

Gold und Silber – Von der Lagerstätte bis zur Verwendung

Umweltgeochemisches Seminar WS 2003/2004

Datum der Abgabe: 30. 01. 2004

Seminarleitung : Prof. Dr. Doris Stüben

Dr. Stefan Norra

Referent : Leila El Gasmi

Inhaltsverzeichnis

TEIL I : Gold

1. Einführung

| | |
|--|---|
| 1.1. Zur Geschichte..... | 3 |
| 1.2. Physikalische und chemische Elementeigenschaften..... | 3 |
| 1.3. Goldvorkommen..... | 4 |

2. Lagerstätten und Lagerstättenbildung

| | |
|-----------------------------------|---|
| 2.1. Die magmatische Abfolge..... | 5 |
| 2.2. Die sedimentäre Abfolge..... | 6 |
| 2.3. Fossile Goldseifen..... | 7 |

3. Die Goldgewinnung

| | |
|---|---|
| 3.1. Die Goldgewinnung aus Erzen..... | 7 |
| 3.2. Die Wiederaufbereitung von Gold..... | 9 |

4. Gold in der Umwelt

| | |
|--|----|
| 4.1. Gold in Böden..... | 9 |
| 4.2. Gold in Oberflächenwässern..... | 10 |
| 4.3. Gefahren durch die Goldgewinnung..... | 10 |
| 4.4 Die Wirkung auf den Menschen..... | 11 |

5. Die Verwendung

| | |
|--|----|
| 5.1. Gold in der Schmuckindustrie..... | 11 |
| 5.2. Gold in der Industrie..... | 12 |

TEIL II : Silber

1. Einführung

| | |
|--|----|
| 1.1. Zur Geschichte..... | 13 |
| 1.2. Physikalische und chemische Elementeigenschaften..... | 13 |
| 1.3. Silbervorkommen..... | 14 |

2. Lagerstätten

| | |
|--------------------------------------|----|
| 2.1. Magmatogene Lagerstätten..... | 14 |
| 2.2. Sedimentogene Lagerstätten..... | 15 |

| | |
|---|-----------|
| 3. Die Gewinnung | 16 |
| 4. Die Wirkung des Silbers | 16 |
| 5. Silber in der Umwelt | |
| 5.1. Silber in Böden | 17 |
| 5.2. Silber in natürlichen Gewässern | 18 |
| 5.3. Silberemissionen | 18 |
| 6. Verwendung | |
| 6.1. Silber in der Photographie | 19 |
| 6.2. Silber in der Elektronik | 19 |
| 6.3. Silber in der Medizin | 20 |

Teil I: Gold

1. Einführung

1.1. Zur Geschichte

Schon im Altertum wurde Gold geschätzt. Die Goldverarbeitung ist seit 4000 v. Chr. bekannt. Bei den Ägyptern, die sich als Abkömmlinge des Sonnengottes betrachteten, wurde Gold als göttliches Metall angesehen mit dem man die Unsterblichkeit erlangen kann. Deshalb war Gold immer Bestandteil der Grabzugaben bei Pharaonen und der Pharaos selbst wurde in Gold gehüllt.¹

Die ersten Goldmünzen wurden 659 v. Chr. im orientalischem Raum geprägt. Die Römer schafften es innerhalb von 300 Jahren alle zu jener Zeit bekannten Minen und Schätze unter ihrer Kontrolle zu bringen und führten Gold als festes Zahlungsmittel ein. Sie kannten auch schon Reinigungsverfahren durch Ausschmelzen mit Blei, Kochsalz oder Kreide. Die Goldgewinnung durch Amalgam geht auf das 11. Jahrhundert zurück. Im Mittelalter versuchten Alchemisten durch Transmutation aus unedlen Metallen Gold herzustellen, was nicht gelang.¹

Die Jagd nach dem Gold ist überschattet von vielen Raubzügen, Plünderungen sowie Unterwerfung und Ausrottung anderer Völker, wie beispielsweise den Azteken, Inkas und den Indianern Nordamerikas.

In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden neue Goldlagerstätten in Nordamerika entdeckt und Gold erlebte einen neuen Aufschwung. 1887 führten die Schotten McArthur und Forrest erstmals die Cyanidlaugung zur Goldgewinnung ein, die noch heute weltweit durchgeführt wird.²

1.2. Physikalische und chemische Elementeigenschaften

Gold ist ein gelbes glänzendes Metall. Es ist sehr beständig gegenüber Luft, Wasser, Sauerstoff, Schwefel, auch können Säuren und Laugen Gold nicht lösen. In Chlorwasser und Königswasser, einem Gemisch aus Salzsäure und Salpetersäure, ist Gold löslich. Außerdem kann es mit Quecksilber in Form von Amalgam und als Cyanidkomplexe gelöst werden. Es besitzt eine gute Leitfähigkeit für Wärme und Elektrizität, die ungefähr 70% der Leitfähigkeit

