

Isotopenuntersuchungen zur Bestimmung der Herkunft römischer Bleirohre und Bleibarren

N. GRÖGLER, J. GEISS, M. GRÜNFELDER und F. G. HOUTERMANS

Physikalisches Institut, Universität Bern
und

Institut für Kristallographie und Petrographie, ETH Zürich

(Z. Naturforsch. 21 a, 1167–1172 [1966]; eingegangen am 21. März 1966)

Professor Dr. W. GENTNER zum 60. Geburtstag gewidmet

The isotopic composition of lead in archaeological objects can be used to trace the origin of this lead. In this paper we give the lead isotopic composition of 10 Roman lead pipes and ingots, found on the European continent. In spite of the limited number of samples and the restricted area, significant differences in the isotopic composition are found exceeding by far the experimental limits of error. Thus, it is shown that the isotopic composition of lead is indeed a sensitive tracer for the origin of historical lead objects. Our results are compared with the isotopic compositions of European lead ores. For some examples the possibilities and the limitations of the method are discussed.

Über die Anfänge der Metallurgie des Bleis ist noch wenig bekannt. So wurde eine Bleifigur in Troja aufgefunden (3000–1500 v. Chr.), in Mykaene fand sich Blei in Form von Ringen, in Pfahlbauten hat man Bleigewichte entdeckt. In Froegg (Kärnten) fand man in einem Gräberfeld der Hallstattzeit Ritterfigürchen aus Blei. Auch in Ägypten wird zur Zeit des Thutmosis III. (um 1475 v. Chr.) Blei erwähnt. Herodot spricht um 450 v. Chr. von der Verwendung von Blei beim Brückenbau. Die Griechen gewannen Blei in Laurion sowie auf Rhodos und Zypern.

Erst in der römischen Zeit findet jedoch das Blei häufigere Verwendung, so z. B. für Wasserrohre, Geschosse, Senkbleie, Gewichte, Münzen, Lockenhalter und Schreiftäfelchen. Vitruv, der ältere Plinius und Frontinus beschreiben die römischen Metallrohre eingehend¹. Viele dieser römischen Bleirohre tragen Fabrikationsstempel. Auch das Rohmaterial in Form von Bleibarren ist oft mit Inschriften versehen. So ist es teilweise möglich, auf Grund dieser Inschriften gewisse Schlüsse auf die Herkunft des Materials zu ziehen. In sehr vielen Fällen vermißt man allerdings überhaupt derartige Inschriften. Insbesondere scheinen keine Inschriften aus der Zeit der Republik bekannt geworden zu sein, die frühesten Bezeichnungen geben die Namen

der Kaiser Nerva, Trajan, Severus und Caracalla². Leider zeigten die uns zur Verfügung stehenden Bleirohre keine Inschriften, während unsere Bleibarren mit Inschriften versehen sind.

Ziel der Untersuchungen

Es ist vor einiger Zeit versucht worden, durch Bestimmung der Spurenelemente Aufschlüsse über die Herkunft des Bleis zu gewinnen, eine Methode, die auf Bronzen mit Erfolg angewendet wurde³. BRANDENSTEIN und SCHROLL⁴ haben Spurenelementbestimmungen an einem römischen Bleirohr vom Magdalensberg (Kärnten) und an den Bleifiguren von Froegg (Kärnten) vorgenommen. Die Ergebnisse ließen jedoch kaum nähere Schlüsse zu.

Wir haben nun versucht, die Herkunft von römischen Bleiprobe mit Hilfe der Messung der Bleiisotopenverhältnisse zu untersuchen. Diese Methode ist insofern der Methode der Spurenelemente überlegen, als die Isotopenverhältnisse eines schweren Elements durch technologische Prozesse praktisch nicht verändert werden können. Auf der anderen Seite sind unserer Methode aber Grenzen gesetzt. So gibt es besonders in Europa sehr viele Bleierzvorkommen, die sehr ähnliche Isotopenverhältnisse haben. Es wird also oft möglich sein, einen be-

¹ F. M. FELDHAUS, Die Technik der Vorzeit, der geschichtlichen Zeit und der Naturvölker, Heinz Moos Verlag, München 1965.

² W. GOWLAND, Archaeologia 57, 359 [1901].

³ S. JUNGHANS, E. SANGMEISTER u. M. SCHRÖDER, Metallanalysen kupferzeitlicher und frühbronzezeitlicher Bodenfunde aus Europa, Berlin 1960.

