

Institut für Ur- und Frühgeschichte

Dr. Astrid Röpke

Feuernutzung – ein archäobotanischer und geoarchäologischer Ansatz

Wintersemester 2015/16

Universität zu Köln

## Feuer in der Metallverhüttung



Axel Berger

Matrikelnummer 554 9795

Student@Berger-Odenthal.De

Johann-Häck-Str. 14

51519 Odenthal-Heide

Tel: 0 21 74 / 74 39 67

Titelbild: Abladen von Feuerholz (Salbei, *Artemisia herba-alba*) zum Brotbacken. In ländlichen Regionen des Nahen Ostens wird Brot noch täglich in holzgefeuerten Erdöfen gebacken (Horne 1982, 10).



2016 – [axel.berger-odenthal.de](http://axel.berger-odenthal.de) – Axel Berger

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

**Sie dürfen: Teilen** – das Material in jedwedem Format oder Medium vervielfältigen und weiterverbreiten und **Bearbeiten** – das Material remixen, verändern und darauf aufbauen und zwar für beliebige Zwecke, sogar kommerziell. Der Lizenzgeber kann diese Freiheiten nicht widerrufen solange Sie sich an die Lizenzbedingungen halten.

**Unter folgenden Bedingungen:**

**Namensnennung** – Sie müssen angemessene Urheber- und Rechteangaben machen, einen Link zur Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden. Diese Angaben dürfen in jeder angemessenen Art und Weise gemacht werden, allerdings nicht so, dass der Eindruck entsteht, der Lizenzgeber unterstütze gerade Sie oder Ihre Nutzung besonders.

**Weitergabe unter gleichen Bedingungen** – Wenn Sie das Material remixen, verändern oder anderweitig direkt darauf aufbauen, dürfen Sie Ihre Beiträge nur unter derselben Lizenz wie das Original verbreiten.

**Keine weiteren Einschränkungen** – Sie dürfen keine zusätzlichen Klauseln oder technische Verfahren einsetzen, die anderen rechtlich irgendetwas untersagen, was die Lizenz erlaubt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kupfer, Zinn und Bronze</b>	<b>I</b>
<b>2</b>	<b>Woher kam das Zinn?</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Eisen – warum und welches?</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Energiebedarf und Umweltzerstörung</b>	<b>II</b>
4.1	Der Energiebedarf zur Verhüttung . . . . .	11
4.2	Das Angebot an Brennholz . . . . .	13
4.3	Résumé . . . . .	14
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>15</b>
<b>A</b>	<b>Tafeln</b>	<b>21</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Kupferverhüttung in Westeuropa und im Osten . . . . .	1
2	Die ersten Zinnbronzen . . . . .	3
3	Das reiche Zinnrevier am Viktoriasee . . . . .	4
4	Bleisotope des Zinnrings von Thermi . . . . .	5
5	Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm . . . . .	8
6	Der moderne Hochofenprozess . . . . .	9
7	Das Erzrevier von Kargaly . . . . .	12
8	Die Bergbauregion von Kargaly . . . . .	13

## Tafeln im Anhang

1	Rekonstruktion eines Reduziertiegels aus La Ceñuela . . . . .	21
2	Mikrosondenanalyse des Tiegels aus Villaviciosa de Odón . . . . .	22
3	Zusammenverhüttung von Kupfer- und Zinnerz . . . . .	23
4	Die Zinnerzvorkommen der alten Welt . . . . .	25
5	Die Bleisotope der Erzreviere der Welt . . . . .	26
6	Bleisotope der Zinnbarren von Uluburun und Haifa . . . . .	27
7	Die beiden Erzberge in Österreich . . . . .	28

## Tabellenverzeichnis

1	Röntgenfluoreszenzanalyse an Funden aus Villaviciosa de Odón . . . . .	2
2	Härtevergleich von Kupfer, Bronze und Eisen . . . . .	7
3	Mikrosondenanalyse der anhaftenden Schlacken . . . . .	22
4	Analyseergebnis des Kupfertropfens . . . . .	22
5	Analyseergebnisse einzelner Metallperlen . . . . .	24
6	Analyse ausgewählter Schlackeproben . . . . .	24

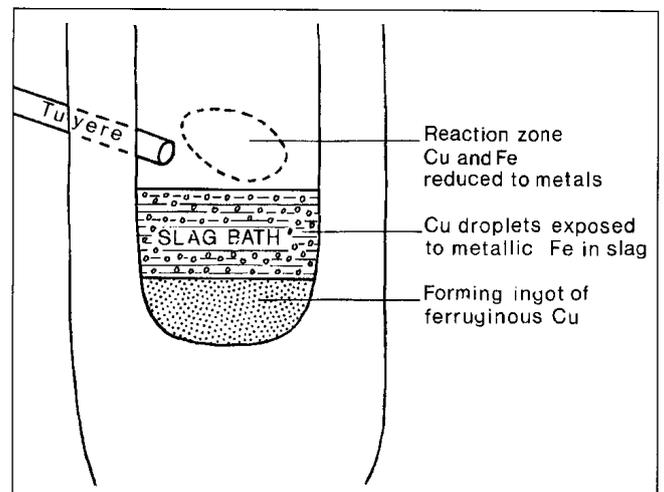
# I Kupfer, Zinn und Bronze

Kupfer ist ein sehr edles Metall und läßt sich schon in der schwach reduzierenden Atmosphäre einer offenen Grube verhütten. Dieses Verfahren ist sehr ineffizient, es verbraucht große Mengen Holzkohle und gewinnt nur rund ein Viertel des im Erz enthaltenen Kupfers. Dafür bleibt das Kupfer fast völlig frei von störenden unedlen Metallen wie Eisen, aber auch Zinn. Im Osten wurden die Gruben von viel effizienteren geschlossenen Öfen mit Schlackebildung abgelöst und dort das Eisen in einem zweiten Schritt an Luft beseitigt (Craddock 1993, 53; Abb. 1). Der Unterschied ist im Eisenrestgehalt leicht nachweisbar. Im Osten liegt er bei rund 0.5 %, im Westen mit unter 0.05 % bei einem Zehntel davon.

Als das oberflächennahe oxidische Erz verbraucht war, mußte das tiefer liegende sulfidische in einen zusätzlichen Schritt erst geröstet werden. Das heißt, der Schwefel wurde durch Erhitzen unter Luftzutritt als Schwefeldioxid ausgetrieben und das Sulfid in ein Oxid umgewandelt. Möglicherweise war das die Ursache



(a) Ringförmiger Tonherd in Los Millares. Bruchstücke von Kupfererz, Tropfen metallischen Kupfers und verschlackte Oberflächen beweisen die Nutzung für die Kupferverhüttung (Craddock 1999, 180).



(b) Ein effizienter stark reduzierender Verhüttungs-ofen mit Bildung von Schlacke und metallischem Eisen (Craddock 1993, 43).

**Abbildung 1:** Vergleich der Kupferverhüttung der späten Kupferzeit im westlichen Europa und im Osten (Craddock 1999).

## Feuer in der Metallverhüttung

NUM_ANALIS	TIPO	FE	NI	CU	ZN	AS	AG	SN	SB	PB
PA3046	Palmela arrowhead	0.04	nd	99.5	nd	0.20	0.017	0,004	0.154	nd
PA3047A	Metal drop	0.96	nd	96.0	nd	2.87	tr	0,17	nd	nd
PA3047	Smelting crucible	17.8	nd	65.3	nd	11.9	nd	5,08	nd	nd
PA3048	Smelting crucible	49.6	nd	24.4	nd	22.5	0.107	0,36	0.066	2.50

**Tabelle 1:** Röntgenfluoreszenzanalyse an Funden aus Villaviciosa de Odón, Madrid (Rovira 2003, 20).

für den Hiatus im 4. Jt. BC (Craddock 1999, 177; Kunst 2001, 69). Der Wiederaufschwung im Osten erfolgte gleichzeitig mit dem Beginn der Metallurgie auf der iberischen Halbinsel und in Britannien. Die dortigen, sehr einfachen Verfahren mit offenen Schalen (Tafel 1) führten zu schwankendem Luftzutritt und gleichzeitigem Rosten und Verhütten in einem Prozeß Rovira 2002.

Trotz des großen Zinnreichtums der Region und des Vorliegens von Mischergen erhielt man ein sehr reines, zinnfreies Kupfer. In den anhaftenden Resten eines Verhüttungstiegels aus Villaviciosa de Odón, Madrid, konnte Salvador Rovira (Rovira 2003) eine Schmelzperle aus reinem Kupfer bei gleichzeitig hohem Zinngehalt in der Schlacke nachweisen (Tab. 1, 3, 4; Tafel 2).

Ein Zusammenverhütten von Kupfer- und Zinnerz zu Bronze ist zwar auch in einer einfachen Grube möglich, führt aber zum Verlust von 89 % des Zinns (Tafel 3; Tab. 5, 6). Aus Erzen mit 270 g Kupfer- und 160 g Zinngehalt wurden 124 g Metall als kleine Perlen gewonnen, von dem beim Zusammenschmelzen noch einmal 10 % verlorengingen. Der resultierende Barren enthielt 16 % Zinn und 0.6 % Eisen. Es wurden also für die Kupferzeit typische 34 % des Kupfers aber nur 11 % des Zinns aus dem Erz gewonnen (Rovira 2009). Da die ersten Zinnbronzen nicht in zinnreichen Regionen sondern dort auftauchten, wo Zinn über große Entfernung importiert werden mußte, gibt es keinen Hinweis, daß ein so verlustreiches Verfahren jemals in größerem Maßstab angewandt wurde.