¹ Nach:[23] <http://www.seinacht.tuttlingen.com/Lexikon/psframe.htm>

² Nach:[5] Prof. Dr. J. Falbe, Prof. Dr. M. Regitz: Römpp Lexikon: Chemie. Band 2. S. 1588-1589

des Silbers entsprechen. Es ist das dehnbarste Metall und aufgrund seiner geringen Härte lässt es sich sehr leicht bearbeiten.³

Die folgende Tabelle fasst die chemischen und physikalischen Eigenschaften zusammen⁴:

| | |
|--------------------|-------------------------|
| Atommasse | 196,96655 |
| Ordnungszahl | 79 |
| Schmelzpunkt | 1064,43 °C |
| Siedepunkt | 2808 °C |
| Oxidationszahlen | 5, 3, 2, 1 |
| Dichte | 19,32 g/cm ³ |
| Härte (Mohs) | 2,5 - 3 |
| Elektronegativität | 2,54 (Pauling) |
| Atomradius | 144,2 pm |
| Elektronenkonfig. | [Xe]4f145d106s1 |
| natürl. Häufigkeit | Au-197 100% |

Tab.1: Physikalische und chemische Eigenschaften von Gold

1.3 Goldvorkommen



Man findet Gold in der Natur als Gediegen Gold. Wie im Bild links zu sehen ist kristallisiert es meist zu sehr bizarren Aggregaten. Oft ist Gediegen Gold mit Silber legiert. Man spricht bei einem Silberanteil >20% von Elektrum. Verbreiteter als Goldaggregate sind mikroskopisch kleine Einschlüsse von Gold in Pyrit (FeS₂) oder Arsenopyrit (AsFeS) in sulfidischen Erzen.⁵

Abb. 1: Gedeiegen Gold

³ Nach [5], Prof. Dr. J. Falbe, Prof. Dr. M. Regitz: Römpp Lexikon: Chemie. Band 2. S.1586-1587

⁴ Nach [23] <http://www.seilnacht.tuttlingen.com/Lexikon/psframe.htm>

⁵ Nach [1] S. Matthes: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. S. 16

2. Lagerstätten und Lagerstättenbildung

2.1 Die magmatische Abfolge

Hierbei handelt es sich um Lagerstätten, die sich aus homogenen und komplexen Schmelzen, den Magmen, gebildet haben. Diese entstehen in tieferen Teilen der Erdkruste sowie im Erdmantel und führen gesteinsbildende Elemente mit. Der Anteil der Elemente hängt von der Herkunft des Magmas und den bis zur Erstarrung ablaufenden Prozessen ab. Dabei kommt es zur Abscheidung von Stoffen und der damit verbundenen Auskristallisation. Man bezeichnet diesen Vorgang als Differentiation des Magmas. Die Differentiation ist abhängig von den Schmelzpunkten der mineralischen Phase und dem Anteil der leichtflüchtigen und flüssigen Komponenten.⁶

Die Goldlagerstätten sind der hydrothermalen Phase zuzuordnen. Es sind katathermale Gold-Quarz-Gänge, dies entspricht einem Temperaturbereich von 400-300°C. Die Gänge besitzen Mächtigkeiten von 0,5-3 m, haben eine bedeutende Erstreckung von bis zu 250 km, wie zum Beispiel die Lagerstätte Mother Lode in Kalifornien, durch hintereinander gereichte Einzelgängen mit gegenseitiger tektonischer Verschiebung. Die Gänge bestehen zu 97-98% aus Quarz, der Gangart, daneben bestehen sie aus verschiedenen Sulfiden, wie Pyrit oder Arsenopyrit. Das Gediengen Gold ist in den Pyriten eingeschlossen und oftmals mit Silber legiert. Handelt es sich um eine abbauwürdige Lagerstätte, dann liegt der Goldgehalt bei 0,001-0,003%, was 10-30g Gold auf eine Tonne Gestein entspricht. Abbauwürdige Lagerstätten gibt es in den USA, Kanada, Australien, Indien und in den GUS-Staaten. Die mächtigste ist Mother Lode in Kalifornien.⁷

Die subvulkanischen Abfolge ist an junge Orogenzonen geknüpft und die Erze an vulkanische Spalten und Ruschelzonen gebunden. Oft füllen Kristalldrüsen Hohlräume aus. Das Freigold ist stark silberhaltig und mit Gangarten und Sulfiden verwachsen, sowie in Pyrite eingeschlossen. Charakteristisch sind außerdem Goldtelluride und Goldselenide. Zu den abbauwürdigen Lagerstätten gehören, die des andesitisch-dacitischen Karpateninnenrandes, zu dem das Slowakische Erzgebirge und das Siebenbürger-Erzgebirge in Rumänien zählen. Des Weiteren gibt es Vorkommen in den USA und im zirkumpazifischen Inselbogen.⁸