⁴ M. BRANDENSTEIN u. E. SCHROLL, Archaeologia Austriaca, Beiheft 3, 116 [1958].



stimmten Herkunftsort eindeutig auszuschließen, hingegen ist es viel schwieriger, den Herkunftsort eindeutig zu beweisen. Eine bessere Definition des Herkunftsortes ist durch die Kombination der Isotopenmethode mit der Spurenelementmethode zu erwarten.

Für unsere Untersuchungen haben wir vor allem Bleirohre und Bleibarren verwendet, die in größeren Mengen vorhanden sind. Damit wird die Wahrscheinlichkeit herabgesetzt, daß die untersuchte Bleiprobe durch Wiederaufschmelzen von Blei gemischter Herkunft gewonnen wurde. Die Schmelzöfen aus römischer Zeit in der Nähe von Bleierzvorkommen lassen darauf schließen, daß das Blei im allgemeinen an Ort und Stelle verhüttet wurde. Somit erscheint eine Mischung von Blei mit verschiedenen Isotopenverhältnissen bei Erzeugnissen, die serienmäßig hergestellt wurden, im allgemeinen ausgeschlossen. Man kann daher hoffen, daß das Blei in Bleirohren und Bleibarren prinzipiell mit dem Blei einer größeren Lagerstätte identifiziert werden kann.

Proben

Die folgenden Proben standen für unsere Untersuchungen zur Verfügung:

1. Römisches Bleirohr von Aventicum (Avenches, VD, Schweiz); das Alter wird auf etwa 150 n. Chr. geschätzt⁵. Quelle: Dr. G. TH. SCHWARZ, Murten.
2. Römisches Bleirohr von Augusta Raurica (Augst, BL, Schweiz); Quelle: Museum Augst, vermittelt durch G. TH. SCHWARZ.
3. Römisches Bleirohr von Castrum Eburodunense (Yverdon, VD, Schweiz); Fragment aus den Ausgrabungen von Castrum 1906⁶. Quelle: Prof. LÉO MICHAUD, Musée du Vieil-Yverdon.
4. Römisches Bleirohr von Toffen (Bodenacker), BE, Schweiz; Inv. Nr. 40 188. Aus einer römischen Villa (zweite Hälfte 2. Jhdts. n. Chr.)⁷. Quelle: H. GRÜTTER, Historisches Museum Bern.
5. Römisches Bleirohr von Herculaneum (Italien); die Probe muß aus der Zeit vor 79 n. Chr. stammen (Untergang von Herculaneum). Quelle: Dr. BRUNO DE NISCO, Napoli.
6. Römisches Bleirohr vom Magdalenberg, Kärnten, Österreich; Fragmente eines Wasserleitungsrohres aus der Zeit um Chr. Geburt, nach EGGER von Aquileia geliefert⁸. In der römischen Zeit und

auch früher wurde allerdings auch schon in Kärnten an verschiedenen Stellen Blei gewonnen^{8, 9, 10}. Quelle: Prof. Dr. R. EGGER, Wien.

7. Römisches Bleirohr von Conimbriga (nahe Coimbra, Portugal); an der gleichen Probe wurden von H. DE CARVALHO chemische Analysen ausgeführt¹¹. Quelle: Prof. Dr. A. HERCULANO DE CARVALHO, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
8. Römisches Bleirohr von Caldas de Monchique, Algarve, Portugal; chemische Analysen von dieser Probe wurden von H. DE CARVALHO publiziert¹². Quelle: Prof. Dr. A. HERCULANO DE CARVALHO, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
9. Römischer Bleibarren von Arbon, TG, Schweiz; 145 kg, gefunden 1952¹³. Es wird angenommen, daß dieser Barren aus einer Bleigießerei in der Nähe der Rheingrenze von Niedergermanien stammt. Die diesem Gebiet am nächsten liegenden Bleiglanzvorkommen, die zu dieser Zeit Blei in größeren Mengen lieferten, dürften in der Eifel gelegen sein. Der Barren wird in die Zeit zwischen 70–100 n. Chr. datiert¹⁴. Quelle: A. HARTMEIER, Historisches Museum, Arbon.
10. Römischer Bleibarren von Basel, Schweiz; Inv. Nr. 1905.6636 a. 1653 gefunden, 33 kg. Es wurde die Annahme geäußert, der Barren sei auf dem Wasserwege aus Gallien oder Spanien nach Basel gelangt^{2, 15}. Quelle: Prof. Dr. M. REINHARDT, Historisches Museum, Basel.

