphen Zone, die durch Granodioritintrusionen in Kalkstein entstanden ist. Die Vererzung besteht aus Kupferkies, Bornit, Kupferglanz, Pyrit, Zinkblende und Sekundärmineralen. Ein derzeit stillgelegter moderner Tagebau hat einige enge Kriechstrecken angefahren. Neben antikem und mittelalterlichem kommt auch prähistorischer Abbau in Frage, da auf Halde Klopfsteine und Steinpickel gefunden wurden (Lutz 1987).

Chemische Analysen an Kupfererzen aus dieser Region sind in Tab. 14 zusammengestellt.

b. Nördliche Ägäis

Wie schon in Kap. III 1.b vielfach erwähnt, enthalten die meisten Sulfiderzvorkommen in Nordgriechenland untergeordnet auch Kupferminerale. Lokale Anreicherungen könnten für prähistorische Verhältnisse bauwürdig gewesen sein. Polymetallische Kieserzlagerstätten, bei denen alter Abbau nachgewiesen werden kann, kommen daher prinzipiell auch für Kupfergewinnung in Betracht. Daneben gibt es einige Porphyritstöcke, die aber bisher keine wirtschaftliche Bedeutung erlangt haben, bei Kirki (Arikas 1981) in Ostthrakien, bei Vathi, Jerkario und Pontokerassia im Krusia-Gebirge östlich von Kilkis (Feldhaus 1984) und bei Skouries in der Nähe des Kassandra-Distrikts im Nordosten der Chalkidike (Kockel et al. 1975). Außerdem treten kleinere Kupfervorkommen in einigen Ophiolitkomplexen zusammen mit Pyrit bei Evzoni an der jugoslawischen Grenze (Tsamantouridis 1980), bei Perivoli im

nördlichen Pindos-Gebirge, im mittleren Othrys-Gebirge nordöstlich von Lamia und an der Südostspitze der Halbinsel Sithonia (Raschka 1981) auf.
McGeehan-Liritzis (1983) versuchte allein anhand der Angaben im Kommentar zur metallogenetischen Karte Griechenlands (Zachos u. Maratos 1965) eine Auswahl der Kupfervorkommen zu treffen, die in prähistorischer Zeit hätten ausgebeutet werden können. Die Kriterien waren:
1) Nähe zu einer prähistorischen Siedlung,
2) sichtbare Erzführungen vorzugsweise von oxidischen Kupfermineralen und
3) Umfang eines Vorkommens.
Nach dieser nicht unproblematischen Vorgangsweise (siehe auch Kap. IV) klassifiziert sie fast die Hälfte der in der metallogenetischen Karte Griechenlands verzeichneten Vererzungen und Imprägnationen auf dem Festland als potentielle Orte prähistorischer Kupfergewinnung. Vom Metallinhalt erscheint dies zwar möglich, aber es vermittelt sicher ein unrealistisches Bild der tatsächlichen Nutzung dieser Vorkommen. Ein besserer Indikator für prähistorische und antike Nutzung als die Nähe zu prähistorischen Siedlungen sind neben altem Bergbau vor allem Schlacken. In Nordgriechenland sind Schlacken mit Kupfervormacht auf Thasos, im Gebiet nördlich von Kavala (Chalkias 1985), im Bereich des Pangäon-Gebirges, bei Skouries auf Chalkidike (Wagner et al. 1986), bei Angistron nahe der bulgarischen Grenze und etwas weiter östlich in der Nähe von Perithorio auf dem Bekir Tepe (Papastamataki 1975), bei Perivoli im nördlichen Pindos-Gebirge, im Pieria-Gebirge westlich von Katerini und im Othrys-Gebirge (Davies 1935) gefunden worden. In allen Fällen handelt es sich um kleine Halden oder Streufunde.

Thasos

Bei Padia (TG 78) im Westen der Insel (s. Abb. 22) liegen auf einer Höhe von 500 m NN kleine Mengen kupferhaltiger Schlacke und Fragmente grober Keramik. In der Nähe gibt es zwar mindestens drei antike Stollen, deren Erzführung aber eine deutliche Vormacht von Bleimineralen aufweist. Eine nahe gelegene Halde von Bleischlacken bei Skoridia (TG 75) wurde mittels Thermolumineszenz in die römische Kaiserzeit datiert (Pernicka et al. 1980), die wohl die Blütezeit des thasischen Blei-Silber-Bergbaus war.

Skouries

Am westlichen Rand eines erzführenden granitischen Porphyrit-Stockes liegen die Reste (etwa 2500 t) einer teilweise abgetragenen Schlackenhalde (TG 108). Neben kleinstückiger, dunkler Fließschlacke ist auch viel grünlich-blaue Glasschlacke zu finden, die wahrscheinlich von Chargen mit zu wenig eisenhaltigen Zuschlägen stammt (s. Tab. 15). Mittels Thermolumineszenz wurde ein Stück Ofenkeramik aus der Halde in das 4. Jahrhundert n. Chr. datiert. Aus dieser Zeit ist wenig über Makedonien überliefert.

Probe	TG108-3.2	TG108-3.3	TG108-3.4	TG108-3.6
Textur	schaumig mit Ton vermischt	schaumig, blaugrau	hellblau, glasig viele Blasen	hellblau, glasig wenige Blasen, schlierig
SiO_2	64,2	45,6	41,2	52,4
FeO	9,4	48,0	41,9	17,9
Al_2O_3	16,8	3,0	3,6	7,8
CaO	0,29	0,91	2,4	9,7
MgO	2,1	n.b.	n.b.	n.b.
Na_2O	0,77	0,21	0,03	0,22
K_2O	2,4	1,24	0,96	2,2
MnO	0,12	0,15	0,20	4,2
ZnO	0,56	0,01	0,01	0,02
CuO	0,59	1,20	1,07	1,01
PbO	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
As	0,0017	0,0008	0,00015	0,0020
Sb	0,00044	0,0002	0,00013	<0,0001
Au	0,00027	<0,0001	<0,0001	0,00001
Summe	95,3	94,9	96,9	95,7

Tab. 15 Zusammensetzung von römerzeitlichen Kupferschlacken von Skouries (TG108), Ostchalkidiki. Angaben in Prozent.

Probe	TG 81	TG 82	TG 83	TG 84	TG 85-2
Lokalität	Domatia	Antifilippi	Mati	Pouliana	Fdelia
Textur	dicht, faustgr.	dunkel, krist.	Erz	dunkel, krist.	dunkel, krist.
SiO_2	22,1	11,9	n.b.	26,1	23,9
FeO	40,6	54,2	41,2	35,2	50,8
Al_2O_3	5,7	3,0	1,5	4,8	4,0
CaO	9,5	7,8	0,15	14,5	7,0
MgO	1,4	1,5	0,70	2,5	1,0
K_2O	0,76	0,32	<0,01	0,50	0,48
ZnO	<0,1	0,40	0,26	1,8	<0,1
CuO	0,15	0,12	1,55	0,15	1,46
PbO	<0,1	2,64	15,6	1,51	0,07

Tab. 16 Zusammensetzung von Schlacken und einem Eisenerz aus dem Pangäongebiet (Angaben in Prozent).

Erst kürzlich wurde an der Südostspitze von Sithonia ein massives Sulfiderzlager in einer Ophiolitfolge zwischen extrusiven Vulkaniten und vorwiegend pelagischen Sedimenten entdeckt (Raschka 1981), doch ist der Kupfergehalt zu niedrig, um für alten Bergbau in Betracht zu kommen.

Pangäon

Der Pangäon ist vor allem für antike Goldgewinnung bekannt. Gelegentlich sind auch Schlacken mit Kupfervormacht anzutreffen (s. Tab. 16), die aber vermutlich ebenfalls von der Silber- und Goldgewinnung stammen. Wenn tatsächlich Kupfer erschmolzen wurde, dann vermutlich eher um Gold und Silber daraus zu gewinnen. In diesem Fall wären die Schlacken mittelalterlich oder später. Denn das gemeinsame Verschmelzen von Kupfer mit Blei zur Extraktion der Edelmetalle dürfte in der Antike noch nicht bekannt gewesen sein (Suhling 1976). Insgesamt wurden noch zu wenige archäometallurgische Untersuchungen im Pangäongebiet durchgeführt, um die Frage nach frühem Kupferbergbau in diesem Gebiet beantworten zu können.

Perivoli

Pyrit und Kupferkies treten bei Perivoli, ca. 35 km südwestlich von Grevena, als Stockvererzung in massigen Diabasen auf (Raschka 1981). Der alte Bergbau dieser Region wurde von Davies (1932a) beschrieben. Es sollen bei Perivoli und Avdela etwa 30 Stollen bekannt gewesen sein. Eine Erzprobe enthielt 14,5% Cu. Zusätzlich seien die Erze gold- und silberhaltig gewesen. Davies fand auch Schlacke zusammen mit vermutlich mittelalterlicher Keramik. Die Schlacke schien aber wegen ihres geringen Eisengehaltes und Abwesenheit von Blei und Kupfer keinem metallurgischen Prozeß zu entstammen. Papastamataki (1975) berichtet ebenfalls von kleineren Schlackenvorkommen, ohne eine Analyse zu geben. Falls überhaupt Kupfer gewonnen wurde, war die Produktion wohl zu allen Zeiten unbedeutend (Davies 1932a).

Vermion

Am tektonisch stark zerscherten Ostrand des Vermion-Gebirges ist eine Magnetkies-Kupferkies-Erzführung in Pillowlaven und Serpentinschuppen bei Saitopetra eingeschaltet (Raschka 1981). Sie ist durch einen kleinen verlassenen Bergbau erschlossen, der aber anscheinend nicht auf ältere Vorläufer zurückgeht (Davies 1932a). In der antiken Literatur (Strabo 680) wird in dieser Region Goldbergbau erwähnt (s. Kap. III, 2b). Papastamataki (1975) berichtet von zwei Schlackenvorkommen im Pieria-Gebirge östlich des Aliakmon, die aber nach ihrer Zusammensetzung zu schließen kaum etwas mit extraktiver Metallurgie zu tun haben.

Krusia

Schließlich sollte ein Hinweis von Davies (1932a) nicht unerwähnt bleiben, der bei Sacili (heutiger Name nicht bekannt) eine bergmännisch erschlossene Pyrit- und Malachitvererzung angetroffen hatte. Außerdem fand er prähistorische Keramik und einen Steinschlägel. Nach seinen Angaben sollte Sacili wenige Kilometer südlich oder südöstlich von Kilkis liegen. Die metallogenetische Karte verzeichnet in dieser Gegend einige kleine Eisenerzvorkommen, die demnach eine nähere archäometallurgische Untersuchung lohnen dürften, besonders, weil Mack (1964) dort auch ein Kupfer- und Arsenkies-Vorkommen erwähnt.

Othrys

Vererzte und verquarzte Ruschelzonen in stark alterierten Pillowlaven sind in der Nähe von Limogardion nördlich der Stadt Lamia bekannt. Früher soll es dort alte Galerien gegeben haben, die durch modernen Abbau zerstört wurden (Davies 1935). Nennenswerte Erzvorkommen, in Pillowlaven eingeschaltet, treten bei Styrfaka, westlich von Lamia, auf. Auch sie sind durch verlassene Kleinbergbaue erschlossen. Größere Schlackenhalden sind heute noch bei Archani, Perivoli und Styrfaka zu finden (Papastamataki u. Demetriou

1985). Außerdem scheint ein Teil der Kupfererze auf der gegenüberliegenden Nordwestspitze von Euböa verhüttet worden zu sein (Davies 1935), wo auch ein Fundplatz frühbronzezeitlicher Keramik liegt (Sackett et al. 1966). Nach den Keramikfunden zu schließen, waren diese Vorkommen zumindest seit der Antike bekannt, aber wahrscheinlich haben sie nie eine bedeutende Rolle gespielt.

c. Südgriechenland und Kykladen

Euböa

Strabo (X.1.9) berichtet von reichen Kupferlagerstätten in der Lelantinischen Ebene südöstlich von Chalkis, die zu seiner Zeit schon erschöpft waren. Außerdem war die Stadt Chalkis in der Antike berühmt für ihre Metallerzeugnisse (Muhly 1973) und ihr Name wurde mit dem griechischen Wort für Kupfer in Verbindung gebracht (Davies 1935). Dennoch wurden in diesem Gebiet keine Kupfervorkommen entdeckt, obwohl aufgrund der Hinweise aus der antiken Literatur mehrfach danach gesucht wurde (Fiedler 1841; Davies 1935). Ein lagerstättenkundlicher Explorationsbericht über das Gebiet um Eretria SE von Chalkis beschreibt nur einige kleine Eisen- und Manganerzvorkommen von maximal 200 t (Karageorgiou 1955). Es werden Spuren bergmännischer Prospektion und Erschließung bei Geronda (Abbau von ca. 12 t Erz), Lymno und Anydron erwähnt. Aus dem Bericht geht nicht hervor, ob es sich um moderne oder ältere Arbeiten handelt. Demnach dürfte der Ruf der Stadt Chalkis als metallurgisches Zentrum in der Antike ähnlich wie bei Korinth und Delos eher auf die Kunst ihrer Bronzeschmiede als auf eine nahe gelegene Lagerstätte zurückgehen. Antike oder ältere Kupferverhüttung ist an der Nordküste Euböas belegt (s. Kap. III, 2b) und Kupfergewinnung unbekannten Alters im Südteil der Insel nördlich von Kallianou, wo bei Valtos (TG 57) eine Halde kupferhaltiger Schlakken angeschnitten ist (s. Kap. III, 1c).

Laurion

Vor kurzem wurde vorgeschlagen, daß in Laurion nicht nur Blei und Silber, sondern auch Kupfer, vor allem in prähistorischer Zeit, gewonnen worden sein könnten (Zwicker 1982; Gale u. Stos-Gale 1982). Zur Unterstützung dieser These werden ältere Berichte über relativ reiche oxidische Kupfererze in Laurion herangezogen (Fiedler 1941; Philipps u. Louis 1896 u.a.) und die Monographie von Marinos und Petraschek (1956), die von reichen sulfidischen und oxidischen Kupfererzen und sogar gediegen Kupfer bei Kamareza und Sounion berichten. Solche lokalen Anreicherungen von Kupfer kommen in vielen Blei-Zink-Lagerstätten vor. Die entscheidende Frage ist aber, wie leicht zugänglich sie unter prähistorischen Bedingungen waren. Der beste Beweis für prähistorische Kupfergewinnung wären Kupferschlacken, die aber anscheinend bisher nicht gefunden wurden. Solche Funde sind allerdings kaum zu erwarten, denn man schätzt die Gesamtmenge der antiken Bleischlakken auf etwa 2 Millionen Tonnen, die noch dazu zum größten Teil im letzten Jahrhundert wieder aufgearbeitet wurden. Unter diesen Umständen wäre es wohl ein großer Zufall, würde man einen prähistorischen Kupferschmelzplatz entdecken. In diesem Fall ist man wahrscheinlich allein auf indirekte Hinweise aus den geochemischen Charakteristika von Fertigobjekten angewiesen, die in Kap. IV,2 ausführlich diskutiert wurden.

Attika

Fiedler (1841) erwähnt zwei Malachitvorkommen in der Umgebung des damaligen Athen, die wegen der heutigen Ausdehnung der Stadt nicht mehr zu überprüfen sind. Auf dem Hymettos sind alte Gruben bei Asteri und Ag. Ioannis Kynigos erhalten (Marinos u. Petraschek 1956). Die zweite Stelle wird auch von Davies (1935) erwähnt, der sie nicht selbst gesehen hat. Wahrscheinlich handelt es sich um ein Vorkommen gemischter Sulfide, das vielleicht sogar vorwiegend auf Blei abgebaut wurde.

Peloponnes

Etwa 7 km nordöstlich von Ermioni in der Argolis wurden seit dem Ende des vergangenen Jahrhunderts bis 1977 Pyrit und Kupferkies, zuletzt mit einer Kapazität von etwa 50 000 t pro Jahr, abgebaut. Es handelt sich um stratiforme massive Pyritlagerstätten mit geringen Kupfergehalten im unteren Bereich einer bis zu 500 m mächtigen Flyschabfolge, in die andesitische Gesteine eingeschaltet sind. Die – wahrscheinlich exhalativ – sedimentär entstandenen Lagerstätten sind an einen rotgefärbten, kalkreichen Tonschieferhorizont im Liegenden und Andesite oder Flyschsedimente im Hangenden gebunden (Aranitis 1963).

Obwohl diese Lagerstätten bis vor kurzem den Hauptanteil an der griechischen Kupferproduktion hatten, ist es unwahrscheinlich, daß sie im Altertum bekannt waren, denn sie liegen relativ tief unter der Bodenoberfläche (30-200 m), zeigen kaum Ausbisse übertage und sind außerdem ziemlich arm an Kupfer. Der mittlere Gehalt der Lagerstätte Karkassi betrug 0,76% Cu und die erst 1950 in Abbau genommene Lagerstätte Roro enthielt etwa 3,5% Cu. Es wird z. B.

ausdrücklich erwähnt, daß die zweitgrößte Erzlinse bei Karkassi nur 30 m unter der Oberfläche lag, aber trotzdem keine Indikationen sichtbar waren (Aronis 1951). Dementsprechend werden diese Lagerstätten in der älteren Literatur überhaupt nicht erwähnt.
In der Argolis ist in der Metallogenetischen Karte Griechenlands noch eine Kupfervererzung mit etwa 2,6% Cu in Phyllitschiefern verzeichnet, die von McGeehan-Liritzis (1983) als wahrscheinliche Rohstoffquelle für die Bronzezeit angesehen wird. Allerdings wird dort kein Bergbau erwähnt (Marinos 1953) und der Kupfergehalt, falls er repräsentativ für das gesamte Vorkommen ist, dürfte zu gering für bronzezeitliche Verhüttung sein (Cooke et al. 1972). Eine Reihe weiterer Sulifderzindikationen mit sekundären Kupfermineralen (Anastopoulos u. Papanikolaou 1958) wurden von den gleichen Autoren aufgesucht und als Rohstoffquellen für die Bronzezeit ausgeschieden. Nicht untersucht wurde allerdings die von Davies (1935) beschriebene Grube nahe dem Kap Malea. Es bleibt vorläufig ungeklärt, welches Metall dort zu welcher Zeit gewonnen wurde.

Kea

Geringe Mengen verstreuter Kupferschlacke liegen auf der Anhöhe der kleinen Halbinsel Kephala (TG 124B) an der Nordwestküste von Kea (s. Abb. 30). Dort siedelte in der ersten Hälfte des 4. Jahrtausends v. Chr. eine kleine Gemeinschaft von wahrscheinlich weniger als 50 Individuen über wenige Generationen (Coleman 1977). Danach blieb die Halbinsel bis heute unbewohnt. Obwohl die meisten Schlacken auf der Oberfläche liegen, wird nicht daran gezweifelt, daß die Bewohner von Kephala mit metallurgischen Techniken vertraut waren, weil einige Bruchstücke von hochgebranntem Ton mit anhaftender Kupferschlacke (Tiegel oder Ofenauskleidung) stratifiziert gefunden wurden. Kephala ist somit einer der frühesten eindeutig identifizierten Kupfergewinnungsplätze in der Ägäis. Dennoch sollte nicht übersehen werden, daß S. R. B. Cooke (in Coleman 1977) aufgrund einer Untersuchung von zwei Schlackenproben (Oberflächenfunde) von Kephala Zweifel an deren Datierung angemeldet hat. Nach seiner Meinung deuten diese Schlakken auf einen relativ fortgeschrittenen Hüttenprozeß, wie man ihn im späten Neolithikum in der südlichen Ägäis nicht erwarten würde. Es scheint sich demnach bei den Schlacken nicht um Überreste von ersten, tastenden Schmelzversuchen zu handeln.

Auf Kea sind jedoch keine Kupfervorkommen bekannt. Die Situation ist demnach komplementär zu der von Laurion, wo prähistorischer Bergbau umging und zumindest kleine Mengen von Kupfererzen hätten abgebaut werden können. Zumindest bis heute sind aber noch keine Kupferschlacken in Laurion gefunden worden. Deshalb schlug Coleman (1977) vor, daß Kupfererze von Laurion auf Kephala verhüttet worden wären. Die Begründung dafür läßt er offen. Holzmangel kann zu der frühen Zeit und bei den kleinen Mengen ebenso wie die Windverhältnisse keine Rolle gespielt haben. Abgesehen von sehr kleinen Mengen gepulvertem Azurit, der in der ägäischen Frühbronzezeit offensichtlich als Pigment (Schminke?) benutzt wurde, gibt es keine Anzeichen dafür, daß Erze – ähnlich wie Obsidian – weit transportiert und gehandelt wurden. Im Gegenteil, auf dem kahlen Vorsprung von Ag. Sostis auf Siphnos sind die natürlichen Gegebenheiten weniger gut für Verhüttung geeignet als in Laurion oder Thorikos, und doch wurde das Erz in der frühen Bronzezeit direkt neben der Grube verhüttet. Auch Seriphos und Kythnos, wo große Mengen Kupferschlacken bekannt sind, zeichnen sich weder durch Waldreichtum noch durch andere Vorzüge für die Verhüttung aus, sondern nur durch das Vorkommen von Kupfererzen (s. u.). Es ist deshalb von besonderem Interesse, der Frage nach Kupfervorkommen auf Kea nachzugehen.

Alter Bergbau ist auf Kea an mehreren Stellen zu vermuten (s. auch Kap. III,1c). Die Rötelgrube von Kalamo (TG 125A) wurde schon von Fiedler (1841) als antik eingestuft. Auch Philippson (1901) erwähnt alte Stollen an dieser Stelle. An einem Kontakt Marmor/Schiefer ist dort eine ehemals vielleicht mehrere Meter mächtige Erzlinse eingelagert, die vorwiegend aus Fe-Mn-Oxiden besteht. Die Blei- und Kupfergehalte sind allerdings so niedrig (Tab. 17), daß eine frühere Buntmetallgewinnung selbst in kleinem Maßstab unwahrscheinlich ist.

Weiter östlich, in einer kleinen Bucht, liegt das Bergwerk von Spathi (TG 120), das ebenfalls von Fiedler (1841) für antik gehalten wurde. Eine schichtgebundene Erzführung, z. T. Spalten in Marmor füllend, ist durch einen modernen Prospektionsstollen erschlossen, der offensichtlich durch Aufsprengen alter Mundlöcher entstand. Der Abbau scheint sich nicht gelohnt zu haben, so daß ein Teil der alten Örter noch erhalten ist. Alle Stöße und Firsten weisen Spuren von leichten Pickelhieben auf, die wahrscheinlich von einer Nachuntersuchung stammen. Im Versatz unter einer Abbautasche fand sich ein Metallfragment aus einer Cu-Sn-Zn-Legierung (11,1% Zn, 3,5% Sn). Obwohl die Metallzusammensetzung im allgemeinen keine Rückschlüsse auf das Alter eines Objektes erlaubt, darf man dennoch vermuten, daß dieses Fragment mittelalterlich oder höchstens römerzeitlich ist. Denn so hohe Zn-Gehalte tauchen in der klassischen Antike erstmals gelegentlich auf (Craddock 1976) und sind erst in der Kaiserzeit ausgesprochen häufig.

Ein ähnlicher Erztyp ist an mehreren Stellen bei Orkos (TG 122) anzutreffen. Heute sind dort nur mehr große Tagesbrüche eines verlassenen Eisenbergbaus anzutreffen, aber Davies (1935) hat noch alte Strecken von 60-90 cm Höhe gesehen und berichtet, daß bei der Wiederaufnahme des Betriebes (nach 1930) viele Stollen und Schächte und sogar einige Eisenschlägel und Meißel gefunden wurden. Davies erwähnt auch einige Streufunde von Schlacken, die geringe Mengen Kupfer enthielten und 21,61% Fe. Daraus schließt er, daß

Probe	Lokalität	Fe %	Cu µg/g	Pb µg/g
TG120-8.1	Spathi	34,4	64	<10
TG121-1.2	Liparos	55,1	170	330
TG122-6.1	Orkos	48,1	35	11
TG123C-3.1	Faros Nord	22,1	89	1220
TG123D-4.1	Spasmata	53,8	36	160
TG125	Kalamos	n.b.	n.b.	120

Tab.17 Teilanalysen von Eisenerzen (vorwiegend Brauneisen) von der Kykladeninsel Kea.

Kupfererz das Ziel des alten Bergbaus gewesen sein könnte und daß er deswegen nicht als Tagebau betrieben wurde, obwohl die eisenhaltigen Erze großflächig übertage ausbeißen. Auf dem Hügel, der die Bucht von Orkos im Süden begrenzt, wurden vereinzelte Stücke von Kupferschlacke entdeckt, die in ihrer Zusammensetzung denen von Kephala ähneln (s. Tab. 18).

Weder Fiedler noch Davies erwähnen das Erzvorkommen von Liparos (TG 121) im Südwesten der Insel, das an eine Störung in einer Schiefer/Marmor-Wechsellagerung gebunden ist. Obertage ist die Störung mehrere hundert Meter fast in der Fallinie eines Hanges zu verfolgen. Auch hier wurden, vermutlich gleichzeitig mit Orkos, Eisenerze gefördert. Die Erze bestehen wie in Orkos vorwiegend aus Eisenoxiden, aber in Liparos wurden auch Spuren von Kupferkies und sekundären Kupfermineralen beobachtet. Allerdings sind keine Anzeichen eines älteren Abbaus vorhanden, und es mag erwähnenswert sein, daß Liparos im Gegensatz zu den meisten Erzvorkommen auf den Kykladen mit Spuren alten Bergbaus nicht vom Meer aus sichtbar ist. Insgesamt enthalten die Eisenerzvorkommen auf Kea nur ziemlich geringe Gehalte an Cu und Pb (s. Tab. 17), so daß die Frage nach Kupfervorkommen auf der Insel offen bleibt.

Kythnos

Mehrere stratiforme Eisenerzvorkommen in Marmoren sind vor allem im Nordosten der Insel bekannt (de Smeth 1975). Fiedler (1841) beschrieb besonders bei Ag. Ioannis ausgedehnte alte Gruben in den Eisenerzen und erwähnt auch kleine Mengen Malachit. Aber er scheint sie ebenso wie Philippson (1901) und Davies (1935) für Eisenbergwerke gehalten zu haben. Fiedler und Davies erwähnen auch Schlackenvorkommen, wobei Fiedler auf grüne Kupferausblühungen auf den Schlacken am Osthang des Prophitis Elias-Berges aufmerksam macht. Gale et al. (1985) bestätigen diese Angaben, weisen aber anhand von Schlacken- und Erzuntersuchungen überzeugend nach, daß Kupfererze bei Zogaki und Ag. Ioannis gefördert und nördlich von Ag. Ioannis verhüttet wurden. Neuere Untersuchungen zeigen, daß diese Aktivitäten in die Bronzezeit zu datieren sind (Stos-Gale 1987). Die alten Gruben sind zwar großteils durch den Bergbau um die Jahrhundertwende, als 360000 t Erz gefördert wurden (Feldhaus 1984), und durch eine kurze Betriebsphase um 1940 zerstört worden, aber ähnlich wie auf Siphnos sind noch Überreste der prähistorischen Bergbauanlagen erhalten.

Seriphos

Die reichen Erzlagerstätten im Südwesten der Insel sind anscheinend seit dem Altertum bekannt. Im Mittelalter wurden sie von den Venetianern ausgebeutet und sie stehen noch heute im Abbau, wenn auch die Förderung in den letzten Jahren stark zurückging. Insgesamt wurden etwa 7 Millionen Tonnen Erz gefördert, und man schätzt die noch vorhandenen Reserven auf 500000 t. Eine geologische Beschreibung der Lagerstätten wurde von Marinos (1951) vorgelegt. Demnach handelt es sich um kontaktmetasomatische Erzbildungen in der Nähe des Kontaktes von Marmoren zu einem alpidischen Granodioritstock. Erzmine-

Probe	Lokalität	SiO_2	FeO	Al_2O_3	CaO	MgO	ZnO	K_2O	CuO	PbO	Summe
TG122A	Orkos	37,0	40,9	3,0	6,6	4,0	–	–	0,30	–	91,8
TG124A	Ag. Irini	40,9	36,9	2,4	7,3	5,8	–	–	0,44	–	93,7
TG124B-1	Kephala	37,9	39,4	3,2	5,6	5,4	–	–	0,97	–	92,5
TG124B-2	Kephala	29,0	49,1	2,5	3,2	4,4	–	–	4,85	–	92,9
TG125B	Paoura	1,60	71,1	1,14	0,15	1,31	0,02	–	0,08	–	75,4

Tab. 18 Zusammensetzung von Verhüttungsschlacken von verschiedenen Lokalitäten auf Kea und einem Eisenerz (TG125B). Angaben in Prozent; – bedeutet < 0,1%.