⁶ Nach: [9] Dr. R. Gaedecke: Zur Mineralogie der wichtigsten Gesteinsgemengteile. In: Die Entwicklungsgeschichte der Erde. Band I. S. 73-74

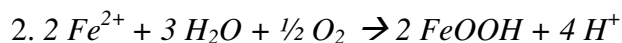
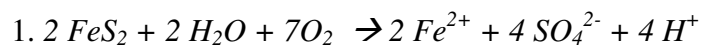
⁷ Nach: [1] S. Matthes: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. S.284

⁸ Nach: [1] S. Matthes: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde S.284

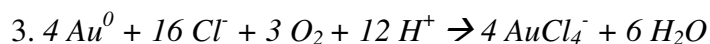
2.2 Die sedimentäre Abfolge

Unter Sedimenten versteht man durch Verwitterung, Transport und Ablagerung von Gesteinen neu entstandene Produkte.⁹

Minerale, durch die Kraft des Wassers transportiert und angereichert, werden als Seifen bezeichnet. Das verwitterungspersistente Gold kommt hierbei in Form von kleinen, dünnen Blättchen vor, da es durch die Bewegung des Schotters ausgewalzt wurde. Selten werden Erbsen bis Nuss große gerundete Körner gefunden, die Nuggets genannt werden und in Einzelfällen 60-70 kg wiegen können. Das Seifengold ist ärmer an Silber als Berggold, da Silber bevorzugt in Lösung geht und Gold somit relativ angereichert wird.¹⁰ Es wurde festgestellt, dass quantitative bedeutsame Mengen an Gold in natürlichen Verwitterungslösungen mit dem Grundwasser transportiert werden, was auch zu einer Anreicherung in Flusssseifen führt. Das Gold bildet hierbei mit Halogeniden und Cyaniden Komplexe. Cyanide werden durch Pflanzen und Pilze beim Abbau organischer Substanz in Böden produziert. Durch ihre Anwesenheit geht Gold als $[\text{AuCN}_4]^-$ in Lösung. Von Bedeutung ist auch die Anwesenheit von Eisenverbindungen. Bei der Verwitterung von Pyrit, die häufig durch die Aktivität von *Thiobactus ferroxidans* und anderen Bakterien eingeleitet oder beschleunigt wird, entstehen Sulfate oder Hydroxide bzw. die entsprechenden Anionen. Dies führt zu einer pH-Wert Erniedrigung und zur Erhöhung der Eh-Werte im Grundwasser. Der Lösungsprozess des Goldes soll an den folgenden Reaktionen dargestellt werden:



Durch diese Reaktionen wird der pH-Wert des Grundwassers herabgesetzt und bei Anwesenheit von Chlorid kann die folgende Reaktion ablaufen:



Die Ausfällung des Goldes erfolgt dann nach einem Transport und bei Anwesenheit von Eisenionen:



Da Eisenhydroxid als Schutzkolloid für den Goldtransport gilt, sind Goldseifen häufig auch mit der Anreicherung von Eisenhydroxid verbunden.¹¹ Das konkretionäre Wachstum findet dann an vorhandenen Goldkörnchen statt.

⁹ Nach: [1] S. Matthes: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde S.301

¹⁰ Nach: [1] S. Matthes: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde S.301

¹¹ Nach: [13] H. Füchtbauer (Hrsg.): Sediment-Petrologie Teil II: Sedimente und Sedimentgesteine S.627-629

Goldseifen findet man in fast allen primären Goldbezirken, vor allem in Kalifornien, Alaska, Nordkanada und in den GUS-Staaten.¹²

2.3 Fossile Goldseifen

Zu den fossilen Seifen zählt das Witwatersrandbecken. Hierbei handelt es sich um eine pyritische Gold-Uran -Paläoseife, die überwiegend mit Quarzkonglomeraten assoziiert ist. Die Goldfelder sind alluviale Schuttfächer und bildeten sich dort, wo ein Fluss aus dem Hinterland in das Becken mündete. Es entstand ein Delta mit verästelten kleinen Flusskanälen. Die enormen Sedimentmächtigkeiten zeigen, dass an der Nordwestflanke wiederholt Absenkungen verbunden mit gleichzeitiger Anhebung des Hinterlandes stattfanden. Dadurch wurden die proximalen Bereiche immer wieder erodiert und resedimentiert, während die distalen Bereiche erhalten blieben. In den Flusskanälen mit relativ hoher Transportenergie kam es zu zum Transport und Ablagerung von Geröllen und Kiesen, sowie zur Anreicherung von Schwermineralen, insbesondere Gold und Uranit.