Bei allen Proben konnten Stücke verwendet werden, die noch in metallischer Form vorlagen. Die Oberflächenschichten wurden sorgfältig entfernt. Bei den Bleirohren wurden die Proben immer aus der eigentlichen Wand entnommen, in angemessenem Abstand von Naht- und Ansatzstellen und Ausbesserungen. Hierdurch konnten Verunreinigungen, insbesondere durch Lote, ausgeschlossen werden. Am Bleirohr von Conimbriga wurde durch eine chemische Analyse gezeigt, daß höchstwahrscheinlich keine Lote verwendet worden sind¹¹. Wir selbst haben mit der *Elektronen-Mikrosonde* ein Nahtstück des Bleirohres von Aventicum untersucht und keinen Unterschied in der chemischen Zusammensetzung gegenüber dem Wandmaterial gefunden.

Meßergebnisse

Das Blei wurde durch mehrfache Extraktion mit Dithizon abgetrennt. Die Isotopenverhältnisse wur-

⁵ G. TH. SCHWARZ, persönliche Mitteilung 1965.

⁶ L. MICHAUD, briefliche Mitteilung 1966.

⁷ H. GRÜTTER, persönliche Mitteilung 1966.

⁸ R. EGGER, briefliche Mitteilung 1957.

⁹ H. WIESSNER, Carinthia I 144, 547 [1954].

¹⁰ H. VETTERS, persönliche Mitteilung.

¹¹ A. H. DE CARVALHO, persönliche Mitteilung 1965.

¹² A. H. DE CARVALHO, Rev. Port. Quim. 6, (1), 35 [1964].

¹³ O. MEYER-BOULENAZ, Ur-Schweiz 16, (3), 51 [1952].

¹⁴ G. C. WHITTICK, Ur-Schweiz 29, (1), 17 [1965].

¹⁵ Ur-Schweiz 16, (3), 53 [1952].

den mit einem Massenspektrometer (Atlas CH 4) mit Einbündchen-Thermionenquelle bestimmt. Der Ionennachweis erfolgte mittels Multiplier. Die Massendiskrimination des Multipliers ist bei den angegebenen Resultaten korrigiert. 5–20 μg Blei wurden als Bleinitrat unter Zugabe von Borsäure analysiert. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengestellt. Jedes Isotopenverhältnis wurde etwa 60–120-mal abgelesen. Beim Verhältnis $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$ entspricht

	$\text{Pb}^{204}/\text{Pb}^{206}$ $\times 100$	$\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$ $\times 100$	$\text{Pb}^{208}/\text{Pb}^{206}$ $\times 100$
<i>Bleiglanz</i> Bleiberg, Kärnten	5.44 ± 0.03 5.43 ± 0.02 5.425 ± 0.02 5.41 ± 0.03	85.4 ± 0.1 85.55 ± 0.2 85.35 ± 0.1 85.45 ± 0.1	210.2 ± 0.5 210.7 ± 1.0 210.1 ± 0.5 210.4 ± 0.5
<i>Römische Bleirohre</i>			
Aventicum	5.44 ± 0.02 5.435 ± 0.02	85.2 ± 0.1 85.0 ± 0.2	210.0 ± 0.8 209.0 ± 0.8
Augusta	5.425 ± 0.03	85.0 ± 0.2	209.5 ± 1.0
Raurica	5.41 ± 0.04 5.39 ± 0.03	85.1 ± 0.15 85.1 ± 0.15	210.5 ± 0.8 209.7 ± 0.7
Castrum Ebu- rodunense	5.40 ± 0.02	85.05 ± 0.1	208.7 ± 0.7
Toffen	5.37 ± 0.03	84.85 ± 0.1	208.7 ± 0.6
Herculanum	5.42 ± 0.02 5.37 ± 0.05	85.05 ± 0.2 84.9 ± 0.2	210.0 ± 0.6 210.2 ± 0.8
Magdalens- berg	5.31 ± 0.02	83.95 ± 0.1	209.2 ± 0.5
Conimbriga	5.455 ± 0.02	86.05 ± 0.1	212.2 ± 0.5
Caldas de	5.43 ± 0.03	85.45 ± 0.1	210.2 ± 0.8
Monchique	5.43 ± 0.03	85.35 ± 0.2	210.1 ± 0.8
<i>Römische Bleibarren</i>			
Arbon	5.415 ± 0.03 5.40 ± 0.03	84.85 ± 0.1 84.9 ± 0.1	209.2 ± 0.5 209.4 ± 0.7
Basel	5.31 ± 0.02	83.75 ± 0.15	208.7 ± 0.7