Wesentlich bessere Ergebnisse werden allerdings erzielt, wenn man Zinnerz unter reduzierenden Bedingungen zu flüssigem Kupfer hinzugibt. Sowohl Stannit  $\text{Cu}_2\text{SnFeS}_4$  als auch Kassiterit  $\text{SnO}_2$  sind möglich. Stannit ist dabei der einfachere und besser funktionierende Prozeß – wohl durch die Bildung einer Schlacke aus Eisen und dem immer in Spuren im Erz enthaltenen Sand –, führt aber zu einem deutlichen Eisenanteil, der in alten Zinnbronzen nicht gefunden wird. Vor der Erschöpfung der Vorkommen war Kassiterit als Zinnseife in Flüssen der Zinnregionen leicht zu gewinnen.

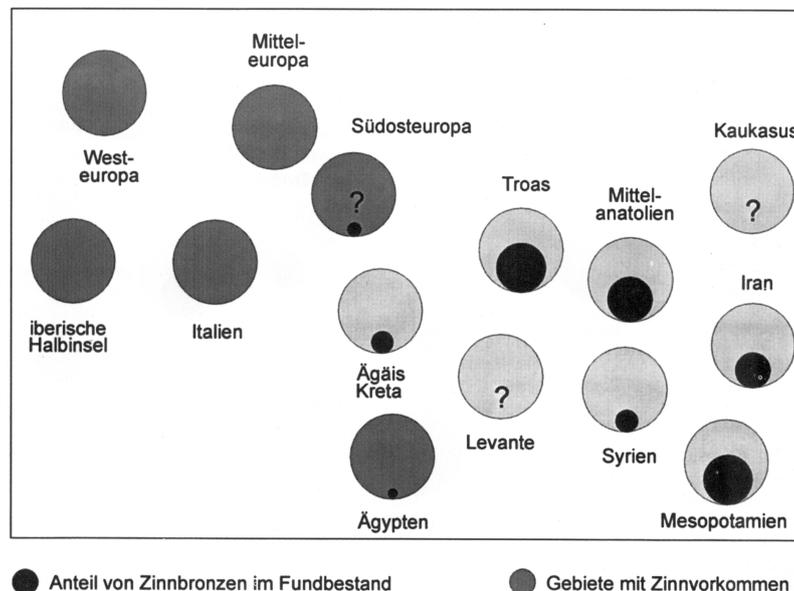
## 2 Woher kam das Zinn?

Die ersten echten Zinnbronzen traten nach der Mitte des 3. Jt. vC im vollkommen zinnfreien Großraum von Mesopotamien, Anatolien und Troja auf (Pernicka 1998) – nach manchen Quellen Tylecote 1991 auch schon in Britannien, was viele andere aber bestreiten (Craddock 1993, Craddock 1999, Kienlin 2010). Die Herkunft dieses ersten Zinns ist völlig unklar.

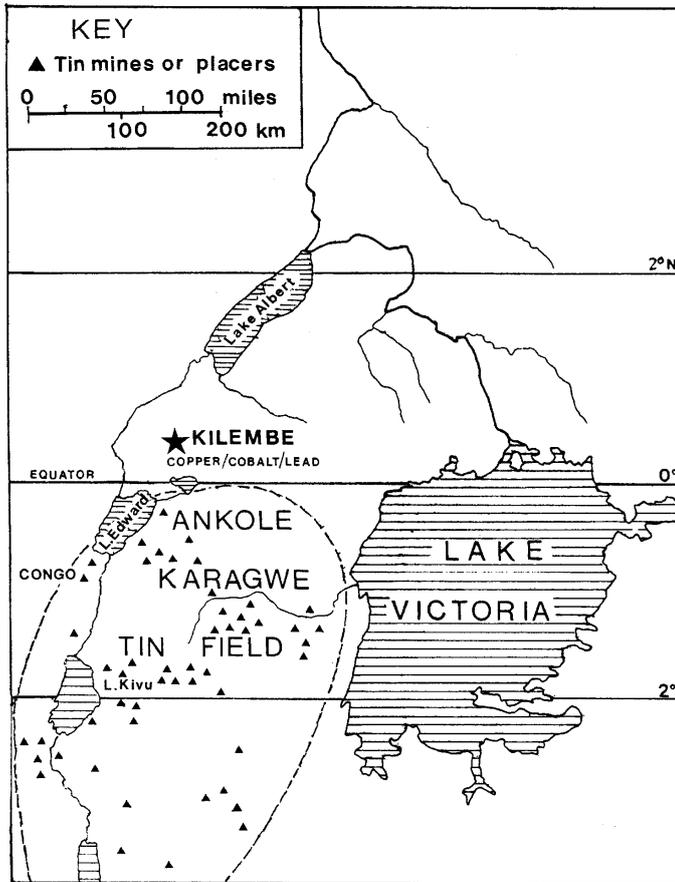
Zinn ist auf der Erde besonders ungleich verteilt und konzentriert sich in nur wenigen Regionen (Tafel 4). Der Westen scheidet, wenn es dort völlig unbekannt war, wohl aus. Im Osten, in Usbekistan, ist vor der Andronovokultur der mittleren Bronzezeit kein Bergbau und keine Metallurgie bekannt.

Auch die Form seiner Verwendung ist unbekannt. Für die mittlere und späte Bronzezeit wissen wir, daß für den Bronzeuß metallisches Zinn zu metallischem Kupfer hinzugefügt wurde, und finden aus dieser Zeit auch zahlreiche Zinnbarren. Möglicherweise diente anfangs aber nicht Zinn sondern Zinnseife als Legierungsmaterial. Der Assyriologe Muhly bestreitet das unter Verweis auf Schriftquellen mit verwendeten Mischungsverhältnissen von 1:6 und 1:8 (Muhly 1973, 116). Möglicherweise war ihm nicht bewußt, wie hoch der Anteil von Schwermetallen

**Abbildung 2:** Die ersten Zinnbronzen erscheinen vor 2200 vC ausschließlich in genau den Regionen, in denen es keinerlei Zinnvorkommen gibt (Pernicka 1998, 139).



## Feuer in der Metallverhüttung

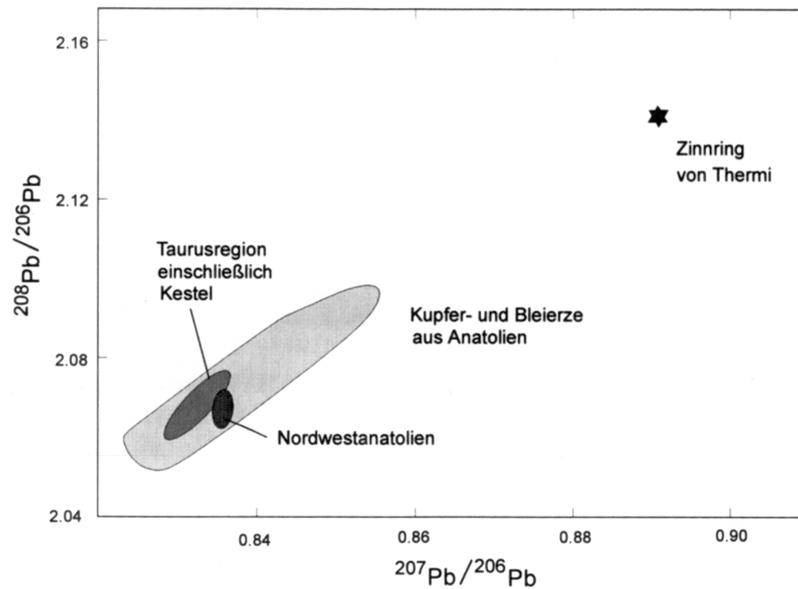


**Abbildung 3:** Das reiche Zinnrevier am Viktoriasee (Dayton 2003, 166).

in ihren Erzen ist. Das Zinn stellt beim Kassiterit ( $\text{SnO}_2$ ) zwar nur ein Drittel der Atome aber rund 79 % der Masse. Wendet man die o. g. Verhältnisse auf Kassiterit anstelle von metallischem Zinn an, so erhält man eine Bronze mit einem Zinnanteil von 10–13 %. Metallisches Zinn ist grundsätzlich einfacher zu gewinnen als Eisen, kommt aber vor dem 16. Jh. vC praktisch nicht vor.

Auf eine bisher vollkommen unbeachtete Zinnquelle weist der Geologe John Dayton hin, die sehr reichen und heute noch intensiv genutzten Quellen am Viktoriasee in Ostafrika. Ägypten hatte schon früh intensive Handelsbeziehungen in die Region und bezog von dort Elfenbein, Ebenholz, Leopardenfelle, Gold und Pygmäen. Als sehr spät, erst im Mittleren Reich, auch in Ägypten die Zinnbronze aufkam, dürfte es auch sein Zinn von dort bezogen haben. Sicher ist, daß das Zinn der Funde vor der Küste bei Haifa und vom Schiff von Uluburun von dort gekommen sein muß (Dayton 2003, Tafel 6). Das letztere wurde offenbar mit Blei aus Laurion gestreckt.