Probe	TG102-1	TG102-2	TG102-3	TG102-4	TG102-5	TG102-6	TG102-7
SiO_2	36,5	44,2	41,4	39,6	48,9	60,4	42,2
FeO	44,0	38,2	39,4	41,9	37,5	9,6	13,2
Al_2O_3	5,2	1,9	2,8	0,90	4,4	12,1	19,7
CaO	6,8	8,9	7,2	7,0	3,4	6,0	14,8
MgO	2,9	4,7	3,7	5,8	2,4	5,2	1,0
Na_2O	0,40	0,23	0,31	0,16	0,29	2,05	0,26
K_2O	1,68	0,47	1,70	<0,02	2,23	4,10	n.b.
MnO	0,44	0,30	0,79	0,27	0,40	0,21	n.b.
ZnO	<0,1	<0,1	0,29	<0,01	<0,1	<0,1	0,16
CuO	0,93	1,75	2,25	3,35	1,06	0,11	0,63
Pb	0,13	0,15	0,26	0,14	0,15	0,14	2,39
As	0,007	0,004	0,008	0,034	0,003	0,0008	n.b.
Sb	0,0007	0,0006	0,0014	0,007	0,0008	0,0003	n.b.
Summe	99,0	100,8	100,1	99,2	100,7	99,9	94,1

Tab. 19 Zusammensetzung von Kupferschlacken von Avyssalos (TG102) auf Seriphos.

rale sind überwiegend Magnetit und daneben Hämatit, Pyrit und und Ilvait.

Aber schon Fiedler (1841) erwähnt auch Kupferminerale im Eisenerz, und Schurfrechte für Kupfer und Blei wurden im vergangenen Jahrhundert vergeben. Etwa 2 km weiter nördlich liegt auf dem Rücken südlich der Bucht von Avyssalos eine große Schlackenhalde (TG 102) von mindestens 100 000 t. Die Schlacken enthalten Kupfer (Tab. 19), wie Davies (1935) erstmals feststellte. Er fand auch einige karthagische Münzen und Fragmente antiker Keramik in den alten Gruben. Auch prähistorische Keramik scheint auf der Schlakkenhalde vorzukommen (Weisgerber, mündliche Mitteilung 1980), die wahrscheinlich das bei weitem umfangreichste Zeugnis alter, vielleicht sogar prähistorischer Kupfergewinnung in der südlichen Ägäis ist. In der nördlichen Ägäis ist nur eine Stelle mit einer ähnlich großen Menge von Kupferschlacken bei Yuvalar (TG 138) bekannt. Eine Datierung dieser Schlacken ist daher dringend geboten. Gale et al. (1985) machten auf eine weitere, kleinere (ca. 3000 t) Halde von Kupferschlacken bei Kephala in ähnlicher Lage und mit ähnlicher Schlackenzusammensetzung aufmerksam.

Siphnos

Unter den frühbronzezeitlichen Schlacken von Ag. Sostis (TG 43) waren auch einige mit Kupfervormacht (Pernicka et al. 1985). Da die dort geförderten komplexen Erze bis zu 40% Cu enthielten (Vavelidis et al. 1985), wäre eine gleichzeitige Gewinnung von Kupfer und silberhaltigem Blei denkbar. Allerdings sind die Kupferschlacken weit seltener als andere, so daß eine allfällige eigenständige Kupfergewinnung neben Blei und Silber nur eine geringe Rolle gespielt haben kann.

Das gleiche gilt für die Kupferschlacken von Platy Gialos (TG 53) an der Südküste von Siphnos (s. Abb. 27), die mengenmäßig von Bleischlacken mit außergewöhnlich hohen Bleigehalten übertroffen werden (Pernicka et al. 1985). Die goldführenden Erze bei Aspros Pyrgos sind z. T. mit Malachit vergesellschaftet und könnten demnach auch auf Kupfer abgebaut worden sein. Dies würde mit den hohen Goldgehalten in den Kupferschlacken von Platy Gialos in Einklang stehen.

Syros

Es gibt mehrere unabhängige Hinweise auf ein Kupfervorkommen auf Syros. Davies (1935) spricht von alten Gruben bei »Pyrghos north of Syra town« und Forbes (1971) erwähnt Kupfervererzungen auf Syros ohne weitere Ortsangabe. Die Angabe von Davies stimmt mit der Information von Melidonis und Constantinides (1983) überein, die in ihrer Karte von Syros bei Ag. Dimitrios nördlich von Ermoupolis und am Osthang des Pirgos-Berges mehrere Sulfidmineralisationen und ein aufgelassenes Bergwerk einzeichnen.

Paros

Als wahrscheinlich darf man auch ein Kupfervorkommen auf Paros betrachten, das von Philippson (1901), Papavasiliou (1909), Davies (1935) und Forbes (1972) erwähnt wird. Alle scheinen auf derselben Quelle zu beruhen, nämlich einer mündlichen Mitteilung von A. Kordellas, nach der bei Naussa auf Kupfer versuchsweise abgebaut wurde (Philippson 1901).

Andros

Eine kurze Beschreibung eines alten Kupferbergbaus bei Ag. Petros liefert Davies (1935). Auch eine nicht genannte Menge von Kupferschlacke ist vorhanden, die z. T. hellblau-glasig aussieht. Eine ähnliche Schlacke von Skouries auf der Chalkidike stammte aus römischer Zeit. Auf dem Kap Selinitis soll es neben Bleiglanz auch Kupferkies und Kupferschlacke geben.

In der metallogenetischen Karte Griechenlands werden auf Anafi kleine Mineralisationen von Malachit und Azurit verzeichnet, die vermutlich ebenso unbedeutend wie die Bleivorkommen sind. Dasselbe gilt wohl für die Kupfervorkommen im Dikaion-Gebirge auf Kos. Davies (1935) sah dort zwar einige Prospektionsschurfe, maß ihnen aber keine archäometallurgische Bedeutung bei. Stephanos (1905) berichtet, daß es im Norden der Insel Naxos bei Karkos eine alte Kupfermine mit Ofenresten davor gäbe. Er verweist auch auf Lokalitätsnamen in der Umgebung, die auf eine lokale Kupfergewinnung oder -verarbeitung deuten. Diese Angaben scheinen weder bestätigt noch widerlegt zu sein.

3. Gold

a. Westanatolien

In den Provinzen Aydin, Izmir und Manisa sind mehrere kleine Goldvorkommen bekannt (MTA 1970). Es handelt sich durchweg um hydrothermale Quarzgänge in Schiefern und Gneisen des Menderes-Massivs, die an Arsenkies gebundenes Gold enthalten. Diese Vorkommen sind in Abb. 7 eingetragen, aber nur drei sind näher untersucht und scheinen für alten Bergbau in Betracht zu kommen. Außerdem ist das Vorkommen von Astyra in der Provinz Çanakkale zu erwähnen.

Probe	(Au (µg/g)
TG 132B-2	0,62
TG 132B-4	8,1
TG 132B-7	1,1
TG 132B-9	4,6
TG 132B-14	12,1

Tab. 20 Goldgehalte in Erzen von Astyra (TG 132B).

Tire

Etwa 1,5 km westsüdwestlich der Stadt Tire (80 km südöstlich von Izmir) sind die anstehenden Gneise von diskordanten Quarzgängen durchzogen, die 15-35 cm mächtig sind. Der goldhaltige Arsenkies ist unregelmäßig in flachen Linsen, Gängchen und Erztaschen verteilt. Bei Beyler Bahçesi erstrecken sich auf einer Fläche von 250 x 600 m alte Gruben, die vor dem 20. Jahrhundert angelegt wurden (MTA 1970). Das Erz enthält bis zu 33 g/t Au.

Arapdağı (TG 190)

Nördlich des Golfes von Izmir in der Nähe von Karsıkaya werden dazitische Brekzien, die vermutlich einen Vulkanschlot bilden, von einem System hydrothermaler, ost-west-streichender Quarzgänge durchzogen. Die Vererzung besteht aus Pyrit, Bleiglanz, Zinkblende und wenig Kupferkies. Durchschnittsgehalte von 1-5 g/t Au in der Primärzone und bis zu 37 g/t in Brauneisen der Oxidationszone wurden publiziert (Dora 1964). Der Bleiglanz enthält mehrere 1000 g/t Ag. Entlang des Hauptganges sind über 300 m Stollenmundlöcher, Pingen und Tagesbrüche aneinandergereiht. Aufgrund des Erscheinungsbildes halten Wagner et al. (1986) prähistorische Goldgewinnung für möglich.

Sart

Die alluvialen Sedimente des Sart çay und die neogenen Sandsteine und Konglomerate enthalten geringe Mengen von Gold. Sart ist das antike Sardes, die Hauptstadt von Lydien, dessen König Krösus berühmt für seinen Reichtum war. Anscheinend währte der Reichtum aber nicht lange, denn schon in der Spätantike war das Vorkommen erschöpft. Moderne Prospektion ergab im Durchschnitt 0,7 g/m^3 Au in alluvialen Sedimenten (Apaydin u. Erseçen 1981) und bis zu 0,37 g/m^3 Au im Konglomerat. An dieser Stelle sollte sicherheitshalber wiederholt werden, daß die Behauptung, sardisches Gold sei nach Ur exportiert worden (Young 1972), keineswegs gesicherte Erkenntnis ist, wie manchmal dargestellt (z. B. Höckmann 1987). Im Gegenteil, die Grundlagen, auf denen diese Behauptung beruhte, hielten einer Überprüfung nicht stand (Meeks u. Tite 1980).

Astyra (TG 132)

Rund 30 km südöstlich von Çanakkale liegen die beiden Goldvorkommen von Kaletaş (TG 132A) und Kartalkaya (TG 132B). In der MTA-Publikation Nr. 129 (MTA 1970) werden sie als Madendagi bzw. Kartaldagi bezeichnet. Beide Vorkommen wurden um die Jahrhundertwende von der englischen »Astyra Gold

Mines Co« ausgebeutet. Die Konzession hatte F. Calvert, der sich auch mit archäologischen Fragen, insbesondere der Lokalisation Trojas, beschäftigte (Cook 1973). Der Bergbau wurde 1914 stillgelegt und gilt heute als unrentabel (MTA 1970). Die Erzführung ist an dazitische Intrusionen gebunden, in denen Pyrit und gediegen Gold vorkommt (Tab. 20). Die Vorkommen waren in der Antike bekannt und Strabo (XIII, 1.2.3 und XIV,5.28) behauptet, sie wären die Quelle des Reichtums des sagenhaften trojanischen Königs Priamos. Nach dem Geländebefund ist die antike Nutzung eindeutig belegt und prähistorische Goldgewinnung wahrscheinlich (Pernicka et al. 1984).

b. Nördliche Ägäis

In der antiken Literatur werden die Goldvorkommen Makedoniens ebenso gerühmt wie die Lydiens (Casson 1926). Allgemein bekannt ist der Goldreichtum der makedonischen Könige, der vermutlich eine nicht zu unterschätzende Rolle beim Aufstieg Makedoniens zur beherrschenden Macht im ägäischen Raum spielte. Allerdings dürfte die von Mack (1964) geschätzte Fördermenge von insgesamt 300 t Gold für die Zeit von etwa 2100 v. Chr. bis 500 n. Chr. bei weitem zu hoch sein. Abgesehen davon, daß er die Grundlagen für diese Schätzung nicht nennt, weckt sein Umgang mit der archäologischen Evidenz zum Bergbau in Makedonien leises Mißtrauen. Sie beruht nämlich im wesentlichen auf den veralteten Vorstellungen Quirings (1948), nach denen kretische Prospektoren mit kupfernen Kreuzhacken den Balkan überschürften. Dahinter steht das diffusionistische Modell, daß die Kenntnis der Metallurgie von Ägypten bzw. aus Vorderasien über Kreta auf den Balkan gelangte. Das war zwar damals die Lehrmeinung, aber problematisch ist der von Mack übernommene Versuch Quirings, die antike Literatur und antike Mythen zur Untermauerung dieser Lehrmeinung heranzuziehen.

Vom archäometallurgischen Standpunkt ist die Arbeit Macks (1964) ähnlich unausgewogen wie die Branigans (1974). Während bei Branigan die lagerstättenkundlichen Aspekte weit hinter dem archäologischen zurückbleiben, ist es bei Mack (1964) umgekehrt. Dessen Arbeit gilt mit Recht auch heute noch als bester lagerstättenkundlicher Überblick über die Goldvorkommen in Nordgriechenland. Deswegen werden zumindest in der geologischen Literatur meist auch die problematischen archäometallurgischen Aussagen, was die Fördermenge oder den Beginn des geschichtlich belegten Goldbergbaus anbelangt, übernommen (z. B. Feldhaus 1984).

Demnach sind bei Mack (1983) 17 alte Goldbergwerke in Nordgriechenland zu finden, die nach seinem Verständnis als antik oder prähistorisch eingestuft werden müßten. Da er keinerlei Beschreibung liefert, ist diese Informationsquelle schwer zu beurteilen. Tatsache ist jedenfalls, daß viele Flüsse und Bäche in Nordgriechenland Gold führen, das z. T. auch platinhaltig ist (Vavelidis, mündliche Mitteilung 1987). Mack (1964) hebt diesbezüglich besonders die Flüsse Gallikos, Strymon, Axios sowie deren Zuläufe und die kleinen Flüsse Linthos und Chavrias auf der Halbinsel Chalkidike hervor. Eine frühere Ausbeutung dieser Seifengoldlagerstätten ist naturgemäß schwer nachzuweisen. Mack (1964) spricht von zahlreichen antiken Waschrückständen am Gallikos, die auch schon von Davies (1932a) aufgesucht und mit einer Textstelle bei Aristoteles (Mirabiles Auscultationes 45) in Verbindung gebracht worden sind, in der von paeonischem Waschgold die Rede ist.

Eine andere antike Erwähnung von Waschgold findet sich bei Plinius (Naturalis Historia 33, 66), der den Hebros in Ostthrakien zusammen mit dem Pactolus nennt. Im 16. Jahrhundert sah Bellon (1555) Goldwäscher im Maritzatal (der slawische Name für den Hebros), bemerkt aber, daß deren Ausbeute gering war. Dies steht in Einklang mit den modernen Prospektionsergebnissen (Mack 1964), daß die Lagerstättensubstanz der Seifengoldvorkommen in dieser Region immer gering ist.

Damit übereinstimmend beziehen sich die meisten antiken Textstellen über den Goldreichtum Nordgriechenlands auf Berggold, und zwar im wesentlichen in vier Regionen:

Vermion

Die Vorstellung über antiken Goldbergbau im Vermion-Gebirge geht auf Strabo (14, 680) zurück. Davies (1932a) hält Goldvorkommen in dieser Region überhaupt für unwahrscheinlich, während Mack (1983) in einer Verbreitungskarte von Goldvorkommen dort sogar ein antikes Goldbergwerk verzeichnet. Es ist allerdings möglich, daß letzterer diese Eintragung aufgrund der antiken Textstelle vorgenommen hat, denn in der gleichen Karte erscheint auch ein Goldbergwerk auf der Kykladeninsel Siphnos, das bis vor kurzem ebenfalls nur in der antiken Literatur existierte. Zur Zeit scheint es deshalb am besten zu sein, die Frage nach antiker Goldgewinnung im Vermion-Gebirge offen zu lassen.

Krusia

Herodot (V,17) beschreibt eine Route vom Prasias-See über ein Goldbergwerk des makedonischen Königs Alexander I. (495-450/40 v. Chr.), das ein Talent (ca. 26 kg) Gold oder Silber pro Tag produziert haben soll, zum Berg Dysoron und dann weiter nach Makedonien. Sowohl der Prasias-See als auch Dysoron sind nicht genau lokalisiert, aber wahrscheinlich handelt es sich um den heutigen Kerkinisee am mittleren Strymon und das Krusia-Gebirge nördlich von Saloniki, dessen Westflanke auch heute Dissoron genannt wird. Im Krusia-Gebirge gibt es im Bereich des Quellgebietes des Gallikos ca. 10 km südlich von Vathi mehrere Berggoldvorkommen, gebunden an Quarzgänge und an den Eisernen Hut von Sulfidlagerstätten (Mack 1964). Davies (1932a) spricht von vielen Stollenmundlöchern und kleinen Schlackenhalden in dieser Gegend, so daß antiker Bergbau wahrscheinlich ist. Er erwähnt auch einen Rillenschlägel aus Kalkstein unter den Ausgrabungsfunden von Kilindri, ein für die Bronzezeit typisches Gezähe.

Pangäon

Der Pangäon-Gebirgszug und die umliegenden Städte werden in der antiken Literatur wohl am häufigsten im Zusammenhang mit Edelmetallen genannt. Die Sage ließ den Reichtum des Phöniziers Kadmos vom Pangäon stammen (Strabo 14, 680). Die einheimischen Stämme fallen durch eine frühe Münzprägung auf. Zahlreiche alte Pingen, Schächte und Stollen am Nordwesthang des Pilaftepe (Mack 1964) weisen auf ehemals rege Bergbautätigkeit hin. Der Goldgehalt scheint vor allem an Arsenkies gebunden zu sein, wie auch die Schlackenhalden von Nikisiani (TG 63) vermuten lassen, die viel Speise enthalten. Für voreisenzeitlichen Abbau gibt es bisher keinen Beleg.

Thasos

Herodot (VI,46) berichtet über die Bergwerke von Thasos: »Ich habe diese Bergwerke selber gesehen; das erstaunlichste von den Bergwerken ist das von den Phönikern entdeckte, als sie im Verein mit Thasos diese Inseln besiedelten, die dann nach diesem Phöniker Thasos ihren Namen erhielt. Dieses phönikische Bergwerk auf Thasos liegt zwischen den Orten Ainyra und Koinyra, gegenüber von Samothrake. Ein großer Berg wurde dort beim Suchen umgewühlt«. Diese genaue Ortsbeschreibung ermöglichte früh die Identifizierung der topographischen Lage, denn der Name Kinyra hat sich bis heute in einem Weiler an der Ostküste der Insel erhalten. Dennoch wurde seit mehr als hundert Jahren (Conze 1860; Speidel 1929; Davies 1932a) vergeblich danach gesucht. Dies führte zu Zweifeln an Herodots Angaben bzw. deren Umdeutung (Holtzmann 1979), wonach eine Verwechslung mit Silberminen an anderen Stellen der Insel vorläge.

Die Auffindung eines Goldbergwerks bei Paläochori (TG 80A), wo schon Davies (1932a) mehrere Stollen, aber keine Erzführung gesehen hatte, bestätigte Herodots Angaben weitgehend (Wagner et al. 1979). Weitere Gruben im gleichen Gebiet (TG 80B-E) und zusätzlich unter der Akropolis der Hauptstadt Thasos (TG 90) belegen den Reichtum der Insel im Altertum (Wagner et al. 1981). Selbst heute sind an diesen Stellen noch bis zu 25 µg/g Au im Erz zu finden. Es liegt im wesentlichen als Freigold in Form von Blättchen von 10-800 µm Durchmesser vor. Aus dem meist lockeren Wirtsgestein (limonitische Karstfüllungen) könnte es relativ leicht ausgewaschen werden. Die lagerstättenkundliche Bearbeitung der Goldvorkommen erfolgte durch Vavelidis (1984).

Nach Herodot (VI,46) hatte Thasos auch Besitzungen auf dem Festland, darunter die noch nicht lokalisierten Goldbergwerke von Skaptehyle. Vermutlich war Davies (1932a) auch hier schon auf der richtigen Spur, als er sie in der Region von Palea Kavala vermutete. Die dort verbreiteten Fe-Mn-Erze weisen z. T. ansehnliche Goldgehalte bis zu 37 µg/g auf und sind an vielen Stellen durch alte Stollen aufgeschlossen (Chalkias 1985).

c. Südgriechenland und Kykladen

In der frühen Bronzezeit sind Goldfunde in dieser Region ausgesprochen selten. Im 2. Jahrtausend v. Chr. findet sich Gold dagegen reichlich in minoischen und mykenischen Fundzusammenhängen. Die unvergleichlich reichen Goldfunde aus den Schachtgräbern von Mykene sind allgemein bekannt. Nach dem Untergang der mykenischen Palastkultur geht der Goldbesitz wieder stark zurück. Erst seit Alexan-

der dem Großen fließt wieder mehr Gold nach Südgriechenland. Insgesamt läßt der archäologische Fundbestand nicht auf größere Vorkommen schließen. Dennoch behauptet Forbes (1964) ohne wirklichen Beleg, daß ägäisches Gold die Quelle des Reichtums der minoisch-mykenischen Ziviliation gewesen sei. In der antiken Literatur wird in Südgriechenland nur ein einziges Goldvorkommen auf Siphnos (Herodot III,57) genannt, das meist zusammen mit Silber bei Ag. Sostis (TG 43) vermutet wurde. Die dort auftretenden komplexen Sulfiderze enthalten zwar Silber, aber nur sehr wenig Gold, so daß die Frage nach Goldvorkommen auf Siphnos offen blieb. Diese konnten später an anderen Stellen auf der Insel (s. Abb. 27) bei Ag. Ioannis (TG 71), Apokofto (TG 91) und Aspros Pyrgos (TG 92) nachgewiesen werden (Pernicka et al. 1982). Es handelt sich um hydrothermale Quarzgänge, in denen das Gold an Pyrit gebunden ist (TG 91) und schichtförmige Erzkörper im Kontaktbereich Schiefer/Marmor (Vavelidis et al. 1985). Alle diese Vorkommen sind durch Bergwerksanlagen unbekannten Alters erschlossen und z. T. zerstört durch modernen Eisenerzbergbau.

Außerdem enthalten die Mischsulfidvorkommen von Kallianou (TG 59) auf Euböa (s. Kap. III,1c) mikroskopisch identifizierbares gediegen Gold. Es ist aber zweifelhaft, ob dies im Altertum erkannt und ausgebeutet wurde. Zwei antike Goldbergwerke sind bei Mack (1983) auf dem Taigetos-Gebirge, dem mittleren »Finger« der Peloponnes, ohne zusätzliche Information kartiert. Die Aufzählung von Goldlagerstätten auf den Kykladeninseln Andros, Thera, Milos, Kimolos, Seriphos und Siphnos (Forbes 1964; wiederholt von Waldbaum 1978) ohne Beleg braucht man hingegen nicht zu beachten.

4. Zusammenfassung der Spuren extraktiver Metallurgie

Es steht ohne Zweifel fest, daß im ägäischen Raum bereits zu Beginn des dritten Jahrtausends v. Chr. Blei-Silber-Erze bergmännisch gefördert und verhüttet wurden. Es sind dies die nach dem derzeitigen Kenntnisstand frühesten Zeugnisse von Blei-Silber-Metallurgie überhaupt. Gleichzeitig oder etwas später dürfte die Blei-Silber-Gewinnung von Gümüşköy (TG 155), südöstlich von Bursa in Nordwestanatolien anzusetzen sein (Pernicka et al. 1984). Andere Spuren frühen Bleibergbaus in Südspanien, England und Österreich sind wesentlich jünger.

Dies läßt zwar nicht den Schluß zu, daß die Technik der Silbergewinnung aus Bleierzen aus der Ägäis stammt, aber es verleiht den Vermutungen über frühbronzezeitliche Blei- und Silbergewinnung im ägäischen Raum (Renfrew 1967; Branigan 1974) einen realistischen Hintergrund. In Abb. 28 sind außer den nachgewiesenen auch einige Stellen vermutlich vorantiken Bergbaus eingetragen, sofern die Ergebnisse der Feldbeobachtung eine solche Vermutung nahelegen.

Bezüglich der vorantiken Produktion von Kupfer ist die Evidenz in den letzten Jahren sehr viel sicherer geworden. Es gibt zwar nur ein einziges nachgewiesenes vorantikes Kupferbergwerk im ägäischen Raum, nämlich auf der Kykladeninsel Kythnos (Stos-Gale 1987), aber die Geländebefunde sprechen für prähistorische Kupfergewinnung auch auf der Nachbarinsel Seriphos (TG 102) sowie bei Yuvalar (TG 138) und Serçeören Köy (TG 192) in Nordwestanatolien. In Abb. 28 sind neben diesen Orten auch die neolithischen bis frühbronzezeitlichen Schlackenfunde aufgenommen. Es handelt sich meist nur um geringe Mengen aus prähistorischen Siedlungen, so daß sie nicht in allen Fällen als Beleg für prähistorische Kupfergewinnung gelten können. Kupferhaltige Schlacken fallen auch bei der Raffination von Rohkupfer an, aber ihre Anwesenheit beweist zumindest die Anwendung pyrometallurgischer Techniken.

Bei Goldbergbau ist die Situation schwierig. Die wenigen datierbaren Abbauspuren wie auch viele literarische Hinweise auf Goldgewinnung stammen aus der Antike. Nur im trojanischen Kulturkreis, in der Nordostägäis, sind genügend Goldvorkommen bekannt, um eine Selbstversorgung mit Gold überhaupt in Betracht zu ziehen. Für Kreta und die Peloponnes ist dies so gut wie ausgeschlossen. Die kleinen Goldvorkommen von Siphnos (TG 91, TG 92), Euböa (TG 59) und Tinos hätten dazu nicht ausgereicht, selbst wenn sie bekannt und mit den damaligen Mitteln auszubeuten gewesen wären. Dafür gibt es allerdings so gut wie keine Beweise.



Abb. 28 Verbreitung früher extraktiver Metallurgie im ägäischen Raum. Volle Symbole bezeichnen prähistorischen und halbvolle antiken Bergbau. Offene Symbole stehen für Berkwerksanlagen unbestimmten Alters, die aufgrund verschiedener Hinweise für antike und/oder prähistorische Nutzung in Frage kommen.

IV. Geochemische Evidenz für die Ausbeutung von ägäischen Erzlagerstätten im Altertum

Die Entdeckung frühbronzezeitlichen Bergbaus auf der Kykladeninsel Siphnos und bei Thorikos in Attika regt zu der Frage an, ob möglicherweise zur gleichen Zeit auch an anderen Stellen Erze gefördert und verhüttet wurden. Aus mehreren schon erwähnten Gründen könnten die Spuren dieser Tätigkeit zerstört oder nicht erkannt worden sein. In solchen Fällen ist nur die indirekte Erschließung frühen Bergbaus durch Vergleich der geochemischen Charakteristika von Erzen und archäologischen Fundobjekten möglich. Wie in Kap. II, 3 erläutert, war die Spurenelementzusammensetzung in dieser Hinsicht bisher wenig erfolgreich, so daß zuerst die Ergebnisse der Bleiisotopenmessungen diskutiert und erst in zweiter Linie die Einsatzmöglichkeiten der Spurenelementanalyse untersucht werden. Da bei der chemischen Analyse im allgemeinen auch die Hauptbestandteile erfaßt werden und die Kenntnis der Legierungszusammensetzung in vielen Fällen die Grundlage für eine Herkunftsdiskussion bildet, stellt sie in jedem Fall eine gute Ergänzung zur Isotopenanalyse dar. Im allgemeinen darf man wohl davon ausgehen, daß auch für die Identifizierung von Rohstoffquellen eine Kombination beider Methoden das Optimum darstellt. Denn selbst wenn die chemische Zusammensetzung nur selten eine eindeutige Zuordnung zu einer Lagerstätte erlaubt, könnte sie doch in Grenzfällen, wo isotopisch eine Zuordnung zu zwei oder drei Lagerstätten in Frage kommt, eine wertvolle Entscheidungshilfe abgeben.

1. Blei und Silber

Es ist eine Grundvoraussetzung für die Herkunftsbestimmung jeglicher Metallobjekte, daß keine Vermischung von Metallsorten verschiedener Herkunft erfolgte. Meist geht man davon aus, daß diese Bedingung in den frühesten Phasen der Metallverwendung weitgehend erfüllt ist. An eine regelmäßige Wiederverwendung von Altmetall könnte man am ehesten bei abgenutzten Gebrauchsgegenständen denken, die überwiegend aus Kupfer oder Kupferlegierungen hergestellt wurden.
Silber wurde dagegen praktisch ausschließlich für Schmuck und Prunkgegenstände verwendet. Dieses Metall taucht relativ unvermittelt erstmals in der Mitte des 4. Jahrtausends v. Chr. in Vorderasien auf. Mehr als 233 Silberobjekte wurden allein in einem Gräberfeld bei Byblos und einige Dutzend mehr in Anatolien, Palästina, Mesopotamien und dem prädynastischen Ägypten gefunden (Prag 1978). Im dritten Jahrtausend v. Chr. konzentrieren sich die Funde in Mesopotamien, Anatolien und der Ägäis. Dort fällt auf, daß Blei und Silber mehr oder weniger gleichzeitig erscheinen.
Blei scheint von Beginn an ein billiges Material gewesen zu sein. Es wurde zur Herstellung von Spinnwirteln, Netzbeschwerern, Drähten u. ä. verwendet, seltener für Armbänder und Idole. Interessant sind vier frühkykladische Schiffsmodelle aus Blei. Weit verbreitet war auch die Verwendung von Blei zur Reparatur gebrochener Keramikgefäße, indem Löcher mit Bleinieten ausgefüllt und Brüche mit Bleidraht umwickelt wurden. Es gibt jedenfalls keine Anzeichen dafür, daß Blei ähnlich wie Kupfer und die Edelmetalle zur Wertakkumulation oder als Rohstoff für einen ganzen Berufszweig gedient hat. In beiden Fällen würde man die Bildung von Horten erwarten, die eine Gefahr der Vermischung von Metall aus verschiedenen Quellen bergen. Man darf demnach erwarten, daß die Bleiisotopenverhältnisse in frühbronzezeitlichen oder früheren Blei- und Silberobjekten charakteristisch für das Ausgangserz sind.
In Abb. 30 sind die Bleiisotopenverhältnisse der bisher analysierten frühbronzezeitlichen Blei- und Silberobjekte aus dem ägäischen Raum (Gale u. Stos-Gale 1981; Pernicka et al. 1983) – sie stammen alle von den Kykladen – zusammen mit dem Meßfehlerbereich von ±0,1% eingetragen. Man erkennt zwei Gruppen und drei verstreut liegende Analysen. Ein Vergleich mit den Bleiisotopenverhältnissen in Sulfiderzen (überwiegend Bleiglanz) aus dem ägäischen Raum (Abb. 29) zeigt zunächst, daß die Blei- und Silberobjekte durchaus lokaler Produktion entstammen könnten, wenn auch ein Import nicht zwingend ausgeschlossen werden kann.

