

Ingo Keesmann ¹ , Archäometallurgie im Zentraliran II: Kupferschlacken – ein Vergleich.²

Die französische Version dieses Textes wurde veröffentlicht unter

KEESMANN, I. (2005) :

Archéométaballurgie de l'Iran Central - II. Les scories de cuivre : une comparaison. Cuivre +, Bull. Groupe de Travail International sur la paléométaballurgie, A.P.A.B. (Beaune), No. 4, 1/2005, 17-23.

1 Frühere archäometallurgische Untersuchungen im Zentraliran

Der Iran ist außerordentlich reich an Lagerstätten metallischer Rohstoffe. Man darf davon ausgehen, dass in der „Alten Welt“ alle oberflächennahen Lagerstätten von Kupfer, Eisen und Blei-Silber schon bereits vor Beginn des Industriezeitalters bekannt waren und ausgebeutet wurden, soweit die technischen Möglichkeiten dies zuließen. Dementsprechend reich ist der Iran an alten und ältesten Zeugnissen von Bergbau und Metallurgie. Dies gilt insbesondere auch für die Hochgebiete östlich des Zagrosgebirges und südlich der großen Salzwüste. Es verwundert nicht, dass sich westliche Industrienationen sehr für dieses Lagerstättenpotential interessierten. Teilweise Hand in Hand damit begann in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts eine allerdings eher zögernde Erkundung der archäometallurgischen Hinterlassenschaften, soweit sie über einzelne archäologische Ausgrabungen hinausgingen. T.A. Wertime gebührt wohl das Verdienst, zusammen mit einem Team international anerkannter Experten regional wie thematisch sehr umfassende archäometallurgische Erkundungen durchgeführt zu haben (Wertime 1968). In diese Richtung gingen auch die Recherchen von T. Berthoud et al. (Berthoud 1979). Die politische Entwicklung im Iran setzte diesen Versuchen zunächst ein Ende.

Anlässlich des Mainzer Symposiums „Metallurgie von Eisen und Kupfer in Westeuropa“ (Mainz 1986), regte M. Momenzadeh, Mitarbeiter des geologischen Dienstes des Iran (GSI), eine Zusammenarbeit an. Ein erstes Ergebnis dieser Kooperation war in der Folge die archäometallurgische Untersuchung alter Eisenschlacken aus Lorestan (Hezarkhani 1990). Es folgten eine Reihe wissenschaftlicher Geländeuntersuchungen (Keesmann et al. 1993) und

¹ Anschrift des Verfassers: Prof. Dr. Ingo Keesmann, Hofstrasse 6, 78343 Gaienhofen, Deutschland. E-mail: keesmann@uni-mainz.de

² Diese Untersuchung ist die Fortsetzung unserer Arbeiten zur Archäometallurgie im Zentraliran. Die Serie begann mit Hezarkhani und Keesmann 1996 und wird fortgesetzt.

der Abschluss eines förmlichen Kooperationsabkommens zwischen dem GSI und dem Institut für Geowissenschaften der Universität Mainz. Auf dieser Grundlage wurden eingehende Geländeuntersuchungen auf der zentraliranischen Hochebene in einem Gebiet durchgeführt, das sich teilweise mit der Reiseroute von Wertime überschneidet (Abbildung 1).

Die Kupfer- und Bleischlacken dieses Gebietes waren Gegenstand von zwei Diplomarbeiten sowie der Doktorarbeit von Z. Hezarkhani (Hezarkhani 1995, Hezarkhani und Keesmann 1996). In der Folge wuchs das gegenseitige Interesse an einem wissenschaftlichen Austausch. Mit großzügiger Unterstützung der Volkswagen-Stiftung in Hannover konnten H.J. Nissen (TU Berlin, Seminar für vorderasiatische Altertumskunde) und I. Keesmann (Universität Mainz, Institut für Geowissenschaften) eine ausgewählte Gruppe von Archäometallurgen aus europäischen und asiatischen Staaten zu einem Symposium nach Teheran führen. Diese Veranstaltung fand vom 18. bis 21.04.1997 in Teheran statt, mit einer anschließenden, mehrtägigen Exkursion in die Region von Kashan, Isfahan und Anarak. Ziel war die Vermittlung von Erfahrungen und der wissenschaftliche Austausch mit den iranischen Kollegen. Im Iran selbst war das Research Centre for Conservation of Cultural Relics, RCCCR, unter der Leitung von A. Vatandoust Feder führend. Daraufhin entwickelten sich eine Reihe fruchtbarer Kontakte, die neue archäologische und archäometallurgische Projekte unter Beteiligung auch anderer Wissenschaftler ermöglichten, u.a. die Untersuchung des archäometallurgischen Komplexes von Arisman, Bezirk Kashan. Ergebnisse dieser Untersuchungen im Detail stehen noch aus.

2 Eigene Untersuchungen an Kupferschlacken in Zentraliran

2.1 Kupferschlacken der Region von Saghand - Posht-e-Badam

Die alten Kupferschlacken der Region von Saghand – Posht-e-Badam wurden sehr eingehend von Z. Hezarkhani untersucht und ihre Mineralogie, Petrographie und Petrologie *in extenso* dargelegt (Hezarkhani und Keesmann 1996). Eine Wiederholung erübrigt sich daher an dieser Stelle. Lediglich auf ein wichtiges Kriterium dieser sowohl zeitlich wie regional sehr differenzierten Serie alter Kupferschlacken ³ sei hier nochmals zurückgegriffen: Die spezifischen Merkmale in ihrer chemischen Pauschalzusammensetzung. Es handelt sich um Produkte aus der Verhüttung sulfidischer Erze.

³ Tatsächlich umfasst die Schlackensammlung – mit Ausnahme der Bleischlacke von Moghistan, eines Nachbardorfes von Saghand – nur Kupferschlacken. Eisenschlacken wurden nicht aufgefunden. Dies ist insofern interessant, als die unmittelbare Umgebung sehr reich an Eisenerzen ist (u.a. die Lagerstätte von Chador Malu), die in der alten Kupferverhüttung offenbar auch als Schlackenbildner eingesetzt wurden.

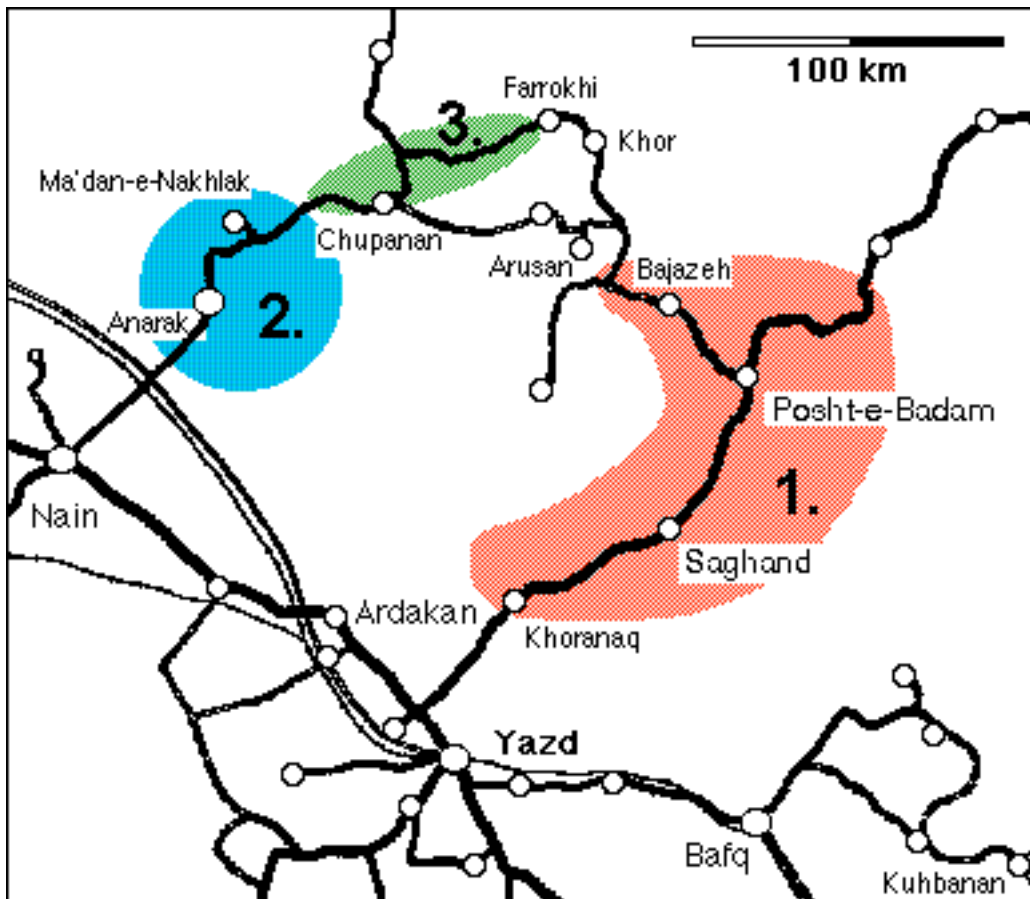


Abbildung 1. Ausschnitt aus der topografischen Karte des Iran mit dem zentralen Ort Yazd (31.53 N, 54,25 E), ca. 300 km ESE von Isfahan. Die markierten Flächen bezeichnen drei Arbeitsgebiete mit unterschiedlichen Schwerpunkten:

1. alte und älteste Kupfergewinnung entlang der Posht-e-Badam-Störung;
2. subrezente Kupfertechnologie aus teilweise komplexen Erzen sowie Bleitechnologie verschiedener Alterstufen;
3. vorindustrielle (?) Bleitechnologie

Wie aus Abbildung 2 hervorgeht, liegen alle Punkte auf einer Ebene innerhalb eines relativ engen Korridors. Es sind vier Schwerpunkte der Häufigkeit zu erkennen. Die Schlacken der „Gruppe 1“ der Pauschalzusammensetzungen sind im Gegensatz zu allen übrigen heterogen und enthalten noch Reste eisenreicher Zuschläge, die nicht völlig von der Schmelze resorbiert wurden. Ursprünglich wurde angenommen, dass die Ebene der darstellenden Raumpunkte durch ihre Projektion auf die Tetraederflächen definiert ist (Hezarkhani und Keesmann 1996, Abbildung 7a). Es lag daher nahe, die Gesamtverteilung der Schlackenzusammensetzungen aus einer einfachen Mischung von Eisenerzen mit einer praktisch eisenfreien Komponente im System $\text{CaO}(\text{Na}_2\text{O})\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ zu erklären, in der sulfidische Kupfererze umgesetzt wurden.