**Abbildung 4:** Das Bleisotopenverhältnis des Zinnrings von Thermi, des wohl ältesten untersuchten Zinngegenstandes aus der Phase II von Troja (Pernicka 1998, 144).



Das einzige untersuchte Stück reinen Zinns aus dem 3. Jt. vC dürfte der heute verschollene Zinnring von Thermi sein. Seine Bleisotope (Abb. 4) weisen auf das Gesteinsalter der Region um Joachimsthal in Böhmen.<sup>1</sup> Auch dort gibt es vor dem 18. Jh. vC noch keine Zinnbronze aber neuere Funde lassen eine vorher stets verneinte Zinngewinnung im bronzezeitlichen Böhmen als wahrscheinlich erscheinen (Bartelheim 1996). Für eine Zinnquelle im Norden spricht auch das Gefälle des Zinnreichtums. Der Anteil der frühen Bronzefunde nimmt von Troja nach Mesopotamien hin ab. Bei einem Zinnimport aus dem Osten wäre der entgegengesetzte Gradient zu erwarten.

<sup>1</sup> Offenbar hat Dayton zu seinem Beitrag von 2003 einen Satz von sechs detaillierten Tafeln eingereicht. Leider hat der Herausgeber davon lediglich die unskalierte Übersicht (Tafel 5) aufgenommen. Über die Lage von Kilembe und Laurion in Tafel 5 und Tafel 6 können wir die fehlende Skalierung aber grob abschätzen.



### 3 Eisen – warum und welches?

Einfach verhüttetes Eisen ist entweder wertloses, unbrauchbares Gußeisen oder nahezu kohlenstofffreies Schmiedeeisen. Mit Ausnahme vielleicht des äußerst aufwendig geschmiedeten Damaszenerstahls aus indischem Wootz<sup>2</sup> ist Eisen bis zur Entwicklung des Gußstahls an der Schwelle des 19. Jh. einer gut kaltverfestigten Bronze keineswegs überlegen (Tab. 2). Die Erzeugung von Stahl mit einem Kohlenstoffgehalt zwischen 0.4 % und 1.7 % konnte erst erlernt werden, nachdem Eisen schon verbreitet für einfache Werkzeuge Verwendung fand.

Im Übergang ersetzte Eisen die Bronze zuerst in Werkzeugen und erst später in Waffen, ein Hinweis, daß es als minderwertige Alternative und Ersatzwerkstoff angesehen wurde.<sup>3</sup> In der römischen Armee trugen die Offiziere noch Bronzeschwerter lange nachdem die einfachen Soldaten mit Eisenschwertern ausgerüstet waren. Eine Ausnahme bilden vielleicht Messer. Auch ohne die Härte guter Bronze verleihen mäßig aufgekohltem Stahl die eingelagerten harten Zementitlamellen überragende Schnitteigenschaften (Buchwald 2005, 68). Gute Messer sind heute, bei der ausschließlichen Verwendung minderwertigen rostfreien Stahls für Besteck, nahezu in Vergessenheit geraten.

Für den Wandel werden zwei Ursachen diskutiert. Die eine ist der hohe Holzbedarf bei der Verhüttung des räumlich konzentrierten Kupfers (Horne 1982) verglichen mit dem nur halb so großen Kohlebedarf bei der Verhüttung von Eisen<sup>4</sup>

**Tabelle 2:** Härtevergleich von Kupfer, Bronze und Eisen (Spindler 1971, 199).

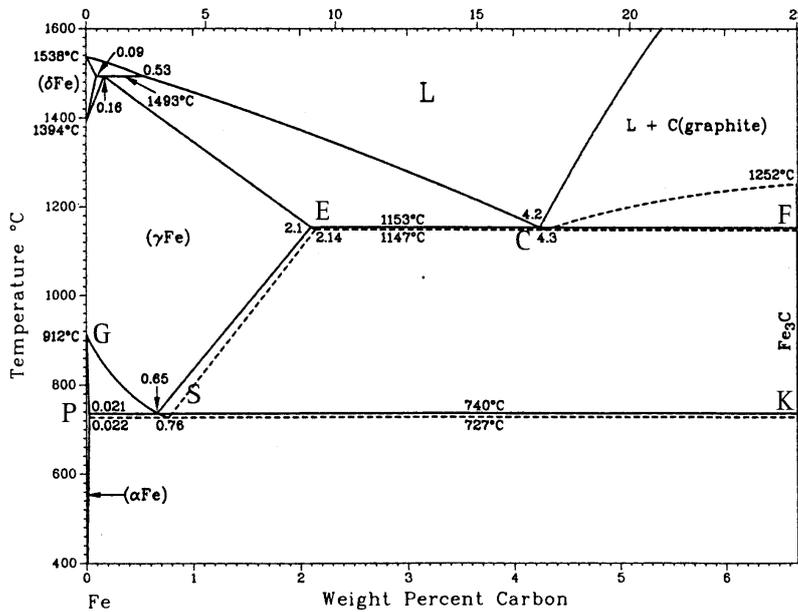
	Brinellhärte
Reines geglühtes Kupfer	40–50 kp/mm <sup>2</sup>
Kaltgeschmiedetes Kupfer mit 0,4 % Zinn	118 kp/mm <sup>2</sup>
Kaltgeschmiedetes Kupfer mit 5 % Zinn	203 kp/mm <sup>2</sup>
Kaltgeschmiedetes Kupfer mit 10 % Zinn	230 kp/mm <sup>2</sup>

Zum Vergleich sei angeführt, daß Schmiedeeisen eine Brinellhärte von 70–80 kp/mm<sup>2</sup>, ein geschmiedeter, nicht abgeschreckter Stahl mit 0,55 % Kohlenstoffgehalt eine Härte von 246 kp/mm<sup>2</sup> aufweist, also etwa soviel wie eine kaltgeschmiedete 10prozentige Zinnbronze.

<sup>2</sup> Es gibt Hinweise daß indischer Wootz über Unreinheiten des Erzes Vanadium als Legierungselement enthielt.

<sup>3</sup> Siehe dazu allerdings die gegenteilige Position von Vagn Buchwald (Buchwald 2005)

<sup>4</sup> Siehe aber unten den zusätzlichen Aufwand und die Verluste beim Ausschmieden der



**Abbildung 5:** Das Eisen-Kohlenstoff-Diagramm für Stahl und Gußeisen. Der niedrigste Schmelzpunkt von 1153 °C wird im Eutektikum bei einem Massenanteil von 4.2 % Kohlenstoff erreicht (Buchwald 2005, 64).

verbunden mit der viel gleichmäßigeren räumlichen Verteilung der Eisenerze. Der wahrscheinlichere Grund ist Rohstoffmangel. Zeitlich fällt der Übergang in einen Zusammenbruch der Handelsnetzwerke. Zinn ist wegen der ungleichmäßigeren Verteilung hier der wahrscheinlichere Auslöser als Kupfer (Cramer 1995).

Oft wird als Grund für seine späte Verwendung der hohe Schmelzpunkt des reinen Eisens von 1538 °C genannt. Das ist in mehrfacher Hinsicht falsch. Genau wie bereits weit unterhalb des Gefrierpunktes festes Salz festes Eis verflüssigt, muß auch Eisen nicht erst selbst schmelzen um mit Kohlenstoff flüssiges Gußeisen zu bilden. Dessen Schmelzpunkt liegt mit 1153 °C niedriger als der von Kupfer (1084 °C) oder Gold (1064 °C), die schon in der frühen Kupferzeit um 4.5 ka cal BC erreicht wurden<sup>5</sup> (Leusch 2015). Gußeisen ist brüchig, spröde und nicht schmiedbar. Deshalb wurde die Temperatur niedrig genug gehalten, daß nur die Schlacke flüssig wurde und abfloß und eine poröse Luppe aus Roheisen zurückblieb. Die Schlacke besteht zum größten Teil aus Fayalit (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>). Das Silizium stammt aus dem stets als Verunreinigung im Erz enthaltenem Sand<sup>6</sup> und ihr hoher Eisengehalt bindet große Teile des Metalls, so daß in der Regel nur rund

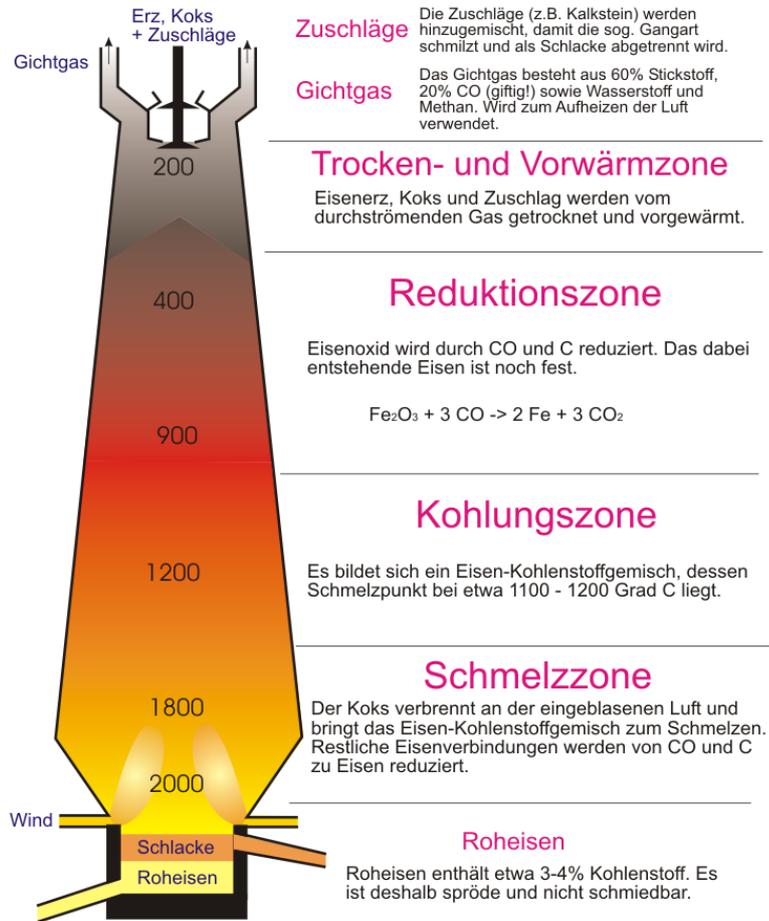
Schlacke.