Tab. 1. Isotopenverhältnisse des Bleis in römischen Bleiprobe. Die Mehrfachbestimmungen sind wiederholte massenspektrometrische Analysen derselben Bleilösung. Zum Vergleich wurden die Isotopenverhältnisse des Bleis aus Bleivor-kommen von Bleiberg wiederholt bestimmt.

der angegebene Fehler dem dreifachen mittleren quadratischen Fehler des Mittelwertes. Es wird aber nie ein kleinerer Fehler als 0,1 in Tabelle 1 angegeben. Bei den Verhältnissen $\text{Pb}^{204}/\text{Pb}^{206}$ und $\text{Pb}^{208}/\text{Pb}^{206}$ wurden systematische zeitliche Variationen während des Verlaufes der Messung beobachtet, die auf eine Isotopenanreicherung bei der Verdampfung zurückzuführen sind. Dies ergibt einen weiteren

Beitrag zum Fehler, dem bei den Angaben in Tab. 1 Rechnung getragen wurde. Unsere Fehler müssen nach dem Gesagten als Relativfehler betrachtet werden.

Man erkennt, daß die Ergebnisse der Mehrfachbestimmungen alle innerhalb der Fehlergrenzen übereinstimmen. Um unsere Resultate auch mit anderen Arbeiten vergleichen zu können, wurde häufig eine Probe des Bleiglanzes von Bleiberg analysiert, der schon früher in Bern als Standard benutzt wurde^{16, 17}. Die Übereinstimmung mit den früheren Resultaten ist bei den Verhältnissen $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$ und $\text{Pb}^{208}/\text{Pb}^{206}$ sehr gut^{16, 17, 18}. Beim Verhältnis $\text{Pb}^{204}/\text{Pb}^{206}$ gibt es vielleicht eine geringe systematische Abweichung. Diese ist jedoch für unsere Diskussion, die sich ausschließlich auf die Verhältnisse $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$ und $\text{Pb}^{208}/\text{Pb}^{206}$ stützt, ohne Bedeutung.

Aus Tab. 1 ist zu ersehen, daß schon bei der relativ geringen Zahl der untersuchten Bleiprobe und trotz der Beschränkung auf den europäischen Kontinent erhebliche Unterschiede in den Isotopenverhältnissen auftreten. Beim Verhältnis $\text{Pb}^{207}/\text{Pb}^{206}$ übertreffen die Unterschiede zwischen den verschiedenen Proben die Fehlergrenzen zum Teil um das Zwanzigfache. Damit ist eindeutig gezeigt, daß die Bleiisotopenverhältnisse als „tracer“ für die Herkunft von historischen Bleigegegenständen verwendbar sind, vgl. auch WAMPLER und BRILL^{19a}.

Bleibergbau zu römischer Zeit

Die grundlegenden Untersuchungen von GOWLAND² und DAVIES¹⁹ haben gezeigt, daß die Römer vor allem in England, Spanien, Sardinien und Deutschland Bleierz abgebaut haben. Hier seien einige Tatsachen zusammengestellt, die für die Diskussion unserer Isotopenanalysen von Bedeutung sind.

Es ist bekannt, daß seit dem 1. Jhdt. n. Chr. aus England Blei auf den Kontinent geliefert wurde. Die Bedeutung dieses Landes für die römische Bleiindustrie wird durch die vielen Funde von Bleibarren unterstrichen. Die wichtigsten römischen Abbaustellen in England waren die folgenden²:

1. Mendip Hills, Somerset; die frühesten hier gefundenen Bleibarren tragen den Namen des Britannicus (44–49 n. Chr.).

¹⁶ N. GRÖGLER, M. GRÜNENFELDER u. E. SCHROLL, *Anzeiger math.-naturw. Kl. d. Österr. Akad. Wiss. Wien* **1961**, (Nr. 9), S. 106.

¹⁷ N. GRÖGLER, M. GRÜNENFELDER u. E. SCHROLL, *Tschermaks Min. Petr. Mitt.* **10** (1–4), 586 [1965].

¹⁸ P. EBERHARDT, J. GEISS u. F. G. HOUTERMANS, *Z. Phys.* **141**, 91 [1955].

¹⁹ O. DAVIES, *Roman Mines in Europe*, Oxford 1935.

^{19a} J. M. WAMPLER u. R. H. BRILL, *Trans. Am. Geophys. Union* **45** (1), 109, March 1964.