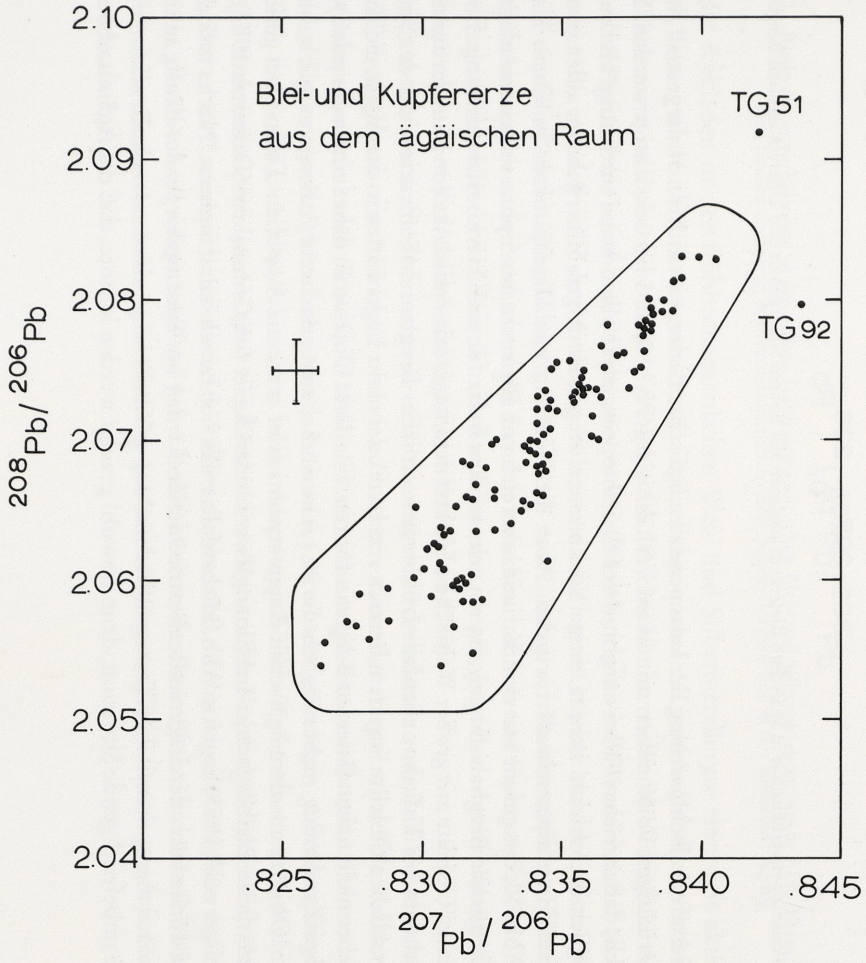


Abb. 29 Bleiisotopenverhältnisse in Blei- und Kupfererze aus dem ägäischen Raum (nach Pernicka et al. 1984).

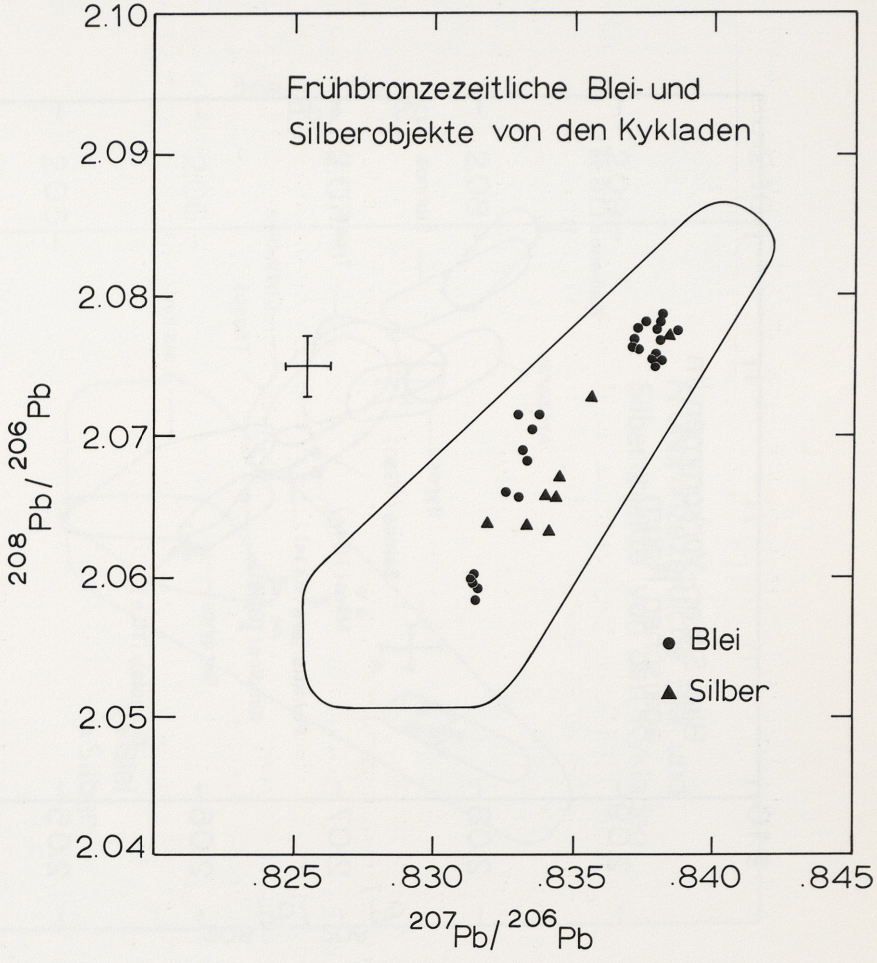


Abb. 30 Bleiisotopenverhältnisse in frühbronzezeitlichen Blei- und Silberobjekten von den Kykladen.

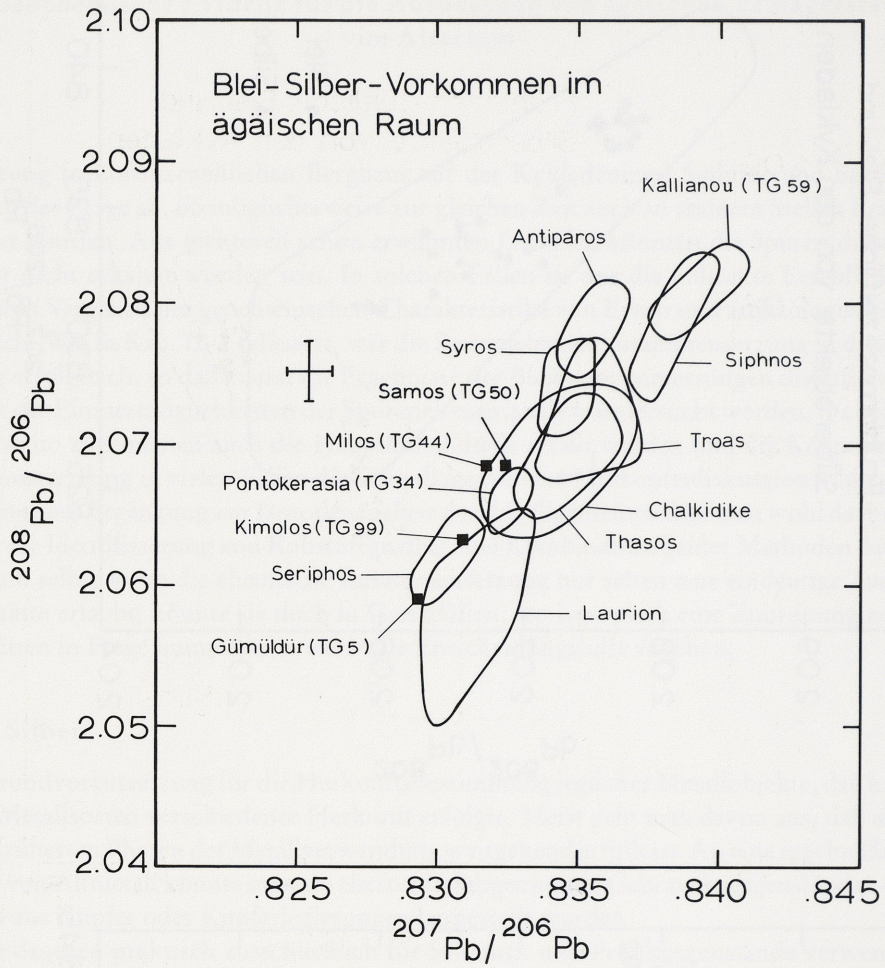


Abb. 31 Bleiisotopenverhältnisse in ägäischen Bleierzvorkommen mit hohem Silbergehalt und Überresten alten Bergbaus.

Eine detailliertere Aufschlüsselung der Isotopendaten ägäischer Bleierze ist in Abb. 31 dargestellt, wobei nur die silberhaltigen Vorkommen mit einem Verhältnis Ag/Pb > 0,0005 berücksichtigt wurden. Es ist offensichtlich, daß in vielen Fällen aufgrund der Bleiisotopenanalyse allein keine eindeutige Herkunftsaussage möglich ist, obwohl bereits einige Vorkommen wegen niedrigen Silbergehaltes oder mangels alter Bergbauspuren ausgeschieden wurden. Aber die Häufung von Datenpunkten in einem kleinen Bereich in Abb. 30, der gerade mit dem Variationsbereich von Bleierzen aus Siphnos zusammenfällt, wo frühbronzezeitlicher Bergbau umging, ist ein sehr starkes Indiz für eine Herkunftsbeziehung. Ebenso wird man einige Objekte mit großer Wahrscheinlichkeit dem Lagerstättendistrikt von Laurion zuordnen können, nachdem bei Thorikos ebenfalls frühbronzezeitlicher Bergbau dokumentiert wurde (Spitaels 1984). Die restlichen Objekte liegen im Bereich von zwei oder mehr Lagerstätten in der Ägäis, die Anzeichen alten, aber nicht näher datierten Bergbaus führen. Für diese Objekte ist daher eine mehr oder weniger eindeutige Zuordnung nicht möglich. Es ist nicht einmal eine gesicherte Aussage möglich, ob das Metall dieser Objekte aus dem ägäischen Raum stammt oder etwa aus Anatolien. Denn zwei gesichert frühbronzezeitliche Bleibergwerke im Einzugsbereich der Ägäis bei Gümuşköy (Demirok 1982) und Gümüş (Seeliger et al. 1985) liegen in Abb. 31 ebenfalls zwischen Laurion und Siphnos. Nach vorläufigen Ergebnissen dürfte auch der Lagerstättenbezirk von Bolkardağ im Taurusgebirge, der häufig mit dem »Silberberg« aus mesopotamischen Texten in Verbindung gebracht wird, dazu zu rechnen sein.
Dies ist eine unbefriedigende Situation, denn obwohl gezeigt werden konnte, daß die Ägäis und beson-

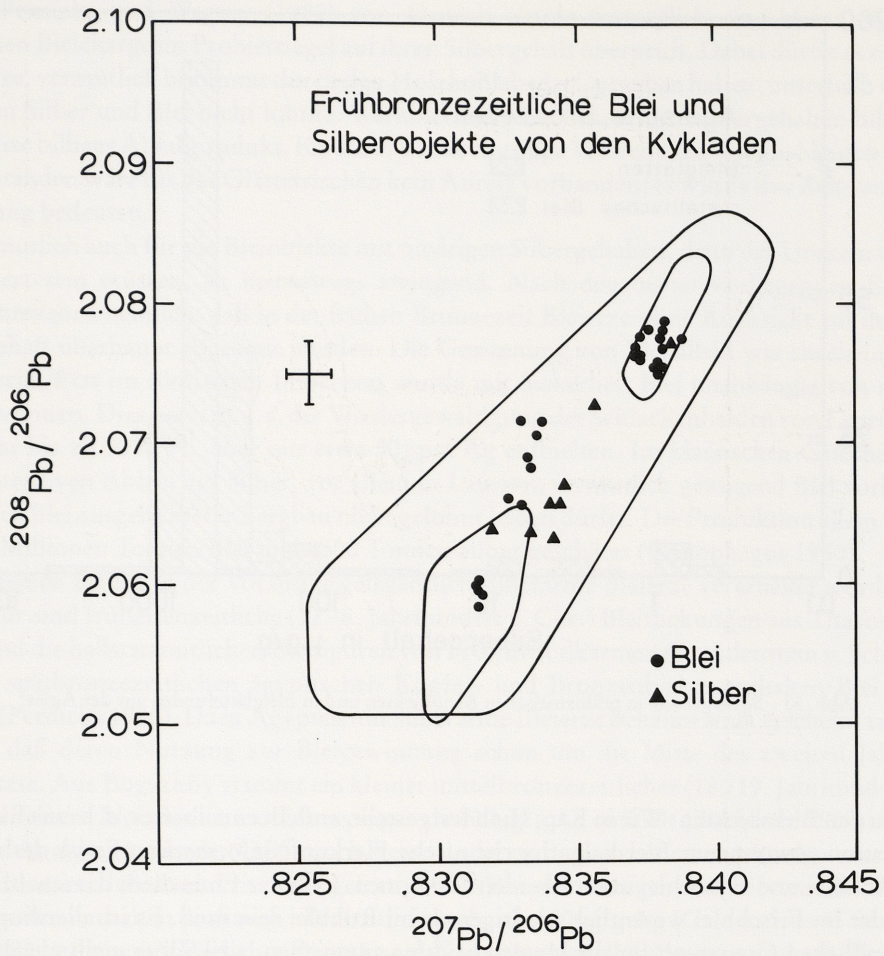


Abb. 32 Bleiisotopenverhältnisse in den selben frühbronzezeitlichen Blei- und Silberobjekten wie in Abb. 30 im Vergleich mit den beiden unstreitig frühbronzezeitlichen Blei-Silber-Bergwerken in der südlichen Ägäis.

ders die Kykladen in der frühbronzezeitlichen Blei- und Silbermetallurgie eine weit aktivere Rolle gespielt haben, als man früher vermutet hatte, ist die Frage nach den Ursprüngen dieser Technologie auf diese Weise nicht zu lösen. Eine Feinchronologie der Objekte könnte vielleicht zusätzliche Aufschlüsse ergeben. Aufgrund der besonderen Fundumstände auf den Kykladen ist eine solche aber nicht in Sicht. Immerhin fällt auf, daß die bisher eindeutig frühesten analysierten Objekte aus der Grotta-Pelos-Phase, nämlich ein Glied einer 200 gliedrigen Perlenkette von Louros auf Naxos und eine Silberschale von Amorgos, isotopisch in den mehrdeutigen Bereich zwischen Laurion und Siphnos (Abb. 32) fallen. Die Silberschale weist außerdem stilistisch nach Anatolien, u. a. wegen ihrer Bodenaufwölbung (Omphalos), die im ägäischen Metallhandwerk unbekannt ist (Matthäus 1985).

Seit kurzem sind auch die Bleiisotopenverhältnisse in den von manchen ins Endneolithikum datierten zwei Silberobjekten – ein Anhänger und eine Halskette – aus der Alepotrypahöhle auf der Halbinsel Mani (Peloponnes) bekannt (Stos-Gale 1987). Sie stimmen mit denen von Laurion überein und würden damit den Beginn des Bergbaus in Laurion schon im 4. Jahrtausend nahelegen. Allerdings sind die Fundumstände dieser Objekte ziemlich unklar. In der Alepotrypahöhle wurden zwar endneolithische Keramik und formenkundlich in den gleichen Zeitraum zu datierende Kupferbeile gefunden (Hauptmann 1971), aber es wird vermutet, daß die beiden Silberobjekte und zwei goldene Armreifen aus einem Grab stammen, das durchaus später angelegt worden sein könnte. In dieser Situation stellt sich die Frage, ob die chemische Zusammensetzung zusätzliche Unterscheidungsmöglichkeiten bezüglich der Herkunft dieser Metalle bietet.

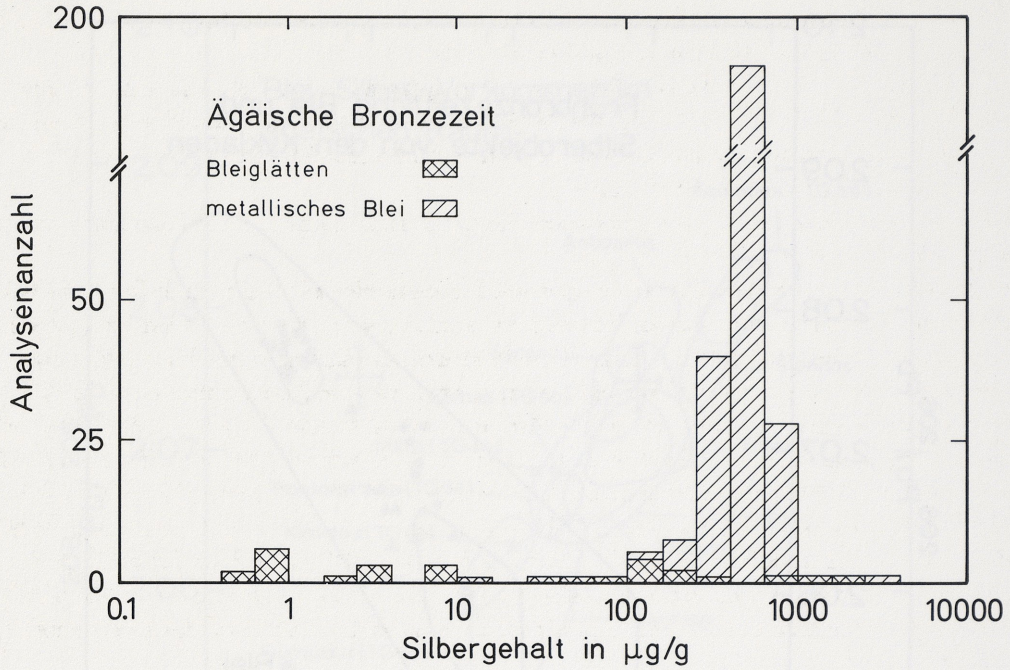


Abb. 33 Silbergehalte in prähistorischen Bleiobjekten und in Bleiglättefunden aus der Ägäis.

Zunächst zu den Bleiobjekten: Wie in Kap. II,4b festgestellt, enthält entsilbertes, d. h. aus Bleiglätte nach der Kupellation gewonnenes Blei keinerlei chemische Herkunftsinformation. Es ist deshalb wichtig, zwischen Rohblei und Frischblei unterscheiden zu können. In erster Linie dient dazu natürlich der Silbergehalt, der im Frischblei wesentlich niedriger als im Rohblei sein muß. Es ist allerdings schwierig, einen verbindlichen Grenzwert für die Unterscheidung anzugeben, weil Silber nicht gleichmäßig während des gesamten Kupellationsprozesses in die Glätte übergeht. Während zu Beginn praktisch kein Silber oxidiert wird, bildet sich gegen Ende der Treibarbeit eine geringe Menge von Silberoxid, das von der Glätte aufgenommen wird. Außerdem ist zu berücksichtigen, daß unter primitiven Bedingungen wahrscheinlich nur eine unvollständige mechanische Trennung von Glätte und silberhaltigem Blei gelang. Je weiter der Treibprozeß gediehen war, desto größer wurde die Gefahr, daß Silber in die Glätte gelangte. Die Zusammensetzung des Frischbleis hängt daher weitgehend davon ab, ob die gesamte Glätte oder nur Teile aus verschiedenen Stadien der Kupellation gefrischt wurden. Dies bezieht sich übrigens nicht nur auf Silber, sondern auch auf die anderen Begleitelemente des Bleis.

Deshalb ist für die Herkunft von Blei zunächst zu überprüfen, ob es sich um entsilbertes Blei handelt oder nicht. Mehrere Untersuchungen (Gale u. Stos-Gale 1981; Pernicka et al. 1985; Gale et al. 1984) haben mittlerweile gezeigt, daß in Bleiglättefunden selten höhere Gehalte an Ag als etwa 100µg/g auftreten. Ein Teil dieser Proben ist sogar stratifiziert, so daß selbst unter bronzezeitlichen Verhüttungsbedingungen mit weniger als 100µg/g Ag im Frischblei zu rechnen ist. Höhere Silbergehalte in Bleiobjekten sind demnach im allgemeinen ein Hinweis auf das Vorliegen von Rohblei, das noch einen Teil seiner chemischen Herkunftsinformation enthalten sollte.

Wie Abb. 33 zeigt, enthält der überwiegende Anteil von mehr als 300 vorantiken Bleigegenständen aus der Ägäis deutlich mehr Silber als die meisten Bleiglätten, so daß es sich wahrscheinlich mehrheitlich um Rohblei handelt. (Gelegentlich auftretende Silbergehalte von mehr als 100µg/g Ag sind vermutlich auf kleine Einschlüsse von metallischem Silber zurückzuführen, s.o.). Andererseits fehlen in den Bleiobjekten höhere Gehalte von mehr als 0,1% Ag, wie sie nicht selten in Bleiglanz angetroffen werden, völlig. Eine einleuchtende Erklärung dieses Befundes schlugen unabhängig voneinander Gale und Stos-Gale

(1981) und Pernicka und Wagner (1982) vor. Danach wurde vermutlich eine kleine Menge jeder geschmolzenen Bleicharge im Probiertiegel auf ihren Silbergehalt überprüft. Dabei dürfte es eine ökonomische Grenze, vermutlich bestimmt durch den Holzkohlebedarf, gegeben haben, unterhalb der sich die Trennung von Silber und Blei nicht lohnte. Werkblei mit relativ niedrigen Silbergehalten bildete so ein vergleichsweise billiges Abfallprodukt, für das es dennoch einige Verwendungsmöglichkeiten gab. Unter solchen Umständen wäre für das Glättefrischen kein Anreiz vorhanden; es würde nur Zeit- und Energieverschwendung bedeuten.

Dies gilt vermutlich auch für die Bleiobjekte mit niedrigen Silbergehalten, denn der Umkehrschluß, daß diese entsilbert sein müssen, ist keineswegs zwingend. Nach den bisher vorliegenden Ergebnissen erscheint es unwahrscheinlich, daß in der frühen Bronzezeit Bleierze ohne Rücksicht auf ihren möglichen Silbergehalt überhaupt abgebaut wurden. Die Gewinnung von Blei allein war anscheinend ein zu geringer Anreiz. Erst im römischen Imperium wurde mit Sicherheit Blei unabhängig von seinem Silbergehalt gewonnen. Dies beweist u. a. die Wiedergewältigung der Schlackenhalden von Laurion (Strabo 399), die zwar bis zu 20% Pb, aber nur etwa 50 ppm Ag enthielten. Im klassischen Griechenland war durch den intensiven Abbau auf Silber, vor allem in Laurion, vermutlich genügend Blei vorhanden, so daß ein nur auf Blei ausgerichteter Bergbau nicht gelohnt haben dürfte. Die Produktion allein in Laurion wird auf 1,4 Millionen Tonnen Blei und 3500 Tonnen Silber geschätzt (Conophagos 1980).

Dennoch scheinen bereits in der Vorantike gelegentlich silberarme Bleierze verarbeitet worden zu sein. Beispiele dafür sind früheisenzeitliche (12.-8. Jahrhundert v. Chr.) Bleiflickungen aus Thasos (Pernicka et al. 1983) und die hallstattzeitlichen Bleifiguren von Frög in Südkärnten (Brandenstein u. Schroll 1958). Die meisten spätbronzezeitlichen ägyptischen Kupfer- und Bronzeobjekte enthalten Blei als Legierungszusatz (Pernicka 1986). Da in Ägypten nur silberarme Bleierze bekannt sind, erscheint es nicht ausgeschlossen, daß deren Nutzung zur Bleigewinnung schon um die Mitte des zweiten Jahrtausends v. Chr. einsetzte. Aus Bogazköy stammt ein kleiner mittelbronzezeitlicher (18./19. Jahrhundert v. Chr.) Ring aus sehr reinem Blei, das vermutlich weniger als 100 µg/g Ag enthielt (Buchholz 1967). Da mit der angewandten Analysenmethode (OES) auch keine anderen Begleitelemente gefunden wurden, ist es nicht ausgeschlossen, daß er aus Frischblei gefertigt war. Von den wenigen analysierten Bleiobjekten aus früheren Perioden enthalten praktisch alle deutlich mehr als 100 µg/g Ag (Gale u. Stos-Gale 1981; Pernicka et al. 1983 und unveröffentlichte Daten), so daß es sich zweifellos überwiegend um Werkblei handelt.

Obwohl nun die Grundvoraussetzung für eine Herkunftsbestimmung von Blei, nämlich daß es nicht entsilbert sein darf, erfüllt ist, dürfte dennoch aus zwei Gründen die chemische Zusammensetzung von Blei nur in wenigen Fällen ein Indikator für die Erzherkunft sein: Erstens spiegeln die bisher untersuchten Bleiobjekte eine Auslese der Erze einer Lagerstätte bezüglich des Silbergehaltes wider. Es ist daher möglich, daß auch andere Elemente nicht repräsentativ für die jeweilige Lagerstätte sind. Zweitens – und das ist viel gravierender – scheint das Blei schon von Beginn an systematisch, wenn auch wahrscheinlich unabsichtlich, gereinigt worden zu sein.

Dies legen die stark unterschiedlichen Variationsbreiten in den Konzentrationen der Begleitelemente nahe, die in Abb. 34 dargestellt sind. Es handelt sich überwiegend um unveröffentlichte Analysen einer Untersuchung von Bleiartefakten aus der Grabung von Tiryns unter der Leitung von K. Kilian. Die Daten werden veröffentlicht, sobald die archäologische Bearbeitung dieser Objekte abgeschlossen ist. Außerdem sind Analysen von Gale und Stos-Gale (1981), Stos-Gale und Gale (1982), Pernicka et al. (1983), Gale et al. (1984) und Pernicka et al. (1985) mit aufgenommen. Während die As, Sb und Au-Gehalte über zwei oder mehr Größenordnungen streuen, liegen die Cu- und Ag-Gehalte jeweils innerhalb einer halben Größenordnung. Bei Ag kann diese Verteilung durch die Nichtbeachtung silberarmer und die Entsilberung silberreicher Bleierze erklärt werden. Aber Cu sollte noch wesentlich mehr streuen, besonders in Richtung höherer Gehalte, weil in der Ägäis fast alle Bleivorkommen akzessorisch Kupferminerale führen.