<sup>5</sup> Es ist aufgrund der stark endothermen Boudouard-Reaktion allerdings schwerer, diese Temperaturen in stark reduzierender Atmosphäre zu erreichen als bei hohem Luftüberschuß

<sup>6</sup> Beim Feuerschweißen (engl. *forge welding*) in der Schmiede wird feiner Sand als Flußmittel zugegeben, um die Oxidhäute auf den Werkstücken als dünnflüssige Schlacke abzutransportieren.

### 3 Eisen – warum und welches?

**Abbildung 6:** Der moderne Hochofenprozess. Die eigentliche Reduktion findet bei Temperaturen unterhalb von 900 °C statt. In der Schmelzzone wird bei bis zu 1800 °C auch das restliche Eisen aus der Schlacke gewonnen und das Erz vollständig ausgenutzt. (Andreas Schmidt aus der deutschsprachigen Wikipedia).



ein Viertel des Erzgehaltes gewonnen werden kann.<sup>7</sup> Beim Reinigen der Luppe gehen noch einmal große Teile des Eisens als Schlacke verloren.

Noch in der Neuzeit galt die versehentliche Erzeugung von Gußeisen als Unfall und es wurde mit Bezeichnungen wie *Dreckfluß* und *Saueisen* versehen. Noch heute heißt das Roheisen aus dem Hochofen im Englischen „pig iron“. Seit dem 1. Jh. vC ist in China und seit dem 13. Jh. cE in Europa die Stahlerzeugung durch Entkohlen von Gußeisen bekannt (Killick 1996, 257). In der Mongolei wurde dennoch im Mittelalter und in Amerika noch im 19. Jh. cE zumindest für höherwertige Erzeugnisse Schmiedeeisen aus dem Rennofen bevorzugt (Gordon 1992, Park 2015).

Eine Besonderheit stellt neben dem indischen Wootz das *ferrum noricum* aus der römischen Provinz Noricum im heutigen Österreich dar. Der Erzberg bei

<sup>7</sup> Nach dem Aufkommen der ersten Hochöfen im 13. Jh. cE wurden eisenzeitliche Schlacken in großen Mengen als Rohmaterial genutzt.

## Feuer in der Metallverhüttung

Hüttenberg in Kärnten<sup>8</sup> (Tafel 7a) lieferte das Eisen für fast alle Schwerter der römischen Legionen. Keltische Schwerter der Zeit von 600 vC – 100 cE waren in der Regel weder aufgekohlt noch gehärtet und den römischen weit unterlegen (Buchwald 2005, 122). Die einzigartige Qualität des *ferrum noricum* war wohlbekannt und wurde von Ovid als selbst mit der Härte einer Frauenseele – Anaxaretes, als sie den Hirten Iphis abweist – vergleichbar beschrieben:

Saevior illa freto surgente cadentibus Haedis,  
durior et ferro, quod Noricus excoquit ignis,  
et saxo, quod adhuc vivum radice tenetur,  
spernit et inridet, factisque inmitibus addit  
verba superba ferox et spe quoque fraudat amantem.<sup>9</sup>

*Metamorphosen, XIV. Buch, 711–715*

Die besondere Qualität des Eisens rührt vom Gehalt an Mangan und der Phosphorarmut her (Buchwald 2005, Moshage 1960). Das Element Mangan ist heute ein wichtiges Legierungselement und die Voraussetzung für das Bessemerverfahren der Gußstahlerzeugung, wurde aber erst Ende des 18. Jh. entdeckt. Genau wie das Fahlerzkupfer der Frühbronzezeit wurde wohl auch *ferrum noricum* nicht als Legierung sondern als ein besonders hochwertiges Eisen verstanden

---

<sup>8</sup> Rund 60 km entfernt gibt es einen zweiten Erzberg bei Eisenerz, Steiermark (Tafel 7b), dessen gleich hochwertiges Erz aber nicht vor dem Mittelalter abgebaut wurde.

<sup>9</sup> Grimmiger noch als das steigende Meer vom Grunde des Hades, // hart selbst wie Eisen, in norischer Esse geschmiedet // oder Gestein, fest noch haftend an lebender Wurzel, // weist ihn höhnisch sie ab und gesellt hochmütige Worte // schnöde zu kränkendem Tun und benimmt dem Bewerber die Hoffnung. (modifiziert nach Gottwein)

## 4 Energiebedarf und Umweltzerstörung

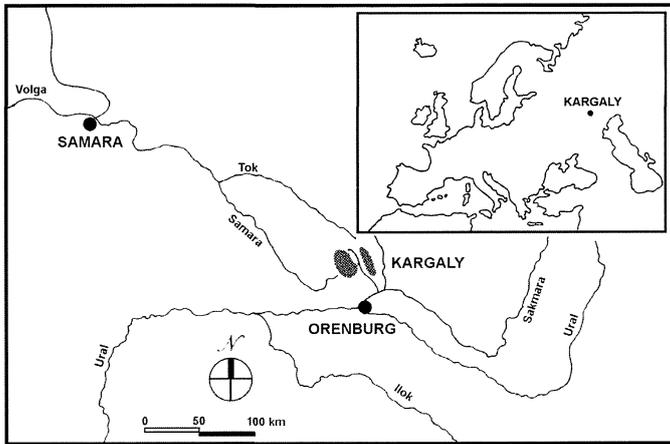
Schon länger gibt es in der Ur- und Frühgeschichte zahlreiche Untersuchungen über den Flächen- und Materialbedarf für Nahrungsmittel, Jagdwild, werkzeu-geeigneten Stein, Bauholz und Metallerze. Eine Frage wurde bis auf ganz wenige Ausnahmen bisher jedoch fast nie gestellt, die nach dem Energiebedarf. Dabei läßt sich nachweisen, daß jeder größere kulturelle Fortschritt mit einer deutlichen Vergrößerung des verfügbaren Energieangebotes einherging (Clark 2007, Cottrell 1955, Morris 2015, Moshage 1960). Diese waren die eigene körperliche Arbeit, Sklaven- und Zwangsarbeiterheere aus den Überschüssen der produzierenden Wirtschaft, Zugtiere, Wind- und Wasserkraft, Dampfkraft, die industrielle Revolution und zuletzt die Elektrizität und der Verbrennungsmotor. Die einzige Quelle neben der menschlichen Arbeit war für sehr lange Zeit das Feuer, ohne das es keine Metallverarbeitung gäbe.

### 4.1 Der Energiebedarf zur Verhüttung

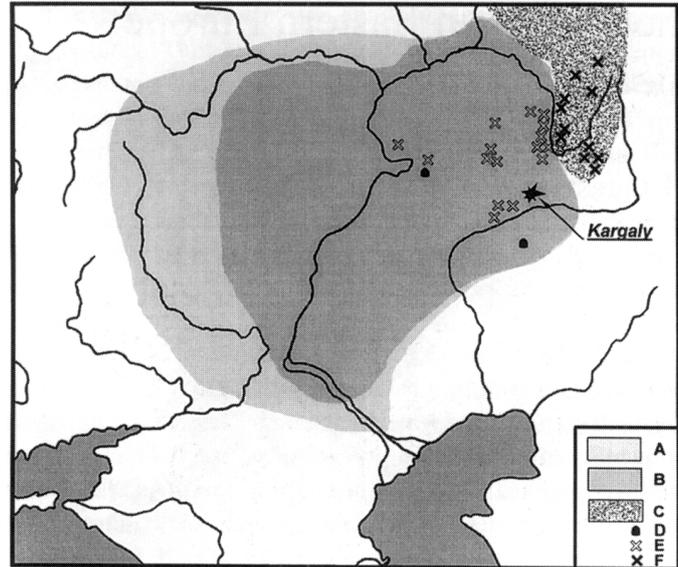
Die Metallverarbeitung ist denn auch der einzige Bereich, in dem bisher Überlegungen zum Energieproblem angestellt wurden. Der nicht mehr zu deckende Holzbedarf in der Nähe der räumlich konzentrierten Kupfervorkommen wird als ein möglicher Grund für den Beginn der Eisenzeit diskutiert (Cramer 1995, Horne 1982). Tatsächlich sind aus geschichtlicher Zeit massive Umweltzerstörungen durch den Kahlschlag für die Verhüttung bekannt. Zarin Elisabeth verbot 1754 bis zu einem Abstand von 200 km um Moskau jegliche Metallindustrie, um den Holz- und Brennholzbedarf der Hauptstadt zu sichern (Chernykh 1994, 60). Im 18. Jh. verschob sich aufgrund der intensiven Kupferverhüttung die Waldgrenze im Südrural bei Kargaly in nur 25 a um 200 km nach Norden (Chernykh 1998, 132).