2. Bezirk von Stiper Stones, Shropshire; alle Bleibarren tragen den Namen des Kaisers Hadrian (117–138 n. Chr.).
3. Hügelgebiet von North Derbyshire; Inschriften ebenfalls Hadrian.
4. Umgebung von Holywell, Flintshire; früheste Inschriften auf den Bleibarren geben den Namen Nero (59 n. Chr.).

Als Folge des 2. Punischen Krieges mußten die Phönizier die reichen Bleibergwerke in *Spanien* den Römern überlassen². Die spanischen Bleiminen waren bis zur Entdeckung der Vorkommen in England für die Phönizier und Römer die wertvollsten. Wichtig waren vor allem die Lagerstätten im Süden des Landes, in den Provinzen Murcia (Carthagera), Almeria, Jaen (Linares und La Carolina) und Huelva (Rio Tinto)².

Am Ende des 1. Punischen Krieges (241 v. Chr.) kamen die Bleiminen von *Sardinien*, die bereits von den Phöniziern ausgebeutet worden waren, in den Besitz der Römer². Daneben wurden von den Römern in *Italien* noch auf Sizilien, Elba und Ischia Bleierze abgebaut¹⁹.

In *Deutschland* haben die Römer im Gebiet der Eifel sowie in den Tälern der Lahn und der Sieg Blei gewonnen. Erwähnt werden auch die Vorkommen von Wiesloch bei Heidelberg und Uckerath im Siebengebirge^{2, 19, 20, 21}. Der Bleibergbau in Deutschland hat aber offenbar zu römischer Zeit eine geringere Bedeutung gehabt als derjenige in England.

Diskussion der Resultate

Im folgenden werden die gemessenen Isotopenverhältnisse in den römischen Bleiprobe mit denen aus Bleierzlagerstätten verglichen, die für die Herkunft in Frage kommen. Für den Vergleich verwenden wir nur die Verhältnisse Pb^{207}/Pb^{206} und Pb^{208}/Pb^{206} , da beim Verhältnis Pb^{204}/Pb^{206} die Meßfehler größer sind und außerdem systematische Unterschiede zwischen den Ergebnissen verschiedener Laboratorien festgestellt wurden. Selbst wenn das Verhältnis Pb^{204}/Pb^{206} genauer bekannt wäre, so würde doch nicht wesentlich an Information gewonnen, da die Variationen des Verhältnisses Pb^{204}/Pb^{206} mit denen der Verhältnisse Pb^{207}/Pb^{206} und Pb^{208}/Pb^{206} korreliert sind.

²⁰ H. v. PETRIKOVITS, *Erzmetall* 11, (12), 594 [1958].

²¹ H. v. PETRIKOVITS, *Das römische Rheinland*, Westdeutscher Verlag, Köln 1960.

In Tab. 2 sind die römischen Bleiprobe aus der *Schweiz* mit den als Quellen in Frage kommenden deutschen und englischen Bleilagerstätten verglichen. Mit Ausnahme des Bleibarrrens von Basel zeigen alle römischen Bleiprobe Isotopenverhältnisse, wie sie in vielen Lagerstätten Mitteleuropas und Englands vorkommen. Daher sind in diesen Fällen nur relativ allgemeine Aussagen über den Herkunftsort möglich.

	Pb^{207}/Pb^{206} × 100	Pb^{208}/Pb^{206} × 100	Ref.
<i>Römische Bleiprobe aus der Schweiz</i>			
Aventicum	85.2 ± 0.1	209.5 ± 0.6	a
Augusta Raurica	85.1 ± 0.1	209.9 ± 0.6	a
Castrum Eburonunense	85.05 ± 0.1	208.7 ± 0.5	a
Toffen	84.85 ± 0.1	208.7 ± 0.6	a
Arbon	84.9 ± 0.1	209.3 ± 0.5	a
Basel	83.75 ± 0.15	208.7 ± 0.7	a
<i>Bleierze aus England</i>			
Mendip Hills, Somerset*	85.0 ± 0.2	208.9 ± 0.4	b
Shelve, Shropshire	84.9 ± 0.3	208.5 ± 0.7	b
Southern Pennines, Derbyshire*	84.5 ± 0.2	207.8 ± 0.6	b
Halkyn, Flintshire	84.4 ± 0.3	208.7 ± 0.4	b
North Wales*	85.9 ± 0.3	210.2 ± 1.0	b
Northern Pennines*	85.25 ± 0.15	209.2 ± 0.8	b
<i>Bleierze aus Deutschland</i>			
Eifel*	85.1 ± 0.1	209.2 ± 0.5	c, d, e
Siegerland*	85.4 ± 0.1	209.1 ± 0.4	f, e
Lahngebiet*	85.7 ± 0.15	209.5 ± 0.8	c, f, e
Wiesloch b. Heidelberg*	83.65 ± 0.2	207.8 ± 0.8	c, e
Aachener Bezirk*	85.1 ± 0.1	208.1 ± 0.3	f, e