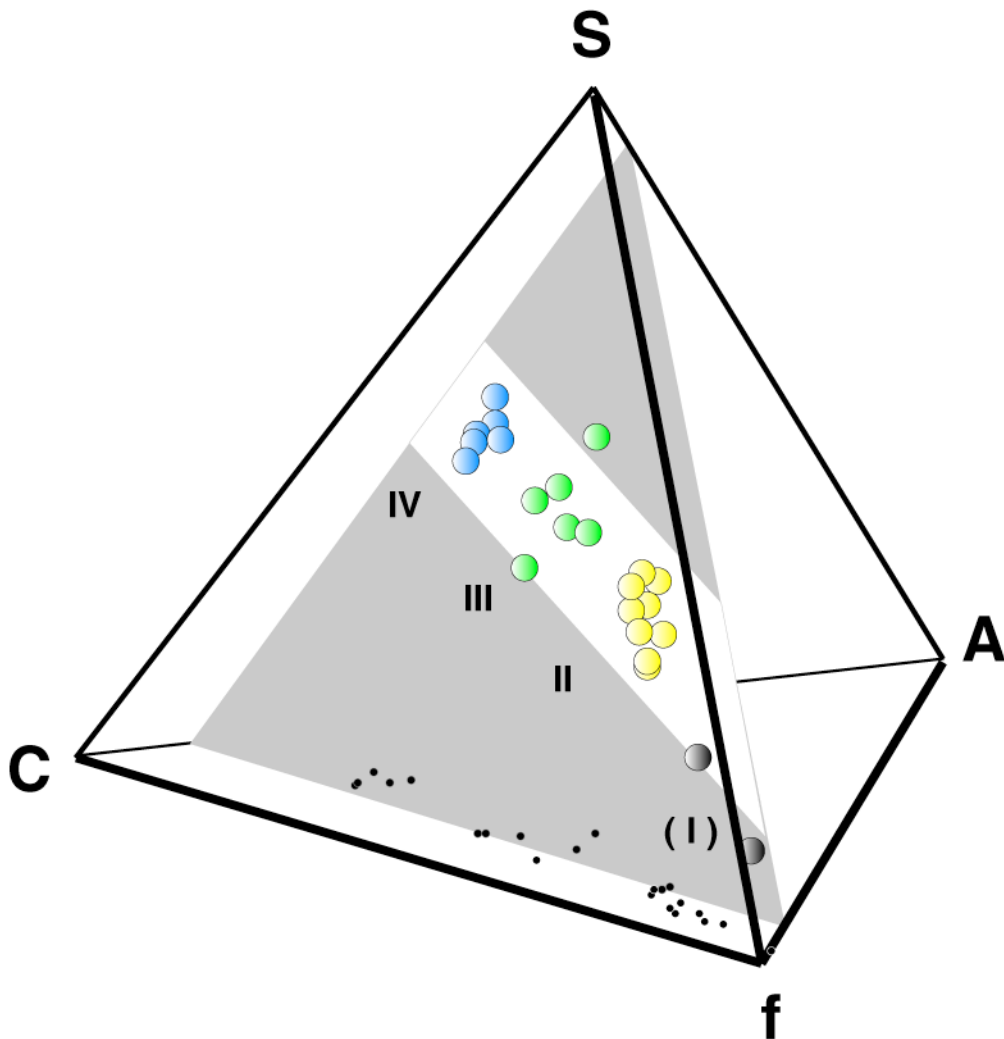


Abbildung 2. Pauschalchemische Zusammensetzungen von Kupferschlacken aus dem Arbeitsgebiet Saghand - Posht-e-Badam im System C-A-f-S.

C= $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$; A= Al_2O_3 ; F= FeO (Gesamteisen)+ $\text{MgO}+\text{MnO}+\text{ZnO}$; S= $\text{SiO}_2+\text{P}_2\text{O}_5$

Analysenwerte für diese und alle übrigen Abbildungen der vorliegenden Untersuchung in Gewichtsprozent. Alle Punkte liegen innerhalb eines relativ engen Korridors auf einer Fläche parallel zur Tetraederfläche CfS (vgl. auch Abbildung 10). Es sind vier Schwerpunkte der Häufigkeit zu erkennen. Erläuterungen siehe Text.

Dafür kämen unter Umständen die Salztone in der unmittelbaren Umgebung einzelner Fundstellen in Betracht, die zu verschiedenen Epochen auch zur Herstellung von Backsteinen Verwendung fanden. Der Fund von Muschelschalen an einer alten Verhüttungsstelle, die möglicherweise ebenfalls als Zuschlag verwendet wurden, weist darauf hin, dass die Verhältnisse wahrscheinlich komplexer sind. Außerdem zeigen die Analysen keine Zunahme des Al_2O_3 -Gehaltes mit abnehmendem FeO , wie dies mit Zunahme des Tonanteils in der Schlacke anzunehmen wäre. Vielmehr beträgt er im Mittel ca. 7 Gew.-% (vgl. Tabelle 1). Daraus ergibt sich, dass alle Punkte auf einer Fläche liegen, die parallel zur Tetraederfläche CfS verläuft (Abbildungen 2 und 10). Aus der einfachen Mischung fiktiver Komponenten wären auch die Schwerpunktsbildungen der einzelnen Gruppen 2, 3 und 4 ohne zusätzliche Annahmen

nicht zu erklären. Gerade diese Schwerpunkte unterschiedlicher Zusammensetzungen sind ein wesentliches Merkmal der untersuchten Schlacken von Saghand – Posht-e-Badam ⁴. Die Bildung der effektiven Zusammensetzungen muss daher anders interpretiert werden.

2.2 Kupferschlacken im Gebiet von Anarak

Keine der Schlacken von Saghand – Posht-e-Badam kann einem modernen Verfahren oder einer datierbaren moderneren Verhüttungsanlage zugeordnet werden. Ganz im Gegensatz dazu stehen die von uns untersuchten Schlacken der Region von Anarak (Abbildung 2, Teilgebiet 2). Sie stammen zum Teil aus unmittelbarer Nähe von Talmessi und Meskani, die noch in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts aktive Kupferproduktionsstätten waren, sowie aus der Gegend von Chuni, östlich der Straße Anarak - Nakhlak (Bagherzadeh 1995). Selbst so archaisch anmutende Installationen wie die Röst- und Verhüttungseinrichtungen von Schirnu sind nach Tylecote 1970 möglicherweise sehr jung: „One of the most impressive sites ... about 8 km west of Talmessi... This had probably been used until quite recently.“ Chemisch unterscheiden sich diese Schlacken von denen der Region Saghand – Posht-e-Badam in mehrfacher Hinsicht. Zunächst fällt auf, dass nun eine Reihe von Elementen als Hauptbestandteile der Schlacken auftreten, die in den alten Schlacken eher ungewöhnlich sind: Nickel, Antimon, Barium und Strontium. Die Kupfergewinnung beruhte auf überwiegend polymetallischen Erzen. Ihre chemische Zusammensetzung variiert über einen sehr großen Bereich. Reduziert man das Spektrum der Schlacken auf einigermaßen vergleichbare chemische Zusammensetzungen (Abbildung 3), dann sind sie gegenüber den Schlacken der Kavir (Abbildung 1, Bereich 1) deutlich Al_2O_3 -reicher ⁵.

Der Schwerpunkt der pauschalchemischen Schlackenzusammensetzungen (Abbildung 3) liegt ungefähr im Bereich der Gruppen 2 und 3 der Kavir Schlacken. Eine Gruppierung ist nicht zu erkennen. Mineralogisch sind es überwiegend Pyroxen-Olivinschlacken mit mehr oder weniger hohen Glasanteilen. Analysiert man die Glasanteile bzw. mikrokristallinen Restschmelzen in den einzelnen Schlacken, dann stellt man fest, dass sie viel FeO-ärmer als die dazu gehörigen Pauschalzusammensetzungen sind. Außerdem zeigen sie eine sehr hohe Al_2O_3 -Anreicherung (Tabelle 1). Gleichzeitig steigt der SiO_2 -Gehalt.

⁴ Einschließlich der einen Bleischlacke von Moghestan, vgl. Anmerkung 3.

⁵ Die in dieser Arbeit verwendeten Analysenwerte befinden sich mit Ausnahme der in Abbildung 8 abgebildeten Analysentabelle im Anhang.



Abbildung 3. Kupferschlacken aus dem Gebiet von Anarak im System CAfS. Schwarz = pauschalchemische Zusammensetzungen (RFA-Analysen); weiß = Zusammensetzung von feinkörniger Grundmasse bzw. von Gläsern (Mikrosondenanalysen). Die pauschalchemischen Zusammensetzungen sind sowohl eisenreicher als auch - mit einer Ausnahme – deutlich aluminiumärmer als die Gläser und Zwischenkornmassen.

3 Vergleich mit Kupferschlacken anderer Autoren und Länder

Offensichtlich gibt es große Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung alter Kupferschlacken im Zentraliran. Damit bietet es sich an, mit Schlacken der gleichen Kupfertechnologie, aber aus anderen Zeiten, anderen Ländern und von anderen Autoren zu vergleichen. Hierzu wurden zunächst Analysen von Kupferschlacken aus dem Niger, aus Italien und aus Jordanien herangezogen. Die Auswahl ist mehr oder weniger willkürlich. Bei den Schlacken aus der Republik Niger handelt es sich um Abfälle einer Cu-As-Technologie früherer Zeitstellung (Cu-II, vergleiche Grébénart 1985). Die italienischen Schlacken sind mittelalterlich und stammen aus der Toscana (Guideri und Francovich 1998). Die jordanischen Schlacken sind aus dem Fenan und römischzeitlich (Hauptmann 1998). Jede dieser drei Vergleichsgrup-

pen ist chemisch wohl definiert und bildet im System CAfS eine in sich geschlossene Gruppe, die sich deutlich von den übrigen absetzt (Abbildung 4).