Überraschenderweise finden sich in Pollenprofilen aus der Bronzezeit aber keine Hinweise auf großflächige Abholzungen. Die Ausnahme sind Wüstenstandorte wie Timna, wo es in der Kupferproduktion mehrere Hiaten von mehr als hundert Jahren zur Regeneration der Vegetation gab (Horne 1982, 13.) Im folgenden soll deshalb der tatsächliche Holzbedarf für die prähistorische Metallgewinnung

## Feuer in der Metallverhüttung



(a) Kargaly in Südrußland (Rovira 1999, 89).



(b) Das Erzrevier von Kargaly (Chernykh 1998, 130).

**Abbildung 7:** Das Erzrevier von Kargaly in Südrußland an der Grenze zu Kasachstan. Kargaly selbst liegt in einer Steppenregion, über Flüsse kann das Erz aber zur Verüttung in das Waldgebiet des Südrural transportiert werden. A: maximale Ausdehnung der Kupferversorgung in der Bronzezeit; B: Hauptnutzungsgebiet des Kupfers in der Bronzezeit; C: Waldregion im Uralgebirge; D: Kurgane und frühbronzezeitliche Gräber mit Kupfer aus Kargaly; E: Spätbronzezeitliche Siedlungen mit Erzfinden aus Kargaly; F: Verhüttungsplätze für Erz aus Kargaly im 18. und 19. Jh. CE (Chernykh 1998).

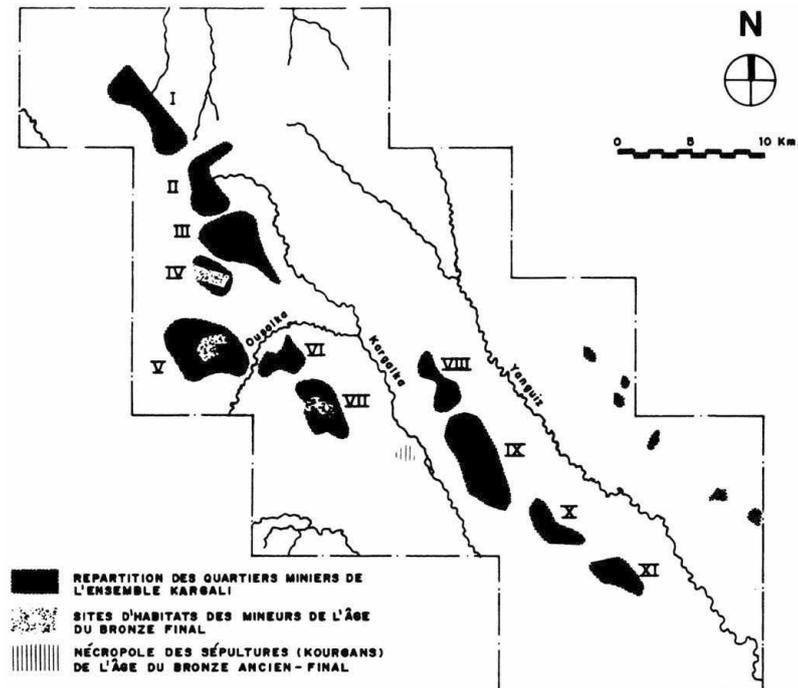
abgeschätzt werden.

Zur Verhüttung von 10 kg Kupfer – das ist wenig mehr als ein Liter – braucht man (Chernykh 1994, 59; Chernykh 1998, 131; Horne 1982, 11–12):

- 400 kg Holzkohle
- 3 000 kg Holz
- 5 Festmeter Holz
- 5–6 Akazienstämme
- 7 Manntage

Für Eisen ist es nach Horne weniger als die Hälfte (Horne 1982, 12), das berücksichtigt aber noch nicht den o. g. Folgeaufwand zum Reinigen und Ausschmieden der Luppe zu einem brauchbaren Rohbarren.

**Abbildung 8:** Die Bergbau-region von Kargaly. Der eingblendete Maßstab läßt die benötigte Waldfläche von  $8 \times 8$  km maßvoll erscheinen (Chernykh 1994, 66).



Vier bronzzeitliche Beispiele können nach Chernykh 1994 das Ausmaß des Brennholzbedarfes illustrieren:

#### Timna

In der Wüstenregion im Negev wurden für 100 t Kupfer ungefähr 70 000 Akazienstämme verbraucht.

#### Kengazgan

Eine Steppenregion in Kasachstan, der nächste Wald ist hunderte von Kilometern entfernt. Der Bedarf für 25 kt Kupfer beträgt 30 Millionen Bäume.

#### Ai Bunar

Für 1000 t Kupfer wurden 1 Million Bäume verbraucht.

#### Kargaly

Eine Steppenlandschaft in der Nähe der Wälder des Südurals. Es wurden 125 kt Kupfer gewonnen und 63 Millionen Festmeter Holz verbraucht. Das entspricht  $2500 \text{ km}^2$  Wald.

## 4.2 Das Angebot an Brennholz

Die reine Angabe des Gesamtbedarfes täuscht aber. Holz ist ein nachwachsender Rohstoff und das Erz wurde über lange Zeiträume verteilt abgebaut. Auf einem

## *Feuer in der Metallverhüttung*

Hektar Wald in natürlicher Altermischung stehen etwa 300 Festmeter Holz<sup>10</sup> – in Deutschland sind es rund 10 % mehr, im Südrural 10 % weniger. Bei nachhaltiger Nutzung können jährlich etwa 5 Festmeter Holz pro Hektar eingeschlagen werden. Mit diesen Zahlen und der Nutzungszeit der Bergwerke läßt sich der tatsächliche Waldbedarf abschätzen:

### **Kengazgan**

25 kt Kupfer in 500–700 a sind 50 t/a und benötigen 25 000 m<sup>3</sup>/a Holz, entsprechend 5000 ha. Das ist eine Fläche von 7 × 7 km.

### **Ai Bunar**

1000 t Kupfer in < 300 a sind 4 t/a mit einem Holzbedarf von 2000 m<sup>3</sup>/a auf 400 ha, das sind 2 × 2 km.

### **Kargaly**

125 kt Kupfer in 2000 a sind im Mittel 60 t/a. Der Holzbedarf beträgt 30 000 m<sup>3</sup>/a, also rund 6000 ha. Das ist eine Fläche von 8 × 8 km.

Für Kerkazgan ist bisher unbekannt, wie der Holzbedarf gedeckt werden konnte. Die Region um Ai Bunar ist fruchtbar, die nachhaltige Nutzung einer Waldfläche von 4 km<sup>2</sup> dürfte kein Problem dargestellt haben. Dasselbe gilt im völligen Gegensatz zum Raubbau des 18. Jh. auch für Kargaly. Eine Waldfläche von 8 × 8 km hätte für den damaligen Bedarf ausgereicht.

## **4.3 Résumé**

Holz und Energie waren unter den Bedingungen der Bronzezeit in den meisten Regionen kein begrenzender Faktor für die Metallverarbeitung. Einen sich radial um die Mine ausbreitenden Kahlschlag hat es zu der Zeit offenbar nicht gegeben [Craddock 1993](#), 53. Anders wurde das trotz der gleichmäßigen Verteilung des Eisens im Raum erst in der Eisenzeit und Antike, als die Nachfrage und die Bevölkerung deutlich anstiegen.

---

<sup>10</sup> Das ist bei gleichmäßiger Verteilung über die Fläche eine Schichtdicke von 3 cm. In einer einfachen Grobabschätzung bin ich auf rund das zehnfache gekommen, habe dabei aber offenbar einen natürlichen Wald mit einer erntereifen Holzplantage verwechselt.

# Literaturverzeichnis

BARTELHEIM 1996

Martin Bartelheim & Elke Niederschlag, *Bronzezeitliche Zinnengewinnung im Erzgebirge?* [Archäologie aktuell im Freistaat Sachsen 4 \(1996\), 61–66.](#)

BERGER 1980

Walter Berger, *Zur Charakterisierung des Brandverhaltens von Werkstoffen.* [VFDB-Zeitschrift 1980, ii, 45–47.](#)

BUCHWALD 2005

Vagn Fabritius Buchwald, *Iron and steel in ancient times.* Historisk-filosofiske Skrifter 29 ([Copenhagen 2005](#)).

CHERNYKH 1994

Eugène N. Chernykh, *L'ancienne production minière et métallurgique et les catastrophes écologiques anthropogènes, Introduction au problème.* [Trabajos de Prehistoria 51 \(1994\), ii, 55–68.](#)

CHERNYKH 1998

Evgenij N. Chernykh, *Ancient mining and metallurgy in Eastern Europe, Ecological problems.* In: Bernhard Hänsel (Hrsg.), *Mensch und Umwelt in der Bronzezeit Europas – Man and Environment in European Bronze Age, Abschlußtagung: Die Bronzezeit, das erste goldene Zeitalter Europas, Berlin, 17.–19. März 1997.* ([Kiel 1998](#)), 129–133.