Eine Erklärung dafür würde sich anbieten, wenn das Werkblei geseigert wurde, d. h. in der Gegend des Schmelzpunktes langsam erhitzt oder abgekühlt wurde (Seigern mit steigender oder fallender Tempera-

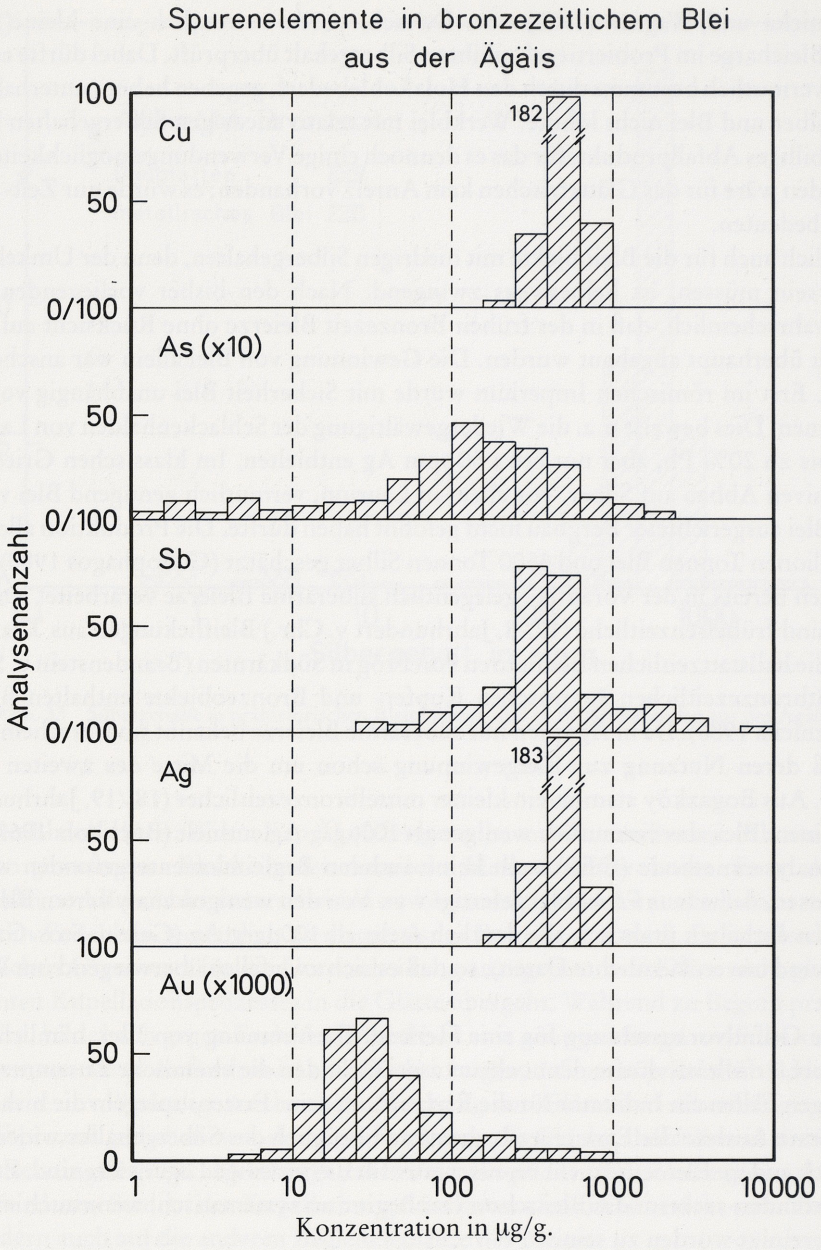


Abb. 34 Variationsbereiche verschiedener Spurenelemente in prähistorischen Bleiobjekten aus der Ägäis.

tur), dann konnte Kupfer als Metall, Sulfid (Cu_2S) oder Arsenid (Cu_3As) abgetrennt werden, weil alle diese Stoffe in Blei nur geringe Löslichkeit besitzen. Das Eutektikum von Blei und Kupfer liegt mit 0.055% Cu bei 326°C (Abb. 34) auffallend nahe dem Maximum der Kupfergehalte in den hier diskutierten Bleiartefakten. Bei Anwesenheit von mehr Schwefel als Kupfer verbleibt noch etwas weniger Kupfer im Blei. Der bei diesem Vorgang entstehende Schlicker kann leicht vom Blei abgetrennt werden.
Warum sollte man sich der Mühe einer solchen Prozedur unterziehen? Ein Grund könnte die Reinigung des Bleis sein (Gale u. Stos-Gale 1981), denn die meisten Verunreinigungen im Blei machen es härter und spröder. In diesem Fall hätte man aber nicht nur Kupfer, sondern auch andere Elemente, wie z. B. Antimon entfernen müssen, weil schon 0,1% davon härtend wirken (Tafel u. Wagenmann 1953). Um aber Antimon zu entfernen, muß zur hellen Rotglut erhitzt und Luft aufgeblasen werden. Das Blei könnte dabei

	Cu µg/g	As µg/g	Sb µg/g	Au µg/g	Ag µg/g	Au/Agx10^6
M1061	290	<100	2680	520	264	2000
TG892	2	12400	134	2,6	33,7	80
TG89-3	<10	8400	162	4,2	24,8	170
TG89-4	8,3	9100	130	6,2	20,8	300
TG89-5	13,9	2900	164	300	204	1500
TG89-6	3	10700	182	1,5	10,9	140
TG89-7	65,4	5600	155	630	813	770
TG89-8	9,2	2900	199	9,8	175	60
TG89-9	71,0	6000	169	14,9	1600	9
TG89-10	<10	71	107	26,5	806	30
TG89-12	7,1	10800	101	3,2	12,4	260
TG89-13	20,4	3600	283	2,5	217	10

Tab. 21 Spurenelementgehalte in früheisenzeitlichen thasischen Bleiartefakten.

auch mit grünem Holz umgerührt werden, wobei der freiwerdende Wasserdampf für gute Durchmischung sorgt und gleichzeitig die Oxidation beschleunigt. Dieser Vorgang wird »Polen« genannt (Tafel u. Wagenmann 1953) und ist für den antiken Hüttenbetrieb in Laurion nachgewiesen (Conophagos 1980).
Es ist aber nicht ganz einsichtig, welchen Nutzen die Herstellung von Weichblei gehabt hätte. Für die meisten Verwendungszwecke wie z.B. Bleiflickungen an Keramik, hätte wohl auch Hartblei gereicht. Dies zeigen etwa die früheisenzeitlichen Bleiflickungen von Thasos (Tab. 21). Sie enthalten nämlich zwischen 0,3 und 1,2% Arsen, das eine ähnlich härtende Wirkung auf Blei wie Antimon hat. Dagegen sind deren Kupfergehalte wesentlich niedriger als es der eutektischen Zusammensetzung entspricht.
Das Seigerverfahren zur Trennung von Kupfer und Blei hat aber noch einen anderen wichtigen Aspekt: Bei dieser Trennung verbleibt das gesamte Silber und auch das Gold der Blei/Kupferlegierung im Blei, aus dem die Edelmetalle leicht durch Kupellation gewonnen werden können. Im Mittelalter wurde dieses Verhalten dazu benutzt, um Kupfer zu entsilbern indem man es mit Blei verschmolz und anschließend die Seigerung durchführte (Suhling 1976). Es gibt keine Belege dafür, daß dieses Verfahren schon früher bekannt war, aber man kann es auch nicht völlig ausschließen. Da der größte Teil der dem Histogramm in Abb. 34 zugrunde liegenden Bleiobjekte (vorwiegend aus Tiryns) in die späte Bronzezeit datiert, ist die Möglichkeit, daß der einheitliche Kupfergehalt im Blei auf die Anwendung des Seigerprozesses zur Entsilberung von Kupfer zurückzuführen ist, nicht ganz von der Hand zu weisen.
Dennoch dürfte eine andere Erklärung für die einheitlichen Kupfergehalte wahrscheinlicher sein: Wenn Blei mehr als 0,05% Cu enthielt, bildete sich beim Aufschmelzen zwangsläufig ein Schlicker, der entweder entfernt wurde oder an der Tiegelwand haftete. Da der Schmelzvorgang wahrscheinlich relativ langsam vor sich ging und das Blei vielleicht eine gewisse Zeit flüssig gehalten wurde, konnte sich ein Phasengleichgewicht zwischen Blei und Schlicker einstellen. Die Temperatur spielte dabei keine große Rolle, weil im Phasendiagramm der Anstieg zu kupferreicheren Legierungen sehr steil verläuft (Abb. 35). Das bedeutet, daß jedes Wiederaufschmelzen von Blei eine gewisse Reinigungswirkung, vor allem in Bezug auf Kupfer, hat. Die geringe Streuung in den untersuchten Kupferobjekten könnte daher bedeuten, daß Blei vor seiner Verwendung meist sogar mehrere Male aufgeschmolzen wurde. Dies würde natürlich auch die Möglichkeit von Vermischungen erhöhen. Selbst ohne Mischung von Bleisorten verschiedener Herkunft würden sich dabei die Konzentrationen der herkunftsspezifischen Elemente verändern, mit Ausnahme von Au und Bi. Die Au-Gehalte in Bleierzen streuen aber zu stark in den bisher untersuchten Bleilagerstätten als daß sie charakteristisch sein könnten und von Bi liegen noch zu wenige Daten vor. Für die Herkunftsdiskussion bleiben demnach nur Schwellenwerte für Cu und vielleicht auch Sb übrig, da zur Entfernung von Antimon, wie schon erwähnt, das Blei auf dunkle Rotglut erhitzt werden muß. Man wird wohl davon ausgehen können, daß eine Bleicharge, deren Kupellation nicht lohnte, keine so weitgehende Behandlung erfahren hat. Dies steht im Einklang mit der Tatsache, daß die höchsten Anti-

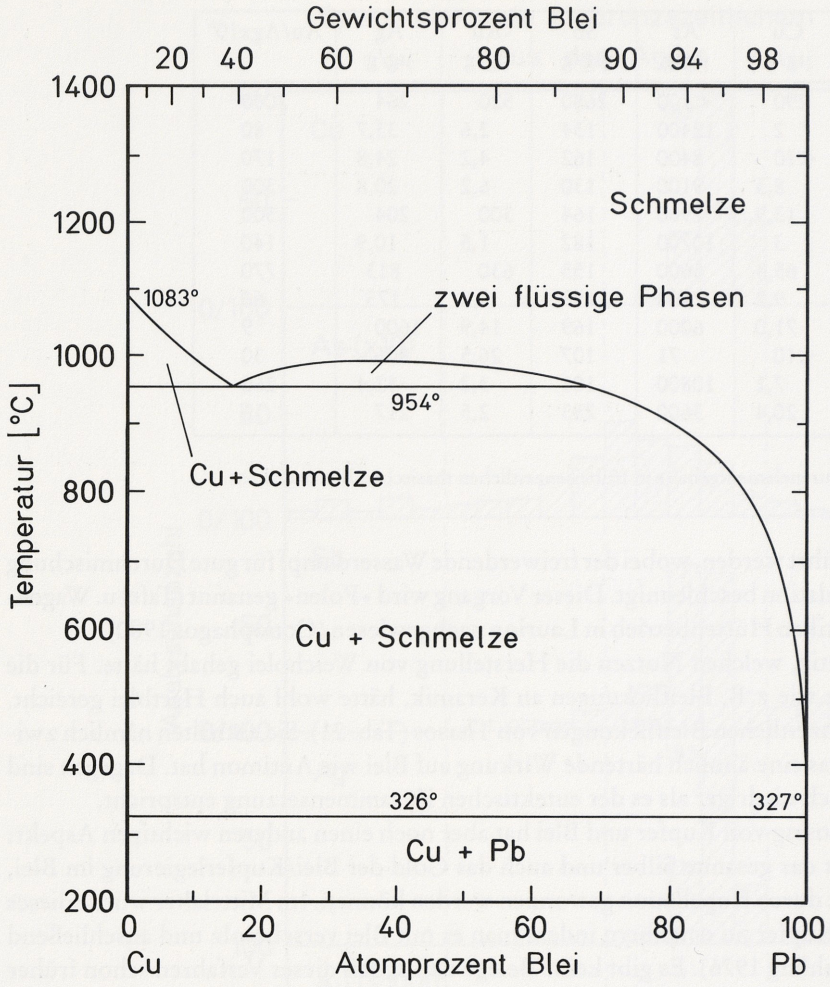


Abb. 35 Phasendiagramm von Kupfer und Blei (aus Hansen u. Anderko 1958).

mongehalte in Bleiobjekten zu finden sind, die im siphnischen Isotopenfeld liegen, denn die siphnischen Erze zeichnen sich allgemein durch hohe Antimongehalte aus. Allerdings kommen auf Siphnos Erze mit Antimongehalten bis zu 25% vor, während in Bleiobjekten selten mehr als 1% Sb gefunden wird. Offensichtlich wurden solche Erze in prähistorischer Zeit nicht verarbeitet. Wenn diese Erklärung zutrifft, sollte sie eigentlich für alle frühen Bleiobjekte gelten und es wäre interessant, dieser Frage nachzugehen. Allerdings liegen praktisch keine Vergleichsanalysen aus anderen Regionen vor. Ein Bleidraht von Amuq in Nordsyrien (Phase G) soll 1-10% Cu enthalten (Buchholz 1967). Alle anderen Elemente außer Blei liegen unter 0,1%. Diese Angabe wäre noch zu überprüfen, vor allem ob der Kupfergehalt nicht auf Oberflächenkontamination zurückzuführen ist.

Es ist also noch nicht endgültig abzusehen, welche Rolle die Spurenelementanalyse bei der Herkunftsbestimmung von Blei spielen kann. Es ist möglich, wenn auch nicht wahrscheinlich, daß in anderen Regionen andere metallurgische Praktiken vorherrschten. Andererseits kommen noch andere Elemente, vor allem Selen, Tellur und Thallium für die Herkunftsbestimmung in Betracht, für die noch keine systematischen Untersuchungen in prähistorischem Blei vorliegen. Für Silber dagegen kann man solche Überlegungen von vorneherein ausschließen, denn durch die Kupellation werden zu große Veränderungen der chemischen Erzcharakteristik herbeigeführt (s. Kap. II, 4 b). Zur Ergänzung der Bleiisotopenmethode stehen praktisch nur die Gold- und gelegentlich die Iridiumgehalte im Silber zur Verfügung. Die Au/Ag-Verhältnisse erlauben aber leider nur in Ausnahmefällen zwischen verschiedenen Erzvorkommen – zumindest in der Ägäis – zu unterscheiden (Abb. 36), selbst wenn man nur silberreiche Vorkommen mit alten Bergbauspuren berücksichtigt.

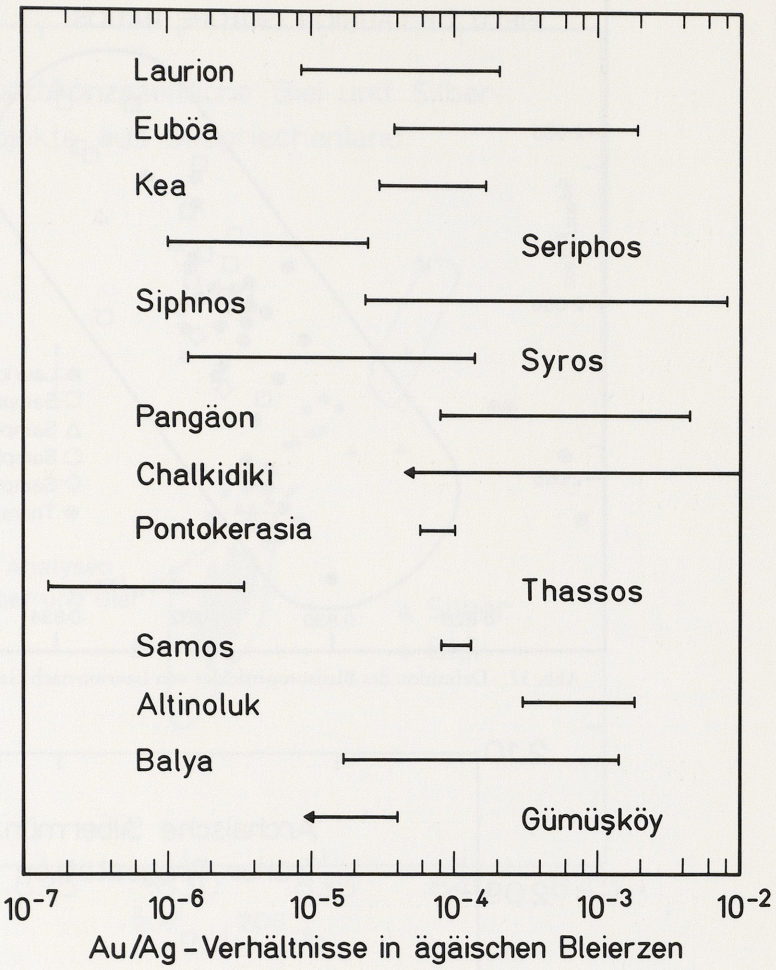


Abb. 36 Au/Ag-Verhältnisse in silberreichen ägäischen Bleierzvorkommen. Alle aufgelisteten Lokalitäten weisen alte Abbauspuren auf und kommen daher prinzipiell für prähistorische Silbergewinnung in Frage.

Von den bisher untersuchten frühbronzezeitlichen Silberobjekten aus der Ägäis fällt eines in das siphnische Bleiisotopenfeld (Abb. 32) und die restlichen in den Bereich zwischen die Felder von Siphnos und Laurion, in dem auch die Isotopenverhältnisse einer Reihe anderer Vorkommen liegen. Gale und Stos-Gale (1981) ordnen die ganze Gruppe von Objekten mit $^{208}Pb/^{206}Pb > 2{,}065$ (Abb. 32) den Erzen von Laurion zu und begründen dies mit den Bleiisotopenverhältnissen in Bleiglätte und -metall aus dem antiken Thorikos, die bis in diesen Bereich streuen (Abb. 37). Die bei Thorikos anstehenden Blei-Silber-Erze sind aber von anderen Lokalitäten in der Laureotike isotopisch nicht unterscheidbar (Begemann u. Schmitt-Strecker, unveröffentlichte Daten). Da die Blütezeit des laureotischen Bergbaus in das 6. und 5. Jahrhundert v. Chr. fällt, ist es nicht ganz ausgeschlossen, daß in der Hafenstadt Thorikos mit Verbindungen in alle Teile der damaligen Welt später auch anderes Blei verwendet wurde oder daß es zu Vermischungen kam.

Prinzipiell wäre es auch denkbar, daß in Laurion im Altertum Erze gewonnen wurden, deren Bleiisotopenverhältnisse leicht verschieden von denen in heute zugänglichen Erzen sind. Dies ist aber nicht sehr wahrscheinlich, wie auch die Bleiisotopenverhältnisse in archaischen Silbermünzen nahelegen (Abb. 38). Frühe Münzprägungen aus Silber sollten eine relativ zuverlässige Charakteristik der in der Antike genutzten Erze bilden, denn die Einführung des Münzgeldes gegen Ende des 7. Jahrhunderts v. Chr. ließ den Bedarf für Silber sprunghaft ansteigen, so daß vermutlich eine Reihe neuer Bergwerke eröffnet wurde. Bei Silbermünzen, die zu den frühesten Prägungen überhaupt gehören, darf man deshalb wohl davon ausgehen, daß sie aus unvermischtem Metall bestehen, besonders wenn – wie im Fall von Athen – die Prägestätte über ein eigenes Bergwerk verfügte. Die Bleiisotopenverhältnisse in archaischen Silber-

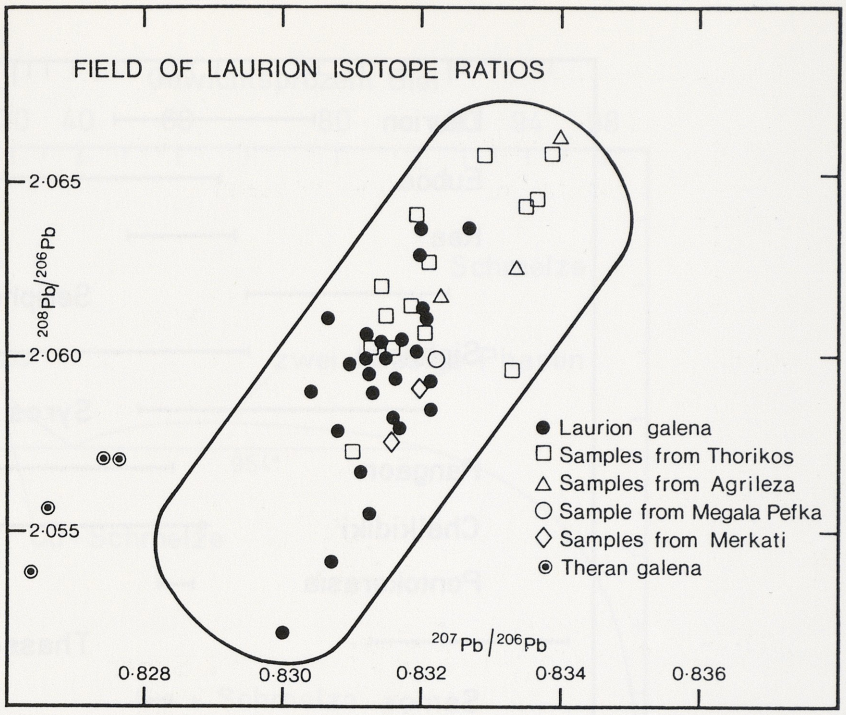


Abb. 37 Definition des Bleiisotopenfeldes von Laurion nach Gale u. Stos-Gale (1981).

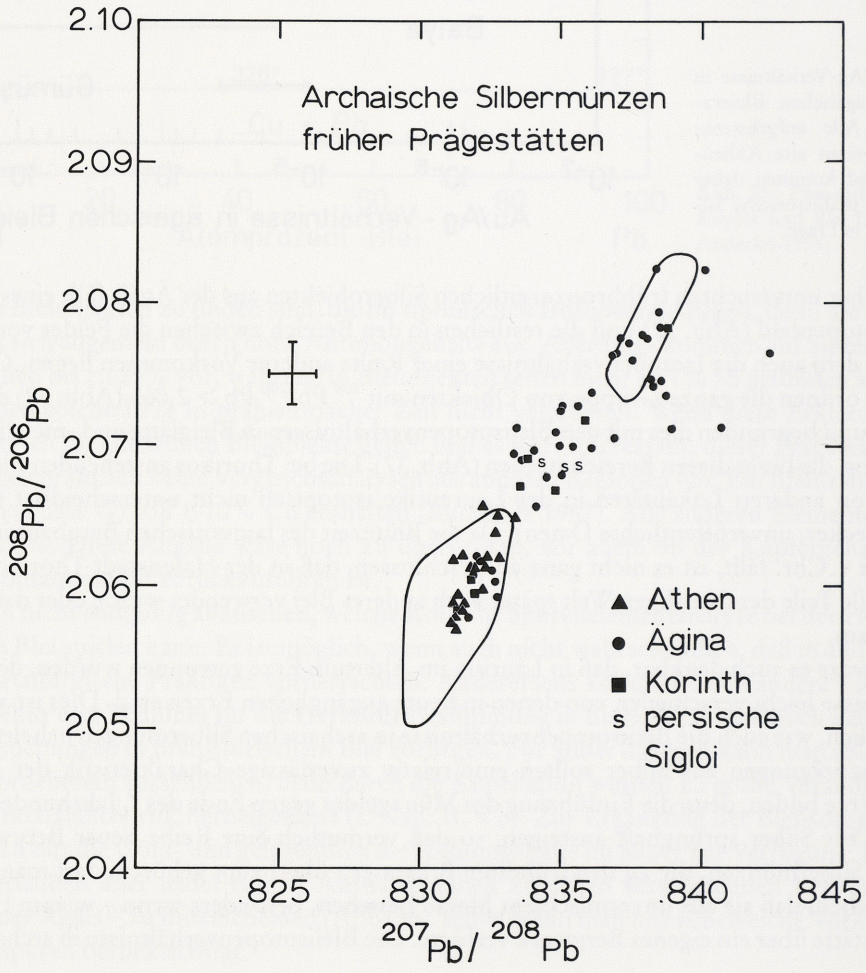


Abb. 38 Bleiisotopenverhältnisse in archaischen Silbermünzen nach Analysen von Gale et al. (1980).

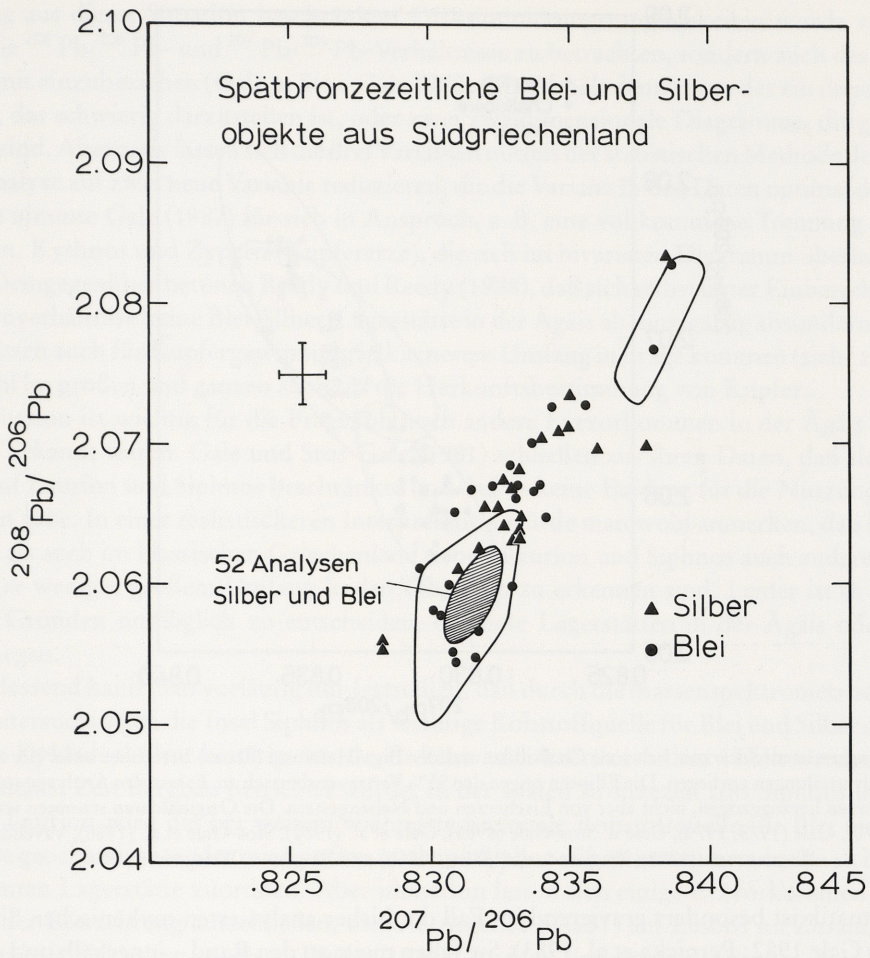


Abb. 39 Bleiisotopenverhältnisse in spätbronzezeitlichen Blei- und Silberobjekten aus der Ägäis. Die Daten stammen von den gleichen Quellen wie in Abb. 33 ergänzt durch Stos-Gale u. Gale (1982). Außerdem wurden noch unveröffentlichte Ergebnisse von Begemann und Schmitt-Strecker von Objekten aus Mykene verwendet.

münzen von Athen befinden sich praktisch alle in dem durch die Erze von Laurion definierten Feld. Ein Großteil der Datenpunkte ist sogar auf einen noch kleineren Bereich innerhalb des Laurionfeldes konzentriert, so daß man die Lagerstätte wohl als isotopisch außerordentlich einheitlich bezeichnen kann. Eine ähnliche Schlußfolgerung läßt sich aus den Bleiisotopenverhältnissen spätbronzezeitlicher Blei- und Silberobjekte aus Südgriechenland ziehen (Abb. 39). Auch hier ist im Laurionfeld eine deutliche Anhäufung von Datenpunkten zu erkennen, während der Rest weiter, aber größtenteils im Bereich der durch andere ägäische Erzvorkommen definierten Felder streut. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß die bisher analysierten Silberobjekte (vorwiegend aus Mykene) mehrheitlich nicht mit Erzen von Laurion übereinstimmen.

Das eigentliche Problem besteht darin, daß es keine allgemein gültige Festlegung für die Variationsbereiche verschiedener Erzlagerstätten im Bleiisotopendiagramm gibt. Derzeit ist die gängigste Praxis die Umrandung der Meßwerte aus einer Lagerstätte, wobei der individuelle Meßfehler (meist ± 0,1%) der am Rande der Punktwolke liegenden Messungen berücksichtigt wird (siehe z. B. Abb. 31). In früheren Veröffentlichungen (z. B. Brill 1970; Gale u. Stos-Gale 1981) wurden die Meßpunkte meist von geometrischen Figuren umrandet, für die es weder eine geologische noch eine statistische Begründung gibt. Deshalb können die Umrandungen solcher »Lagerstättenfelder« auch nicht als absolute Grenze für die Entscheidung, ob ein Objekt von einer bestimmten Lagerstätte stammen kann oder nicht, herangezogen werden.

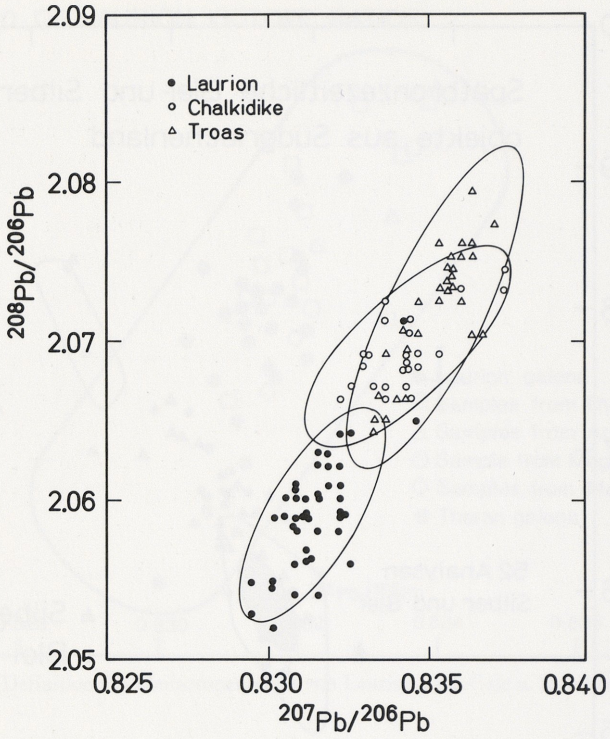


Abb. 40 Die Lagerstättenfelder von Laurion, Chalkidike und der Biga-Halbinsel (Troas) berechnet unter der Annahme, daß bivariate Normalverteilungen vorliegen. Die Ellipsen zeigen den 95% Vertrauensbereich an. Es wurden Analysen sowohl von Blei- als auch Kupfererzen herangezogen, nicht aber von Eisenerzen und Nebengestein. Die Originaldaten stammen von Barnes et al. (1974), Brill (1970), Gale (1978; 1979), Gale u. Stos-Gale (1985), Gale et al. (1980), Stos-Gale et al. (1986), Vavelidis et al. (1985), Wagner et al. (1985), Wagner et al. (1986a; 1986b) und Wagner u. Weisgerber (1988).