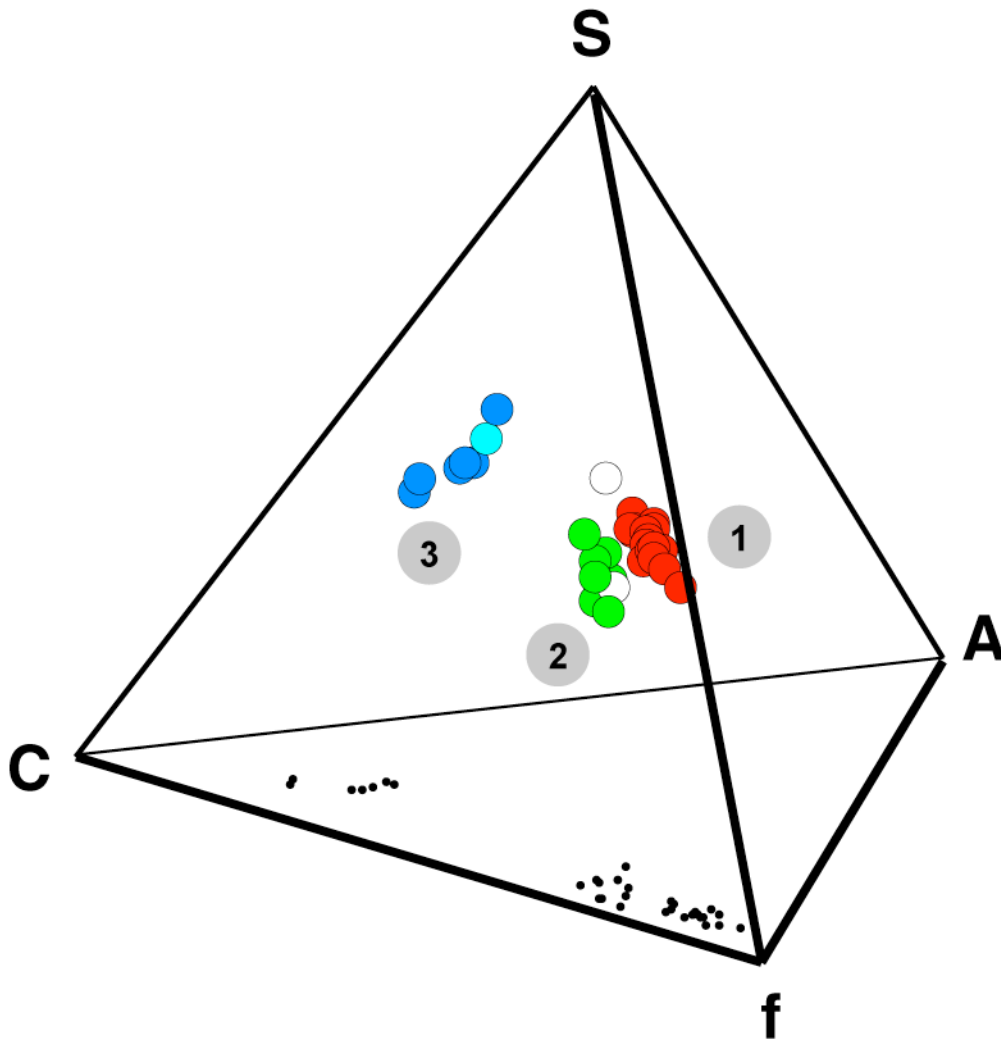


Abbildung 4. Vergleichende Darstellung von Kupferschlacken verschiedener Herkunft und unterschiedlichen Alters.

1 (Olivin-Schlacken) = römische Kupferschlacken aus dem Fenan nach Daten von Hauptmann 1998 (rot);

2 (Pyroxen-Schlacken) = mittelalterliche Kupferschlacken aus der Toskana nach Daten von Guideri und Francovich 1998 (grün) sowie römische Kupferschlacken aus dem Fenan nach Hauptmann 1998 (weiß);

3 (Melilith-Schlacken) = vorgeschichtliche Schlacken aus der Region Agadez/Niger nach Daten von Tylecote 1982 (blau) und T. Kost (türkis, vgl. Keesmann et al. 1985).

Die Schlacken der verschiedenen Fundpunkte bilden deutlich voneinander abgesetzte Gruppen. Die Gruppen entsprechen teilweise denen in Abbildung 2 (Zentraliran) und deuten auf ähnliche Bildungsmechanismen und vergleichbare mineralogische Zusammensetzungen.

Lediglich bei den Proben aus dem Fenan zeigt sich eine Untergliederung und gleichzeitig eine Überschneidung mit der CaO-reicheren Gruppe aus der Toskana. Am FeO-ärmsten und zugleich CaO-reichsten sind die ältesten Schlacken dieser Vergleichsserie, die Proben aus der Sahara. Eine Abhängigkeit des Al_2O_3 -Gehaltes vom FeO- oder SiO_2 -Gehalt besteht in

dieser Serie nicht. Alle Analysenpunkte liegen nahezu perfekt auf einer Fläche parallel zur Tetraederfläche CfS, entsprechend den Schlacken aus der Kavir. Es zeigt sich auch eine sehr ähnliche Gruppierung wie bei den Schlacken aus der Kavir (Abbildung 2). Insbesondere die absoluten Al_2O_3 -Gehalte sind vergleichbar.

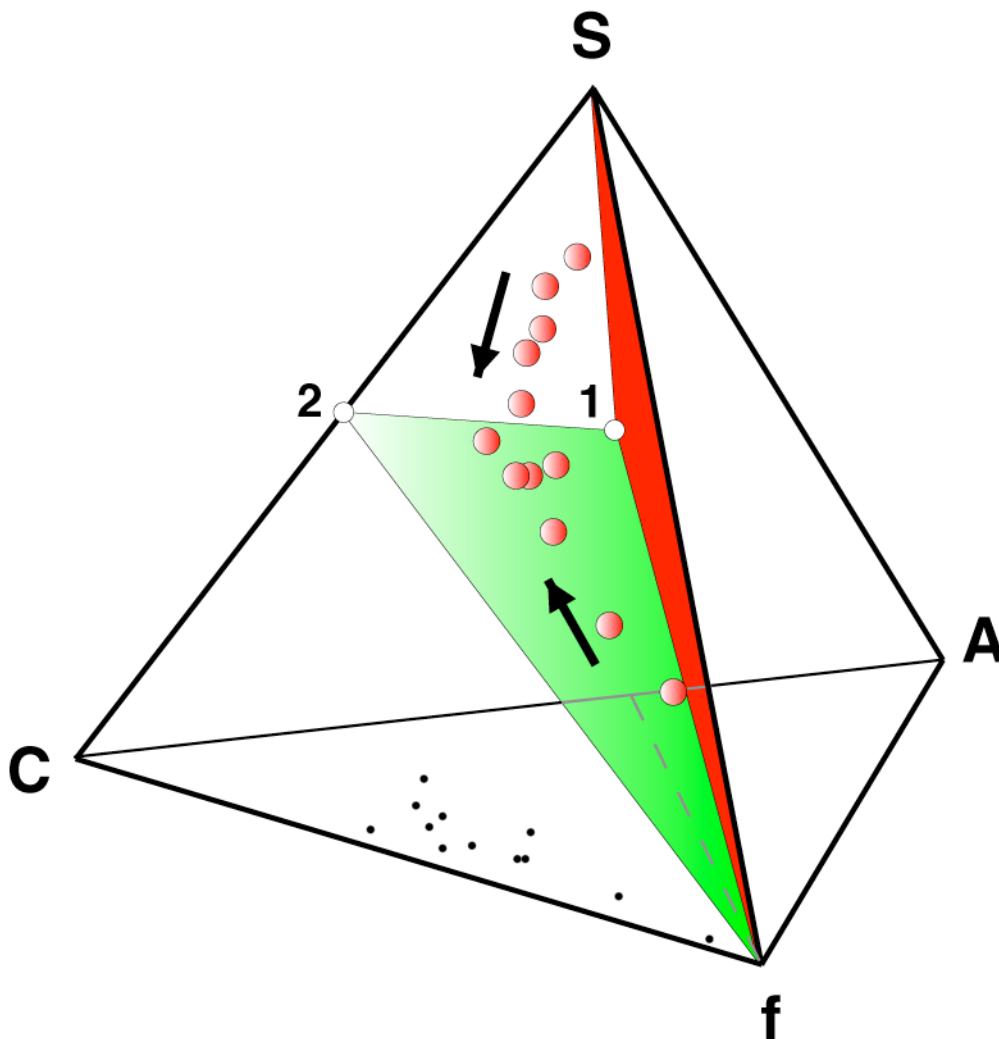


Abbildung 5. Verlauf chemischer Zusammensetzungen in Kupferschlacken von Kalgari im System CafS (nach Daten von Chernykh und Rovira, 1998).

1 = Anorthit ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$); 2 = Wollastonit (CaSiO_3).

Die dargestellten Zusammensetzungen sind einerseits relativ arm an Al_2O_3 , andererseits teilweise sehr reich an SiO_2 . Sie liegen über der Fläche Wollastonit-Anorthit-Wüstit nahe der Tetraederfläche CfS. Ein unmittelbarer Bezug zur Fläche Anorthit-Wüstit-Quarz besteht nicht. Es scheinen zwei Tendenzen zu bestehen, die beide zu Klinopyroxen- oder Melilith-reichen und vermutlich gesamteutektischen Zusammensetzungen führen.

Eine sehr interessante Vergleichsvariante bietet sich mit den Schlackenanalysen von Kalgari, Russland (Chernykh und Rovira 1998). Hierbei handelt es sich um Mikrosondenanalysen an Gläsern und Zwischenkornmatrices aus kristallinen Schlacken. Sie sollten damit prinzipiell mit den Mikrosonden-Teilanalysen (WDS) der Schlacken von Anarak vergleichbar sein. Tatsächlich jedoch sind sie viel Al_2O_3 -ärmer und entsprechen darin eher allen übrigen hier auf-

geführten Schlacken. Allerdings streuen sie über einen sehr weiten Bereich insbesondere ihrer FeO- und SiO₂-Gehalte (Abbildung 5). Im System CAfS sind sie SiO₂-reicher, als es der Fläche Wollastonit-Anorthit-„FeO“ entspräche. Ein direkter räumlicher Bezug zur Fläche Anorthit-Quarz-„FeO“ besteht offenbar ebenfalls nicht. Vielmehr liegen wieder alle Punkte auf einer Fläche nahe und parallel zur Tetraederfläche CfS. Mit einem Mittelwert von 4,33 Gew.-% (Median: 4,10) sind die Al₂O₃-Werte noch deutlich niedriger als die von Saghand – Posht-e-Badam (Tabelle 1). Sie sind damit praktisch identisch mit denen der Toscana.