Die pyritischen gold- und uranführenden Konglomerate enthalten überwiegend milchig weiße gerundete Quarzgerölle, daneben Gerölle von Chert, silifiziertem Schiefer, Vulkaniten, Porphyry und gebänderten Eisenformationen. Allerdings führen nur wenige Witwatersrand-Konglomerate mehr als 10 ppm Gold. Die Goldpartikel weisen nur selten detritische Morphologie auf. Dies wird zurückgeführt auf die geringe Korngröße und einer metamorphen Rekristallisation. Deshalb wird der Witwatersrand heute als eine schwach metamorph überprägte Paläoseife angesehen.¹³ Das Becken ist die bedeutendste Goldlagerstätte. Ihr Anteil an der Weltproduktion beträgt 40-50%.¹⁴

3. Die Goldgewinnung

3.1 Die Goldgewinnung aus Erzen

Gold wird zum einem über das Waschen von Seifengold oder über den Abbau von goldhaltigen Erzen im Unter bzw. Tagebau gewonnen. Allerdings ist dieses Gold vermengt mit anderen Elementen wie z.B. Silber und muss aufbereitet werden. Für die Aufbereitungsschritte werden die gefördert Erze verschiedenen Zerkleinerungsprozessen unterworfen. Diese gehen von Grobmahlen in Backenbrechern über Feinmahlen in Kugelmühlen. Wegen der geringen Konzentration an Gold in den Erzen, findet eine

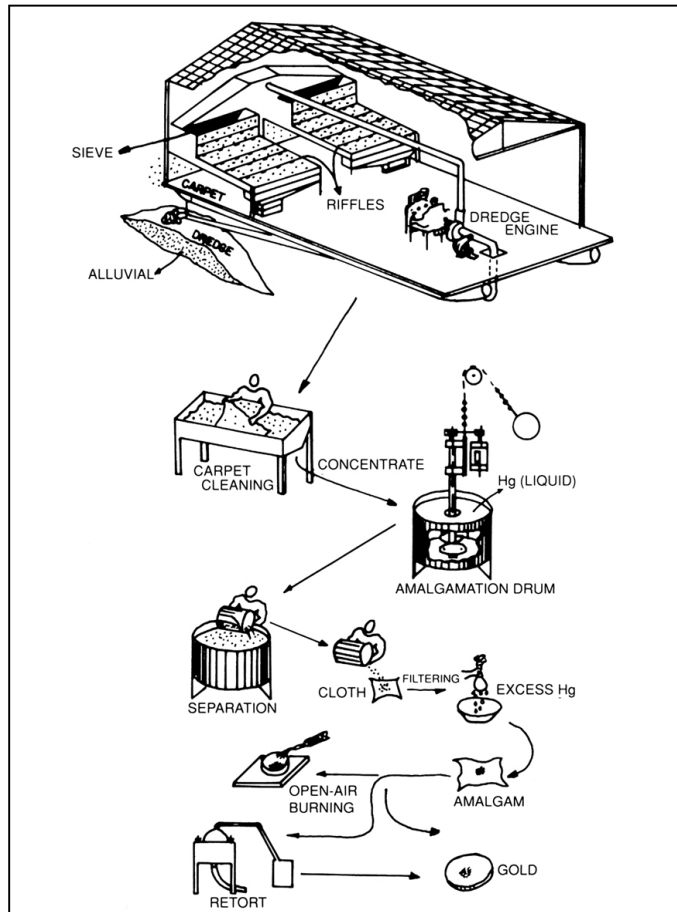
¹² Nach: [1] S. Matthes: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. S.329-330

¹³ Nach: [12] Lexikon der Geowissenschaften, Band 5

¹⁴ Nach: [1] S. Matthes: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde.S.330-331

Vorkonzentration durch Flotation statt. Nach der mechanischen Aufbereitung gelangen die zerkleinerten Erze, die jetzt in einem Schlamm vorliegen zur chemisch-technischen Aufbereitung. Es werden zwei Arten der Aufbereitung unterschieden, die Amalgammethode und die Cyanidlaugung. Die Amalgammethode macht sich zu Nutze, dass Gold mit Quecksilber eine Legierung eingeht und so von der Gangart und anderen Metallen getrennt werden kann.¹⁵

Abbildung 2 zeigt das Verfahren, wie es im Amazonasgebiet noch heute durchgeführt wird.

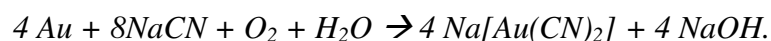


Aus einer Flusseite wird Alluvium abgetragen und auf Rinnenwannen befördert. Es erfolgt die Trennung nach Gewichtsunterschieden.