^a Diese Arbeit

^b MOORBATH²²

^c GEISS²³

^d EHRENBURG-MÜRTZ²⁴

^e CAHEN-JEDWAB²⁵

^f EHRENBURG-HORLITZ²⁶

* Mittelwerte aus mehreren Lagerstätten oder Gruben des Gebietes. Die Fehler geben in diesen Fällen die beobachteten Variationen an.

Tab. 2. Vergleich zwischen Pb-Isotopenverhältnissen von römischen Bleirohren und Bleibarren aus der Schweiz und solchen aus Bleiglänzlagerstätten, die als Herkunftsort in Frage kommen.

Wie oben erwähnt nimmt WHITTICK¹⁴ für die Herkunft des *Arboner Bleibarrrens* das Eifelgebiet an. Die Übereinstimmung in den Isotopenverhältnissen scheint diese Hypothese zu unterstützen. Andererseits kommen aber auch die sehr bedeutenden englischen Lagerstätten von Somerset und Shropshire in Frage. Die anderen in Tabelle 2 aufgeführten Erzvorkommen in England und Deutschland scheinen auf Grund der vorliegenden Isotopenbestimmungen als Herkunftsort für den Bleibarren von Arbon ausgeschlossen.

Das Pb^{207}/Pb^{206} -Verhältnis des *Bleibarrrens von Basel* unterscheidet sich recht stark von denen der

anderen schweizerischen Funde. Ein derartig niedriges Verhältnis ist in europäischen Lagerstätten bisher nur selten gefunden worden. Aus diesem Grunde kann die Herkunft des Basler Bleibarrens relativ scharf eingegrenzt werden. Nach GOWLAND² könnte der Barren aus dem deutschen Bergbaubezirk den Rhein heraufgebracht worden sein. Auf Grund der Isotopenverhältnisse käme tatsächlich die Lagerstätte von Wiesloch bei Heidelberg in Frage, die auch schon von den Römern abgebaut wurde. Der Basler Bleibarren erinnert an die Form eines in Spanien gefundenen Barrens, während er sich von denen aus England unterscheidet². Die Isotopenverhältnisse aller bisher gemessenen englischen Bleilagerstätten sind tatsächlich stark verschieden von denen des Basler Bleibarrens, so daß mit der Isotopenmethode England als Herkunftsort ausgeschlossen werden kann. In einer neueren Arbeit¹⁵ wird angenommen, daß der Barren auf dem Wasserwege aus Gallien oder Spanien nach Basel gelangte. Nach unseren Untersuchungen scheint eine Herkunft aus Spanien recht unwahrscheinlich zu sein. Eine Herkunft aus Gallien können wir zunächst nicht ausschließen, da

	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶ × 100	Pb ²⁰⁸ /Pb ²⁰⁶ × 100	Ref.
<i>Römische Bleiprobe aus Portugal</i>			
Conimbriga	86.05 ± 0.1	212.2 ± 0.5	a
Caldas de Monchique	85.40 ± 0.1	210.2 ± 0.6	a
<i>Bleierz aus Spanien</i>			
Province Jaen* (La Carolina)	85.69	211.6	b
Province Huelva (Rio Tinto)	85.32	210.2	b
Hornachuelos (Cordoba)	87.17	210.8	c
Barcelona	85.0 ± 0.2	209.5 ± 0.6	d

^a Diese Arbeit

^b Lamont Geol. Observatory, Columbia University²⁷

^c Geophysics Laboratory, University of Toronto²⁸

^d EHRENBURG-HORLITZ²⁶

* Mittelwerte aus mehreren Lagerstätten oder Gruben des Gebietes. Die Fehler geben in diesen Fällen die beobachteten Variationen an.

Tab. 3. Vergleich zwischen römischen Bleirohren aus Portugal und den Bleierzvorkommen der Iberischen Halbinsel, deren Isotopenverhältnisse bisher gemessen worden sind.

aus diesem Gebiet bisher nur wenige Isotopenanalysen zur Verfügung stehen.