Tabelle 1. Al₂O₃-Gehalt von Kupferschlacken (Gew.-%)

Herkunft	Mittelwert	Standardabweichung (s)
Saghand, Iran	7,12	2,09
Anarak (Schirnu), Iran	13,05	0,60
Fenan, Jordanien	3,62	0,85
Toscana, Italien	4,11	2,39
Agadez, Niger	7,21	1,10
Kalgari, Russland	4,33	1,77

4 Interpretation der Zusammensetzungen

4.1 Eutektische Schlackenschmelzen

Unter Schlacken verstehen wir Produkte der Verfestigung silikatischer Schmelzen aus technischen Verfahren. Die Zusammensetzung von Schlacken ist ein wesentliches Merkmal metallurgischer Prozesse. Sie bestimmt die minimale Arbeitstemperatur und die Abläufe während der technologiespezifischen Redoxreaktionen bei der Verhüttung. Wir dürfen wohl davon ausgehen, dass die überwiegende Mehrzahl der uns bekannten alten Schlacken nicht das Produkt von *trial and error* sind, sondern das Ergebnis ausgefeilter technischer Abläufe, wie sie sich im Verlauf langer Erfahrung entwickelten. Dazu gehört nicht nur die Auswahl geeigneter Erze und Ofenkonstruktionen, sondern auch eine möglichst gute Anpassung an die Umweltbedingungen. Dies gilt besonders für ökologische Randbedingungen, wie sie in Trockengebieten herrschen. Das verlangt insbesondere einen ökonomischen Umgang mit Holz und Holzkohle, wenn der Energierohstoff nur begrenzt zur Verfügung steht und teuer ist. Vermutlich alle hier zusammengestellten Schlacken stammen aus mit Holzkohle betriebenen Verhüttungsöfen. Die mineralogische Zusammensetzung der Schlacken ist das Ergebnis aus

der Zusammensetzung, den Verfahrensbedingungen in den einzelnen Reaktionsstufen und den Verfestigungsbedingungen der Schmelze.

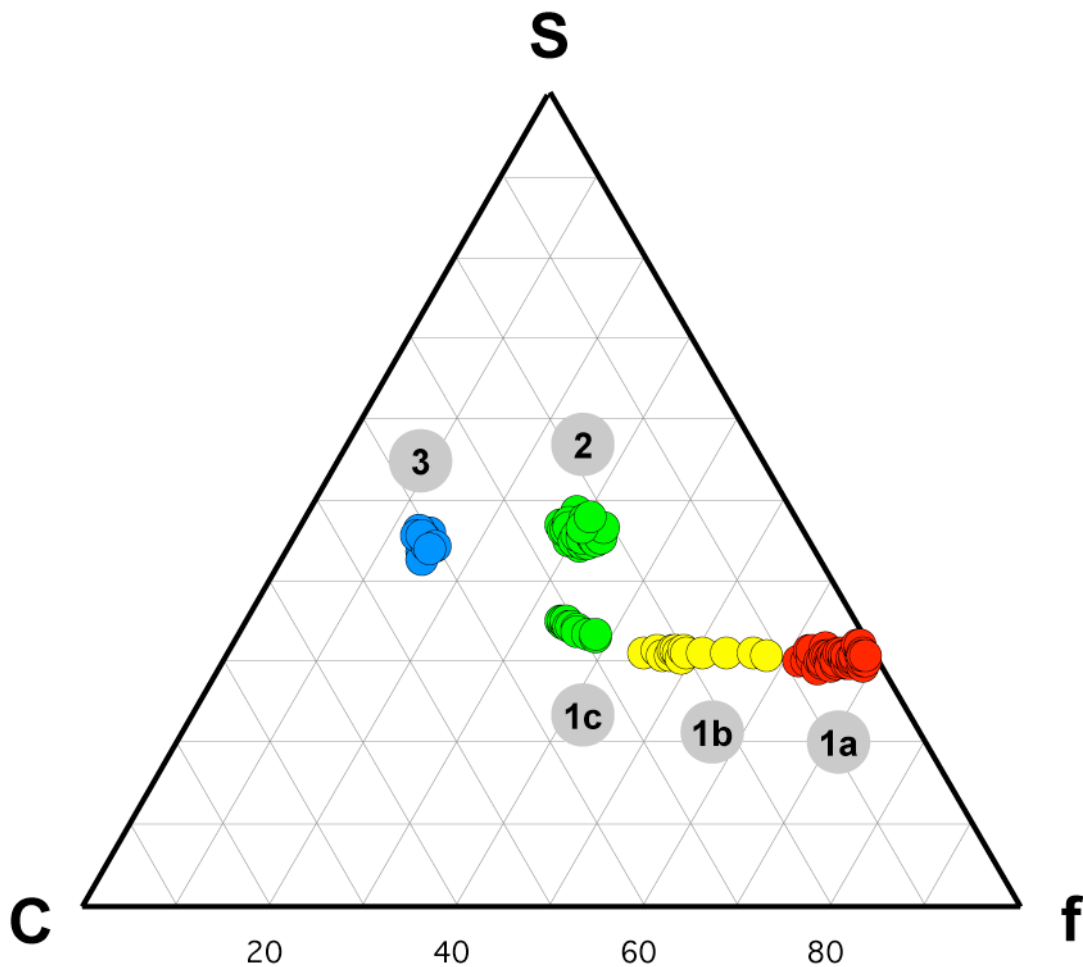


Abbildung 6. Wichtigste Schlacken bildende Minerale von Kupferschlacken im System CfS, teilweise als Projektion aus dem Tetraeder CAfS. 156 Analysen, nach Daten von Z. Hezarkhani (Hezarkhani 1995, Hezarkhani und Keesmann 1996).

1a = fayalitischer Olivin $(\text{Fe,Mg,Mn,Zn})_2\text{SiO}_4$;

1b = Mischkristalle der Reihe Fayalit-Kirschsteinit;

1c = Kirschsteinit (CaFeSiO_4) .

2 = hedenbergitischer Klinopyroxen (komplexe Zusammensetzungen, ideal: $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$)

3 = Melilith (hauptsächlich Gehlenit-Äkermanit-Mischkristalle $(\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7\text{-Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7)$).

Der Aluminiumgehalt der Melilithe und von Klinopyroxen sowie anderer aluminiumreiche Silikate sind in der Zeichnung nicht berücksichtigt. Auch andere Minerale, die Al_2O_3 enthalten, sind in der Darstellung nicht berücksichtigt. Dazu gehören Feldspäte und so genannte Feldspatvertreter, insbesondere Leucit $(\text{KAlSi}_2\text{O}_6)$ sowie die bariumreichen Feldspäte Hyalophan und Celsian $(\text{K,Ba})(\text{AlSi})_4\text{O}_8$ (Keesmann 1993).

Abbildung 6 zeigt vereinfacht die wichtigsten Mineralkomponenten in den Schlacken der Region von Saghand – Posht-e-Badam im System CfS ⁶. Im Prinzip könnten nun alle Schlacken

⁶ Kupferschlacken bilden sich in der Regel unter höheren Sauerstoff-Partialdrücken als Eisen-Reduktionsschlacken. Magnetit bzw. Magnetit-betonter Spinell ist in der Regel eine wichtige Komponente von Kupferschlacken. Diese Komponente ist in Abbildung 6

der Region Saghand – Posht-e-Badam durch Mischungen dieser Minerale dargestellt werden, um eine Verteilung entsprechend Abbildung 2 zu verstehen. Die effektive Zusammensetzung der Schlacken würde sich entweder aus unterschiedlichen Anteilen der Einzelminerale oder mit einer zusätzlichen Al-reichen „Glasphase“ mit fallweise unterschiedlicher Zusammensetzung erklären lassen. Diese entspräche im Grunde dem bereits oben angesprochenen „Mischungsmodell“. Die Gewinnung von Kupfer aus sulfidischen Erzen ist in der Regel ein mehrstufiger Prozess. Um möglichst eisenfreies metallisches Kupfer zu erhalten, ist die Verwendung eines eisenarmen Schlackenbades in der letzten Stufe sinnvoll. Das erklärt zwar die Tatsache unterschiedlicher Schlackenzusammensetzungen an ein und derselben Fundstelle, nicht aber die Ausbildung diskreter Häufungen in einem Zwischenbereich zwischen Pyroxen und Olivin (Abbildung 2, II), bei Klinopyroxen (Abbildung 2, III) oder bei Melilith, hier mit einer zusätzlich SiO_2 -Komponente (Abbildung 2, IV). Reine Olivin-Kupferschlacken scheinen im Zentraliran zu fehlen (s.o.). Speziell zusammengesetzte Olivinschlacken finden sich im Fenan (Abbildung 4, 1). Sie sind besonders manganreich. Das mag seinen Grund darin haben, dass unter diesen chemischen Voraussetzungen Kupfer auch dann ohne Beimengung von metallischem Eisen gewonnen werden kann, wenn die Bedingungen stärker reduzierend sind. Möglicherweise etwas weniger scharf ausgeprägt aber durchaus nachvollziehbar sind im Fenan ebenfalls Häufungen im Bereich von Pyroxen- und Melilithschlacken (Hauptmann 1998). Interessant ist die Tatsache, dass in Abbildung 4 zwei römerzeitliche Fenan-Schlacken (1) in die Gruppe der mittelalterlichen Schlacken aus der Toscana (2) fallen, die sich scharf von den (Mangan)-Olivinschlacken absetzt. Die deutlich ausgeprägte Häufung von Schlackenzusammensetzung zwischen Melilith und Quarz aus Abbildung 2 hat ein Äquivalent in den prähistorischen Kupferschlacken von Agadez (Abbildung 4, 3) ⁷. Ihre Zusammensetzung ist so ungewöhnlich, dass R.F. Tylecote postulierte: „The slags from Afounfoun and Ikawaten are not copper slags because their FeO contents are not high enough for such slags“ (Tylecote 1982).

Wir stellen fest, dass Schwerpunkte im Rahmen der insgesamt möglichen Zusammensetzung von Kupferschlacken keine Besonderheit des Zentraliran sind, sondern regional und zeitlich weit gestreut vorkommen. Ihre spezifische Zusammensetzung ergibt sich aus dem

durch „f“ („FeO“) berücksichtigt. Auf die sehr komplexe Zusammensetzung der Spinelle in den Kupferschlacken des Iran kann hier nicht eingegangen werden. Im Gegensatz zu römerzeitlichen Kupferschlacken aus Rio Tinto, Südwestspanien (Wilhem 1989), wurde im Iran bisher kein Iscorit ($\text{Fe}^{2+}_5\text{Fe}^{3+}_2\text{SiO}_{10}$) bestimmt. Auch der in anderen Kupferschlacken relativ häufig auftretende Andremerit ($\text{BaFe}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) ist nicht dargestellt.