Diese Problematik ist besonders gravierend im Fall der bisher analysierten mykenischen Silberobjekte (Stos-Gale u. Gale 1982; Pernicka et al. 1983). Sie fallen meist an den Rand – innerhalb und außerhalb – des Laurionfeldes. Es ist nun ganz eindeutig eine Überinterpretation der Daten, wenn Stos-Gale und Gale (1982) behaupten, das mykenische Silber stamme mehrheitlich von Laurion. Auf diese Weise wird scheinbar eindeutig eine durchaus mögliche, ja interessante Herkunftsregion, nämlich die nördliche Ägäis ausgeschlossen, obwohl sie im Bleiisotopendiagramm direkt an das Laurionfeld anschließt und vielleicht mit diesem teilweise überlagert.

Wie kann nun eine solche Überlagerung quantifiziert werden? Zunächst muß man die Annahme machen, daß die analysierten Proben eine Lagerstätte weitgehend vollständig erfassen und daß die Streuung der Bleiisotopenverhältnisse einer Zufallsverteilung entspricht. Bei kleinen Streubreiten innerhalb einer Lagerstätte dürften diese Annahmen weitgehend zutreffen. In diesem Fall kann man im Isotopendiagramm (z.B. Abb. 31) ein Feld berechnen, in das allfällige weitere Analysen von der selben Lagerstätte mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit fallen werden. Solch ein Feld läßt sich mit um so größerer Sicherheit berechnen, je mehr Datenpunkte von einer Lagerstätte zur Verfügung stehen. Im allgemeinen sollten 15-20 Datenpunkte ein Feld so gut beschreiben, daß weitere Meßwerte seine Lage nur unwesentlich beeinflussen würden.

In Abb. 40 ist dies für die isotopisch einheitlichen Lagerstättendistrikte von Laurion, Chalkidike und der Troas dargestellt. Es wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05 zugelassen, d.h. daß 95% der Werte einer neuen Analysenserie von jeder Lagerstätte innerhalb der aufgrund der vorliegenden Daten errechneten Felder liegen sollten. Bei weniger Datenpunkten und zunehmender zu fordernder Treffsicherheit vergrößern sich natürlich die Felder. Es ist offensichtlich, daß es einen Bereich im Isotopendiagramm gibt, in dem ein Artefakt mit etwa gleich großer Wahrscheinlichkeit verschiedenen Lagerstätten zugeordnet werden kann.

Als Ausweg aus dieser Situation beschränkter Diskriminierungsmöglichkeiten wurde vorgeschlagen, nicht nur die $^{208}Pb/^{206}Pb$- und $^{207}Pb/^{206}Pb$-Verhältnisse zu betrachten, sondern auch das $^{204}Pb/^{206}Pb$-Verhältnis mit einzubeziehen (Gale u. Stos-Gale 1982). Man erhält dann entweder ein dreidimensionales Diagramm, das schwierig darzustellen ist, oder zwei zweidimensionale Diagramme, die gleichzeitig zu betrachten sind. Alternativ lassen sich die drei Variablen mittels der statistischen Methode der Hauptkomponentenanalyse auf zwei neue Variable reduzieren, die die Varianz in den Daten optimal darstellen. Auf diese Weise nimmte Gale (1987) für sich in Anspruch, z.B. eine vollkommene Trennung der Erzfelder von Laurion, Kythnos und Zypern (Kupfererze), die sich im bivariaten Diagramm überlagern, erreicht zu haben. Demgegenüber betonen Reedy und Reedy (1988), daß sich selbst unter Einbeziehung aller drei Bleiisotopenverhältnise keine Blei-Silber-Lagerstätte in der Ägäis als einzigartig absondern läßt. Da viele Bleilagerstätten auch für Kupfergewinnung in kleinerem Umfang in Frage kommen (siehe z.B. Laurion), gilt das wohl im großen und ganzen auch für die Herkunftsbestimmung von Kupfer.

Diese Diskussion ist wichtig für die Frage, ob noch andere Erzvorkommen in der Ägäis bereits in der Bronzezeit bekannt waren. Gale und Stos-Gale (1981) schließen aus ihren Daten, daß sich der Abbau praktisch auf Laurion und Siphnos beschränkte und daß es keine Evidenz für die Nutzung anatolischer Lagerstätten gäbe. In einer realistischeren Interpretation würde man wohl anmerken, daß sowohl in der Bronzezeit als auch im klassischen Griechenland neben Laurion und Siphnos auch andere Lagerstätten in mehr oder weniger großem Umfang in den Objekten zu erkennen sind. Leider ist es aus den oben erwähnten Gründen unmöglich zu entscheiden, ob diese Lagerstätten in der Ägäis oder in anderen Regionen liegen.

Zusammenfassend kann man vorläufig nur feststellen, daß durch die massenspektrometrischen und chemischen Untersuchungen die Insel Siphnos als wichtige Rohstoffquelle für Blei und Silber der frühbronzezeitlichen Kykladenkultur bestätigt wurde. Es kann auch kaum mehr bezweifelt werden, daß in Laurion zur gleichen Zeit Bergbau betrieben wurde. In der späten Bronzezeit tritt Siphnos in den Hintergrund und Laurion wird die bei weitem wichtigste regionale Rohstoffquelle für Blei und Silber. Die Objekte, die geochemisch weder mit Laurion noch mit Siphnos übereinstimmen, lassen sich zur Zeit keiner bestimmten Lagerstätte zuordnen. Aber immerhin lassen sich einige Erzvorkommen im ägäischen Raum von der Betrachtung ausschließen, die wie Argenos (TG51) auf Lesbos im Zusammenhang mit frühem Bergbau diskutiert wurden (Davies 1932). Andere Vorkommen wie Ag. Triades auf Milos (TG44) und Almiropotamos auf Euböa (TG 56) verdienen dagegen eine stärkere Beachtung. Weitere Fortschritte sind nach diesen orientierenden Untersuchungen vor allem durch intensive archäometallurgische Geländearbeit ähnlich wie auf Siphnos und Thasos zu erwarten.

Wie oben erläutert, sind aber beide Lagerstätten selbst in der Ägäis keineswegs einzigartig in ihrer isotopischen Zusammensetzung. So stellten sich z.B. kürzlich die Bleierze von Gümüşlük (TG3) auf der Halbinsel Bodrum – ein archäologisch durchaus akzeptabler Herkunftsort – als isotopisch nicht unterscheidbar von Laurion heraus (Wagner et al. 1986). Hier gibt der archäologische Befund eindeutig den Ausschlag. Auf Bodrum ist kein prähistorischer Bergbau nachgewiesen, und eine intensive Verbindung mit der Kykladenkultur hätte sich im Fundbestand niederschlagen müssen. Als kleine Einschränkung kann lediglich angeführt werden, daß Bodrum bei weitem nicht so intensiv erforscht ist wie Laurion und seine Umgebung.

Schwieriger ist es, zwischen Siphnos und Almiropotamos auf Euböa (TG 56) zu unterscheiden, die sich ebenfalls isotopisch überlagern. Nur wenige Kilometer von Almiropotamos entfernt liegt Manika, die wahrscheinlich größte und bedeutendste frühbronzezeitliche Siedlung in der südlichen Ägäis. Selbst in unmittelbarer Nähe des Bergwerkes sind große Mengen von Fragmenten melischen Obsidians (Herkunft festgestellt durch Neutronenaktivierungsanalyse) zu finden. Die Zuordnung der analysierten frühbronzezeitlichen Bleiartefakte zu Siphnos beruht im wesentlichen auf der eindeutigen Datierung der siphnischen Gruben und auf relativ hohen Antimongehalten in den Bleiartefakten, denn Antimon ist ein charakteristisches Begleitelement der siphnischen Bleierze. Wie bereits erwähnt, ist aber die chemische Zusammensetzung bei Blei kein so zuverlässiger Herkunftsindikator wie die Bleiisotopenverhältnisse und bei Silber nur in beschränktem Umfang anwendbar. Im diesbezüglich wichtigsten Parameter, dem

Au/Ag-Verhältnis, unterscheiden sich Siphnos und Almiropotamos nicht. Dennoch wird man das einzige Silberobjekt im siphnisch-euböischen Isotopenfeld, ein Diadem von Kastri auf Syros, der Lagerstätte von Siphnos zuordnen dürfen, weil für das Bergwerk von Almiropotamos noch keine Beweise frühbronzezeitlichen Abbaus vorliegen.

Für die wichtigste Frage aber, nämlich die nach der Herkunft der Technologie der Blei- und Silbergewinnung und -verarbeitung zeichnet sich derzeit noch keine Antwort ab. Zwar treten die Blei- und Silberfunde in der Ägäis gleichzeitig mit dem Beginn des Bergbaus auf und es ist im kykladischenKulturkreis der Anteil von Blei und Silber bei den Metallfunden auffallend hoch, so daß ein Zusammenhang offensichtlich ist. Aber daraus läßt sich keine unabhängige Entdeckung der Verhüttungstechnologie rekonstruieren. Im Gegenteil, gerade das unvermittelt gehäufte Auftreten von Blei- und Silbergegenständen läßt eher vermuten, daß fertige Kenntnisse in den ägäischen Raum gelangten, wo viele kleine Lagerstätten offen zu Tage traten und somit diese Kenntnisse lokal zur Anwendung kommen konnten. In diesem Zusammenhang ist es vielleicht nicht unwichtig zu erwähnen, daß fast alle Erzvorkommen mit altem Bergbau auf den Kykladen und den Halbinseln Attika und Peloponnes vom Meer aus eingesehen und vermutlich prospektiert werden konnten.

Wenn also ein Technologieimport, in welcher Form auch immer, in Betracht gezogen werden kann, welche Regionen kommen dann sozusagen als Ursprungsländer in Frage? Branigan (1968) postulierte eine Verbindung mit dem westlichen Mittelmeer, um die Blei- und Silberfunde in der Ägäis zu erklären. Dort sind vor allem die großen Bleilagerstätten bei Iglesiente auf Sardinien und Rio Tinto in Südspanien mit frühem Bergbau in Verbindung gebracht worden. Sie können aber aufgrund ihrer Bleiisotopenverhältnisse, die deutlich weniger radiogen sind als in der Ägäis (Boni u. Köppel 1985; Brill 1970) als Rohstoffquellen für die Ägäis ausgeschlossen werden. Andererseits sind die Bleiisotopenverhältnisse im Erzdistrikt von Cartagena in Südostspanien identisch mit denen von Siphnos und die Silbergehalte im dort anstehenden Bleiglanz z. T. noch höher (Graeser u. Friedrich 1970). Aber die archäologischen Hinweise auf Kontakte zwischen Ägäis und dem westlichen Mittelmeer in der frühen Bronzezeit sind nicht unumstritten (Muhly 1973; Höckmann 1978), so daß nach dem derzeitigen Kenntnisstand eine Herkunft der Technik der Blei-Silber-Metallurgie aus dem westlichen Mittelmeerraum unwahrscheinlich ist.

Eine Herkunft aus dem Norden, den Balkanländern, wurde bisher überhaupt nicht in Betracht gezogen. Dabei sind metallurgische Techniken in diesem Raum besonders früh in Gebrauch und sie erstrecken sich nach neueren Erkenntnissen nicht nur auf Kupfer sondern auch auf Blei (Glumac u. Todd 1987). Außerdem werden zumindest im 4. Jahrtausend v. Chr. zunehmend formenkundliche Parallelen zwischen Nordgriechenland und dem Balkan festgestellt (Evans 1986). Die Erzbasis für Blei- und Silbergewinnung wäre jedenfalls in reichem Maße vorhanden, denn in den Rhodopen und auf dem südlichen Balkan sind außerordentlich viele und große Bleilagerstätten bekannt, die meist auch silberführend sind.

Bevor die Hypothese einer autonomen Entwicklung der ägäischen Metallurgie zur Diskussion gestellt wurde (Renfrew 1967), war man meist davon ausgegangen, daß der Ursprung der ägäischen Metalltechnik in Anatolien oder Vorderasien zu suchen sei (Höckmann 1976). Dafür spricht eine Reihe von Gründen: Die formenkundlichen Verbindungen dieser Regionen mit der Ägäis sind weithin anerkannt; einen weiteren Hinweis in diese Richtung stellt vielleicht die silberne Doppelspiralnadel von Poliochni azzurro dar. Die frühesten Silberfunde stammen ausnahmslos aus Vorderasien und reichen einige Jahrhunderte weiter zurück als die ägäischen (Prag 1978). Und schließlich gibt es in Anatolien einige Bleibergwerke, für die frühbronzezeitlicher Bergbau entweder nachgewiesen oder sehr wahrscheinlich ist (Balya, Gümüşköy, Gümüş nordöstlich von Ankara, die Pontusregion um Gümüşhane, Keban, Bolkardağ im Taurusgebirge; Pernicka et al. 1984, Seeliger et al. 1985 und unveröffentlichte Ergebnisse). Von diesen ist nur der Erzdistrikt von Keban isotopisch von ägäischen Erzen zu unterscheiden und nach den bisher vorliegenden Ergebnissen als Rohstoffquelle für die Ägäis auszuscheiden. Darüber hinaus liegen die anderen Lagerstätten isotopisch zwischen den Feldern von Laurion und Siphnos. Sie sind also auch aus diesem Grund durchaus in Herkunftsbetrachtungen von Blei und Silber aus der Ägäis einzuschließen.

Man kann deshalb abschließend nur feststellen, daß die Blüte der ägäischen Blei-Silber-Metallurgie im 3. Jahrtausend v. Chr. nicht auf Import angewiesen war, sondern höchstwahrscheinlich auf der Ausbeu-

tung lokaler Erzvorkommen, vor allem Siphnos und Laurion, aber vermutlich auch anderen beruhte. Das ist eine wichtige Erkenntnis und sichere Grundlage für archäologische Denkmodelle. Woher die Technologie stammt, und ob ein Teil der Objekte auf andere als ägäische Quellen zurückgeht, muß aber weiterhin offen bleiben. Erst ähnlich systematische Untersuchungen im östlichen Mittelmeerraum könnten vielleicht zu weitergehenden Schlußfolgerungen führen.

2. Kupfer

Bei Kupfer und Kupferlegierungen dürfte die Gefahr einer Vermischung durch Wiederverwertung von Altmetall erheblich größer sein als bei Blei und Silber. In der späten Bronzezeit sind z. B. Hortfunde von beschädigten Metallgegenständen, die zweifellos zum Wiedereinschmelzen gesammelt wurden, eine weithin bekannte Erscheinung (Catling 1964; Rychner 1984; Mozsolics 1973; Karageorghis 1974; Spyropoulos 1972). Angesichts der weitreichenden Kulturbeziehungen im östlichen Mittelmeerraum erscheint es deshalb besonders wichtig, die Möglichkeit der Vermischung verschiedener Metallsorten abzuklären.

Im Prinzip sind zwei verschiedene Ansätze denkbar: Einerseits kann man annehmen, daß besonders in den frühesten Epochen der Metallverwendung keine Mischungen vorkamen, weil Metallobjekte allgemein (einschließlich der Gebrauchsgegenstände) als wertvoll galten. Da vielleicht auch die Kenntnis der Guß- und Schmiedetechniken noch nicht weit verbreitet war, wurden sie eher repariert als in unbrauchbarem Zustand bis zum Wiedereinschmelzen gehortet. Nachdem diese Objekte in den Boden gelangten, waren sie damit einem allfälligen Metallkreislauf entzogen und behielten somit weitgehend die geochemische Charakteristik des Ausgangserzes. Dies ist die Grundlage aller bisherigen Serienanalysen von Metallobjekten.

Andererseits könnte man besonders in kulturell hochstehenden, aber rohstoffarmen Gebieten genau das Gegenteil annehmen, nämlich daß sämtliches Metall gerade wegen seiner Knappheit immer wieder gesammelt und eingeschmolzen wurde. Als Beispiel bietet sich Mesopotamien geradezu an. In der sumerischen Sprache existiert sogar ein eigenes Wort für Altmetall und aus dem frühen 2. Jahrtausend ist eine mesopotamische Vorschrift für die Rückgabe von ausgedienten Metallsicheln erhalten (Muhly 1985). Der Unterschied zum ersten Ansatz liegt vorwiegend im mittleren Verwendungszeitraum eines Objektes, der im ersten Fall mit einer oder mehreren Generationen und im zweiten mit einigen Jahren angenommen wird. Es ist daher durchaus möglich, daß in einem gegebenen Zeitraum die Wahrscheinlichkeit, Mischungen von Metallsorten unterschiedlicher Herkunft anzutreffen, von Region zu Region variiert. Wenn das Einschmelzen beschädigter Gebrauchsgegenstände nach einem relativ kurzen Verwendungszeitraum in einer Region die Regel wäre, würde man dort eine mehr oder weniger einheitliche Metallzusammensetzung erwarten. Das ist zumindest bis zur frühen Bronzezeit im allgemeinen nicht der Fall, wie vor allem die Stuttgarter Analysen gezeigt haben (Junghans et al. 1968-1974). In den meisten Regionen Europas sind im Chalkolithikum und in der frühen Bronzezeit gleichzeitig mehrere Metallsorten nebeneinander zu finden. Allerdings ist gerade in der Ägäis eine bestimmte, nach dem Stuttgarter Stammbaum definierte Materialgruppe (C6) besonders häufig vertreten, die in anderen Regionen relativ selten zu finden ist. In diese Materialgruppe gehörte etwa die Hälfte aller untersuchten Metallobjekte aus der ägäischen Frühbronzezeit beim Stand von 12000 Analysen aus ganz Europa. Vielleicht war dies auf eine zu geringe Probenanzahl zurückzuführen, denn insgesamt fielen nur 103 Analysen aus den Perioden »Kupferzeit I« und »Kupferzeit II« in die Materialgruppe C6. Bei der Betrachtung ganz Europas deutete die räumliche Verteilung eine starke Konzentration dieser Materialgruppe in der Ägäis an, wobei aber Analysen aus Kreta zahlenmäßig sehr stark überwogen. Derzeit enthält die Stuttgarter Datenbank beim Stand von etwa 26000 Analysen insgesamt mehr als 300 Analysen aus der Ägäis und es zeigt sich, daß nunmehr die Materialgruppe FA noch stärker als C6 vertreten ist. Beide Materialgruppen sind durch deutliche Arsen- und Nickelverunreinigungen gekennzeichnet (As 0,2-1,5%, Ni 0,025-0,64%). Sie unterscheiden sich durch ihre Antimon-, Silber- und Wismutgehalte, die jeweils in C6 höher sind. Obwohl also in der Frühbronzezeit kein einheitliches Metall in der Ägäis insgesamt in Gebrauch war,

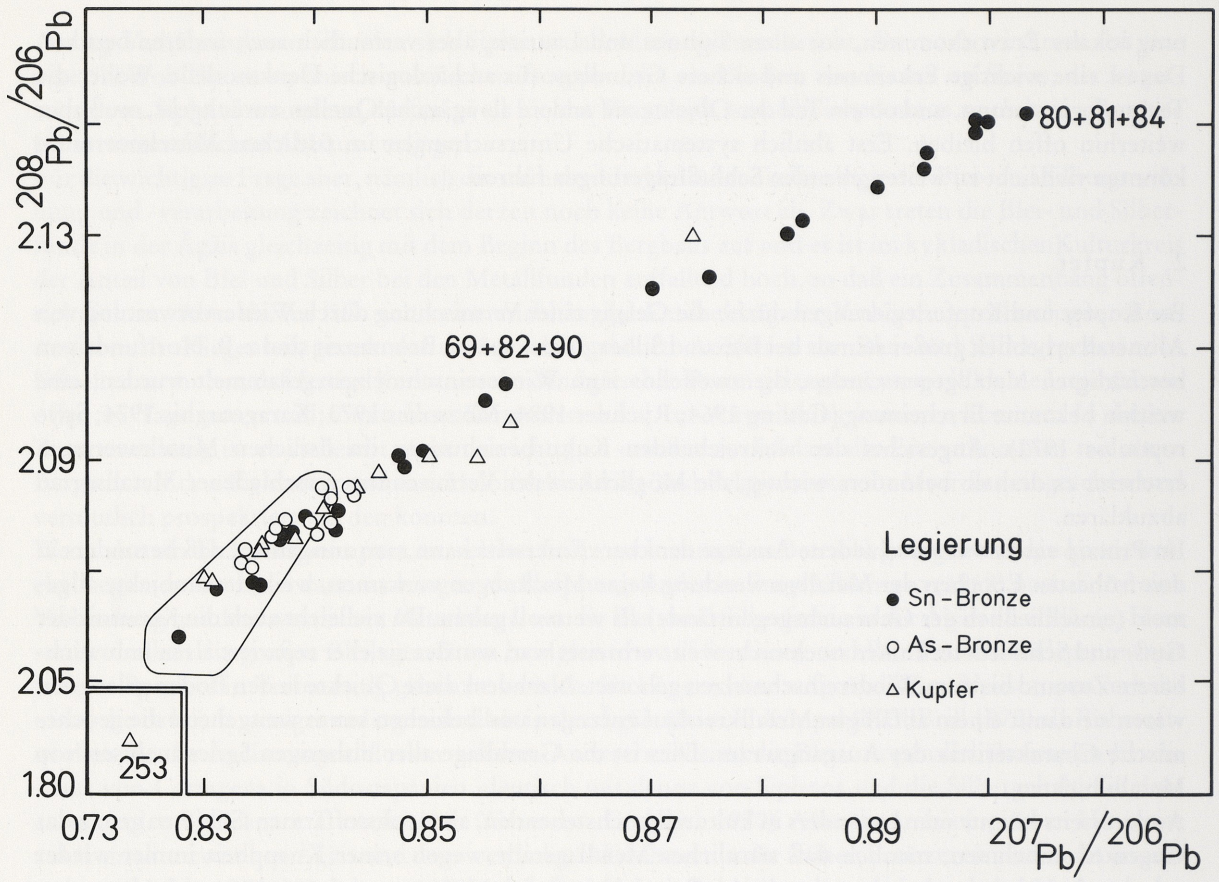


Abb. 41 Bleiisotopenverhältnisse in frühbronzezeitlichen Kupfer- und Bronzeobjekten aus der Nordostägäis (nach Pernicka et al. 1984).

muß die Möglichkeit von Mischungen in kleineren Teilregionen, besonders auf Kreta, dennoch berücksichtigt werden.

In der Nordostägäis dagegen überwiegt keine Materialgruppe, noch ist C6 auffallend häufig vertreten. Vielmehr ist eine Vielzahl verschiedener Metallsorten festzustellen, gleichgültig ob man die Analysen nach dem Stuttgarter Stammbaum oder mit Hilfe der Clusteranalyse gruppiert. Dies trifft auch auf die Isotopenverhältnisse des Bleis in frühbronzezeitlichen Kupfer- und Bronzeobjekten zu (Abb. 41). Mehr noch, sie streuen über einen wesentlich weiteren Bereich als in den ägäischen Blei- und Silberobjekten aus dem gleichen Zeitraum. Es liegt nun in der Natur der Bleiisotopenverhältnisse, daß sie miteinander korreliert sind. Die Verhältnisse der radiogenen Bleiisotope liegen wegen der geringen Schwankungen des Th/U-Verhältnisses in der Erdkruste meist entlang einer Geraden, an der ihre Position durch das Alter der Erzbildung und/oder das (Th,U)/Pb-Verhältnis im Ausgangsreservoir bestimmt wird. Man könnte daher zunächst schließen, daß allein die weite Streuung im Bleiisotopendiagramm auf Kupfer aus verschiedenen Lagerstätten weist.

Dieser Schluß wäre aber problematisch, denn im Prinzip kann eine Streuung von Bleiisotopenverhältnissen auch auf andere Weise, z. B. durch Mischungen zustande kommen. Durch die Kombination mit der Information aus der isotopischen und chemischen Analyse kann nun entschieden werden, ob Mischungen vorliegen oder nicht. Denn man darf wohl davon ausgehen, daß im allgemeinen Metalle, nicht aber Erze verschiedener Herkunft zusammengeschmolzen wurden. Beim Schmelzen von Kupfer verändert sich dessen Zusammensetzung nur wenig (s. Kap. II, 4a) und im Falle einer Mischung von zwei verschiedenen Rohkupfersorten sollten daher nicht nur die Bleiisotopenverhältnisse, sondern auch einige Elementverhältnisse auf der Verbindungsgeraden der Zusammensetzung der Ausgangsmetalle liegen. Im Prinzip kommen für eine solche Betrachtung alle Elementverhältnisse in Frage, die beim Schmelzvor-

gang nicht verändert werden, also auch die Elementkonzentrationen im Kupfer (praktisch identisch mit Element/Cu-Verhältnissen). Wenn aber Element/Pb-Verhältnisse betrachtet werden, dann sollte eine Mischung zusätzlich an der gleichen relativen Position auf der Verbindungsgeraden liegen. Um Zufälligkeiten zu eliminieren, können mehrere Element/Pb-Verhältnisse herangezogen werden.
In Abb. 42 ist ein Beispiel für die prinzipielle Vorgangsweise anhand von drei Analysen aus dem trojanischen Kulturkreis (Pernicka et al. 1984) dargestellt. Wenn man untersuchen will, ob irgend ein Objekt in einem Datensatz einer Mischung von zwei anderen im selben Datensatz entspricht, ergeben sich n!/[k!(n-k)!] mögliche Kombinationen, das sind für 10 Analysen 120 Kombinationen und für 50 Analysen bereits 19600 und für die 58 bisher untersuchten Metallobjekte aus dem trojanischen Kulturkreis (Pernicka et al. 1984) insgesamt 30856 Kombinationen. Es ist offensichtlich, daß diese Aufgabe nur mit einem Computer bewältigt werden kann. Ein von H. Kruse (MPI für Chemie, Mainz) für diesen Zweck erstelltes Programm überprüft zunächst für jede Kombination von drei Proben, ob sie isotopisch auf einer Mischungslinie liegen. Als Toleranz wurde eine Abweichung von 0,1% der mittleren Probe von der Verbindungsgeraden der beiden äußeren Proben zugelassen. War das der Fall, wurden sämtliche Diagrammkombinationen der Variablen ^{208} Pb/^{206} Pb, Ag/Pb, Au/Pb, As/Pb, Sb/Pb, Ni/Pb und Co/Pb auf gleiche Weise überprüft, wobei die Toleranz bei den Elementverhältnissen einen Faktor 2 betrug. Um Rechenzeit zu sparen, wurden einige Proben, die isotopisch und chemisch so ähnlich waren, daß sie vermutlich von einem Gefäß stammten, zu jeweils einem Datenpunkt zusammengefaßt. So wurde die Anzahl der zu untersuchenden Analysen auf 46 Datenpunkte (15 180 Kombinationen) reduziert.
Zusätzlich wurden alle Kombinationen, bei denen zwei Proben im Isotopendiagramm (Abb. 41) weniger als 0,2% voneinander entfernt lagen, verworfen. Das war in 5353 der 15180 möglichen Kombinationen der Fall. Bei 7726 möglichen Kombinationen war eine Mischung aufgrund der Blei-Isotopie und bei weiteren 1955 aufgrund der Elementverhältnisse nicht möglich, d.h. in mindestens 4 von 6 betrachteten gemischten Diagrammen mit ^{208} Pb/^{206} Pb und einem Element/Pb-Verhältnis als Variablen lagen die Proben selbst bei Berücksichtigung der weiten Toleranzgrenze nicht auf einer Geraden, ähnlich wie bei den in Abb. 42 dargestellten Beispielen. Dadurch wurde bereits bei 99% der möglichen Probenkombinationen eine Mischung ausgeschlossen.
In keinem einzigen Fall lagen die Punkte in allen sechs gemischten Diagrammen auf einer Geraden, und nur vier Kombinationen wurden gefunden, wo dies für fünf gemischte Diagramme (und natürlich für die (Isotopendiagramme) zutraf. Es sind dies die Kombinationen der HDM-Nummern (s. Pernicka et al. 1984) (260, 75, 266), (83, 259, 261), (256, 102, 260) und (256, 259, 261). Selbst diese lassen sich bei näherer Betrachtung wegen verschiedener Mischungsverhältnisse in den chemischen und isotopischen Verhältnissen aus den Betrachtungen für allfällige Mischungen ausscheiden.
Demnach ist keine der untersuchten Proben durch eine Mischung aus zwei beliebigen anderen in unserem Datensatz zustande gekommen. Wieso ist es aber möglich, daß dann überhaupt scheinbare Mischungsgeraden noch dazu bei mehreren Elementverhältnissen zu finden sind? Kann das noch durch Zufall bedingt sein? Eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit P, daß r Elemente in einen vorgegebenen Konzentrationsbereich fallen, ist nach der Binomialverteilung möglich (Wilson 1976):

$$P = \frac{n!}{r!(n-r)!}\, p^r(1-p)^{n-r}$$

wobei n die Anzahl der gemessenen Elemente und p die Wahrscheinlichkeit, daß eines der untersuchten Elemente in einen vorgegebenen Konzentrationsbereich fällt, ist. Wenn man für alle Elemente einheitlich einen Streubereich von 10^3 annimmt, wie er im großen und ganzen den Meßwerten in den Artefakten entspricht, dann ist die Wahrscheinlichkeit p, daß ein Meßwert A in den Bereich zwischen A/2 und 2 A fällt,

$$2 \times \frac{\log 2}{\log 10^3} = 0{,}2.$$

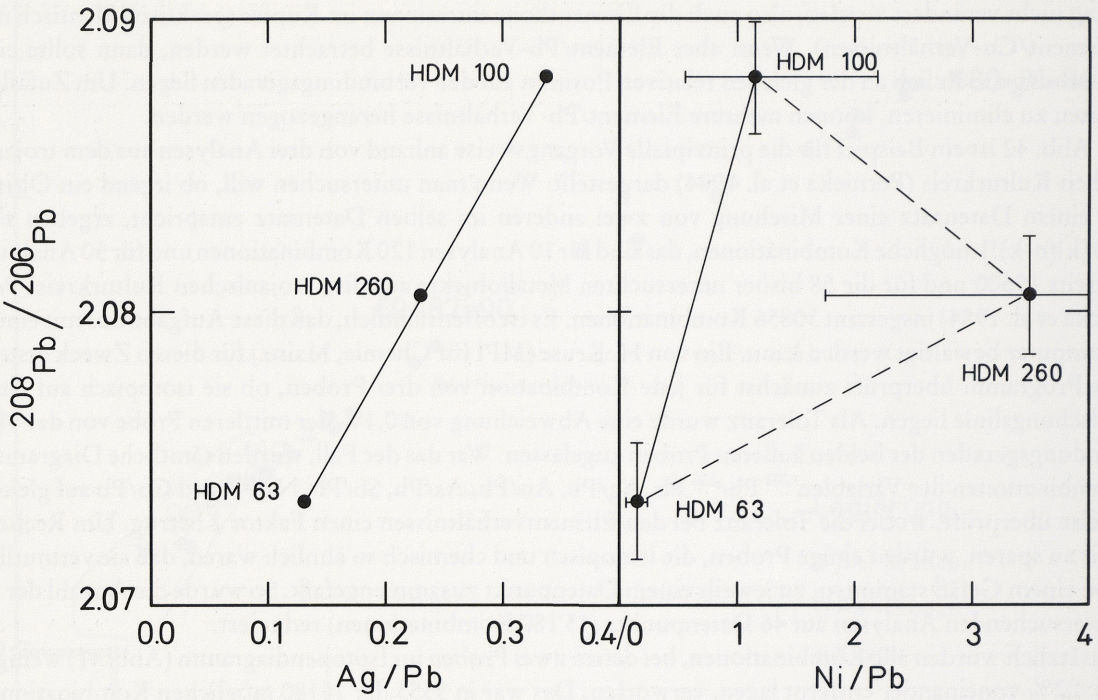


Abb. 42 Gemischtes Diagramm mit einem Bleiisotopenverhältnis ($^{208}Pb/^{206}Pb$) und zwei verschiedenen Konzentrationsverhältnissen. Aufgetragen sind drei Metallobjekte aus Troja (HDM 100 und HDM 260) bzw. aus einem nicht näher lokalisierten Hortfund aus der Troas (HDM 63). Die Daten sind aus Pernicka et al. 1984 entnommen. Aus dem linken Diagramm könnte man schließen, daß die Probe HDM 260 eine Mischung aus HDM 100 und HDM 63 ist, denn sie liegt auf deren Verbindungsgeraden. Wenn es sich tatsächlich um eine Mischung handeln würde, dann sollten sich solche Mischungsgeraden auch dann ergeben, wenn man das Ag/Pb-Verhältnis durch ein anderes Element/Blei-Verhältnis ersetzt. Dies ist offensichtlich nicht der Fall, wie man aus dem rechten Diagramm erkennen kann. Selbst wenn man eine mögliche Veränderung der jeweiligen Element/Blei-Verhältnisse beim Aufschmelzen um einen Faktor 2 berücksichtigt (durch die horizontalen Fehlerbalken gekennzeichnet, sie sind wesentlich größer als die Meßfehler; die vertikalen Fehlerbalken entsprechen dem Meßfehler der Isotopenmessung; man beachte die stark gedehnte vertikale Skala), liegt die Probe HDM 260 weit ab von der Mischungsgeraden. Sie kann deshalb nicht aus einer Mischung der Kupfersorten von HDM 100 und HDM 63 bestehen.