Die beiden römischen Bleiprobe aus Portugal (Tab. 3) weisen verschiedene Isotopenverhältnisse auf. Wegen der großen Bedeutung der spanischen Bleivorkommen für die römische Bleiproduktion² ist es am naheliegendsten, die Isotopenverhältnisse des Bleis der spanischen Erzprovinzen zum Vergleich heranzuziehen. Man erkennt, daß die Pb-Isotopenverhältnisse des Rohres Caldas de Monchique aus der portugiesischen Südprowinz Algarve sehr gut mit denen der großen Erzvorkommen von Rio Tinto in der benachbarten spanischen Provinz Huelva übereinstimmen.

	Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶ × 100	Pb ²⁰⁸ /Pb ²⁰⁶ × 100	Ref.
<i>Römische Bleiprobe aus Österreich und Italien</i>			
Magdalensberg	83.95 ± 0.1	209.2 ± 0.5	a
Herculanum	85.0 ± 0.15	210.1 ± 0.5	a
<i>Bleierz aus Italien</i>			
Forio, Isola d'Ischia	83.1 ± 0.6	207.6 ± 0.4	b
Monte Ponì, Sardinien Nr. 1	85.55 ± 0.15	210.5 ± 0.8	b
Monte Ponì, Sardinien Nr. 2	87.7 ± 0.1	212.9 ± 0.6	b
<i>Bleierz aus Griechenland und Jugoslawien</i>			
Laurium	83.7	206.0	c
Trepca	83.85 ± 0.2	208.0 ± 0.6	d
Raibl	85.55 ± 0.2	212.4 ± 0.5	e
<i>Bleierz aus Österreich</i>			
Bleiberg	85.45 ± 0.2	210.4 ± 0.3	a
Hüttenberg	83.65 ± 0.2	207.3 ± 0.5	e
Rade b. Keutschach	84.55 ± 0.2	210.2 ± 0.5	e
Ponfeld	84.9 ± 0.2	211.3 ± 0.5	f
Jauken	85.4 ± 0.2	211.3 ± 0.5	e
Moosburg	87.55 ± 0.2	213.1 ± 0.5	e
Meiselding	87.25 ± 0.1	214.2 ± 0.3	f

^a Diese Arbeit

^b EBERHARDT, GEISS, HOUTERMANS¹⁸

^c Geophysics Laboratory, University of Toronto²⁸

^d EBERHARDT, GEISS, HOUTERMANS, SIGNER²⁹

^e GRÖGLER, GRÜNENFELDER, SCHROLL¹⁶

^f GRÖGLER, GRÜNENFELDER, SCHROLL¹⁷

Tab. 4. Vergleich der Pb-Isotopenverhältnisse der Bleirohre vom Magdalensberg (Kärnten) und von Herculanum mit denen von österreichischen, italienischen, griechischen und jugoslawischen Erzvorkommen.

²² S. MOORBATH, Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, Math.-Phys. Sci. (No. 1042), **254**, 295 [1962].

²³ J. GEISS, Z. Naturforsch. **9a**, 218 [1954].

²⁴ H. FR. EHRENBURG u. H. J. MÜRTZ, Z. Naturforsch. **13a**, 854 [1958].

²⁵ L. CAHEN u. J. JEDWAB, Z. deutsche Geol. Ges. **110**, 474 [1958].

²⁶ H. FR. EHRENBURG u. G. HORLITZ, Z. Naturforsch. **9a**, 951 [1954].

²⁷ Analyse aus dem Lamont Geological Observatory, Columbia University; vgl.: R. D. RUSSELL u. R. M. FARQUHAR, Lead Isotopes in Geology, Interscience Publishers, New York 1960. Fehlerangaben liegen nicht vor.

²⁸ Analyse aus dem Geophysics Laboratory, University of Toronto; vgl.: R. D. RUSSELL u. R. M. FARQUHAR, Lead Isotopes in Geology, Interscience Publishers, New York 1960. Fehlerangaben liegen nicht vor.

²⁹ P. EBERHARDT, J. GEISS, F. G. HOUTERMANS u. P. SIGNER, Geol. Rundschau **52**, 836 [1962].

Das Bleirohr von Conimbriga weist relativ hohe Pb^{207}/Pb^{206} - und Pb^{208}/Pb^{206} -Verhältnisse auf. Es sollte deshalb möglich sein, recht eindeutige Angaben über die Herkunft dieses Materials zu machen, wenn Isotopenverhältnisse aus einer größeren Zahl von Bleierzlagerstätten der Iberischen Halbinsel bekannt sind.