⁷ Die in Abbildung 4, 3 dargestellten Schlackenzusammensetzungen nach Tylecote (1982) enthalten nicht die Daten, die möglicherweise Mischzusammensetzungen z. B. mit Ofenwandmaterial darstellen.

technischen Erfordernis, durch Verwendung unterschiedlich eisenarmer Schlackenschmelzen eisenarmes Kupfer zu gewinnen. Eine weitere physikalisch-chemische Komponente führt zur Häufung ganz bestimmter Zusammensetzungen, wie sie aus den Abbildungen 2 und 4 hervorgeht. Bereits früher wurde darauf hingewiesen, dass die Zusammensetzungen von Eisenschlacken bestimmter Provenienz eine auffällige Häufung im Bereich des Eutektikums bzw. des kotektischen Bereiches im System Wüstit-Fayalit-Hercynit aufweisen. Diese Beobachtung hat sich inzwischen vielfach bestätigt und wurde anschließend von A. Kronz wesentlich verfeinert (zuletzt: Kronz 2003). Ähnlich wie in der Rennfeuertechnik der Eisengewinnung gibt es auch in der Kupfertechnologie mehrere bevorzugte Bereiche der Schlackenzusammensetzung, unter deren Bedingungen Kupfer gewonnen wurde. Wir können demnach diese Ergebnisse aus der Untersuchung von Eisenreduktionsschlacken auf unsere Kupferschlacken übertragen. Die Zusammensetzungen der Kupferschlacken zeichnen sich durch Eigenschaften aus, die einerseits über die FeO-Aktivität der Schlackenschmelze die gewünschten Metalleigenschaften gewährleisten, andererseits in eutektischen Bereichen liegen, d.h. mit einem Minimum an thermischer Energie zum technischen Ergebnis führen. Es ist interessant festzustellen, dass alle vier hier belegten eutektischen oder kotektischen Zusammensetzungen etwa im selben Temperaturbereich $\leq 1000^\circ\text{C}$ schmelzen.

4.2 Nichteutektische Schlackenschmelzen.

Die Kupferschlacken von Anarak entsprechen diesem Bild in keiner Weise. Ihre pauschal-chemischen Zusammensetzungen bilden eine weit gestreute Punktwolke. Eine Schwerpunktbildung in der Nähe eines möglichen quaternären Eutektikums ist nicht zu erkennen (Abbildung 3, schwarz). Formal käme bestenfalls noch ein Zusammenhang mit dem Eutektikum im System Anorthit-Wüstit-Quarz in Frage. Allerdings liegt, wie bereits oben erwähnt, ein großer Anteil des nicht silikatisch gebundenen Eisens als Magnetit vor und anstelle von Olivin enthalten diese Schlacken überwiegend Klinopyroxen bzw. pyroxennormative Gläser. Die von allen übrigen Schlacken abweichende Tendenz wird durch die Zusammensetzung der glasartigen Zwischenkornmasse mit dem sehr großen Schwankungsbereich im Al_2O_3 -Gehalt noch besonders hervorgehoben (Abbildung 3, rot). Mineralogisch bedeutet das unter den Bedingungen der Kupfergewinnung, dass die potentiell am niedrigsten schmelzenden Anteile sehr stark an Magnetit sowie Olivin und Klinopyroxen verarmt sind. Es handelt sich selbst bei Schirnu um wahrscheinlich subrezente Produkte (Tylecote 1970). Ein technologischer Zusammenhang mit den wirklich alten Schlacken der Kavir besteht offenbar nicht.

Die Analysen der Zwischenkornmassen von Kalgari, Russland, zeigen ein völlig anderes Bild. In ihrem Aluminiumgehalt unterscheiden sie sich grundsätzlich von den Anarak-Schlacken (Abbildung 7).

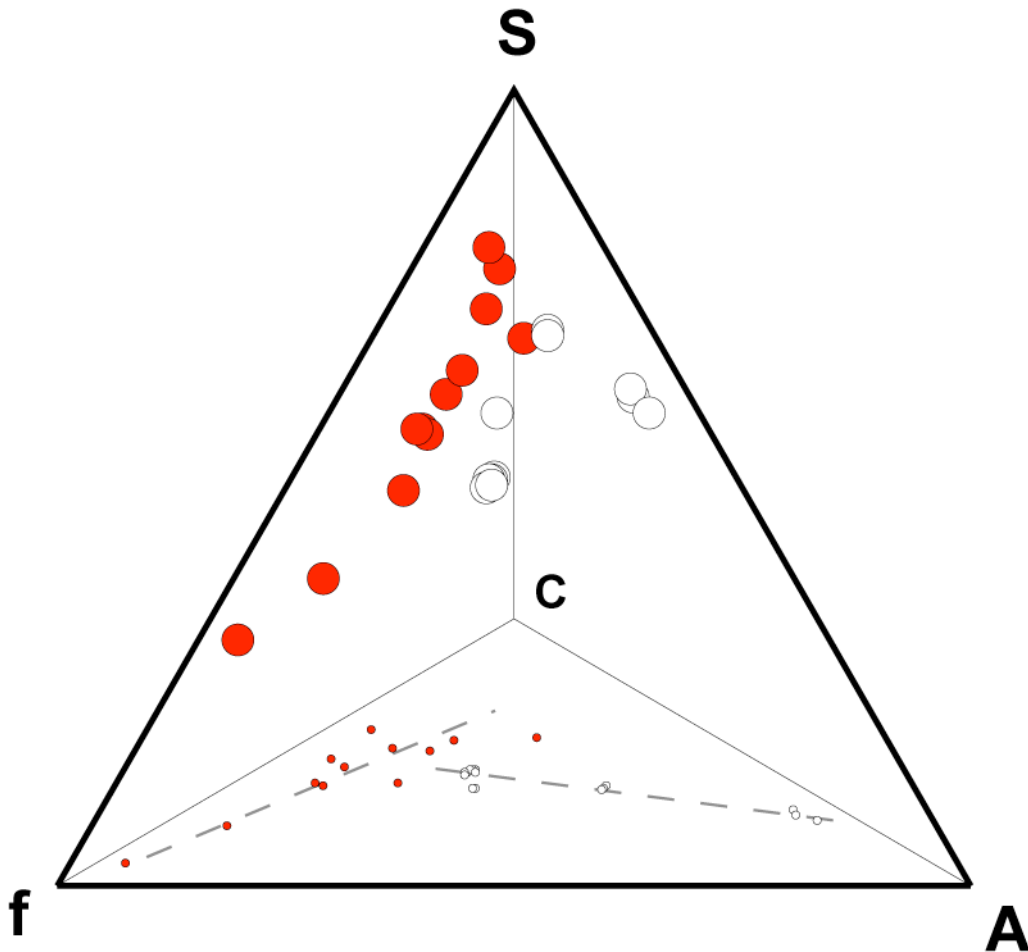


Abbildung 7. Schlackenteilanalysen von Kalgari und der Region von Anarak im Vergleich. Rot = Kalgari, weiß = Region Anarak. Zusätzlich zu den Raumpunkten sind ihre Projektionen auf die Fläche CAf dargestellt. Daraus ergibt sich der Unterschied zwischen beiden Serien im relativen Al_2O_3 -Gehalt. Außerdem zeigen die Al_2O_3 -Gehalte der beiden Analysenserien zwei deutlich verschiedene Entwicklungsrichtungen.

Abbildung 7. Schlackenteilanalysen von Kalgari und der Region von Anarak im Vergleich. Rot = Kalgari, weiß = Region Anarak. Zusätzlich zu den Raumpunkten sind ihre Projektionen auf die Fläche CAf dargestellt. Daraus ergibt sich der Unterschied zwischen beiden Serien im relativen Al_2O_3 -Gehalt. Außerdem zeigen die Al_2O_3 -Gehalte der beiden Analysenserien zwei deutlich verschiedene Entwicklungsrichtungen.

Sie entsprechen zumindest darin sehr gut allen übrigen hier diskutierten Analysenserien. Im übrigen jedoch passen sie nicht in das System der eutektischen Produkte unterschiedlicher Zusammensetzungen. Aus chemischen wie aus mineralogischen Gründen stehen die Eigenschaften dieser Analysenserie nicht unmittelbar mit dem System Anorthit-Wüstit-Quarz in Beziehung (Abbildung 5). Diesbezügliche Überlegungen von Chernykh und Rovira (1998) dürften sich daher erübrigen.

Es bietet sich jedoch eine andere Interpretationsmöglichkeit an: Im Sinne der sich selbstorganisierenden Schmelzsysteme (Kronz 2003) bilden sich in jedem genügend hoch erhitzten Gemenge in der allerersten Stufe die eutektischen Schmelzen, die an einer bestimmten Stelle der Ofenbeschickung unter den gegebenen Bedingungen möglich sind. Das bedeutet, dass in einem heterogenen System an unterschiedlichen Stellen der Beschickung selbst bei gleicher Temperatur unterschiedlich zusammengesetzte Schmelzen entstehen und zunächst unterschiedliche Reaktionen stattfinden können. Diese Abläufe sind z.B. bei Beginn einer Ofenreise zu erwarten. Die Homogenisierung erfolgt erst bei praktisch vollständiger Auflösung der primären festen Bestandteile und wird dann sofort wieder durch die Reaktionsabläufe in der Schmelze überlagert. Diese Vorgänge lassen sich im Mikromaßstab sehr schön an Material der experimentellen Eisengewinnung von Ph. Andrieux belegen (I. Keesmann, unveröffentlicht). Die Analysen von Kalgari zeigen zwei Tendenzen: Bildung und Auflösung von FeO-reichen Anteilen und von SiO₂-reichen Anteilen. Vermischen sich beide Teilsysteme mehr und mehr zu einem homogenen System, dann führt das zu einer Mischzusammensetzung, die möglicherweise Klinopyroxen- und/oder Melilith-Schlacken entspricht. Unter dieser Annahme würden sich die von Chernykh und Rovira untersuchten Kupferschlacken vollkommen und zwanglos in das aus anderen Schlackenserien abgeleitete System alter Kupferschlacken mit quasi eutektischen Zusammensetzungen einfügen.