CLARK 2007

Gregory Clark, *A Farewell to Alms, A brief economic history of the world.* Princeton Economic History of the Western World ([Princeton 2007](#)).

COTTRELL 1955

Fred Cottrell, *Energy & Society, The relation between energy, social change, and economic development.* <sup>2</sup>(Bloomington 2009).

CRADDOCK 1993

Paul T. Craddock, *A short review of the evidence for Bronze Age mining*

## Feuer in der Metallverhüttung

*in the British Isles*. In: Heiko Steuer & Ulrich Zimmermann (Hrsg.), *Montanarchäologie in Europa, Int. Koll. „Frühe Erzgewinnung und Verhüttung in Europa“ in Freiburg i. Br. vom 4. bis 7. Oktober 1990*. Archäologie und Geschichte 4 (Sigmaringen 1993), 37–56.

### CRADDOCK 1999

Paul T. Craddock, *Paradigms of metallurgical innovation in prehistoric Europe*. In: Andreas Hauptmann, Ernst Pernicka, Thilo Rehren & Unsal Yalgin (Hrsg.), *The Beginnings of Metallurgy, Proceedings of the International Conference „The Beginnings of Metallurgy“, Bochum 1995*. Der Anschnitt, Beiheft 9 (Bochum 1999), 175–192.

### CRAMER 1995

Clayton E. Cramer, *What Caused The Iron Age?* unveröffentlichter Seminarvortrag, December 10, 1995. (Sonoma 1995). <<http://www.claytoncramer.com/unpublished/Iron2.pdf>> (2012-11-17).

### DAYTON 1971

J. E. Dayton, *The problem of tin in the Ancient World*. *World Archaeology* 3 (1971), 49–70.

### DAYTON 1973

J. E. Dayton, *The Problem of Tin in the Ancient World, A Reply to Dr Muhly and Dr Wertime*. *World Archaeology* 5 (1973), 123–125.

### DAYTON 2003

John E. Dayton, *The problem of tin in the ancient world, (Part 2)*. In: Alessandra Giumlia-Mair & Fulvia Lo Schiavo (Hrsg.), *Le probleme de l'etain a l'origine de la metallurgie – The Problem of Early Tin, Acts of the XIVth UISPP Congress, University of Liege, Belgium, 2–8 September 2001*. BAR International Series 1199 (Oxford 2003), 165–170.

### GORDON 1992

Robert B. Gordon & David J. Killick, *The Metallurgy of the American Bloomery Process*. *Archeomaterials* 6 (1992), 141–167.

### HORNE 1982

Lee Horne, *Fuel For The Metal Worker, The Role of Charcoal and Charcoal Production in Ancient Metallurgy*. *Expedition* 25 (1982), i, 6–13.

### KIENLIN 2010

Tobias L. Kienlin, *Traditions and Transformations: Approaches to Eneolithic*

(Copper Age) and Bronze Age Metalworking and Society in Eastern Central Europe and the Carpathian Basin. BAR International Series 2184 (Oxford 2010).

KILLICK 1996

David Killick, *On Claims For “Advanced” Ironworking Technology in Precolonial Africa*. In: Peter R. Schmidt (Hrsg.), *The Culture and Technology of African Iron Production*. (Gainesville 1996), 247–266.

KUNST 2001

Michael Kunst, *Die Kupferzeit der Iberischen Halbinsel*. In: Blech (Hrsg.), *Denkmäler der Frühzeit*. Hispania Antiqua (Mainz 2001), 67–100.

LEUSCH 2015

Verena Leusch, Barbara Armbruster, Ernst Pernicka & Vladimir Slavčev, *On the Invention of Gold Metallurgy, The Gold Objects from the Varna I Cemetery (Bulgaria)—Technological Consequence and Inventive Creativity*. *Cambridge Archaeological Journal* 25 (2015), 353–376.

VAN DER MERWE 1980

Nikolaas Johannes van der Merwe, *Production of high carbon steel in the African Iron Age, The direct steel process*. In: R. E. Leakey & B. A. Ogot (Hrsg.), *Proceedings of the 8th Panafrican Congress of Prehistory and Quaternary Studies, Nairobi, September 1977*. (Nairobi 1980), 331–334.

MORRIS 2015

Ian Morris, *Foragers, farmers, and fossil fuels, How human values evolve*. University Center for Human Values Series (Princeton 2015).

MOSHAGE 1960

Julius Moshage, *Energie bewegt die Welt, Das große Buch der Naturkräfte*. (1960).

MUHLY 1973

J. D. Muhly & T. A. Wertime, *Evidence for the sources and use of tin during the Bronze Age of the Near East: a reply to J. E. Dayton*. *World Archaeology* 5 (1973), 111–122.

PARK 2015

Jang-Sik Park & Susanne Reichert, *Technological tradition of the Mongol Empire as inferred from bloomery and cast iron objects excavated in Karakorum*. *Journal of Archaeological Science* 53 (2015), 49–60.

## Feuer in der Metallverhüttung

PERNICKA 1998

Ernst Pernicka, *Die Ausbreitung der Zinnbronze im 3. Jahrtausend*. In: Bernhard Hänsel (Hrsg.), *Mensch und Umwelt in der Bronzezeit Europas – Man and Environment in European Bronze Age, Abschlußtagung: Die Bronzezeit, das erste goldene Zeitalter Europas, Berlin, 17.–19. März 1997*. (Kiel 1998), 135–147.

ROVIRA 1999

Salvador Rovira, *Una propuesta metodológica para el estudio de la metalurgia prehistórica, El caso de Gorny en la región de Kargaly (Orenburg, Rusia)*. *Trabajos de Prehistoria* 56 (1999), ii, 85–113.

ROVIRA 2002

Salvador Rovira, *Early slags and smelting by-products of copper metallurgy in Spain*. In: Martin Bartelheim, Ernst Pernicka & Rüdiger Krause (Hrsg.), *Die Anfänge der Metallurgie in der Alten Welt, Euroseminar Freiberg/Sachsen, November 1990*. *Forschungen zur Archäometrie* 1 (Rahden/Westf. 2002), 83–98.

ROVIRA 2003

Salvador Rovira & Ignacio Montero, *Natural Tin-Bronze Alloy in Iberian Peninsula Metallurgy: Potentiality and reality*. In: Alessandra Giunlia-Mair & Fulvia Lo Schiavo (Hrsg.), *Le probleme de l'étain a l'origine de la metallurgie – The Problem of Early Tin, Acts of the XLVth UISPP Congress, University of Liege, Belgium, 2–8 September 2001*. *BAR International Series* 1199 (Oxford 2003), 15–22.

ROVIRA 2009

Salvador Rovira, Ignacio Montero-Ruiz & Martina Renzi, *Experimental co-smelting to copper-tin alloys*. In: Tobias L. Kienlin & Ben Roberts (Hrsg.), *Metals and Societies, Studies in honour of Barbara S. Ottaway*. *Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie* 169 (Bonn 2009), 407–414.

SIMON 1993

Klaus Simon, *Zum ältesten Erzbergbau in Ostthüringen und Sachsen, Argumente und Hypothesen*. In: Heiko Steuer & Ulrich Zimmermann (Hrsg.), *Montanarchäologie in Europa, Int. Koll. „Frühe Erzgewinnung und Verhüttung in Europa“ in Freiburg i. Br. vom 4. bis 7. Oktober 1990*. *Archäologie und Geschichte* 4 (Sigmaringen 1993), 89–104.