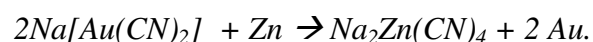
Schwere goldhaltige Teilchen werden als Konzentrat gesammelt und einer Trommel zugeführt, die Quecksilber enthält. Es bilden sich Goldamalgame, die von anderen Bestandteilen getrennt werden und noch einmal einem Behälter mit Quecksilber zugeführt werden. Diese Goldamalgame werden bei ca. 600°C geröstet und das Quecksilber verdampft. Das Endprodukt ist Rohgold.¹⁶

Abb. 2: Das Amalgamverfahren am Amazonas

Bei der Cyanidlaugung wird Gold mittels Natriumcyanid zu einem Komplex gelöst. Die chemische Formel dazu lautet:



Danach werden die gebildeten Komplexe mit Zinkstaub zersetzt:



Dieses Verfahren wird heute allerdings durch den Carbon-Pulp-Prozess abgelöst. Hier wird das Gold aus der Cyanidlaugung an Aktivkohle adsorbiert.¹⁷ Um es von der Kohle zu trennen

¹⁵ Nach [7] R.J. Meyer, E.H. Pietsch: Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie. Band 62. S. 281-283

¹⁶ Nach: [3] L. D.de Lacerda, W. Salomons: Mercury from Gold and Silver Mining: A Chemical Time Bomb? S.13

¹⁷ Nach: [5] Prof. Dr. J. Falbe, Prof. Dr. M. Regitz: Römpp Lexikon: Chemie. Band 2. S.1587

wird eine Ätzlauge hinzu gegeben, die das Gold an sich bindet. Die Trennung des Goldes erfolgt über Elektrolyse.

Die Veredlung des Goldes findet in Raffinerien statt, die das Gold von Silberresten und anderen Metallen trennen. Am Ende entsteht Gold mit einem Reinheitsgrad von 99,9%.¹⁸

3.2. Die Wiederaufbereitung von Gold

Gold kann aus verschiedenen Rückständen und Abfällen wieder zurückgewonnen werden. Wie beispielsweise aus Schlämmen, die bei Laugung oder in Minen anfallen. Aber auch außer Kurs gesetzte Goldmünzen, Goldschmuck, Altmetalle und Industrieabfälle werden aufgearbeitet. Dabei gibt es verschieden Verfahren, die so vielfältig sind, wie das Material, das verwendet wird.

Zur Aufbereitung von Scheidgut, wird dieses zuerst geschmolzen und je nach Metallgehalt mit verschiedenen Chemikalien behandelt. Bei Abfällen mit Rohkupfer wird z.B. PbO, Fe und CaF verwendet. Nach dieser Behandlung wird die Schmelze zu Anoden gegossen und der Elektrolyse in schwach saurer, neutraler oder schwach alkalischer nitrathaltiger Lösung zugeführt. Dabei reichern sich Kupfer und Silber im Katodenschlamm, Gold im Anodenschlamm an.

Wird Gekrätz oder Asche aufbereitet, erfolgt zuerst ein Ausglühen, um das Material von organischen Stoffen zu befreien. Unter Zuschlag von FeO und CaO wird es anschließend geschmolzen, zu Anoden gegossen und elektrolysiert.¹⁹

4. Gold in der Umwelt

4.1 Gold in Böden

Elementares Gold ist sehr stabil, kann aber bei bestimmten Verwitterungsprozessen gelöst werden. Bei einer Temperatur von 25°C und saurem, chloridhaltigem Wasser geht Gold als $[\text{AuCl}_4]^-$ in Lösung, insbesondere wenn starke Oxidationsmittel wie MnO_2 , O_2 oder Fe^{3+} anwesend sind. Aber auch mit den anderen Halogeniden und Cyanid geht Gold, gemäß dem Standardelektronenpotential, stabile Verbindungen ein. Außerdem wird es häufig in Form von organometallischen Verbindungen und Chelaten transportiert. Das Auftreten von Gold in Böden ist abhängig vom Ausgangsgestein und dem Verwitterungsstadium. Das Element findet sich sowohl in feinen Bodenpartikeln als auch in größeren Gesteinsbrocken. Die

¹⁸ Nach: [11] <http://www.goldseiten.de/wissen/info.htm>

¹⁹ Nach: [7] R.J. Meyer, E.H. Pietsch: Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie. Band 62 S. 332-336

Humusschicht ist oft mit Gold angereichert, da die elementare Form als Reduktans für mobile Goldformen eine Rolle spielt.

In Böden, die sich nicht in der Nähe einer Lagerstätte befinden, ist Gold in Konzentrationen von 0,6-20ppb vorhanden. Dabei finden sich die größten Anreicherungen in Chernozemen. In der Nähe von Goldminen, wie beispielsweise in den Minen Regionen von Neuseeland, finden sich Konzentrationen von bis zu 48 ppb Gold.²⁰

4.2. Gold in Oberflächenwässern

Aufgrund der niedrigen Konzentrationen der in natürlichen Gewässern gelösten Goldverbindungen, kann nur durch Laborversuche auf das Verhalten von Gold geschlossen werden. Diese zeigen, dass eine Konzentration von 3-30ppm organischen Materials ausreicht, um $[\text{AuCl}_4]^-$ zu reduzieren und in negative Kolloide zu überführen. Diese sind ca. 8 Monate stabil und nicht größer als 10 μm . Daraus wird geschlossen, dass in einem pH-Bereich von 4-9 Gold als organisch geschützte Kolloide transportiert werden.²¹