5 Danksagung

Frau M.C. Frère-Sautot, A.P.A.B. (Beaune) danke ich herzlich für die Anregung zu dieser Arbeit und die Möglichkeit einer raschen Veröffentlichung. Sie besorgte auch mit großem Einsatz die Übersetzung in die französische Sprache..

6 Literatur

- Bagherzadeh, C. (1995): Archäometallurgische Untersuchungen zur Buntmetallurgie in der Region Anarak-Talmessi (Zentraliran). Diplomarbeit im Fach Mineralogie, Fachbereich Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität Mainz. 125 Seiten.
- Berthoud, T. (1979): Étude par l'analyse de traces et la modelisation de la filiation entre minerai de cuivre et object archéologiques du Moyen-Orient (IVème et IIIème millénaire de notre ère). Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.
- Chernykh, E.N. und Rovira, S (1998): La metalurgia antigua del cobre en Kalgari (Orengur, Rusia) : informe preliminar. Paléométagologie des cuivres (Hrsg. M-C. Frère-Sautot). Actes du colloque de Bourg-en-Bresse et Beaune, 17.-18. Oktober 1997. Seiten 77-83.

- Guideri, S. und Francovich, R. (1998): La produzione del rame dai solfuri misti nelle Toscana medievale. *Paléométagologie des cuivres* (Hrsg. M-C. Frère-Sautot). Actes du colloque de Bourg-en-Bresse et Beaune, 17.-18. Oktober 1997. Seiten 155-164
- Grébénart, D. (1985): La région d'In Gall - Tegidda N Tesemt (Niger) II: Le néolithique final et les débuts de la métallurgie. *Etudes Nigériennes* 49, 1985 (Niamey)
- Hauptmann, A. (1998): Zur frühen Metallurgie des Kupfers in Fenan/Jordanien. Habilitationsschrift, Fakultät für Geowissenschaften, Ruhr-Universität Bochum. 318 Seiten.
- Hezarkhani, Z. (1990) : Archäometallurgische Eisenschlacken von Lorestan / Iran. Diplomarbeit im Fach Mineralogie, Fachbereich Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität Mainz. 107 Seiten.
- Hezarkhani, Z. (1995): Archäometallurgische Untersuchungen zur Buntmetallurgie im Zentraliran (Posht-e-Badam – Saghand). Doktorarbeit im Fachbereich Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität Mainz. 234 Seiten
- Hezarkhani, Z. und Keesmann, I. (1996): Archäometallurgische Untersuchungen an Kupferschlacken im Zentraliran. *Metalla* (Bochum) 3.2, 101-125.
- Keesmann, I., Schulz-Dobrick, B. und Birke, W. (1985): Verfahrensbedingungen aus Phasenbestand und chemischer Analyse von alten Kupferschlacken (Afunfun, Agadez/Niger). *Abstract. Fresenius Z.Anal.Chem.* 320, 660 (1985).
- Keesmann, I. (1989): Chemische und mineralogische Detailuntersuchungen zur Interpretation eisenreicher Schlacken. *Archaeometallurgy of Iron 1967-1987, Symposium Liblice 1987* (Hrsg. R. Pleiner), 17-34.
- Keesmann, I. und Hilgart, T. (1992): Chemische und mineralogische Untersuchung der Schlacken von Manching. In: Maier, F., Geilenbrügge, U., Hahn, E. Köhler, H.J. Köhler und S. Sievers: Ergebnisse der Ausgrabungen 1984-1987 in Manching (RGK des DAI, Ausgrabungen in Manching 15, Hrsg. F. Maier, Textband). F. Steiner Verlag Stuttgart 391-413.
- Keesmann, I. (1993): Naturwissenschaftliche Untersuchungen zur antiken Kupfer- und Silberverhüttung in Südwestspanien. *Montanarchäologie in Europa. Berichte zum Internationalen Kolloquium "Frühe Erzgewinnung und Verhüttung in Europa"*, Freiburg i.B., 4.-7.10.1990. Hrsg. H. Steuer und U. Zimmermann. Seiten 105-122. Thorbecke Sigmaringen, 1993.
- Keesmann, I., Momenzadeh, M, Nematolah Rashid Nejad Omran und Hezarkhani, Z. (1993): Archäometallurgische Spurensuche im Iran. *Forschungsmagazin Universität Mainz*, 45-52.
- Kronz, A. (2003): Ancient iron production compared to medieval techniques in Germany: Fayalitic slag and elemental mass balances. *Archaeometallurgy in Europe, Milan 2003. Proceedings, Vol 2*, 555-564.
- Tylecote, R. F. (1970): Early metallurgy in the Near East. *Metals and Materials* 1970, 285-293.

- Tylecote, R.F. (1982): Early copper slags and copper-base metal from the Agadez region of Niger. JHMS 16/2, 58-64.
- Wertime, T.A. (1968): A Metallurgical Expedition through the Persian Desert. Science. Volume 159, Number 3818, S. 927-935.
- Wilhelm, C. (1989): Mineralogische, petrographische und geochemische Untersuchungen an einem Schlackenkegel aus Rio Tinto, Provinz Huelva, Spanien. Diplomarbeit im Fach Mineralogie, Fachbereich Geowissenschaften, Johannes Gutenberg-Universität Mainz. 93 Seiten.

7 Anhang 1: Das Programm Analysen-Tetraeder.

7.1 Grundlagen. Das System CAfS.

Archäometallurgische Untersuchungen auf petrographischer Grundlage münden häufig in die Frage nach den ursprünglichen Prozessparametern Arbeitstemperatur und Redoxbedingungen. Die Lösung ergibt sich im Prinzip aus dem Vergleich der Beobachtungen mit experimentellen Daten aus kontrolliert durchgeführten Versuchen. Das setzt allerdings vergleichbare chemische Zusammensetzungen voraus. Tatsächlich jedoch weichen die wirklichen Zusammensetzungen der Schlacken, die für den Vergleich herangezogen werden, erheblich von den Modellsystemen ab und die Aussagen sind somit fragwürdig.

Aus unseren eingehenden Untersuchungen an Eisenschlacken wissen wir, dass bereits kleinere Abweichungen der tatsächlichen Zusammensetzungen von dem Modellsystem FeO-Al₂O₃-SiO₂ sehr deutlich andere physikalische Bedingungen zur Folge haben. Die mikroskopischen Beobachtungen lassen z.B. erkennen, dass bereits kleinere Gehalte von K₂O das Schmelzverhalten tief greifend beeinflussen: die Schmelztemperaturen werden deutlich abgesenkt⁸. Im System FeO-Al₂O₃-SiO₂ macht sich das dadurch bemerkbar, dass die Punkt- wolke der Schlackenzusammensetzungen eindeutig gegenüber der „kitektischen Rinne“ verschoben ist (Kronz 2003). Damit ist es notwendig, das Dreistoff-System durch die fehlende Komponente zu erweitern. Gleichzeitig sind weitere Komponenten zu berücksichtigen, z.B. CaO. Damit noch eine einfache räumliche Darstellung mit 4 Komponenten möglich ist, sind nun jedoch bereits wieder Vereinfachungen erforderlich. Dies führte zur Entwicklung des Systems CAfS (vgl. Abbildung 2), in dem in der Regel mehr als 90 Gew.-% einer Schlackenanalyse dargestellt werden können. Praktisch kann damit nun der gesamte chemische Stoffbestand erfasst werden.

⁸ Auf die Entmischungsvorgänge, die dabei zusätzlich eine wichtige Rolle spielen und teilweise sehr komplex sind, kann hier nicht näher eingegangen werden.

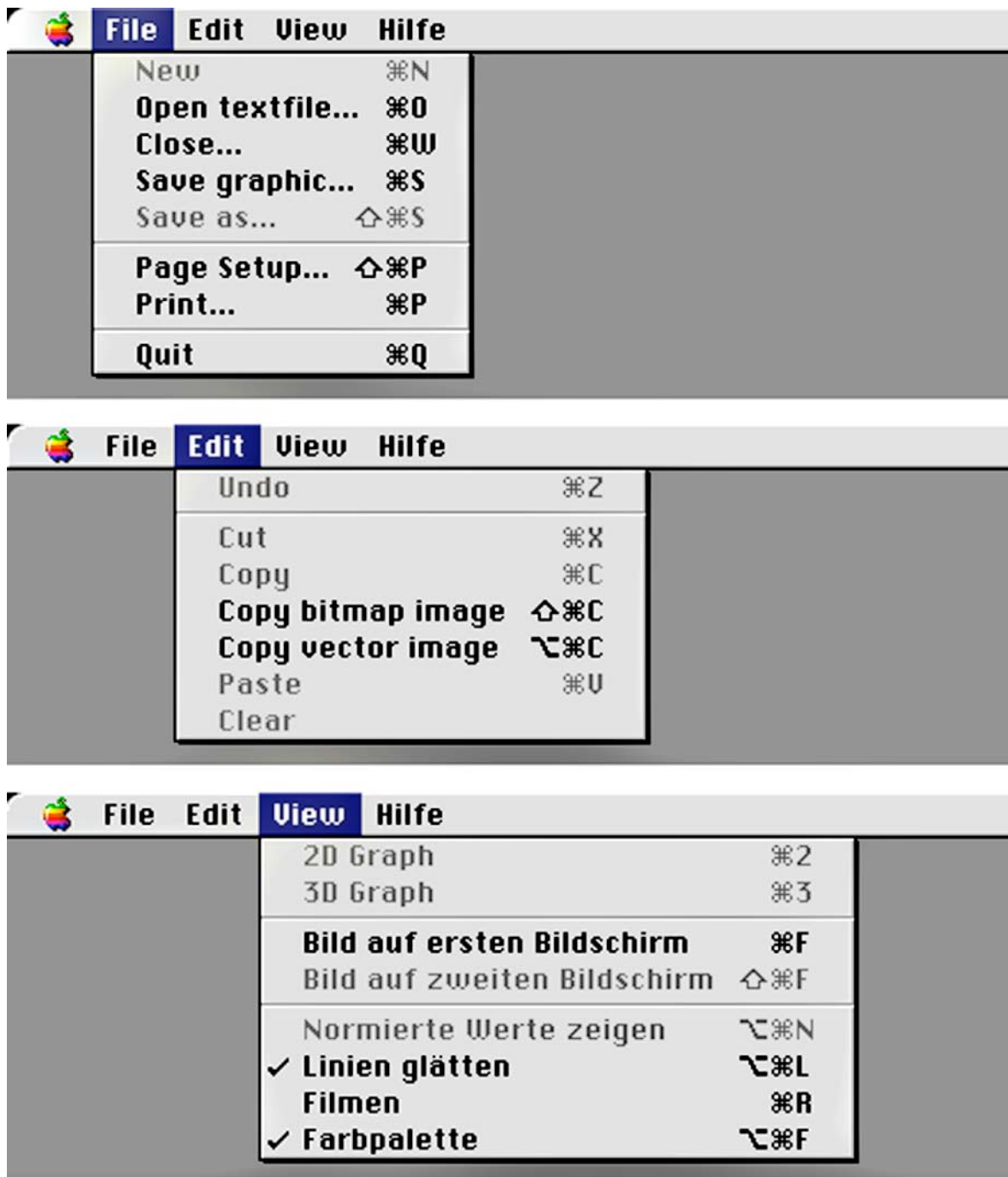


Abbildung 8. Menü des Programms „Analysen-Tetraeder“ (Version MacOS). Über „Hilfe“ kann zusätzlich direkt aus dem Programm eine e-mail-Verbindung zu den Autoren aufgebaut werden. Bildschirmkopien.