SPINDLER 1971

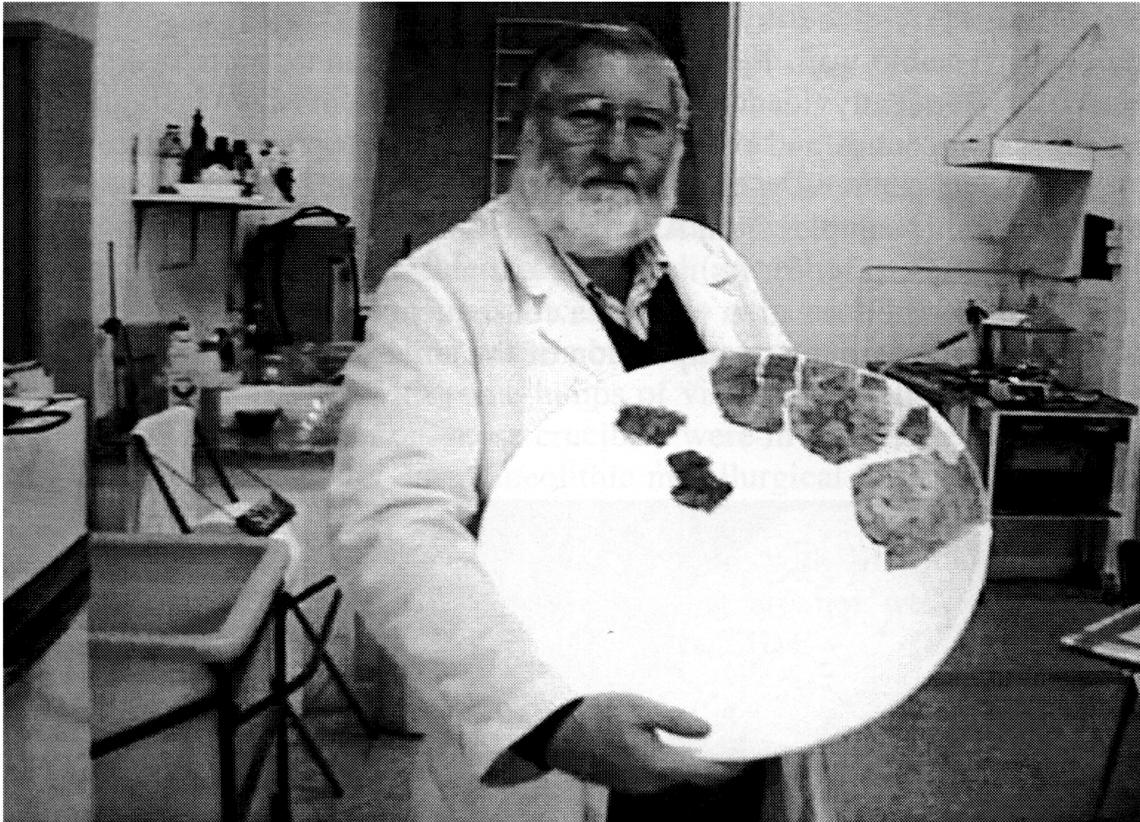
Konrad Spindler, *Zur Herstellung der Zinnbronze in der frühen Metallurgie Europas*. *Acta Praehistorica et Archaeologica* 2 (1971), 199–253.

TYLECOTE 1991

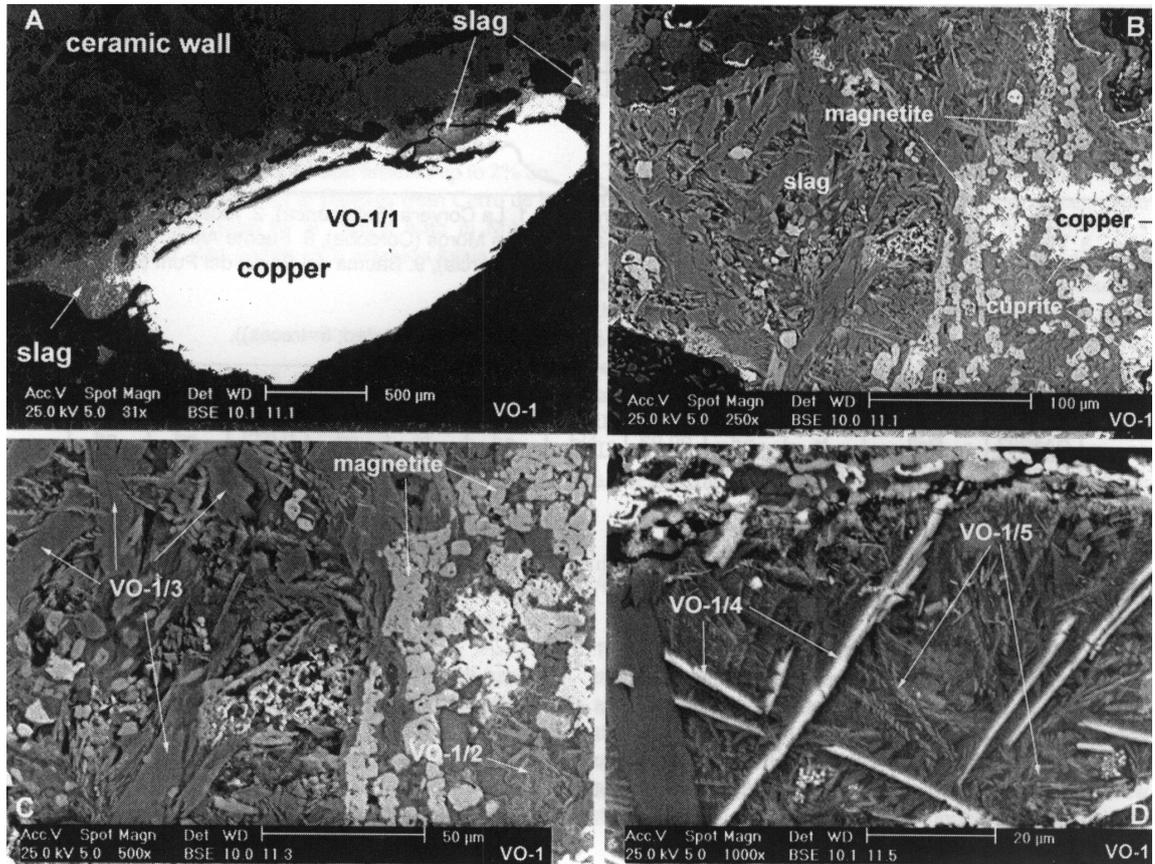
R. F. Tylecote, *Early copper base alloys; natural or man-made?* In: Jean-Pierre Mohen & Christiane Éluère (Hrsg.), *Découverte du métal. Millénaires 2* (Paris 1991), 213–221.



# A Tafeln



**Tafel 1:** Rekonstruktion eines offenen Schmelz- und Reduziertiegels aus La Ceñuela, Murcia, zur gleichzeitigen Röstung und Reduktion sulfidischer Kupfererze (Rovira 2002, 89).



**Tafel 2:** Mikrosondenanalyse der verschlackten Oberfläche des Reduktionstiegels aus Villaviciosa de Odón unter dem Rasterelektronenmikroskop (Rovira 2003, 20).

ANALYSI	PHASE	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	FeO	CuO	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SnO <sub>2</sub>
VO-1/2	Glassy matrix	0	5.11	16.9	1.3	20.7	17.3	11.3	10.6	2.2
VO-1/3	Pyroxene laths	3.6	4.4	32.7	0.1	25.5	24.3	1.5	2.7	3.6
VO-1/4	Delafossite needle	0	0	24.2	0	7.5	25.3	37.9	4.7	0
VO-1/5	Glassy matrix	3	4.6	37.2	1.8	18.7	8.7	12.8	10.6	1.3
VO-1/6	Ceramic (bulk)	1.1	16.1	64.1	4.8	5.3	7.2	0	0	0

**Tabelle 3:** Ergebnisse der Mikrosondenanalyse der anhaftenden Schlacken in Massenprozent (Rovira 2003, 20).

ANALYSIS	PHASE	Cu	Sn	As	Fe
VO-1/1	Metal prill	95.58	0.35	4.07	0

**Tabelle 4:** Analyseergebnis des Kupfertropfens in Massenprozent (Rovira 2003, 20).



**(a)** Vorbereitung des Schmelzplatzes (Rovira 2009, 408).



**(b)** Gewonnene Metallperlen nach dem Zerstoßen der Schlacke. Maßstab in mm (Rovira 2009, 410).



**(c)** Vorheizen. Der Pfeil weist auf den Rand der Schmelzschale (Rovira 2009, 409).



**(d)** Erzzufuhr. Der Pfeil weist auf eine Handvoll zerkleinerten Erzes auf der brennenden Holzkohle (Rovira 2009, 409).

**Tafel 3:** Versuch der Zusammenverhüttung von Kupfer- und Zinnerz im offenen Herdfeuer. Die direkte Gewinnung von Zinnbronze ist möglich, aber nur unter Verlust von 89 % des zugeführten Zinns. (Rovira 2009).

## Feuer in der Metallverhüttung

Analysis #	Cu	Sn	As	Bi	Fe	S	O	Si
PA12856/3	99.4	nd	nd	nd	0.54	nd	nd	nd
PA12856/4	99.3	nd	nd	nd	0.64	nd	nd	nd
PA12856/5	99.5	nd	nd	nd	0.50	nd	nd	nd
PA12856/6	99.9	nd	nd	0.10	nd	nd	nd	nd
PA12857/01	74.8	23.5	nd	0.88	nd	nd	nd	nd
PA12857/02	76.2	22.1	nd	1.68	nd	nd	nd	nd
PA12857/03	17.1	81.3	nd	1.59	nd	nd	nd	nd
PA12857/04	67.0	28.3	2.1	2.57	nd	nd	nd	nd
PA12857/05	99.4	nd	nd	0.60	nd	nd	nd	nd