4.3 Gefahren durch die Goldgewinnung

Eine große Gefahr für die Umwelt stellen die Anwendungen der Goldgewinnung dar. Bei der Amalgammethode, die noch heute beispielsweise im Amazonasgebiet und auf den Philippinen durchgeführt wird, gelangen erhebliche Mengen an Quecksilber in die Atmosphäre und Biosphäre. Der Durchschnittswert des Quecksilberverlustes für Minen des Madeira Rivers, Brasilien liegt bei 1,32 kg Hg auf 1 kg Gold. In der Mindanao Region, Philippinen, werden viel größere Mengen in die Umwelt abgegeben. So kommen auf 15 kg extrahierten Goldes ca. 26.000 kg Quecksilber, was einem Durchschnittswert von 5 kg Hg/kg Gold entspricht. Somit sind weite Teile des Amazonasgebietes und der Philippinen auf längere Sicht Quecksilber verseucht.²²

Weitere Probleme gehen von Cyanid- und Schwermetallvergiftungen aus, die durch Dammbüche von Rückhaltebecken oder unsachgemäße Lagerung von Abfällen bei der Cyanidlaugerei entstehen können. Ein Beispiel ist der Dambruch der Goldmine von Baia Mare, Rumänien im Januar 2000. Hierbei gelangten 100.000t cyanid- und schwermetallhaltiges Schlammwasser in den Fluss Szamos und in die Nebenflüsse der Theiss. Es kam zu einem Massensterben von Fischen, ca. 500 t, in Szamos, Theiss und Donau.

²⁰ Nach: [11] K.H. Wedepohl (Hrsg.): Handbook of Geochemistry. Volume II/5. S. 79-G-1/2

²¹ Nach: [11] K.H. Wedepohl (Hrsg.): Handbook of Geochemistry. Volume II/5.79-H-2

²² Nach: [3] L. D.de Lacerda, W. Salomons: Mercury from Gold and Silver Mining: A Chemical Time Bomb?. S. 16

Außerdem wurde die Trinkwasserversorgung für 2 Millionen Menschen in diesem Gebiet stark beeinträchtigt. Des Weiteren werden die materiellen Schäden auf ca. 120 Mio. Euro geschätzt.²³ Die Liste dieser Unfälle ist lang und Greenpeace hat ermittelt, dass es seit 1970 jedes Jahr auf der Welt mindestens ein Unglück dieser Art gegeben hat.

4.4. Die Wirkung auf den Menschen

Die Wirkungen von Gold auf Organismen beruhen daher nur auf Kenntnissen von therapeutischen Maßnahmen und Laborversuchen. Es wurde festgestellt, dass Gold heilende Wirkung bei Arthritis und sogar bei Krebspatienten hat. Allerdings wirken Gold(III)-Komplexe, wie beispielsweise $[\text{AuCN}_4]^-$ stark toxisch.²⁴

5. Die Verwendung

5.1. Gold in der Schmuckindustrie

Es werden ca. 65% der jährlichen Goldproduktion zur Schmuckherstellung verwendet. Man stellt Gold in verschiedenen Reinheitsgraden her. In der Fachsprache nennt man dies "Feinheit". Die Feinheit gibt den Anteil des reinen Edelmetalls am Gesamtgewicht in Tausendstel an. Die Maßeinheit ist Karat. Die folgende Tabelle soll dies verdeutlichen:

| Karat | Feinheit | Gold in % |
|-------|----------|-----------|
| 24 | 999,9 | 99,99 |
| 22 | 916,7 | 91,67 |
| 18 | 750 | 75 |
| 14 | 583,3 | 58,3 |
| 10 | 416,7 | 41,7 |
| 9 | 375,4 | 37,54 |

Tab. 2: Maßeinheit des Goldes

Die verschiedenen Länder haben verschiedene Ansprüche an den Reinheitsgrad. So verwenden viele Länder im asiatischen Raum Gold zwischen 22-24 Karat. Die Europäer bevorzugen Gold mit 18 Karat.²⁵ Ein anderer wichtiger Aspekt ist die Legierung des Goldschmucks. So können Zusätze von Silber und Kupfer die Farbe des Goldes verändern.

²³ Nach: [2] K. Fent: Ökotoxikologie. Umweltchemie, Toxikologie, Ökologie. S.72-73

²⁴ Nach: [4] E. Merian: Metalle in der Umwelt: Verteilung, Analytik und biologische Relevanz. S.447-449

²⁵ Nach: [20] <http://www.gold.org/jewellery/technology/caratage/index.html>

Bei 18-karätigem Gold verändern Silber und Kupfer die Farbe folgendermaßen:

| Gold in % | Silber in % | Kupfer in % | Farbe |
|-----------|-------------|-------------|------------|
| 75 | 25 | 0 | grün-gelb |
| 75 | 16 | 9 | blass-gelb |
| 75 | 12,5 | 12,5 | gelb |
| 75 | 9 | 16 | rosa |
| 75 | 4,5 | 20,5 | rot |