Daraus läßt sich errechnen, daß unter den gegebenen Randbedingungen die Wahrscheinlichkeit, daß 5 von 6 Elementen in einen vorgegebenen Konzentrationsbereich fallen, noch 0,16% beträgt. Insgesamt liegt die beobachtete Zahl der Kombinationen, die in gemischten Diagrammen eine Gerade bilden, deutlich unter der Anzahl, die sich aus zufälligen Koinzidenzen ergibt (Abb. 42).

Das dürfte auf die ungleichmäßige Verteilung der Konzentrationswerte innerhalb des jeweiligen Streubereichs zurückzuführen sein und steht im Einklang mit der Beobachtung, daß auch eine Erweiterung der Toleranzgrenze bei den Konzentrationsverhältnissen der betrachteten Elemente zu Blei auf einen Faktor 3 keine wesentliche Änderung mit sich bringt. Wie aus Tab. 22 zu ersehen ist, wären die beobachteten Übereinstimmungen noch als zufällig anzusehen, wenn p=0,1, d h. wenn diese Toleranzgrenze nur einen Faktor 1,4 statt 2 betragen hätte.

Auch werden bei keinem bestimmten Elementverhältnis bevorzugt (scheinbare) Mischungsgerade gefunden (Tab. 22), so daß man wohl feststellen kann, daß zumindest im trojanischen Kulturkreis Metalle verschiedener Herkunft – wenn überhaupt – ausgesprochen selten zusammengeschmolzen wurden.

Obwohl nur ein kleiner Teil der vielen in Troja zutage gekommenen Metallfunde für die Analyse zur Verfügung stand – der Rest ist verschollen – und obwohl keine Mehrkomponentenmischungen berücksichtigt wurden, ist dieses Ergebnis doch ein deutlicher Hinweis darauf, daß diese Kupfer- und Bronzeobjekte wenigstens einen Teil ihrer Herkunftscharakteristik noch enthalten.

Mischungsgerade in den Bleiisotopendiagrammen und in gemischten isotopisch/chemischen Diagrammen (siehe Abb. 43)	Ag/Pb	Ni/Pb	Au/Pb	Sb/Pb	As/Pb	Co/Pb	Komb. insg.
n = 0	0	0	0	0	0	0	1505
n = 1	89	83	55	58	71	94	450
n = 2	34	48	29	40	29	52	116
n = 3	15	12	14	17	10	10	26
n = 4	3	2	4	4	3	0	4
n = 5	0	0	0	0	0	0	0
n = 6	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 22 Verteilung der durch Zufall gebildeten Mischungsgeraden in 15180 Dreierkombinationen (46 Proben) auf die verwendeten Elementverhältnisse.

Dies ist eine wichtige Feststellung, denn bei Kupfer stehen neben den Bleiisotopenverhältnissen im Prinzip auch die Konzentrationen mehrerer Elemente für die Herkunftsdiskussion zur Verfügung. Zunächst kann man aber aufgrund des Isotopendiagramms bereits die weit verbreitete Meinung widerlegen, daß die frühbronzezeitliche Metallverarbeitung Trojas auf dem Erzreichtum seiner näheren Umgebung beruht (s. Kap. I,3). Außerdem ist bemerkenswert, daß der überwiegende Teil der Zinnbronzen isotopisch außerhalb des durch Erze aus der Ägäis definierten Feldes liegt. Das widerspricht allen Theorien, die eine unabhängige Erfindung der Zinnbronze in der Nordostägäis annehmen. Es entfällt daher auch die Notwendigkeit, ein Zinnvorkommen in dieser Region zu postulieren (Renfrew 1967). Auch die Vermutung Kaptans (1983), daß das Zinn der ägäischen Frühbronzezeit vom Madenbelenitepe südlich von Bursa stammt, wo mikroskopische Mengen von Zinnkies gefunden wurden (Cağatay et al. 1981), wird

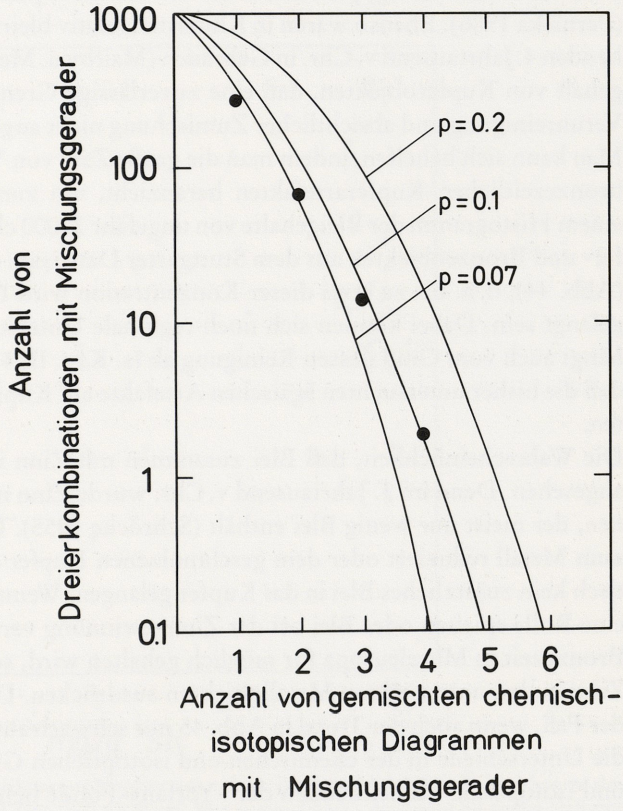


Abb. 43 Abhängigkeit der zufällig sich ergebenden Mischungsgeraden in 58 Artefakten aus dem trojanischen Kulturkreis von der Toleranzgrenze, die für die Veränderung der Element/Blei-Verhältnisse bei der Legierungsherstellung angenommen wird. Die Punkte stellen die Ergebnisse der Durchsicht aller möglichen Dreierkombinationen von Proben nach Mischungsgeraden mit einer Toleranzgrenze von einem Faktor 2 dar (s. auch Tab. 22). Die Kurven geben die Anzahl der statistisch erwarteten, zufällig sich ergebenden Mischungsgeraden bei einer Toleranzgrenze von einem Faktor 1,27 (p=0,07),1,4 (p=0,1) und 2,0 (p=0,2) wieder.

damit hinfällig. Erstens wurde das Vorkommen in osmanischer Zeit offensichtlich auf Silber abgebaut und zweitens fällt es isotopisch in das Ägäisfeld (Pernicka et al. 1984).
Ähnliches dürfte übrigens auch für das jüngst »identifizierte« Zinnvorkommen im Taurusgebirge im südlichen Anatolien zutreffen (Yener u. Özbal 1987). Dort enthält eine kleine Erzlinse bestehend aus Bleiglanz und untergeordnet Fahlerz nur etwa 0,4% Zinn, aber 0,7% Silber. Das bedeutet, daß das Wertmetall in diesem Erz eindeutig das Silber, wahrscheinlich auch für die Verhältnisse des 3. und 2. Jahrtausends v. Chr., war. Der Kupfergehalt in diesem Erz beträgt etwa 5%, der Bleigehalt dagegen 24%. Es ist offensichtlich, daß dieses Erz als silberreiches Bleierz anzusprechen ist und als solches auch abgebaut wurde. Es ist durchaus möglich, daß im Altertum der Kupfergehalt nicht einmal bemerkt wurde. Völlig aus der Luft gegriffen ist dagegen der Vorschlag, daß bei der Verhüttung dieses Erzes unbeabsichtigt eine Zinnbronze mit 4% Zinn entstehen könnte. Kupfer und Zinn sind zwar in diesen Proportionen vorhanden aber eben nur als Nebenbestandteile, und es ist durchaus denkbar, daß die beiden Elemente bei der Verhüttung dieses Erzes getrennt werden.
Obwohl nun die Beteiligung mehrerer verschiedener Kupferlagerstätten an der Metallversorgung Trojas einigermaßen gesichert erscheint, bleibt dennoch die unbefriedigende Tatsache bestehen, daß die chemischen und isotopischen Gruppierungen mit Ausnahme der acht »Yortan«-Funde überhaupt nicht übereinstimmen (Pernicka et al. 1984). Zur Erklärung könnte man annehmen, daß es sich um Lagerstätten mit einer ungewöhnlich großen Streuung in ihren Bleiisotopenverhältnissen handelt. Solche Lagerstätten gibt es durchaus, aber bei den bisherigen Untersuchungen haben sich die Erzvorkommen im östlichen Mittelmeerraum vorwiegend als isotopisch ziemlich homogen herausgestellt.
Eine alternative Interpretation wäre die Zumischung von Blei zu den Legierungen. Blei könnte direkt in das Kupfer gelangen entweder als absichtlicher Zusatz oder als Verunreinigung beim Schmelzen oder es könnte als Verunreinigung des Zinns beigemischt worden sein. Bleizusätze zu Kupferlegierungen kennt man vor allem aus der späten Bronzezeit. Sie verbessern die Gießeigenschaften und erniedrigen den Schmelzpunkt der Legierung. Um diese Wirkungen zu erzielen, muß der Bleizusatz aber erheblich sein. Im Neuen Reich in Ägypten enthalten viele Metallobjekte aus Kupferlegierungen z. B. mehr als 20% Blei (Pernicka 1986). Ebenso waren in Khuzistan relativ bleireiche Kupferlegierungen sogar schon im ausgehenden 4. Jahrtausend v. Chr. in Gebrauch (Malfoy u. Menu 1987). Hier gilt aber, ähnlich wie beim Zinngehalt von Kupferobjekten, daß eine zuverlässige Grenzkonzentration zur Unterscheidung zwischen Verunreinigung und absichtlicher Zumischung nicht angegeben werden kann.
Man kann sich behelfen, indem man die große Zahl von Vergleichsdaten von chalkolithischen und frühbronzezeitlichen Kupferartefakten heranzieht, um zumindest einen Grenzbereich abzuschätzen. In einem Histogramm der Bleigehalte von ungefähr 22000 chalkolithischen und frühbronzezeitlichen Kupfer- und Bronzeobjekten aus dem Stuttgarter Datensatz ist ein Minimum bei etwa 5% Blei zu erkennen (Abb. 44), d.h. bis zu etwa dieser Konzentration wird Blei vorwiegend als Verunreinigung ins Kupfer gelangt sein. Dabei können sich noch regionale Unterschiede ergeben, denn der Bleigehalt im Kupfer hängt auch vom Grad dessen Reinigung ab (s. Kap. II, 4a). Demnach müßte man eigentlich annehmen, daß die bisher untersuchten ägäischen Artefakte auf Kupferbasis kein absichtlich zulegiertes Blei enthalten.
Die Wahrscheinlichkeit, daß Blei zusammen mit Zinn ins Kupfer gelangte, wird allgemein als gering angesehen. Denn im 3. Jahrtausend v. Chr. wurde Zinn mit einiger Sicherheit nur aus Zinnstein gewonnen, der meist nur wenig Blei enthält (Schröcke 1955). Der Zinnstein wurde entweder mit Holzkohle zum Metall reduziert oder dem geschmolzenen Kupfer direkt zulegiert. In beiden Fällen würde praktisch kein zusätzliches Blei in das Kupfer gelangen. Wenn aber Zinnvorkommen mit höherem Bleigehalt eine Rolle spielten oder Blei bei der Zinngewinnung verwendet wurde, wie es zumindest in der späten Bronzezeit in Mitteleuropa für möglich gehalten wird, sollte sich das in einer Korrelation von Blei und Zinn in den untersuchten Metallobjekten ausdrücken. Dies ist zumindest statistisch gesehen eindeutig der Fall, wenn auch der Trend in Abb. 45 nur schwach ausgeprägt ist. Damit könnten im Prinzip sowohl die Unterschiede in der chemischen und isotopischen Gruppierung der Proben als auch die chemische und isotopische Einheitlichkeit der »Yortan«-Funde befriedigend erklärt werden. Da auch einige nicht

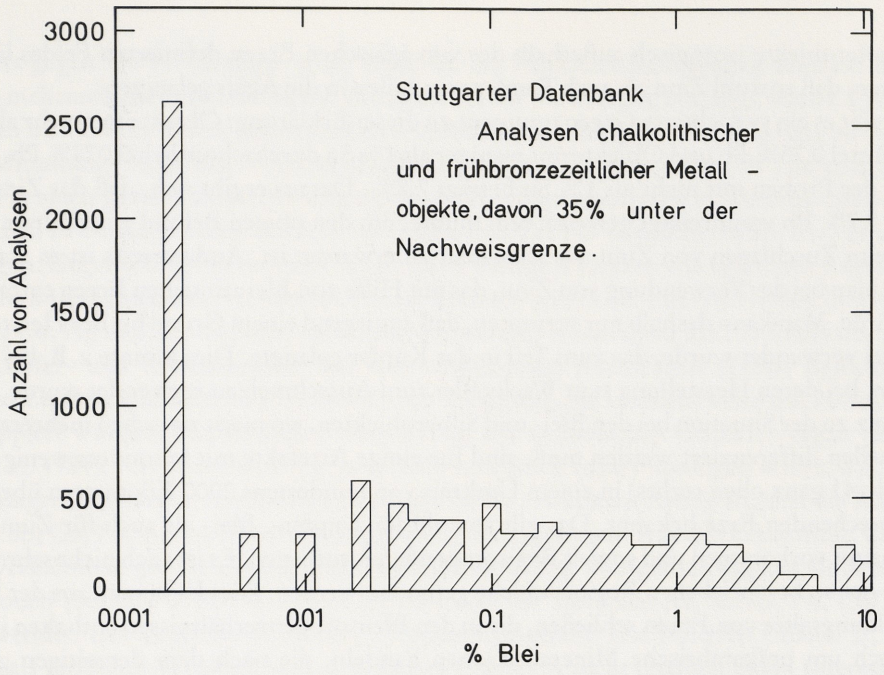


Abb. 44 Histogramm der Bleigehalte von etwa 22000 chalkolithischen und frühbronzezeitlichen Metallobjekten aus dem Stuttgarter Datensatz. In mehr als der Hälfte der analysierten Objekte konnte Blei nicht bestimmt werden. Bei diesen Objekten ist in der Originalveröffentlichung (Junghans et al. 1960, 1968 und 1974) der Bleigehalt mit 0 angegeben. Die Nachweisgrenze für die quantitative Bestimmung von Blei betrug bei den meisten Messungen etwa 0,01%. Kleinere Gehalte konnten nur qualitativ erfaßt werden, wofür die Angaben »Spur« und »?« verwendet wurden. Diese wurden in diesem Histogramm etwas willkürlich mit 0,002% und 0,005% festgelegt, obwohl die wahren Bleigehalte dieser Proben wahrscheinlich in den Grenzen von 0,001% bis 0,01% und vermutlich noch darüber hinaus schwanken.

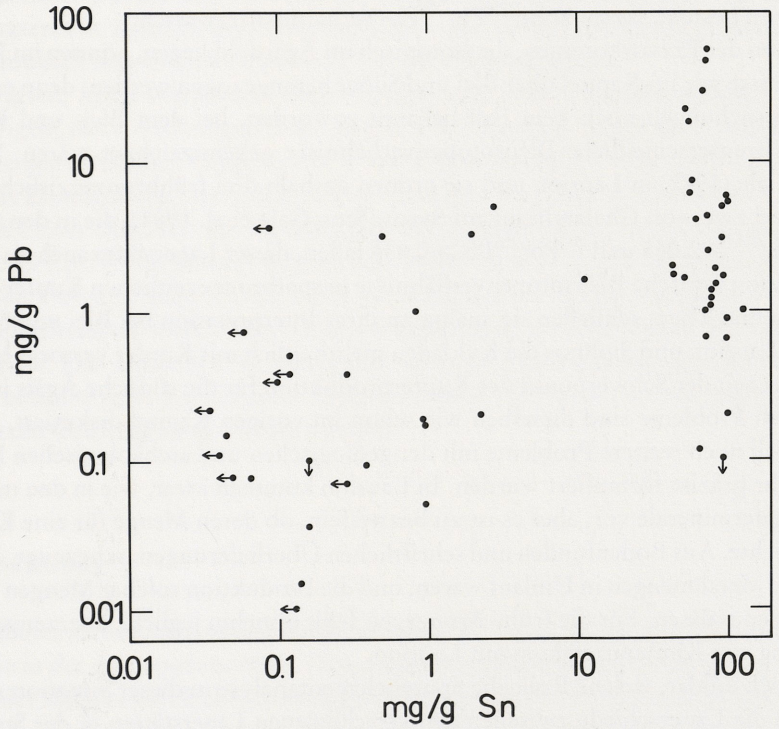


Abb. 45 Blei- und Zinngehalte in Kupfer- und Bronzeobjekten aus Nordwestanatolien (Pernicka et al. 1984). Es besteht eine statistisch signifikante positive Korrelation zwischen Blei und Zinn (r=0,63, N=45, 99,9% signifikant), die darauf hindeutet, daß eine gewisse Menge von Blei zusammen mit dem Zinn in die Legierung gelangte.

legierte Kupferobjekte isotopisch außerhalb des von ägäischen Erzen definierten Feldes liegen, würde dies bedeuten, daß sowohl Zinn als auch Kupfer von außen in die Ägäis gelangten.
Allerdings gibt es ein gewichtiges Gegenargument zu dieser Erklärung: Objekte mit mehr als 1% Sn enthalten im Mittel 0,75% Pb und Objekte mit weniger als 1% Sn durchschnittlich 0,078% Pb. Der mittlere Zinngehalt der Proben mit mehr als 1% Sn beträgt 7,8%. Daraus ergibt sich, daß das Zinn im Durchschnitt mit 8,7% Pb verunreinigt gewesen sein müßte, um den obigen Befund zu erklären. Das ist weit mehr als beim Zuschlagen von Zinn aus Zinnstein zu erwarten ist. Andererseits ist es wahrscheinlich weniger als man bei der Verwendung von Zinn, das mit Hilfe von Blei aus seinen Erzen extrahiert wurde, erhalten würde. Man kann deshalb nur vermuten, daß aus irgend einem Grund bei der Herstellung dieser Objekte Blei verwendet wurde, das zum Teil in das Kupfer gelangte. Dies könnte z. B. bei Gußformen der Fall sein, bei deren Herstellung statt Wachs Blei zum Ausschmelzen verwendet wurde.
Im Gegensatz zu der Situation bei den Blei- und Silberobjekten, wo meist zwischen mehreren möglichen Rohstoffquellen differenziert werden muß, sind für einige Artefakte mit besonders wenig radiogenem Blei (in Abb. 41 ganz oben rechts) in einem Umkreis von mindestens 2000 Kilometern überhaupt noch keine entsprechenden Erze bekannt. Das gilt sowohl für Kupfer-, Blei- als auch für Zinnerze, soweit diese überhaupt vorkommen und soweit Bleiisotopendaten vorliegen. Es ist auch nicht sehr wahrscheinlich, daß in der so beschriebenen Region welche gefunden werden. Dies kann man aus der Information über das Bildungsalter von Erzen schließen, die in den Bleiisotopenverhältnissen enthalten ist. Es müßte sich demnach um präkambrische Mineralisationen handeln, die nach dem derzeitigen geologischen Kenntnisstand weder in Anatolien noch in Südosteuropa auftreten. Man wird entsprechende Erze daher in einem noch weiteren Umkreis suchen müssen. Für den Fall, daß die Bleiisotopenverhältnisse eher die Herkunft des Zinns als die des Kupfers anzeigen, sind zusätzlich – jedenfalls nach den derzeitigen Kenntnissen – die bekannten Zinnlagerstätten in Europa (Erzgebirge, Cornwall, Bretagne, Sardinien) als unwahrscheinliche Zinnquellen für die trojanischen Objekte mit $^{208}Pb/^{206}Pb > 2{,}14$ zu betrachten. Über die Zinnvorkommen sowohl im Nordosten Afghanistans (Muhly 1985) als auch im Altai-Gebirge in Zentralasien ist noch zu wenig bekannt, um ein Urteil über ihre mögliche Rolle als Zinnquellen für Troja zu fällen. Aber die geologischen Verhältnisse zumindest im Altai-Gebirge, das vorwiegend aus präkambrischen Gesteinen besteht, lassen hohe $^{208}Pb/^{206}Pb$-Verhältnisse erwarten.
Für die Diskussion der Erzvorkommen, die isotopisch im Ägäisfeld liegen, können im Prinzip dieselben Isotopenverhältnisse wie im Kapitel über Blei und Silber herangezogen werden, denn es ist im Laufe der bisherigen Untersuchungen noch kein Fall bekannt geworden, bei dem Blei- und Kupfererze einer Lagerstätte durch unterschiedliche Bleiisotopenverhältnisse gekennzeichnet wären. Das finden auch Gale und Stos-Gale (1982) in Laurion und sie ordnen deshalb drei frühbronzezeitliche Kupferobjekte von Amorgos und zwei von Chalandriani auf Syros (Stos-Gale et al. 1984), die in den problematischen Bereich um $^{208}Pb/^{206} \geqslant 2{,}065$ und $^{207}Pb/^{206}Pb \geqslant 0{,}834$ fallen, dieser Lagerstätte auch zu. Ermutigt durch mehrere für Laurion typische Bleiisotopenverhältnisse in spätbronzezeitlichen Kupfer- und Bronzeobjekten von Kreta und Thera schließen sie analog zu ihrer Interpretation bei Blei und Silber, daß in der Frühbronzezeit Laurion und Siphnos die Kykladen mehrheitlich mit Kupfer versorgt hätten und daß in der späten Bronzezeit der Schwerpunkt der Kupferproduktion für die südliche Ägäis in Laurion lag.
Die methodischen Probleme sind dieselben wie schon im vorigen Kapitel diskutiert. Hinzu kommen aber in diesem Fall noch weitere Probleme mit der geologischen und archäologischen Evidenz, die von Muhly (1983) sehr präzise formuliert wurden. In Laurion kommen zwar, wie in den meisten Bleilagerstätten, auch Kupferminerale vor, aber es ist zu bezweifeln, ob deren Menge für eine Kupfererzeugung in großem Stil reichte. Aus Bodenfunden und schriftlichen Überlieferungen ist bezeugt, daß in der späten Bronzezeit große Metallmengen in Umlauf waren, und die Produktion solcher Mengen hätte in Laurion Spuren hinterlassen müssen. Für die frühe Bronzezeit fehlt ohnehin jegliche überzeugende isotopische Übereinstimmung von Kupferartefakten mit Laurion.
Es ist zur Zeit noch unklar, welche Rolle die Spurenelementanalyse in dieser Situation spielen kann. Im allgemeinen sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Lagerstätten in der Spurenelementzusammensetzung noch weniger deutlich als bei den Bleiisotopenverhältnissen. Immerhin hat sich das Dia-

gramm Sb/As gegen Co/Ni (Seeliger et al. 1986) für die Herkunftsbestimmung insofern bewährt, als mittlerweile mehrmals die Stabilität dieser Variablen bei der Verhüttung bestätigt wurde. Erz- und Rohkupferproben aus jeweils einem gemeinsamen Fundzusammenhang im Oman (Hauptmann 1985 und mündliche Mitteilung 1987), Shar-i-Sokhta (Hellmig 1986) und Zypern (Gale 1987) fallen in diesem Diagramm auch in einen gemeinsamen Bereich, wobei die Rohkupferanalysen in Übereinstimmung mit den metallurgischen Erwartungen eine Tendenz zu niedrigeren Co/Ni- und höheren Sb/As-Verhältnissen als die Erze zeigen. Gegenwärtig liegen leider noch relativ wenige Analysen von ägäischen Kupfererzen vor, die für die Herkunftsdiskussion verwendet werden können, und in der Literatur fehlen oft präzise Angaben über Sb, Co, Ag und Au-Gehalte. Immerhin stehen aber schon mehr als 200 Analysen frühbronzezeitlicher Kupfer- und Bronzeobjekte aus dem trojanischen Kulturkreis (Troja, Beşiktepe, Yortan, Poliochni auf Lemnos und Thermi auf Lesbos) zur Verfügung, die versuchsweise mit Hilfe der Clusteranalyse gruppiert wurden. Ein ähnlicher Versuch nur mit trojanischen Objekten ergab vier Gruppen (Pernicka et al. 1984), von denen aber nur zwei auch isotopisch relativ homogen waren, d.h. vermutlich aus einer einzigen Lagerstätte zu stammen schienen. In der erwähnten Arbeit wurden die Konzentrationen von As, Sb, Co, Ni, Ag und Au zur Gruppierung herangezogen. Aus der Erkenntnis, daß in Lagerstätten die Verhältnisse geochemisch ähnlicher Elemente häufig weniger schwanken als deren Absolutkonzentrationen (Seeliger et al. 1986), wurden nunmehr die Variablen As, Sb/As, Ni, Co/Ni, Ag und Au/Ag verwendet. Das Ergebnis ist in Tab. 23 zusammengefaßt. Die früheren Cluster B, C1 und C2 stellten sich als größtenteils robust heraus, während Cluster A nicht erhalten blieb. Interessant ist, daß die frühesten Objekte vom Beşiktepe und den Perioden »azzurro« und »verde« von Poliochni sich großteils in einer Gruppe zusammen mit Proben von Thermi befinden und daß die jüngste Periode von Poliochni, »giallo«, mehrheitlich in eine andere Gruppe zusammen mit Teilen des Clusters A von Troja und einigen Objekten der Periode »azzurro« fällt. Bemerkenswert ist auch, daß von den größeren Gruppen (Nr. 1-5) zwei (Nr. 1 und Nr. 5) keine einzige Zinnbronze enthalten, während die anderen drei jeweils zu ca. 70% aus Zinnbronzen zusammengesetzt sind. Da die Zinngehalte bei der Gruppierung nicht berücksichtigt wurden, bedeutet dies, daß entweder für die Zinnbronzen vorwiegend eine andere Kupfersorte verwendet wurde, oder sich die Spurenelementcharakteristik durch die Zugabe von Zinn geändert hat. Letzteres ist ziemlich unwahrscheinlich, so daß der Schluß naheliegt, daß Zinn und Kupfer zusammen – vermutlich bereits als Fertigobjekt – in die Troas gelangten.
Es bleibt abzuwarten, inwieweit diese Gruppierungen sich in den Bleiisotopenergebnissen abbilden. Nach den bisherigen, noch vorläufigen Ergebnissen von Poliochni (Begemann, mündliche Mitteilung 1987), sind die beiden zinnfreien Gruppen Nr. 1 und 5 auch isotopisch homogen, während die anderen drei Gruppen mit Zinnbronzen isotopisch stark streuen. Im Vergleich zu den bisher analysierten nordwestanatolischen Erzen enthalten die Artefakte im Mittel mehr Nickel und haben folglich im Durchschnitt ein kleineres Co/Ni-Verhältnis (Wagner et al. 1986). Da das Ni/Cu-Verhältnis bei der Verhüttung nur wenig verändert wird (s. Kap. II, 4a), bleibt vorläufig nur der Schluß, daß diese Erze als Ausgangsstoffe wenig wahrscheinlich sind, es sei denn, nickelhaltiges Material wurde bei der Verhüttung als Zuschlag verwendet. Das könnten z.B. Lateriterze oder basische Gesteine sein, die aber auf der Biga-Halbinsel nicht bekannt sind. Ein weiterer Hinweis darauf, daß nicht nur das Zinn sondern auch das Kupfer von anderen Gebieten als der Troas stammt.