Die Vereinfachung auf vier Komponenten hat jedoch zur Folge, dass einzelne Komponenten komplex zusammengesetzt sind, insbesondere C (=Summe der Erdalkali- und Alkalioxide) und f (Summe der zweiwertigen Elemente, die mafische („dunkle“) Minerale bilden: FeO, MgO, MnO, NiO, ZnO. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wird der Oxidationsgrad von Schlacken im System CAfS willkürlich auf 0 gesetzt, d.h. FeO=Gesamteisen. Die Bestimmung der Schmelztemperaturen von Schlacken wird durch das System CAfS nicht unbedingt erleich-

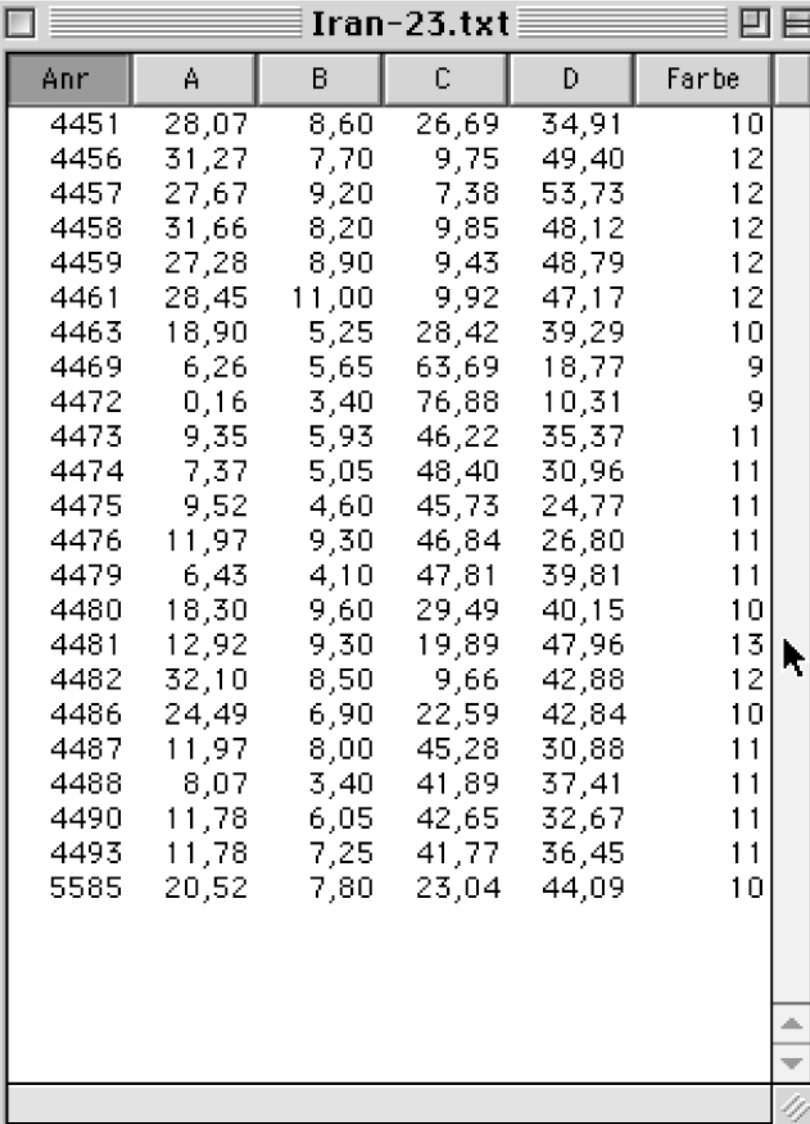
tert, da für quaternäre und Multikomponentensysteme nur sehr wenige relevante Daten existieren. Auch Schnitte durch das Tetraeder (vgl. Abbildung 5) sind selbst bei vereinfachtem chemischem Stoffbestand nur von begrenztem Nutzen (s.o.). Andererseits ist eine Abschätzung durch Vergleich mit den Bedingungen auf den Tetraederflächen insoweit möglich, wie die Zusammensetzung der vier Einzelkomponenten C-A-f-S dies erlaubt.

7.2 Eigenschaften des Programms „Analysen-Tetraeder“.

Die grafische Darstellung von normierten Analysen mit mehr als 3 Komponenten in einem räumlichen System erforderte die Entwicklung einer Software, die diese Art der Zeichnung auf einfache Weise möglich macht: Das Programm „Analysen-Tetraeder“⁹.

Die Abbildungen 8, 9 und 10 zeigen die wichtigsten Funktionen. In Abbildung 8 ist eine Musterdatei im Textformat dargestellt, die auch Grundlage der Abbildung 2 ist. Die Analyse Nr. 4481 ist durch einen Pfeil markiert. Der Farbcode „13“ entspricht der – in diesem Moment geänderten - Farbe des darstellenden Punktes in Abbildung 10. Abbildung 10 ist eine Bildschirmkopie aus dem Programm „Analysen-Tetraeder“ mit der Pseudodarstellung eines Dreistoffsystems. Tatsächlich ist es ein Tetraeder, das mit den Koordinaten x,y,z so gedreht wurde, dass die Fläche CfS senkrecht zur Bildschirmfläche (=Papierebene) steht. Auf diese Weise ist zu erkennen, dass alle Analysen der Tabelle „Iran-23“ einen etwa gleich großen Abstand von der Fläche CfS haben (vgl. Tabelle 1). Demgegenüber ergibt die Projektion auf die Fläche CAf mit abnehmendem f (hauptsächlich FeO) eine starke Verzerrung bezüglich A (Al_2O_3).

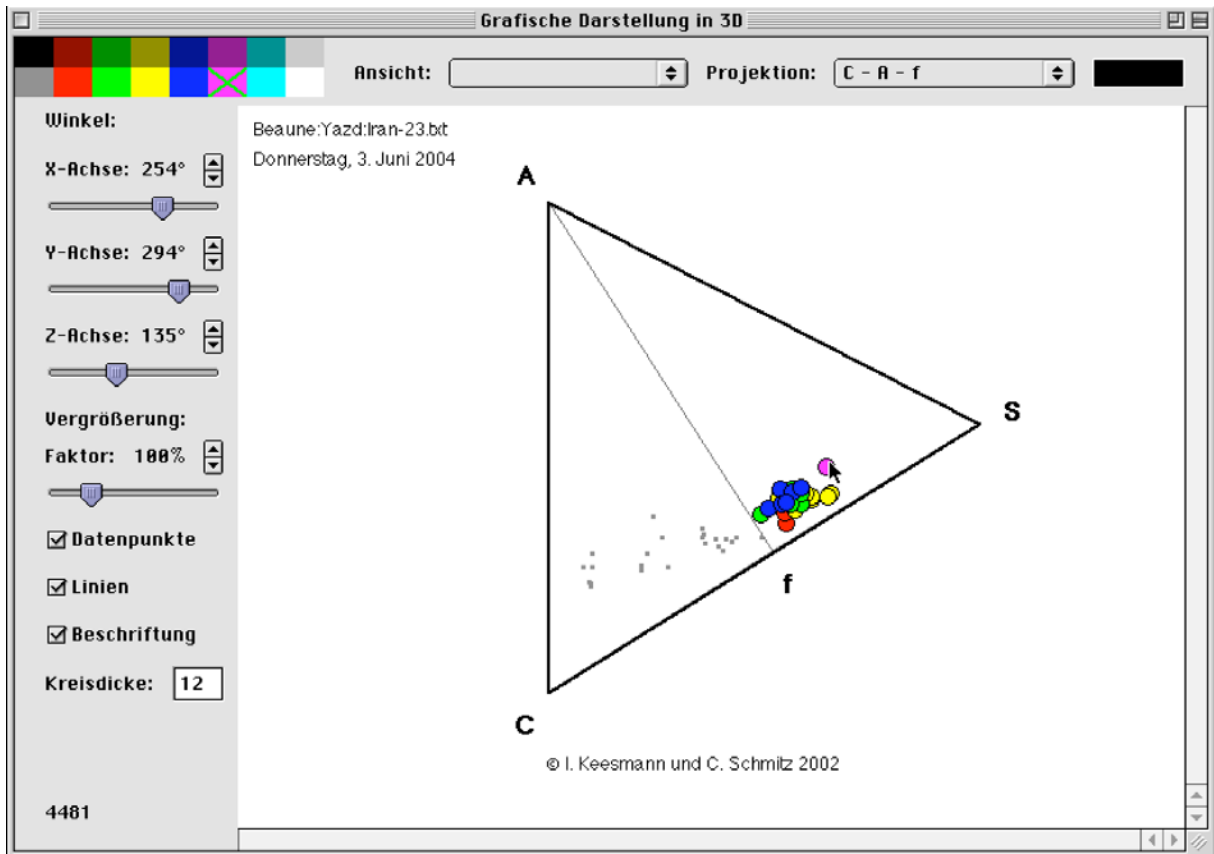
⁹ Eine allgemeine Darstellung des Programms und des theoretischen Hintergrundes kann unter http://www.uni-mainz.de/FB/Geo/Geologie/archaeo/Cebit_Text.pdf abgerufen werden, ebenso stehen hier kostenlose Demo-Versionen des Programms für die Betriebssysteme MacOS, MacOSX und Windows zur Verfügung.