Tab. 3: Goldzusätze und Farbveränderungen

Die unterschiedlichen Farben sollen folgende Beispiele zeigen²⁶:



Abb. 3: Ringe mit Silber- und Kupferzusätzen

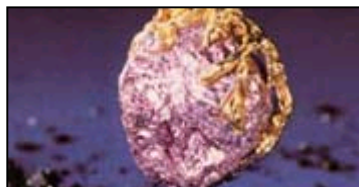


Abb. 4: Anhänger mit Kupferzusätzen

5.2 Gold in der Industrie

In der Industrie findet Gold viele Anwendungen. Neben der Elektronikindustrie wird es auch in der Luft- und Raumfahrtindustrie benutzt. Es werden hauptsächlich Kontakte für elektronische Schalter und Relais hergestellt. Diese Kontakte sind plattiert mit einem dünnen Film aus Gold in Verbindung mit Kaliumcyanid. Dieser Überzug sichert die schnelle Verteilung von Hitze und wirkt sowohl der Oxidation als auch dem Anlaufen des Metalls bei sehr hoher oder extrem niedriger Temperatur entgegen. Dies liefert eine Metalloberfläche mit einem elektrischen Widerstand, der nahe Null liegt.

Gold wird außerdem als Überzug für Fensterglas verwendet. Es bietet zum einen guten Schutz vor Korrosion, zum anderen minimiert Gold durch seine Reflektionskraft die Heizkosten. Gold findet selbst Anwendung im heimischen Gebrauch, so sind bspw. CD's mit einem dünnen Goldfilm überzogen, was die Reflektion erhöht und vor Oxidation und Anlaufen schützt.²⁷

²⁶ Nach: [20] <http://www.gold.org/jewellery/technology/caratage/index.html>

²⁷ Nach [13] http://www.gold.org/discover/knowledge/aboutgold/industrial_uses/index.html

II. Silber

1. Einführung

1.1 Zur Geschichte

Die ersten Silberfunde stammen aus Anatolien und lassen sich ins 6. vorchristliche Jahrhundert einordnen. Die Sumerer verbreiteten es dann in Mesopotamien. Es wurden vor allem Schmuck und Gefäße hergestellt, außerdem wurde es als Lot für Kupfer und Bronze verwandt. Auch die Ägypter bearbeiteten Silber, unter anderem stellten sie Musikinstrumente her. Die Griechen verwendeten Silber zur Münzprägung und der Römer Flaminus führte ca. 217 v. Chr. den Silberdenar als allgemeingültige Währung ein.

Die Blütezeit des Silbers war im Mittelalter, als große Silbervorkommen im Sächsischen Erzgebirge gefunden wurden.

Im 19. Jahrhundert stiegen die USA zum zweitgrößten Silberproduzenten der Welt auf, was ihnen ermöglichte Alaska von Russland abzukaufen.

Bis ins 20. Jahrhundert spielte Silber als Geldmetall eine größere Rolle als Gold.²⁸

1.2. Physikalische und chemische Elementeigenschaften

Silber ist ein weiß glänzendes Edelmetall, dessen Salze meist farblos sind. Es besitzt von allen Metallen die höchste Leitfähigkeit für Wärme und Elektrizität und das höchste Reflektionsvermögen. Nach Gold ist es das dehnbarste Metall, man kann Drähte von 1 km Länge ziehen, die nur 0,005g wiegen. An Luft ist Silber beständig, was wahrscheinlich daher rührt, dass Silber sich mit einer Oxidschicht überzieht und so vor Angriffen geschützt ist. Bei Anwesenheit von Schwefelwasserstoff läuft Silber schwarz an. In wässrigen Lösungen von nicht-oxidierenden Säuren, wie Salzsäure, ist es beständig. Es löst sich allerdings in oxidierenden Säuren, beispielsweise in Salpetersäure und warmer konzentrierter Schwefelsäure. Einige Silberverbindungen, wie zum Beispiel Acetylide, Carboxylate und Phenolate können plötzlich explodieren.²⁹

²⁸ Nach: [12] <http://goldschmiede-bender.de/wissen/metall/silber.html>

²⁹ Nach: [6] Prof. Dr. J. Falbe, Prof. Dr. M. Regitz: Römpler Lexikon: Chemie. Band 5. S. 4091-4092

Die folgende Tabelle fasst die Eigenschaften zusammen:

| | | | |
|------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Atommasse | 107,8682 | Härte (Mohs) | 2,7 |
| Ordnungszahl | 47 | Elektronegativität | 1,93 (Pauling) |
| Schmelzpunkt | 961,93°C | Atomradius | 144,5 pm |
| Siedepunkt | 2163°C | Elektronenkonfiguration | [Kr]4d ¹⁰ 5s ¹ |
| Oxidationszahlen | 3, 2, 1 | Natürliche Häufigkeit | Ag- 107 51,839 % Ag-109 48,161% |
| Dichte | 10,5 g/cm ³ | | |