VI. Zusammenfassung

Es war das Ziel dieser Arbeit, eine solide Basis bezüglich der tatsächlich vorhandenen Rohstoffe für die frühe Metallurgie in der Ägäis aufzustellen. Diese lagerstättenkundliche Übersicht wurde ergänzt durch eine Bewertung der Möglichkeit früher Metallgewinnung anhand von Geländebeobachtungen, Angaben aus der älteren Literatur und Vergleichen der geochemischen Charakteristik von Erzen und Fertigprodukten. Die frühbronzezeitlichen Belege für extraktive Blei-Silber-Metallurgie auf der Insel Siphnos und

Cluster-Nr./ Herkunft	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	Einzel-proben
Troja + Troas	70,88 89,93	58,61,65 69,75,82, 90,91,260, 264,265, 268	80,81,84 100,251	63,74,76, 83,92,102, 104,257, 259,262	79	263,266	71,73, 101	86	85	254	253 255			103 256	252			54,87, 258,267
Yortan	67,72 95,96 97,98,99			52														
Poliochni																		
azzurro	965			875,959, 960,964	972,874 924													
verde	904,972	905		880,978	882,884 888,890, 898,909	895,979				892			879					
rosso	886,878, 893,899, 900,903, 906,974	888,891	969,970	896,901	877	967	894,868	889				876 975				897		
giallo	911,915 934,936, 985	918,920 927,952, 986	907,971, 982	908,914,916, 917,919,921, 922,923,925 926,929,931, 932,933,935, 937,940,941, 942,943,944, 953,954,955, 957,958,973, 977,981,983, 984,987	930,938	912,913 951	971		928									
Thermi	803,804, 807,808, 813, 814,820, 825, 829,830	853,855			815 819 831 836,837 839,840,841, 851	826			854	945		806	852		805			809,833
Besiktepe	1006		163,167, 323,1019		166,168,1010, 1011,1014, 1017	1007, 1008	1012	1013 1015, 1016, 1020								165	1018	307,1008

Tab. 23 Gruppierung frühbronzezeitlicher Kupfer- und Bronzeobjekte aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung. Es wurde die average-link-Clusteranalyse verwendet (Sokal u. Sneath 1973), wobei folgende Variablen gleichzeitig betrachtet wurden: As/10, Ag, Ni, Sb/As, Au/Ag und Co/Ni. Die Zahlen sind die Probennummern aus der HDM-Datensammlung (Pernicka et al. 1984 und unveröffentlichte Daten).

bei Thorikos in Südostattika sowie für Kupfergewinnung auf den Inseln Kea und Kythnos und möglicherweise an mehreren anderen Stellen unterstützen im Prinzip Denkmodelle, die auf einer weitgehend eigenständigen kulturellen und technologischen Entwicklung der Ägäis im 3. Jahrtausend v. Chr. beruhen. Es ist unzweifelhaft, daß dieser Kulturraum besonders auf dem Gebiet der extraktiven Metallurgie eine sehr aktive Rolle gespielt hat, und es wird vielleicht der Revision mancher bisheriger Beurteilungen, die allein auf stilkritischen Untersuchungen beruhen, bedürfen.

Dennoch ist nicht zu übersehen, daß gerade in der Metallurgie die Ägäis im 4. Jahrtausend v. Chr. gegenüber den benachbarten Regionen noch wenig entwickelt erscheint. Das drückt sich u. a. in der vergleichsweise geringen Zahl von spätneolithischen Metallfunden aus und hängt vielleicht mit den zahlen- und mengenmäßig geringen Kupfererzvorkommen in der Ägäis zusammen. Der Aufschwung im 3. Jahrtausend v. Chr. scheint zwar vor allem auf den Kykladen von lokaler Metallproduktion getragen zu sein, aber zumindest in der Nordostägäis spielten Einflüsse von außen eine große Rolle.

Wichtigstes Ergebnis der Artefaktanalysen ist der Nachweis, daß die Einführung der Zinnbronze im trojanischen Kulturkreis nicht auf eine lokale Entwicklung zurückgeführt werden kann, sondern daß zumindest das zu deren Herstellung notwendige Zinn über sehr weite Entfernungen, möglicherweise aus Zentralasien herantransportiert werden mußte.

LITERATURABKÜRZUNGEN

Agiorgitis, G. u. Becker, R. 1975: Spurenelemente in Pyrit, Kupferkies und Bleiglanz von Kalliani, Euböa-Distrikt, Griechenland. Chem. Erde 34, 1975, 239-243.

Aitken, M. J. 1974: Physics and Archaeology (Oxford 1974).

Anastopoulos, J. 1963: Geologische Untersuchungen auf Antiparos und den umliegenden Inseln. Geol. Geophys. Res. VII, No. 5 (Athen 1963).

Anastopoulos, J. u. Papanicolaou, N. 1958: Mining geological and geophysical reconnaissance of S and SE Lakonia. Geological Reconnaissance, Rep. No. 27, IGEY (Athen 1958).

Apaydin, N. u. Erseçen, N. 1981: Known ore and mineral resources of Turkey. MTA Publ. 185 (Ankara 1981).

Aranitis, S. 1963: Die Entstehung der Eruptivgesteine vom Hermioni-Gebiet und der mit ihnen verbundenen Vererzung. Ann. Géol. pays helléniques, Athen 14, 1963, 213-304.

Ardaillon, E. 1897: Les mines du Laurion dans l'antiquité (Paris 1897).

Arikas, K. 1981: Subvulkanisch-hydrothermale Mo-Cu-Zu-Pb-Vererzungen, S. E. Rhodopen, Nordgriechenland: Petrographie und Geochemie. Tschermaks Min. Petr. Mitt. 28, 1981, 189-205.

Aronis, G. 1951: Research on the iron-pyrite deposits in the Hermioni mining district. The mineral wealth of Greece I (1951) 153-188.

Ashworth, K. L., Billet, M. F., Constantinides, D., Demetrides, A., Katirtzoglu, C. u. Michael, C. 1985: Base metal mineralization of the Evros region, N. E. Greece. Fortschr. Min. 63, 1985, 13.

Baer, K. E. v. 1876: Von wo das Zinn zu den ganz alten Bronzen gekommen sein mag? Archiv f. Anthr. 9, 1876, 263.

Barin, J. u. Knacke, O. 1973: Thermochemical Properties of Inorganic Substances (Berlin-Heidelberg-New York 1973).

Barnes, I. L., Shields, W. R., Murphy, T. J. u. Brill, R. H. 1974: Isotope Analysis of Laurion Lead Ores. In: C. W. Beck (Hrsg.): Archaeological Chemistry (Washington, D.C. 1974) 1-10.

Beaujour, B. 1829: Voyage militaire dans l'empire othoman (Paris 1829).

Bellon, P. 1555: Observations de plusieurs singularités et choses mémorables, trouvées en Grèce, Asie, Inde, Egypte, Arabie et autres pays étrangères (Anvers 1555).

Berthoud, T. 1979: Etude par l'analyse de traces et la modelisation de la filiation entre minerai de cuivre et objets archéologiques du Moyen-Orient (IV^{ème} et III^{ème} millénaire avant notre ère). Thèse Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI (1979).

Biegel, G. (Hrsg.) 1985: Das erste Gold der Menschheit (Freiburg 1985).

Biek, L. 1957: The examination of some copper ores: a report of the Ancient Mining and Metallurgy Committee. Man. 57, 1957, 72-76.

Binder, J. J. 1895: Laurion. Die attischen Bergwerke im Alterthum. Jahresber. der k. k. Staats-Oberrealschule 1894-95 (Laibach 1895) 1-54.

Boeck, A. 1818: Über die laurischen Silberbergwerke in Attika (Berlin 1818).

Bogdanov, B. 1982: Bulgaria. In: Dunning, F. W., Mykura, W. u. Slater, D.: Mineral Deposits of Europe II (1982) 215-232.

Bokhari, F. Y. u. Kramers, J. K. 1982: Lead isotope data from massive sulfide deposits in the Saudi Arabian Shield. Econ. Geol. 77, 1982, 1766-69.

Boni, M. u. Koeppel, V. 1985: Ore-lead isotope pattern from the Iglesiente-Sulcis Area (SW Sardinia) and the problem of remobilization of metals. Mineral. Deposita 20, 1985, 185-193.

Braidwood, R. J. 1958: The agricultural revolution. Science 127, 1958, 1419-1430.

Brandenstein, M. u. Schroll, E. 1958: Spektralanalytische Untersuchungen von Bleifunden aus Kärntner Ausgrabungen. Arch. Austriaca, Beih. 3 (1958) 116-120.

Branigan, K. 1966: Prehistoric relations between Italy and the Aegean. Bull. Paletnologia Italiana 75, 1966, 97-109.

1974: Aegean Metalwork of the Early and Middle Bronze Age (Oxford 1974).

Brill, R. H. 1970: Lead and oxygen isotopes in ancient objects. Phil. Trans. Roy. Soc. Lond. A. 269, 1970, 143-164.

Brill, R. u. Wampler, J. M. 1965: Isotope ratios in archaeological objects of lead. In: W. J. Young (Hrsg.), Application of science in examination of works of art (Boston 1965) 155-166.

Britton, D. 1963: Review of Junghans u. a. 1960. Antiquity 37, 1963, 152-154.

Buchholz, H.-G. 1967: Analysen prähistorischer Metallfunde aus Zypern und den Nachbarländern. Berliner Jahrb. Vor- u. Frühgesch. 7, 1967, 189-256.

1972: Das Blei in der mykenischen Kultur und in der bronzezeitlichen Metallurgie Zyperns. Jahrb. Dt. Arch. Inst. 87, 1972, 1-59.

Bürchner, W. 1921: Keos. In: Paulys Realencyclopädie der classischen Altertumswissenschaft 11, 1921, Sp. 182-190.

Cağatay, A., Altun, Y. u. Arman, B. 1981: Mineralogy of the Madenbelenitepe (Soğukpinar-Bursa) tin mineralisation. Bull. Min. Res. Explor. Inst. of Turkey 92, 1981, 25-34.

Caley, E. R. u. Richards, J. F. C. 1956: Theophrastus on Stones (Ohio State University 1956).

Çambel, H. u. Braidwood, R. J. 1983: Çayönü Tepesi: Schritte zu neuen Lebensweisen. In: R. M. Boehmer und H. Hauptmann (Hrsg.), Beiträge zur Altertumskunde Kleinasiens. Festschrift K. Bittel (Mainz 1983) 155-166.

Casson, S. 1926: Macedonia, Thrace and Illyria (Oxford 1926).

Catling, H. W. 1964: Cypriot Bronzework in the Mycenaean World (Oxford 1964) 278-298.

Černych, N. E. 1978: Aibunar – a Balkan copper mine of the fourth millennium BC. Proc. Prehist. Soc. 44, 1978, 203-217.

Chalkias, S. 1985: Geologie und Erzvorkommen des südlichen Lekani-Gebirges nördlich der Stadt Kavala, Ostmakedonien, Griechenland. Diplomarbeit Univ. Heidelberg 1985.

Charles, J. A. 1973: Heterogeneity in metals. Archaeometry 15, 1973, 104-105.

1980: The Coming of Copper and Copper-Base Alloys and Iron: A Metallurgical Sequence. In: T. A. Wertime und J. D. Muhly (Hrsg.), The coming of the Age of Iron (New Haven und London 1980) 151-183.

Chase, W. T. 1974: Comparative analysis of archaeologial bronzes. In: C. W. Beck (Hrsg.), Archaeological chemistry (Advances in Chemistry Series No. 138) 1974, 148.

Childe, V. G. 1957: The Dawn of European Civilization (London 1957).

Clark, D. E. u. Purdy, B. A. 1982: Early Metallurgy in North America. In: T. A. Wertime u. S. F. Wertime (Hrsg.), The Evolution of the First Fire-Using Industries (Washington D. C. 1982) 45-58.

Coghlan, H. H. 1939: Some Experiments on the Origin of Early Copper. Man 92, 1939, 106-108.

1939-40: Prehistoric Copper and Some Experiments in Smelting. Trans. Newcomen Soc. 20, 1939-1940, 49-65.

Coleman, J. E. 1977: Keos I: Kephala (Princeton 1977).

Conophagos, C. E. 1980: Le Laurium antique et la technique grècque de la production de l'argent (Athen 1980).

Conze, A. 1860: Reise auf den Inseln des thrakischen Meeres (1860).

Cook, J. M. 1973: The Troad. An archaeological and topographical study (Oxford 1973).

Cooke, S. R. B., Henrickson, E. u. Rapp, G. R. Jr. 1972: Metallurgical and geochemical studies. In: W. McDonald u. G. R. Rapp Jr. (Hrsg.): The Minnesota Messenia Expedition (Minneapolis 1972) 225-233.

Craddock, P. T. 1976: The composition of the copper alloys used by the Greek, Etruscan and Roman civilizations. 1. The Greeks before the Archaic Period. Journal Arch. Science 3, 1976, 93-113.

1980: The Composition of Copper Produced at the Ancient Smelting Camps in the Wadi Timna, Israel. In: P. T. Craddock (Hrsg.), Scientific Studies in Early Mining and Extractive Metallurgy. Brit. Mus. Occ. Paper 20, 1980, 165-173.

Crushing, F. H. 1894: Primitive copper working: an experimental study. American Anthropology 5, 1894, 165-176.

Czedik-Eysenberg, F. 1958: Beiträge zur Metallurgie des Kupfers in der Urzeit. Arch. Austriaca 3, 1958, 1-18.

Davies, O. 1932a: Ancient mines in southern Macedonia. Journal Royal Anthr. Inst. 62, 1932, 145-162.

1932b: Bronze age mining round the Aegean. Nature 130, 1932, 985-987.

1935: Roman mines in Europe (Oxford 1935; Arno Press, New York 1979 [Reprint]).

Davies, E. N. 1972: Der geologische Bau der Insel Kea. Bull. Geol. Soc. Greece 9, 1972, 252-265.

De Jesus, P. 1980: The Development of Prehistoric Mining and Metallurgy in Anatolia. Brit. Arch. Rep. Int. Ser. 74, 1980.

Doelter, C. 1916: Die Mineralschätze der Balkanländer und Kleinasiens (Stuttgart 1916).

Dora, Ö. O. 1964: Geologisch-lagerstättenkundliche Untersuchungen im Yamanlar-Gebirge nördlich vom Karseyaka (Westanatolien). MTA-Publ., No. 116 (Ankara 1964).

Dougherty, R. C. u. Caldwell, J. R. 1966: Evidence of Early Pyrometallurgy in the Kerman Range in Iran. Science 153, 1966, 984-985.

Dunning, F. W., Mykura, W. u. Slater, D. 1982: Mineral Deposits of Europe. II: Southeast Europe (London 1982).

Elitzsch, Ch., Pernicka, E. u. Wagner, G. A. 1983: Thermoluminescence Dating of Archaeometallurgical Slags. PACT 9, 1983, 271-286.

Evans, R. K. 1986: The pottery of phase III. In: C. Renfrew, M. Gimbutas u. E. Elster (Hrsg.), Excavations of Sitagroi: A Prehistoric Village in Northeast Greece. Vol. I (Los Angeles 1986).

Fabian, H. 1978: Kupfer. In: Ullmanns Encyclopädie der technischen Chemie 15 (4. Aufl., Weinheim 1978) 487-545.

Farquhar, R. M. u. Fletcher, J. R. 1984: The provenience of galena from Archaic Woodland Sites in northeastern North America: lead isotope evidence. American Antiquity 49, 1984, 774-785.

Faure, P. 1966: Les minerais de la Crète antique. Revue Arch. N.S. 1966, 45-78.

Feldhaus, L. 1984: Rohstoffwirtschaftliche Länderberichte der Bundesanstalt für Geowisenschaften und Rohstoffe. XXIX: Griechenland (Hannover 1984).

Fiedler, K. G. 1841: Reise durch alle Theile des Königreiches Griechenland (Leipzig 1841).

Forbes, R. J. 1963: Studies in Ancient Technology. VII: Geology and Mining (Leiden 1963).

1964: Studies in Ancient Technology VIII: Metallurgy; IX Metals (Leiden 1964).

Freise, F. 1907: Geographische Verbreitung und wirtschaftliche Entwicklung des Bergbaues in Vorder- und Mittelasien während des Altertums. Zeitschr. Prakt. Geol. 1907, 101-117.

1908: Geschichte der Bergbau- und Hüttentechnik. Bd. I: Das Altertum (Berlin 1908).

Friedman, A. M., Conway, M., Kastner, M., Milsted, J., Metta, D., Fields, P. R. u. Olsen, E. 1966: Copper artifacts: Correlation with some types of Copper ores. Science 152, 1966, 1504-1506.

Gale, N. H. 1978: Lead Isotopes and Aegean Metallurgy. In: C. Doumas (Hrsg.), Thera and the Aegean World, Vol. 1 (London 1978) 529-545.

1979: Some aspects of lead and silver mining in the Aegean. Misc. Graeca II, 9-60.

1987: Archaeometallurgical studies of late Bronze Age oxhide copper ingots from the Mediterranean Region. In: A. Hauptmann, E. Pernicka u. G. A. Wagner (Hrsg.), Old World Archaeometallurgy. Der Anschnitt. Beiheft 6 (im Druck).

Gale, N. H., Gentner, W. u. Wagner, G. A. 1980: Mineralogical and geographical silver sources of Archaic Greek coinage. Metallurgy in Numismatics 1, 1980, 3-49.

Gale, N. H., Papastamataki, A., Stos-Gale, Z. A. u. Leonis, K. 1985: Copper sources and copper metallurgy in the Aegean Bronze Age. In: P. T. Craddock u. M. J. Hughes (Hrsg.): Furnaces and Smelting Technology in Antiquity. Brit. Mus. Occ. Pap. No. 48, 1985, 81-101.

Gale, N. H. u. Stos-Gale, Z. A. 1981: Cycladic lead and silver metallurgy. Ann. Brit. School Athens 76, 1981, 169-224.

1982: Bronze Age Copper Sources in the Mediterranean: A New Approach. Science 216, 1982, 11-19.

1985: Cyprus and the Bronze Age metal trade. Acts of the International Congr. of Cypriot Studies (Nicosia 1985) 51-66.

Gale, N. H., Stos-Gale, Z. A. u. Davis, J. L. 1984: The provenance of lead used at Ayia Irini, Keos. Hesperia 53, 1984, 389-402.

Graeser, S. u. Friedrich, G. 1970: Zur Frage der Altersstellung und Genese der Blei-Zink-Vorkommen der Sierra de Cartagena in Spanien. Mineral. Deposita 5, 1970, 365-374.

Gimbutas, M. 1965: Bronze Age Cultures in Central and Eastern Europe (Den Haag 1965).

Glumac, P. D. u. Todd, J. A. 1987: New Evidence for the Use of Lead in Prehistoric South-East Europe. Archaeomaterials 2 (1), 1987, 29-37.

Gmelin 1955: Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie, Kupfer, Teil A, Lieferung 1 (Weinheim 1955).

Göbel, F. 1842: 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 (Erlangen 1842).

Grögler, N., Geiss, J., Grünenfelder, M. u. Houtermans, F. G. 1966: Isotopenuntersuchungen zur Bestimmung der Herkunft römischer Bleirohre und Bleibarren. Zeitschr. f. Naturforsch. 21a, 1966, 1167-72.

Gropengießer, H. 1986: Siphnos, Kap Agios Sostis: Keramische prähistorische Zeugnisse aus dem Gruben- und Hüttenrevier I. Athenische Mitt. 101, 1986, 1-39.

1987: Siphnos, Kap Agios Sostis: Keramische prähistorische Zeugnisse aus dem Gruben- und Hüttenrevier II. Reste von Tongefäßen. Athenische Mitt. 102, 1987, 1-54.

Hanfmann, G. M. A. u. Waldbaum, J. C. 1970: New Excavations at Sardis and Some Problems of Western Anatolian Archaeology. In: J. A. Sanders (Hrsg.), Near Eastern Archaeology in the Twentieth Century: Essays in Honour of Nelson Glueck (Garden City 1970) 307-326.

Hansen, M. u. Anderko, K. 1958: Constitution of binary alloys (New York-Toronto-London 1958).

Härke, H. 1978: Probleme der optischen Emissionsspektralanalyse in der Urgeschichtsforschung. Prähist. Zeitschr. 53, 1978, 165-276.

Hartmann, A. 1970: Prähistorische Goldfunde aus Europa I (Berlin 1970).

1982: Prähistorische Goldfunde aus Europa II (Berlin 1982).

Hauptmann, A. 1985: 5000 Jahre Kupfer in Oman. 1: Die Entwicklung der Kupfermetallurgie vom 3. Jahrtausend bis zur Neuzeit. Der Anschnitt, Beih. 4 (1985).

Hauptmann, A. Weisgerber, G. u. Knauf, E. A. 1985: Archäometallurgische Untersuchungen im Gebiet von Fenan, Wadi Arabah (Jordanien). Der Anschnitt 37, 1985, 163-195.

Hauptmann, H. 1971: Forschungsbericht zur ägäischen Frühzeit: Das Festland und die kleineren Inseln. Archäol. Anz. 86, 1971, 348-387.

1982: Die Grabungen auf dem Norşuntepe 1974. Keban Project 1974-1975 activities (Ankara 1982) 13-70.

Hauttecœur, H. 1896: L'île de Kéos. Bull. Soc. Roy. Belge de Géographie 20, 1896, 181-225.

1897: L'île de Kythnos (Thermia). Bull. Soc. Roy. Belge de Géographie 21, 1897, 417-447.

1900: L' île de Sériphos. Bull. Soc. Roy. Belge de Géographie 24, 1900, 533-558.

1901: L'île de Kimolos. Bull. Soc. Roy. Belge de Géographie 25, 1901, 350-366.

Hellmig, D. 1986: Versuche zur analytisch-chemischen Charakterisierung frühbronzezeitlicher Techniken der Kupferverhüttung in Shar-i-Sokhta/Iran (Diplomarbeit, Ruhr-Universität Bochum 1986).

Hermann, G. 1968: Lapis Lazuli: The Early Phases of its Trade. Iraq 30, 1968, 21-57.

Hetherington, R. 1980: Investigations into primitive lead smelting and its products. In: W. A. Oddy (Hrsg.), Aspects of Early Metallurgy. Brit. Mus. Occ. Paper No. 17, 1980, 27-40.

Höckmann, O. 1976: Die Kykladen und ihre östlichen Nachbarn. In: J. Thimme (Red.): Kunst und Kultur der Kykladen im 3. Jahrtausend v. Chr. (Karlsruhe 1976) 159-167.

1987: Frühbronzezeitliche Kulturbeziehungen im Mittelmeergebiet unter besonderer Berücksichtigung der Kykladen. In: H.-G. Buchholz, Ägäische Bronzezeit (Darmstadt 1987) 73-120.

Houtermans, F. G. 1960: Die Bleimethoden der geologischen Altersbestimmung. Geol. Rundschau 49, 1960, 168-196.

Holtzmann, B. 1979: Des mines d'or à Thasos? Bull. Corr. Hell., Suppl. V 1979, 345-349.

Hughes, M. J., Northover, J. P. u. Staniaszek, B. E. P. 1982: Problems in the analysis of leaded bronze alloys in ancient artefacts. Oxford Journal Arch. 1, 1982, 359-363.

Ivanov, S. I. 178: Die Schätze der Warnaer chalkolithischen Nekropole (Sofia 1978).

Jacobsen, T. W. 1964: Prehistoric Euboia. Ph. Diss., Univer. Pennsylvania, Ann Arbor 1964.

Jones, J. E. 1982: The Laurion silver mines: A review of recent researches and results. Greece and Rome 29, 1982, 169-183.

Jovanovič, B. 1971: Early Copper Metallurgy of the Central Balkans. Actes du VIII^{e} congrès international des sciences préhistoriques et protohistoriques, Belgrad 1971, 131-138.

Junghans, S., Klein, H. u. Scheufele, E. 1954: Untersuchungen zur Kupfer- und Frühbronzezeit Süddeutschlands. Ber. RGK 34, 1954, 77-114.

Junghans, S., Sangmeister, E. u. Schröder, M. 1960: Metallanalysen kupferzeitlicher und frühbronzezeitlicher Bodenfunde aus Europa (Berlin 1960).

1968: Kupfer und Bronze in der frühen Metallzeit Europas 1-3 (Berlin 1968).

1974: Kupfer und Bronze in der frühen Metallzeit Europas 4 (Berlin 1974).

Kalczyk, H. 1982: Untersuchungen zum attischen Silberbergbau. Gebietsstruktur, Geschichte und Technik (Frankfurt-Berlin 1982).

Kaptan, E. 1983: The significance of tin in turkish mining history and its origin. Bull. Min. Res. Explor. Inst. of Turkey, 95, 96, 1983, 106-114.

Karageorghis, V. 1974: Excavations at Kition. I. The Tombs (Nicosia 1974) 69-94.

Karageorgiou, E. 1955: Geology and ore deposits in the Eretria-Styra district (Euboea island). IGEY Rep. No. 23 (Athen 1955).

Katirtzoglou, K. G. 1986: Metallogenesis of the Tertiary sulphide mineralization of the Essimi region, Evros County. Diss. Univ. Athen 1986.

Kockel, F., Mollat, H. u. Gundlach, H. 1975: Hydrothermally altered and (copper-)mineralized porphyritic intrusions in the Serbo-Macedonian Massif (Greece). Min. Deposita 10, 1975, 195-204.

Kordellas, A. 1871: Le Laurium (Marseille 1871).

1902: O Metallikos Ploutos kai ai Alykai tis Ellados (Athen 1902).

Kroll, W. 1932: Minium. In: Paulys Realencyklopädie der classischen Altertumswissenschaft 15, 1932, Sp. 1848-1854.

Krysko, W. W. 1979: Blei in Geschichte und Kunst (Stuttgart 1979).

Kubaschewski, O. u. Alcock, C. B. 1979: Metallurgical Thermochemistry (5. Aufl., New York 1979).

Lamb, W. 1936: Excavations at Thermi in Lesbos (Cambridge 1936).

Lamberg-Karlovsky, C. C. u. Lamberg-Karlovsky, M. 1971: An Early City in Iran. Scientific American 224/6, 1971, 102-111.

Landerer, X. 1849: Über die in Griechenland sich findenden Bergwerke aus den Zeiten der alten Hellenen. N. Jahrb. Min. 1849, 411-436.

1876: Mittheilungen aus Griechenland. 1) Mineralogisches von der Insel Siphnos. Berg- und Hüttenmänn. Ztg. 1876, 94-95.

Lechevalier, J. B. 1792: Beschreibung der Ebene von Troja (Leipzig 1792).

Leleu, M. 1966: Les gisements plombo-zincifères du Laurium (Grèce). Science de la Terre 11, 1966, 293-343.