Anr	A	B	C	D	Farbe
4451	28,07	8,60	26,69	34,91	10
4456	31,27	7,70	9,75	49,40	12
4457	27,67	9,20	7,38	53,73	12
4458	31,66	8,20	9,85	48,12	12
4459	27,28	8,90	9,43	48,79	12
4461	28,45	11,00	9,92	47,17	12
4463	18,90	5,25	28,42	39,29	10
4469	6,26	5,65	63,69	18,77	9
4472	0,16	3,40	76,88	10,31	9
4473	9,35	5,93	46,22	35,37	11
4474	7,37	5,05	48,40	30,96	11
4475	9,52	4,60	45,73	24,77	11
4476	11,97	9,30	46,84	26,80	11
4479	6,43	4,10	47,81	39,81	11
4480	18,30	9,60	29,49	40,15	10
4481	12,92	9,30	19,89	47,96	13
4482	32,10	8,50	9,66	42,88	12
4486	24,49	6,90	22,59	42,84	10
4487	11,97	8,00	45,28	30,88	11
4488	8,07	3,40	41,89	37,41	11
4490	11,78	6,05	42,65	32,67	11
4493	11,78	7,25	41,77	36,45	11
5585	20,52	7,80	23,04	44,09	10

Abbildung 9. Datei mit 23 pauschalchemischen Zusammensetzungen von Kupferschlacken aus dem Arbeitsgebiet Saghand - Posht-e-Badam. Tabelle im Format „Text“. Die Liste enthält neben der Analysen-Nummer die Werte C, A, f, S und eine beliebig wählbare Farbkodierung für jede einzelne Analyse. Bildschirmkopie.

Abbildung 10. „3D Graph“ aus den Daten von Abbildung 9. Drehung des Tetraeders $x/y/z=254^\circ/294^\circ/135^\circ$. Fläche CfS senkrecht zur Darstellungsebene. Projektion der Raumpunkte auf die Fläche CAf. Der Zeiger markiert die SiO_2 -reichste Schlacke aus der Datei „Iran-23.txt“ (Analysen-Nummer 4481, Farbcode 13 entsprechend der eingblendeten Farbtafel). Die Punktwolke der Analysen zeigt den engen Korridor der Raumverteilung bei \pm gleich bleibenden Al_2O_3 -Werten (A). Unterschiedliche C/f-Werte führen in der Projektion auf die Fläche CAf zu einer deutlichen Verzerrung der A-Werte. Sie wird umso größer, je kleiner der f-Anteil der Proben ist. Bildschirmkopie.



8 Anhang 2 : Tabelle der verwendeten Analysen

Hauptmann, A. (1998):

Nummer	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	ZnO	MgO	CaO	BaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Summe
4	32,60	0,20	4,89	3,52	36,70	—	1,33	7,92	0,65	3,26	0,72	2,31	94,10
9	40,50	0,22	2,55	1,67	43,20	—	1,00	2,20	0,98	1,57	0,10	0,05	94,04
10	36,20	0,25	2,90	2,51	40,20	—	0,83	1,14	0,60	1,84	0,11	0,18	86,76
11	47,80	0,22	2,63	2,35	29,80	—	1,22	6,03	0,53	2,63	0,40	0,07	93,68
211	40,90	0,34	3,42	2,66	39,80	—	0,20	0,97	1,50	3,17	0,29	0,17	93,42
212	38,00	0,23	2,70	1,17	41,00	—	0,29	2,68	0,84	2,04	0,69	0,18	89,82
231	42,60	0,30	4,86	5,49	33,90	—	0,49	2,29	0,65	1,32	0,42	0,16	92,48
232	43,00	0,21	3,59	1,67	39,80	—	0,46	1,28	0,64	3,79	0,10	0,12	94,66
233	43,80	0,31	5,03	5,40	35,90	—	0,60	2,38	0,67	1,43	0,42	0,14	96,08
241	42,40	0,29	3,75	1,30	41,50	—	0,25	1,47	0,62	3,22	0,36	0,17	95,33
242	41,20	0,20	3,32	5,80	37,90	—	0,73	1,93	0,70	2,42	0,41	0,23	94,84
243	41,40	0,26	3,35	5,72	38,10	—	0,46	1,76	0,82	2,24	0,32	0,15	94,58
271	41,70	0,30	4,81	7,31	37,00	—	0,64	1,99	0,69	1,37	0,42	0,24	96,47
272	43,50	0,21	3,97	1,93	38,10	—	0,77	2,42	0,72	3,88	0,58	0,13	96,21
32	43,80	0,41	4,09	1,92	34,40	—	0,94	3,85	0,15	3,31	0,10	0,04	93,01
334	41,90	0,25	2,45	0,97	37,30	—	0,99	5,10	0,62	1,42	0,10	0,09	91,19
381	38,70	0,29	3,71	10,20	41,50	—	0,15	0,09	1,76	0,63	0,10	0,10	97,23
382	43,00	0,35	3,07	1,87	38,30	—	0,64	3,24	1,19	2,83	0,10	0,05	94,64

Chernykh, E.N. und Rovira, S (1998):

Nummer	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	ZnO	MgO	CaO	BaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Summe
E1/5	47,30	—	4,40	22,70	—	—	0,00	10,00	9,40	2,70	—	—	96,50
E10/1	47,50	—	2,90	22,70	—	—	0,00	9,70	12,40	1,70	—	—	96,90
E11/3	43,40	—	3,70	21,70	—	—	0,00	5,60	8,50	1,70	—	—	84,60
E12/1	50,60	—	2,30	16,20	—	—	0,43	14,00	10,10	2,50	—	—	96,13
E13/3	75,20	—	3,90	9,50	—	—	0,00	3,40	3,20	1,80	—	—	97,00
E13/4	66,30	—	5,00	11,10	—	—	0,00	6,10	7,40	3,00	—	—	98,90
E13/5	64,30	—	3,90	7,10	—	—	0,00	6,00	4,90	2,40	—	—	88,60
E2/2	42,40	—	5,90	30,20	—	—	0,00	10,40	8,90	2,30	—	—	100,10
E6/1	53,30	—	4,30	15,00	—	—	0,00	10,60	7,40	2,40	—	—	93,00
E8/1	58,00	—	8,80	7,20	—	—	0,00	16,90	1,20	2,10	—	—	94,20
E9/2	33,60	—	4,70	46,30	—	—	0,00	9,20	4,30	1,80	—	—	99,90
E8/3	27,90	—	2,20	60,90	—	—	0,00	3,70	1,70	0,71	—	—	97,11

Bagherzadeh, C. (1995):

Nummer	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	ZnO	MgO	CaO	BaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Summe
CB555	41,83	—	13,12	14,87	—	—	2,93	20,08	—	2,01	2,15	—	96,99
CB556	41,63	—	13,09	15,48	—	—	3,02	20,14	—	2,13	1,95	—	97,44
CB557	40,89	—	13,01	15,41	—	—	2,97	20,27	—	2,11	1,92	—	96,58
CB558	41,20	—	13,08	15,20	—	—	2,91	20,08	—	1,95	1,92	—	96,34
CB568	40,67	—	13,09	16,09	—	—	2,84	19,40	—	2,25	2,60	—	96,94
CB569	40,82	—	13,23	16,65	—	—	2,80	19,66	—	2,13	2,49	—	97,78
CB570	40,55	—	13,17	16,67	—	—	2,85	19,54	—	2,01	2,42	—	97,21
CB571	40,94	—	13,58	15,55	—	—	2,94	19,94	—	2,01	1,92	—	96,88
CB612	50,25	—	11,82	13,54	—	—	2,02	11,27	—	3,51	1,43	—	93,84
CB613	50,86	—	11,84	13,83	—	—	2,02	11,20	—	3,60	1,45	—	94,80
CB603	63,17	—	13,66	5,44	—	—	1,62	4,63	—	6,42	1,71	—	96,65
CB604	62,09	—	13,86	5,74	—	—	1,68	4,59	—	6,35	1,71	—	96,02
CB593	58,29	—	27,37	1,46	—	—	0,94	3,03	—	4,68	3,46	—	99,23
CB594	54,68	—	30,79	1,31	—	—	0,71	2,98	—	4,26	3,66	—	98,39
CB595	55,29	—	27,04	1,47	—	—	0,68	3,64	—	4,43	3,74	—	96,29

Guideri, S. und Francovich, R. (1998):

Nummer	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	ZnO	MgO	CaO	BaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Summe
RSS 2289	39,95	—	2,10	34,60	6,60	3,50	—	14,10	—	0,70	0,00	—	101,55
RSS 2291	39,66	—	2,10	34,90	6,60	3,40	—	14,20	—	0,70	0,00	—	101,56
RSS 2458	43,50	—	3,00	29,20	6,70	2,00	—	14,20	—	1,20	0,00	—	99,80
RSS 2459	35,30	—	1,80	41,30	6,90	0,50	—	12,80	—	0,50	0,00	—	99,10
PdG 102-1	34,40	0,20	8,70	33,00	0,20	1,00	3,10	7,90	—	2,10	4,10	0,40	95,10
PdG 102-2	39,60	—	4,30	38,70	0,50	0,40	—	13,10	—	1,70	0,00	—	98,30
MARS 200A	40,60	—	5,80	38,30	0,30	0,50	—	11,60	—	1,90	0,00	—	99,00
MARS 200F	34,20	—	5,30	41,40	0,40	0,80	—	14,30	—	2,30	0,00	—	98,70

Tylecote, R.F. (1982):

Nummer	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	ZnO	MgO	CaO	BaO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Summe
276	42,50	0,00	5,50	0,20	0,00	—	10,60	37,30	—	0,00	2,40	—	98,50
277	38,70	1,50	15,10	1,90	0,63	—	13,20	10,50	—	1,50	5,50	—	88,53
278	39,50	0,00	6,40	0,40	0,00	—	9,80	37,80	—	0,10	2,40	—	96,40
327	44,40	0,53	7,10	1,50	0,38	—	10,80	29,60	—	1,10	2,99	—	98,40
328	42,40	0,60	7,00	1,50	0,40	—	10,20	28,50	—	1,00	1,20	—	92,80
329	43,00	0,00	7,90	2,10	0,00	—	10,00	27,00	—	0,90	2,60	—	93,50
330	49,00	0,60	7,70	1,20	0,30	—	8,90	22,70	—	1,20	1,10	—	92,70
331	47,17	0,70	8,90	2,17	0,44	—	8,47	25,00	—	0,84	3,23	1,39	98,31
332	59,00	1,40	22,50	6,70	0,20	—	1,00	1,40	—	3,10	1,30	—	96,60