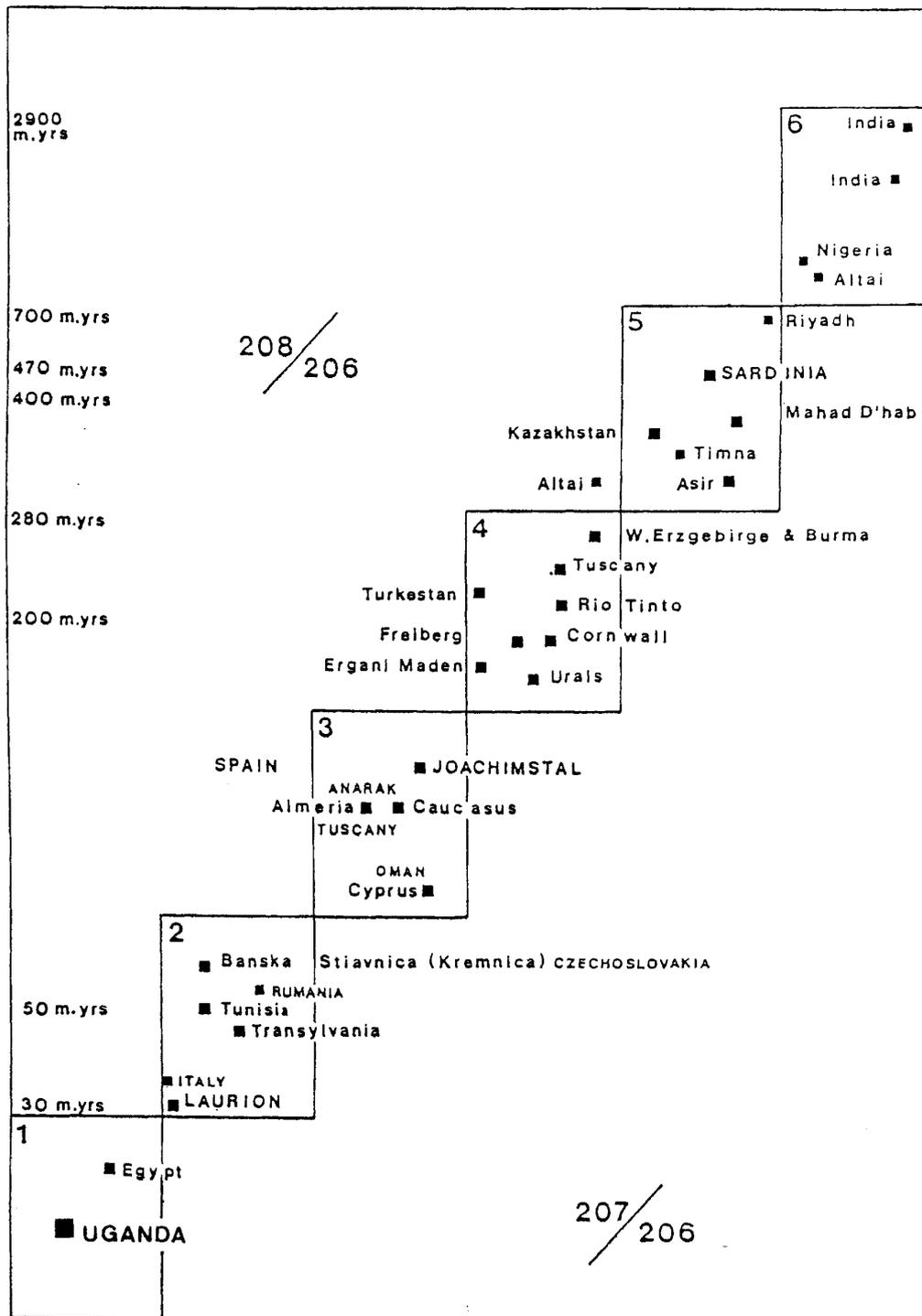
**Tabelle 5:** Analyseergebnisse einzelner Metallperlen aus dem Versuch der Zusammenverhüttung von Kupfer und Zinn (Rovira 2009, 411).

Analysis #	Fe	Ni	Cu	Zn	As	Ag	Sn	Sb	Pb	Bi
PA12855	1.35	nd	4.45	nd	nd	nd	8.10	0.025	0.45	0.76
PA12856	1.52	nd	6.96	nd	0.30	0.022	5.19	0.033	0.67	1.50
PA12857	1.22	nd	12.8	nd	nd	nd	23.1	nd	0.68	2.44
PA12858	1.14	nd	4.51	nd	nd	nd	8.47	0.019	0.44	1.00
PA12869	1.49	nd	13.6	nd	nd	nd	15.1	0.040	0.77	1.30
PA12870	1.28	nd	9.39	nd	nd	nd	20.7	nd	0.55	1.41
PA12871	1.53	nd	10.4	nd	nd	0.021	19.3	tr	0.64	2.04

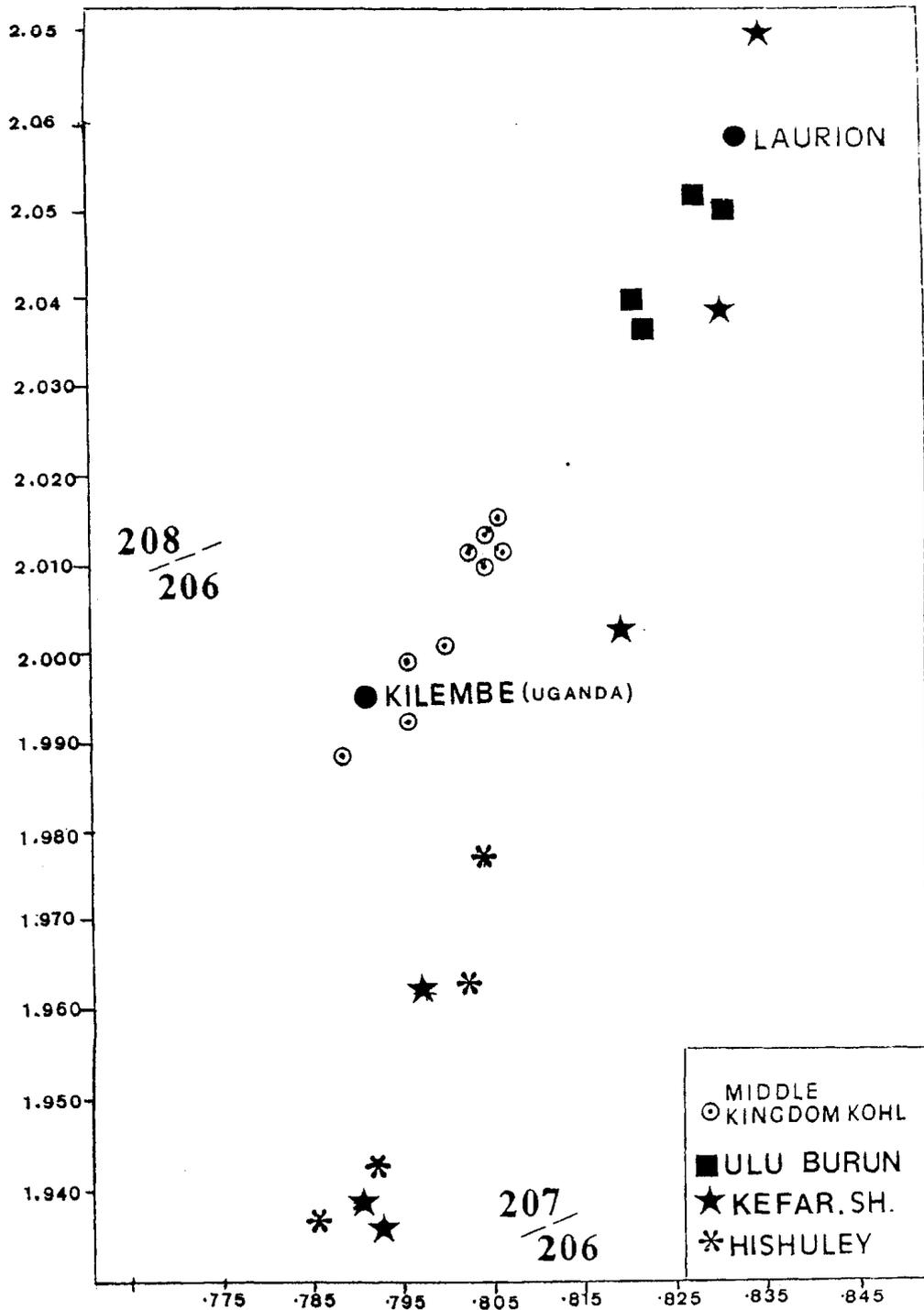
**Tabelle 6:** Analyseergebnisse ausgewählter Schlackeproben aus dem Versuch der Zusammenverhüttung von Kupfer und Zinn (Rovira 2009, 412).



**Tafel 4:** Die Zinnerzvorkommen der alten Welt. Östlich von Mesopotamien existiert es erst in Ostasien oder Sibirien. Das nächstgelegene Vorkommen ist das östliche Usbekistan, wo es keinerlei Hinweis auf eine Gewinnung vor dem 2. Jt. vC gibt. (Spindler 1971, 203).



Tafel 5: Die Bleiisotope der Erzreviere der Welt als Funktion des regionalen Gesteinsalters (Dayton 2003, 168).



**Tafel 6:** Die Bleisotopenverhältnisse der Zinnbarren vom Schiff von Uluburun und aus der Nähe von Haifa (Hishuley, Kefar Samir) (Dayton 2003, 170).

## Feuer in der Metallverhüttung



(a) Der Erzberg bei Hüttenberg in Kärnten (Buchwald 2005, 125).



(b) Der Erzberg bei Eisenerz in der Steiermark (Gerald Senarclens de Grancy, Wikicommons).

**Tafel 7:** Die beiden Erzberge in Österreich mit besonders hochwertigem manganhaltigem Eisenerz. Nur der Berg bei Hüttenberg wurde in römischer Zeit abgebaut und das *ferrum noricum* gewonnen. Der Abbau in Eisenerz begann erst im Mittelalter (Buchwald 2005).