Leese, M. N., Craddock, P. I., Freestone, J. C. u. Rothenberg, B. 1986: The composition of ores and metal objects from Timna, Israel. Wiener Berichte über Naturwissenschaft in der Kunst, 2-3, 1985-86 (1986) 90-120.

Lorenzen, W. 1965: Helgoland und das früheste Kupfer des Nordens (Otterndorf/Niederelbe 1965).

Lupu, A. u. Rothenberg, B. 1970: The Extractive Metallurgy of the Early Iron Age Copper Industry in the Arabah, Israel. Arch Austriaca 47, 1970, 91-130.

Lutz, J. 1987: Geologie und Erzvorkommen des südlichen Çataldağ, Westanatolien, Türkei (Diplomarbeit, Univ. Heidelberg 1987).

Mackey, P. J. 1982: The Physical Chemistry of Copper Smelting Slags – A Review. Can. Met. Quart. 21, 1982, 221-260.

Mack, E. 1964: Die Goldvorkommen in Griechisch-Makedonien. Erzmetall 17, 1964, 9-18.

1977: Die Erkundung und Bewertung der Mineralvorkommen auf der Insel Milos (Griechenland). Berg- und Hüttenmänn. Mh. 122, 1977, 48-57.

1983: Auriferous Mineralization in Northern Greece: History, Exploration, and Evaluation. In: H.-J. Schneider, Mineral Deposits of the Alps and of the Alpine Epoch in Europe. Proc. IV ISMIDA. Berchtesgaden, October 4-10, 1981 (1983) 375-384.

Maddin, R., Wheeler, T. S. u. Muhly, J. D. 1980: Distinguishing Artifacts of Native Copper. Journal Arch. Science 7, 1980, 211-25.

Malfoy, J.-M. u. Menu, M. 1987: La métallurgie du cuivre à Suse aux IV^{e} et III^{e} millénaires: analyses en laboratoire. In: F. Tallon: Métallurgie Susienne I (Paris 1987) 355-377.

Marinos, G. 1951: Geology and metallogenesis of Serifos island. The Mineral Wealth of Greece I, 1951, 95-128.

1953: Bericht über das erzführende Gebiet westlich von Argos zwischen den Orten Masi Merkouri und Tavlari. IGEY, Int. Rep. No. 329 (Athen 1953).

Marinos, G. P. u. Petrascheck, W. E. 1956: Laurium. Geol. and Geophys. Res. 4, 1956, 1-247.

Mastoris. K. J. 1979: Relationship between Pb-Ag in the mixed sulphide deposits in Kirki area. Min. Expl. No. 11, IGME (Athen 1979).

Matthäus, H. 1985: Siphnos im Altertum. In: G. A. Wagner u. G. Weisgerber (Bearb.): Silber, Blei und Gold auf Sifnos: Prähistorische und antike Metallproduktion (Bochum 1985) 17-58.

McGeehan-Liritzis, V. 1983: The relationship between metalwork, copper sources and the evidence for settlement in the Greek Late Neolithic and Early Bronze Age. Oxford Journal Arch. 2/2, 1983, 147-180.

McKerrell, H. u. Tylecote, R. 1972: The working of copper-arsenic alloys in the Early Bronze Age and the effect on the determination of provenance. Proc. Prehistoric Soc. 38, 1972, 209-218.

Meeks, N. D. u. Tite, M. S. 1980: The analyses of platinum-group element inclusions in gold antiquities. Journal Arch. Science 7, 1980, 267-75.

Melidonis, N. G. 1963: Die Geologie der Insel Anafi (Stratigraphie – Tektonik – Petrologie – Lagerstätten). Geol. Geophys. Res. VIII, No. 3 (Athen 1963) 61-309.

1980: Die geologische Struktur und Lagerstätten auf der Insel Tinos (Kykladen, Griechenland). Eine vorläufige Studie. The Geology of Greece 13 (Athen 1980).

Melidonis, N. G. u. Constantinides, D. C. 1979: Study of the sulphide mineralization of the island of Syros (Cyclades-Greece). The Geology of Greece No. 12 IGME (Athen 1979).

1983: The stratabound sulphide Mineralisation of Syros (Cycaldes, Greece). Zeitschr. dt. Geol. Ges. 134, 1983, 555-575.

Mellaart, J. 1967: Çatal Hüyük. A Neolithic Town in Anatolia (New York 1967).

Merkel, J. 1983a: Reconstruction of Bronze Age Copper Smelting. Experiments Based on Archaeological Evidence from Timna, Israel. Ph. D. Univ. of London 1983.

1983b: Summary of experimental results for Late Bronze Age copper smelting and refining. Museum Applied Science Center Journal 2/6, 1983, 173-179.

Merpert, N. Y. u. Munchaev, R. M.: The Earliest Metallurgy in Mesopotamia. Sovietskaja Arch. 1977, 154-163.

Moesta, H. 1986: Bronze Age Copper Smelting. Interdisc. Sc. Rev. 11, 1986, 73-87.

Montelius, O. 1899: Der Orient und Europa (Stockholm 1899).

1903: Die älteren Kulturperioden im Orient und in Europa I. Die Methode (Stockholm 1903).

Mozsolics, A. 1973: Bronze- und Goldfunde des Karpatenbeckens. Depotfundhorizonte von Forró und Ópályi (Budapest 1973).

MTA Publ. 129 (1970): Arsenic, Mercury, Antimony and Gold Deposits of Turkey (Ankara 1970).

MTA Publ. 133 (1972): Lead, Copper and Zinc Deposits of Turkey (Ankara 1972).

Much, M. 1893: Die Kupferzeit (Jena 1893).

Muhly, J. D. 1973: Copper and Tin. Trans. of the Connecticut Academy of Arts and Sciences 43, 1973, 155-535.

1976: Supplement to Copper and Tin. Trans. of The Connecticut Academy of Arts and Sciences 46, 1976, 77-136.

1977: The copper ox-hide ingots and the bronze age metals trade. Iraq 39, 1977, 73-82.

1983a: Lead isotopes and the kingdom of Alashiya, Rep. Dept. of Antiquities Cyprus 1983, (Nicosia 1983) 210-218.

1983b: Lead isotope analysis and the problem of lead in copper. Rep. Dept. Antiquities of Cyprus 1983 (Nicosia 1983) 78-82.

1985: Sources of Tin and the Beginnings of Bronze Metallurgy. Am. Journ. Arch. 89, 1985, 275-291.

1987: Çayönü Tepesı and the beginnings of metallurgy in the Ancient World. In: A. Hauptmann, E. Pernicka u. G. A. Wagner (Hrsg.), Old World Archaeometallurgy. Der Anschnitt. Beiheft 6 (im Druck).

Murad, E. u. Hubberten, H.-W. 1975: Sulfide mineralization in phyllites from the island of Thera, Santorini Archipelago, Greece. N. Jahrb. Miner. Mh. 1975, 300-308.

Mussche, H. F. 1978: Thorikos. Eine Führung durch die Ausgrabungen (Genf-Nürnberg 1978).

Neubauer, W. H. 1957: Geologie der Blei-Zink-reichen Kieslagerstätten von Kassandra (Chalkidike, Griechenland). Berg- u. Hüttenmänn. Mh. 102, 1957, 1-16.

Neuninger, H. u. Pittioni, R. 1962: Bemerkungen über zwei Methoden der spektralanalytischen Untersuchung urzeitlicher Kupfer- und Bronzeobjekte. Arch. Austriaca 31, 1962, 96-102.

1963: Frühmetallzeitlicher Kupferhandel im Alpenvorland; zur Frage der Herkunft des Ringbarrenkupfers. Arch. Austriaca, Beih. 6 (1963).

Neuninger, H., Pittioni, R. u. Preuschen, E. 1960: Das Kupfer der Nordtiroler Urnenfelderkultur. Arch. Austriaca, Beih. 5 (1960).

1969: Salzburgs Kupfererzlagerstätten und Bronzefunde aus dem Lande Salzburg. Arch. Austriaca, Beih. 9 (1969).

Neuninger, H., Pittioni, R. u. Siegl, W. 1964: Frühkeramikzeitliche Kupfergewinnung in Anatolien. Arch. Austriaca 26, 1964, 52-66.

Neuninger, H., Preuschen, E. u. Pittioni, R. 1970: Versuch einer Fahlerzverhüttung nach dem alten Arbeitsgang auf der Insel Luzon. Arch. Austriaca 47, 1970, 87-90.

Nicolaou, M. 1966: The mineralogy and micrography of the sulfide ores of the Kassandra mines (Greece). Ann. Geol. Pays. Hell. 16, 1966, 111-139.

Okada, Y. 1911: Mabuki-Prozeß (Freiberg 1911).

Otto, H. u. Witter, W. 1952: Handbuch der ältesten vorgeschichtlichen Metallurgie in Mitteleuropa (Leipzig 1952).

Papastamataki, A. 1975: Mineral wealth and slags in ancient Greece. IGME Int. Rep. (1975).

1985: The slags of ancient Greek metallurgy. In: A. Papastamataki (Hrsg.), Proc. of an archaeometric seminar on the slags of ancient Greek metallurgy. IGME (Athen 1985) 41-67.

Papastamataki, A. u. Demetriou, D. 1985: Metallurgical centers and copper production in Phthiotis. In: A. Papastamataki (Hrsg.): Proc. archaeometric seminar on the slags of ancient Greek metallurgy IGME (Athen 1985) 99-115.

Papavasiliou, S. A. 1909: Über die vermeintlichen Urgneise und die Metamorphose des kristallinen Grundgebirges der Kykladen. Zeitschr. dt. geol. Ges. 61, 1909, 199.

Paton, W. R. u. Myres, J. L. 1896: Karian sites and inscriptions. Journ. Hell. Studies, 16, 1896, 204.

Patterson, C. C. 1971: Native copper, silver, and gold accessible to early metallurgists. American Antiquity 36, 1971, 286-321.

Pearson. G. W., Pilcher, J. R. u. Baillie, M. G. L. 1983: High-precision ^{14}C measurement of Irish oaks to show the natural ^{14}C variations from 200 BC. to 4000 BC. Radiocarbon 25, 1983, 179-186.

Pernicka, E. 1981: Archäometallurgische Untersuchungen zur antiken Silbergewinnung in Laurion. Teil I: Chemische Analyse griechischer Blei-Silber-Erze. Erzmetall 34, 1981, 396-400.

1984: Instrumentelle Multi-Elementanalyse archäologischer Kupfer- und Bronzeartefakte: Ein Methodenvergleich. Jahrb. Röm.-Germ. Zentralmus. 31, 1984, 517-531.

1986: Metallanalysen. In: E. Feucht: Vom Nil zum Nekkar. Kunstschätze Ägyptens aus pharaonischer und koptischer Zeit an der Universität Heidelberg (Berlin-Heidelberg-New-York-London-Paris-Tokyo 1986).

Pernicka, E. u. Bachmann, H.-G. 1983: Archäometallurgische Untersuchungen zur antiken Silbergewinnung in Laurion. Teil III: Das Verhalten einiger Spurenelemente beim Abtreiben des Bleis. Erzmetall 36, 1983, 592-597.

Pernicka, E. u. Wagner, G. A. 1982: Lead, Silver and Gold in Ancient Greece: An Archaeometric Study. PACT 7, 1982, 419-425.

Pernicka, E., Bassiakos, I. u. Wagner, G. A. 1982: Goldvorkommen und antiker Bergbau auf der Kykladeninsel Siphnos. Naturwiss. 69, 1982, 39-40.

Pernicka, E., Wagner, G. A., Gentner, W., Vavelidis, M. u. Gale, N. H. 1981: Ancient Lead and Silver Production on Thasos. Greece. Revue d'Archéometrie, Suppl. (1981) 227-237.

Pernicka, E., Lutz, C., Bachmann, H.-G., Wagner, G. A., Elitzsch, Ch. u. Klein, E. 1985: Alte Blei-Silber-Verhüttung auf Sifnos. In: G. A. Wagner u. G. Weisgerber (Bearb.), Silber, Blei und Gold auf Sifnos, prähistorische und antike Metallproduktion. Der Anschnitt, Beih. 3 (1985) 185-199.

Pernicka, E., Wagner, G. A., Assimenos, K., Doumas, C., Begemann, F. u. Todt, W. 1983: An Analytical Study of Prehistoric Lead and Silver Objects from the Aegean. Proc. 22nd Intern. Symp. Archaeometry, Bradford 1982 (1983) 292-302.

Pernicka, E., Seeliger, T. C., Wagner, G. A., Begemann, F., Schmitt-Strecker, S., Eibner, E., Öztunali, Ö. u. Baranyi, I. 1984: Archäometallurgische Untersuchungen in Nordwestanatolien. Jahrb. RGZM 31, 1984, 533-599.

Petrascheck, W. E. u. Marinos, G. P. 1955: Geological reconnaissance in the area of the metalliferous veins NE of Karysteia, S. Euboea. IGEY Rep. No. 17 (Athen 1955).

Phillipps, J. A. u. Louis, H. 1896: A Treatise on Ore Deposits (London 1896).

Philippson, A. 1901: Beiträge zur Kenntnis der griechischen Inselwelt. Ergänzungsheft No. 134 zu Petermanns Mitteilungen (Gotha 1901).

Pittioni, R. 1957: Urzeitlicher Bergbau auf Kupfererz und Spurenanalyse. Beiträge zum Problem der Relation Lagerstätte – Fertigobjekt. Arch. Austriaca. Beih. 1 (Wien 1957).

Podufal, P. 1971: Die Geologie und Lagerstättenkunde der Manganvorkommen bei Drama (Griechisch-Macedonien). Clausthaler geol. Abh. 10, 1971, 1-82.

Prag, K. 1978: Silver in the Levant. In: P. R. S. Moorey u. P. J. Paar (Hrsg.), Archaeology in the Levant (London 1978) 36-45.

Quiring, H. 1948: Geschichte des Goldes (Stuttgart 1948).

Rapp, G. jun.: Native Copper and the Beginning of Smelting: Chemical Studies. In: J. D. Muhly u. V. Karageorghis (Hrsg.), Early Metallurgy in Cyprus 4000-5000 BC. (Larnaca 1985) 33-38.

Raschka, H. 1981: Lagerstätten mit massiven Sulfiden. In: F.-J. Eckhardt: Geologische, petrologische und lagerstättenkundliche Arbeiten im Bereich von Lagerstätten orogener Ultramafitite. Unveröffentlichter Bericht der Bundesanstalt f. Geowiss. u. Rohstoffe, NTS 61, Bd. II, Teil 3 (Hannover 1981).

Reedy, C. L. u. Reedy, T. J. 1988: Lead isotope analysis for provenance studies in the Aegean region: A re-evaluation. In: Materials Issues in Art and Archaeology (Pittsburgh, Materials Research Society), im Druck.

Renfrew, C. 1967: Cycladic Metallurgy and the Aegean Early Bronze Age. Am. Journal Arch. 71, 1967, 2-26.

1969: The Autonomy of the South-East European Copper Age. Proc. Prehist. Soc. 35, 1969, 12-47.

1972: The Emergence of Civilization. The Cyclades and the Aegean in the Third Millennium B. C. (London 1972).

1973: Before Civilization (London 1973).

Renfrew, C., Dixon, J. E. u. Cann, J. R. 1966: Obsidian and early cultural contacts in the Near East. Proc. Prehist. Soc. 32, 1966, 30-73.

Richard, T. A. 1932: Man and Metals (New York und London 1932).

Richards, E. E. u. Blin-Stoyle, A. E. 1961: A study of the homogeneity in composition of an Irish thick-butted axe. Archaeometry 4, 1961, 53-55.

Ross, L. 1840: Reisen auf den griechischen Inseln des ägäischen Meeres (Stuttgart/Tübingen 1840).

Rothenberg, B. 1978: Excavations at Timna Site 39, a Chalcolithic Copper Smelting Site and Furnace and its Metallurgy. Archaeo-Metallurgy. IAMS Monograph No. 1 (1978) 1-15.

Russell, R. D. u. Fahrquhar, R. M. 1960: Lead Isotopes in Geology (New York 1960).

Ryan, C. W. 1960: A guide to the known minerals of Turkey. MTA Publ. (Ankara 1960).

Rychner, V. 1984: La matière des bronziers lacustres. Archäologie der Schweiz 7, 1984, 73-78.

1986: Schriftliche Mitteilung 1986.

Sackett, L. H., Hankey, L. V., Howell, R. J., Jacobson, T. W. u. Popham, M. R. 1966: Prehistoric Euboea: Contributions towards a Survey. Ann. Brit. School Athens 61, 1966, 33-112.

Sagui, C. L. 1928: The ancient mining works of Cassandra, Greece. Econ. Geol. 23, 1928, 671-680.

Schmeisser, C. 1906: Bodenschätze und Bergbau Kleinasiens. Zeitschr. prakt. Geologie 16, 1906, 186-196.

Schröcke, H. 1955: Zur Geochemie erzgebirgischer Zinnerzlagerstätten. N. Jahrb. Mineral. Abh. 87, 1955, 416-456.

Schultze, J. H. 1935: Der Bergbau in Neugriechenland. Metall und Erz 33, 1935, 49-379.

Schulz, H. D. 1983: Zuordnung von Kupfer-Metall zum Ausgangserz. Möglichkeiten und Grenzen der Methode. Prähist. Zeitschr. 58, 1983, 1-14.

Seeliger, T. C., Pernicka, E., Wagner, G. A., Begemann, F., Schmitt-Strecker, S., Eibner, C., Öztunali, Ö. u. Baranyi, I. 1985: Archäometallurgische Untersuchungen in Nord- und Ostanatolien. Jahrb. Röm.-Germ. Zentralmus. 32, 1985, 597-659.

Séfériadès, M. 1985: Troie I. Matériaux pour l'étude des Sociétés du Nord-Est Egéen au debut du Bronze Ancien (Paris 1985).

Slater, E. A. u. Charles, J. A. 1970: Archaeological classification by metal analysis. Antiquity 44, 1970, 207-213.

de Smeth, J. B. 1975: Geological Map of Greece. Kythnos Island (Athen 1975).

Sokal, P. u. Sneath, P. 1973: Numerical Taxonomy (San Fracisco 1973).

Solecki, R. S. 1969: A Copper Mineral Pendant from Northern Iraq. Antiquity 43, 1969, 311-314.

Sonder, R. A. 1924: Zur Geologie und Petrographie der Inselgruppe von Milos. Zeitschr. Vulc. 8, 1924, 181-231.

Speidel, J. 1929: Beiträge zur Kenntnis der Geologie und Lagerstätten der Insel Thasos. Diss. Freiberg 1929.

Spitaels, P. 1984: The early Helladic period in mine No. 3 (Theatre sector). Thorikos VIII, 1972-1976 (1984) 151-174.

Spyropoulos, T. 1972: Hysteromykenaikoi Helladikoi Thesauroi (Athen 1972).

Stephanos, C. 1905: Les Tombeaux prémycéniens de Naxos. Comptes rendus de Congrès international d'Archéologie I, Athen 1905, 224.

Stos-Gale, Z. 1987: Cycladic copper metallurgy. In: A. Hauptmann, E. Pernicka und G.A. Wagner (Hrsg.), Old World Archaeometallurgy. Der Anschnitt. Beiheft 6 (im Druck).

Stos-Gale, Z. A. u. Gale, N. H. 1982: The Sources of Mycenaean silver and lead. Journal of Field Archaeol. 9, 1982, 467-485.

Stos-Gale, Z. A., Gale, N. H. u. Gilmore, G. R. 1984: Early bronze age Trojan metal sources and Anatolians in the Cyclades. Oxford Journal Arch. 3, 1984, 23-43.

Stos-Gale, Z. A., Gale, N. H. u. Zwicker, U. 1986: The Copper Trade in the South East Mediterranean Region: Preliminary Scientific Evidence. Rep. Dept. of Antiquities Cyprus 1986 (Nicosia 1986) 122-124.

Stuiver, M. 1982: A high-precision calibration of the AD radiocarbon time scale. Radiocarbon 24, 1982, 1-26.

Swann, C. P. u. Fleming, S. J. 1986: New directions in the Bartol PIXE system. Nucl. Instr. Methods. B 14, 1986, 61-69.

Suhling, L. 1976: Der Seigerhüttenprozeß (Stuttgart 1976).

Tafel, V. u. Wagenmann, K. 1951: Lehrbuch der Metallhüttenkunde I (Leipzig 1951).

1953: Lehrbuch der Metallhüttenkunde II (Leipzig 1953).

Taylor, R. G. 1979: Geology of tin deposits. Developments in Economic Geology 11 (Amsterdam-Oxford-New York 1979).

Thomsen, C. J. 1836: Ledetrad til Nordisk Oldkyndighed (Kopenhagen 1836).

Tournefort, P. de 1727: Relation d'un Voyage du Levant (Lyon 1727).

Tsamantouridis, P. 1980: Study of the sulphide mineralisation of eastern Paikon area (Kilkis district). Mineral Deposits Research, No. 13 (Athen 1980).

Tsountas, C. 1898: Kykladika. Arch. Ephemeris 1898, 137-212.

Tylecote, R. F. 1962: Metallurgy in Archaeology (London 1962).

1976: A History of Metallurgy (London 1976).

Tylecote, R. F., Ghaznavi, H. A. u. Boydell, P. J. 1977: Partitioning of Trace Elements Between the Ores, Fluxes, Slags and Metal During the Smelting of Copper. Journal Arch. Science 4, 1977, 305-333.

Tylecote, R. F. u. Boydell, P. J. 1978: Experiments on Copper Smelting Based on Early Furnaces Found at Timna. In: Chalcolithic Copper Smelting. Institute for Archaeo-Metallurgical Studies, Monograph No. 1 (London 1978).

Van der Vin, J. P. A. 1980: Ancient Monuments and Old Traditions in Medieval Travellers Tales. In: Travellers to Greece and Constantinople (Oxford 1980).

Vavelidis, M. 1984: Neue Beobachtungen zur Genese der schichtgebundenen Pb-Zn (Fe-Ba-As-Ag-Cu) und der Au-Vorkommen auf Thassos (Nordgriechenland). Diss. Heidelberg, 1984.

Vavelidis, M., Bassiakos, I., Begemann, F., Patriarcheas, K., Pernicka, E., Schmitt-Strecker, S. u. Wagner, G. A. 1985: Geologie und Erzvorkommen. In: G. A. Wagner u. G. Weisgerber (Bearb.), Silber, Blei und Gold auf Sifnos, prähistorische und antike Metallproduktion. Der Anschnitt. Beih. 3 (1985) 59-80.

Vermeule, E. 1964: Greece in the Bronze Age (Chicago 1964).

Waetzoldt, H. 1985: Rotes Gold? Oriens Antiquus 24, 1985, 1-16.

Wagner, G. A. 1975: Unveröffentlichte Feldbucheintragung 1975.

1982: Unveröffentlichte Feldbucheintragung 1982.

Wagner, G. A., Kromer, B. u. Korfmann, M.: Comparison of TL and calibrated radiocarbon dates for Troy I. Proc. 1986 Int. Symp. on Archaeometry, 19-23 May 1986 Athen (im Druck).

Wagner, G. A. u. Weisgerber, G. (Bearb.) 1985: Silber, Blei und Gold auf Sifnos, prähistorische und antike Metallproduktion. Der Anschnitt, Beih. 3 (1985).

Wagner, G. A. u. Weisgerber, G. (Bearb.) 1988: Antike Edel- und Buntmetallgewinnung auf Thasos. Der Anschnitt, Beih. 5 (1988).

Wagner, G. A., Pernicka, E., Gentner, W. u. Gropengiesser, H. 1979: Nachweis antiken Goldbergbaus auf Thasos: Bestätigung Herodots. Naturwiss. 66, 1979, 613.

Wagner, G. A., Pernicka, E., Gialoglou, G. u. Vavelidis, M. 1981: Ancient Gold Mines on Thasos. Naturwiss. 68, 1981, 263-264.

Wagner, G. A., Pernicka, E., Seeliger, T. C. Öztunali, Ö, Baranyi, I., Begemann, F. u. Schmitt-Strecker, S. 1985: Geologische Untersuchungen zur frühen Metallurgie in NW-Anatolien. Bull. Min. Res. Expl. Inst. Turkey 101-102, 1985, 45-81.

Wagner, G. A., Pernicka, E., Vavelidis, M., Baranyi, I. u. Bassiakos, I. 1986a: Archäometallurgische Untersuchungen auf Chalkidiki. Der Anschnitt 38, 1986, 166-186.

Wagner, G. A., Pernicka, E., Seeliger, T. C., Lorenz, I. B., Begemann, F., Schmitt-Stecker, S., Eibner, C. u. Öztunali, Ö. 1986b: Geochemische und isotopische Charakteristika früher Rohstoffquellen für Kupfer, Blei, Silber und Gold in der Türkei. Jahrb. Röm.-Germ. Zentralmus. 33, 1986, 723-752.

Waldbaum, J. C. 1978: From Bronze to Iron. Studies in Mediterranean Archaeology LIV (Göteborg 1978).

Walther, H. W. 1977: Lagerstätten und Vorkommen nutzbarer Mineralien. In: Kockel, F. u. Mollat, H., Erläuterungen zur Geologischen Karte der Chalkidiki und angrenzender Gebiete 1:100000 (Nordgriechenland) (Hannover 1977).

Waniczek, K. 1986: Ein Beitrag zur Zinnmetallurgie der Bronzezeit. Alt-Thüringen 21, 1986, 112-135.

Warren, H. V. u. Thompson, R. M. 1944: Minor elements in gold. Econ. Geol. 39, 1944, 457-71.

Waterbolk, H. T. u. Butler, J. J. 1965: Comments on the use of metallurgical analysis in prehistoric studies. Helinium 5, 1965, 227-251.

Weisgerber, G. u. Heinrich, G. 1983: Laurion – und kein Ende? Der Anschnitt 35, 1983, 190-200.

Weissbach, H. 1932: Miltos, Paulys Realencyklopädie des Altertums. Bd. 15 (1932) Sp. 1709.

Weißhaar, H.-J. 1982: Varna und die ägäische Bronzezeit. Arch. Korrbl. 12, 1982, 321-329.

Wertime, Th. 1973: The Beginnings of Metallurgy: A New Look. Science 182, 1973, 875-887.

Wheeler, T. S., Maddin, R. u. Muhly, J. D. 1975: Ingots and the Bronze Age Copper Trade in the Mediterranean: A Progress Report. Expedition 17, 1975, 31-39.

Whitmore, F. E. u. Young, W. J. 1973: Application of the laser microprobe and electron microprobe in the analysis of platiniridium inclusions in gold. In: W. J. Young (Hrsg.): Application of Science in Examination of Works of Art (Boston 1973) 88-95.

Wiegand, T. 1904: Reisen in Mysien. Athen. Mitt. 39, 1904, 254-339.

Wilson, A. L. 1976: The provenance of the inscribed stirrup-jars found at Thebes. Archaeometry 18, 1976, 51-58.

Wintle, A. G. 1978: A thermoluminescence dating study of some Quaternary calcite: potential and problems. Can. J. Earth Sci. 15, 1977-86 (1978).

Wintle, A. G. u. Huntley, D. J. 1982: Thermoluminescence dating of sediments. Quaternary Science Reviews 1, 1982, 31-53.

Wyttenbach, A. u. Schubiger, P. A. 1973: Trace Element Content of Roman Lead by Neutron Activation Analysis. Archaeometry 15/2, 1973, 199-207.

Yazawa, A. 1980: Distribution of various elements between copper, matte and slag. Erzmetall 33, 1980, 377-382.

Yener, K. A. u. Özbal, H. 1987: Tin in the Turkish Taurus mountains: the Bolkardağ mining district. Antiquity 61, 1987, 220-226.

Young, W. J. 1972: The fabulous gold of the Pactolus valley. Bull. Boston Museum of Fine Arts 70, 1972, 5-13.

Zachos, K. 1987: Vortrag 6th International Colloquium on Aegean Prehistory, Athen 30.8.-5.9.1987.

Zachos, K. u. Maratos, G. 1965: Metallogenic Map of Greece (Athen 1965).

Zschocke, K. u. Preuschen, E. 1932: Das urzeitliche Bergbaugebiet von Mühlbach/Bischofshofen. Materialien zur Urgeschichte Österreichs 6 (1932).

Zwicker, U. 1980: Investigations on the Extractive Metallurgy of Cu/Sb/As Ore and Excavated Smelting Products from Norşun-Tepe (Keban) on the Upper Euphrates (3500-2800 B.C.). In: W. A. Oddy (Hrsg.), Aspects of Early Metallurgy. Brit. Mus. Occ. Paper No. 17 (1980).

1982: Unveröffentlichter Bericht über das Forschungsvorhaben I/35351 der Stiftung Volkswagenwerk: »Kupfer, Erforschung von Rohstoffquellen des Altertums in den unmittelbaren und weiteren Randgebieten des östlichen Mittelmeeres«, Teil 3. Griechenland und griechische Inseln (Erlangen 1982).

Zwicker, U. u. Goudarzloo, F. 1978: Investigations on the Distribution of Metallic Elements in Copper Slag, Copper Matte and Copper and Comparison with Samples from Prehistoric Smelting Places. Archäophysika 10, 1978, 360-375.