In Tabelle 4 werden die *römischen Bleiprobe*n vom Magdalensberg und von Herculaneum mit Bleierzen aus Italien, Österreich, Griechenland und Jugoslawien verglichen. Über die Herkunft der Probe von Herculaneum läßt sich bisher wenig aussagen. Immerhin erscheint Ischia, das am nächsten gelegene von den Römern abgebaute Bleivorkommen¹⁹, als Herkunftsort ausgeschlossen. Um weitere Aussagen machen zu können, müßten die Isotopenverhältnisse von einer weiteren Zahl von italienischen Bleierzlagerstätten bestimmt werden. Insbesondere wäre es wichtig, die Vorkommen von Sardinien näher zu untersuchen. Wir vermuten, daß der große Unterschied in den Isotopenverhältnissen der Proben Monte Poni 1 und 2 auf einer Verwechslung beruht. Sollte sich zeigen, daß das sardinische Blei allgemein ähnlich hohe Pb^{207}/Pb^{206} - und Pb^{208}/Pb^{206} -Verhältnisse hat wie Monte Poni 2, so hätten wir hier einen guten Tracer, der in römischen Bleiproben leicht identifizierbar sein sollte. Derartig hohe Pb^{207}/Pb^{206} - und Pb^{208}/Pb^{206} -Verhältnisse sind in wichtigen Lagerstätten höchstens noch auf der Iberischen Halbinsel oder in Slowenien zu erwarten.

Das Bleirohr vom Magdalensberg hat wieder ein sehr niedriges Pb^{207}/Pb^{206} -Verhältnis. Hierdurch wird der größte Teil der österreichischen und jugoslawischen Bleivorkommen ausgeschlossen, darunter auch Bleiberg und Raibl, die allerdings zur römischen Zeit auch nicht ausgebeutet worden sein sollen. Das Bleirohr vom Magdalensberg kann nicht von dem Bleierz von Jauken herkommen, das in römischer Zeit abgebaut wurde^{10,8}. Ein möglicher Herkunftsort ist Trepca, es ist aber nicht bekannt, ob diese große Lagerstätte zu römischer Zeit abgebaut oder

aber das Blei über Aquileia eingeführt wurde⁸. In diesem Falle ist es zur Zeit nicht möglich, Näheres über den Ursprungsort zu sagen.

Die hier diskutierten Beispiele zeigen, daß die Isotopenmethode in der Lage ist, einen wichtigen Beitrag zur Herkunftsfrage von römischen Bleiproben zu leisten. Um die Schlußfolgerungen verschärfen zu können, ist es notwendig, die Isotopenverhältnisse von weiteren Bleilagerstätten zu bestimmen, insbesondere von solchen, die in römischer Zeit abgebaut wurden. Auch eine Reduktion der Meßfehler etwa durch Verwendung einer Gasionenquelle mit Doppelauffänger würde eine Verbesserung ergeben. Die natürlichen Variationen innerhalb einer Lagerstätte oder Erzprovinz setzen dann allerdings der Sicherheit, mit der ein Blei erkannt werden kann, eine Grenze. Daher ist die Wahl einer geeigneten, der Methode angepaßten historischen Fragestellung wichtig. So lassen sich etwa Bleie kambrischen oder präkambrischen Modellalters sehr gut nachweisen, wie auch Bleie mit anormalem Isotopenverhältnis (J-Typen). Durch Kombination mit Spurenelementuntersuchungen und bei wohl definierter archäologischer Fragestellung sollte es möglich sein, mit der Isotopenmethode zu neuen Ergebnissen über Herkunftsorte und Handelswege zu gelangen.

Für die Überlassung von römischen Bleiproben sind wir Dr. G. TH. SCHWARZ (Murten), dem Museum Augst, Prof. L. MICHAUD (Yverdon), H. GRÜTTER (Bern), Dr. B. DE NISCO (Napoli), Prof. Dr. R. EGGER (Wien), Prof. Dr. A. H. DE CARVALHO (Lisboa), A. HARTMEIER (Arbon) und Prof. Dr. M. REINHARDT (Basel) zu großem Dank verpflichtet.

Dr. F. BEGEMANN und CARMEN GEISS danken wir für die Unterstützung bei der Probenbeschaffung, A. SCHALLER für die Mitwirkung bei den Messungen. Dr. P. EBERHARDT danken wir für seine Hilfsbereitschaft und für wertvolle Ratschläge.

Diese Arbeit wurde teilweise durch Mittel des Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung wissenschaftlicher Forschung unterstützt.