Tab.4: Physikalische und chemische Eigenschaften des Silbers

1.3 Silbervorkommen



Silber kommt in der Natur als Gediegen Silber vor. Es bildet dann draht-, haar-, oder moosförmige Aggregate. Wie man in neben stehenden Bild ein Silberaggregat in Form eines Bäumchens gebildet. Zu den abbauwürdigen Mineralen gehören unter anderem der Silberglanz (Ag₂S) und silberhaltiger Beiglanz (PbS).³⁰

Abb. 7: Gediegen Silber

2. Lagerstätten

2.1. Magmatogene Lagerstätten

Zu den magmatogenen Silberlagerstätten zählen unter anderem die subvulkanischen Goldlagerstätten, die einen hohen Silberanteil besitzen. Die gilt vor allem für die Vorkommen in Mexiko.³¹

Außerdem zu nennen sind die Blei-Silber-Zink-Lagerstätten, die zu dem mesothermalen Stadium zählen. Hierbei handelt es sich um Spaltengänge im Nebengestein der felsischen Plutone. Hier liegt insbesondere Galenit mit einem Silbergehalt vom 0,01-0,03%, stellenweise auch mit 1% Silber vor. In Betrieb befindliche Gruben sind Linares/Spanien, Cœur

³⁰ Nach:[1] S. Matthes: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde S. 17

³¹ Nach:[1] S. Matthes: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde S.286

d'Alene/Idaho. USA und Iglesias/ Sardinien, Italien. Weitere zum mesothermalen Stadium zählende Lagerstätten sind die Zinn-Silber-Wismut-Lagerstätten in Bolivien.

Des Weiteren gibt es noch Lagerstätten des epithermalen Stadiums. Hier tritt Silber zusammen mit Wismut, Cobalt und Nickel auf. Die Lagerstätte Kongsberg/Norwegen gehört zu den stillgelegten Gruben. Hier haben Amphibolitkörper Silberausfällungen bewirkt und es entwickelte sich in den Gängen von Kongsberg ein Absatz mit großen Silbermengen. Eine Lagerstätte mit großer wirtschaftlicher Bedeutung ist Cobalt/ Ontario, Kanada. Hierbei handelt es sich um ein Gangsystem, welches reich an Silber und Cobalt ist. Abgebaut werden Gediegen Silber und Co-reiche Arsenide.³²

2.2 Sedimentogene Lagerstätten

Sedimentogen Lagerstätten sind durch Verwitterung eines sulfidischen Erzkörpers entstanden.

Bei der Verwitterung eines sulfidischen Erzkörpers unterscheidet man drei Zonen:

Oxidationszone

Zementationszone

Primärerzzone,

wobei die Primärzone nicht verwittert ist. Die sulfidischen Erzkörper werden durch sauerstoffhaltige Sickerwässer sowie Luft in den Porenräumen der Böden zu Sulfaten oxidiert. Die wasserlöslichen Sulfate von Kupfer, Silber, Zink und Eisen werden mit dem Sickerwasser vertikal und lateral transportiert. Sie gelangen in die Zementationzone, wo durch Grundwasser ein Sauerstoffabschluß erreicht wird und somit reduzierende Bedingungen herrschen. Hier werden, gemäß der elektrochemischen Spannungsreihe, die edleren Elemente der gelösten Sulfate durch unedlere primäre Sulfide gefällt.³³ Es bilden sich neue Minerale mit einer relativen Anreicherung des jeweiligen Metalls. Silber wird als Akanthit (α -Ag₂S) und selten als Gediegen Silber gefällt. Solche Lagerstätten befinden sich im Sächsischen Erzgebirge, außerdem in den ariden und tropisch-ariden Klimazonen, da hier die Schwankungen des Grundwasserspiegels stark ausgeprägt sind.³⁴

³² Nach: [1] S. Matthes: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde S.288-291

³³ [14] P. Ramdohr: Die Erzminerale und ihre Verwachsungen. S.34

³⁴ Nach: [1] S. Matthes: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde S.312-315

3. Die Gewinnung

Wie schon bei der Gewinnung von Gold beschrieben müssen auch die Silbererze erst einmal zerkleinert werden. Ist dies geschehen gibt es verschieden Verfahren um Silber aus den Erzstückchen zu anzureichern. Die geschieht über pyrometallurgische Verfahren, wie z.B. das chlorierende Rösten, zum anderem über hydrometallurgische Verfahren, darunter fällt die Cyanidlaugung. Silber kann auch aus Anodenschlämmen, die bei der Raffination von Blei oder Kupfer anfallen gewonnen werden.

Der Schlamm aus der Bleiraffination enthält ca. 4-14% Silber. Andere Bestandteile sind Arsen, Antimon und Bismut und Kupfer. Diese werden über pyrometallurgische Verfahren entfernt. Anschließend wird mit NaNO_3 das Blei verschlackt. Die Produkte enthalten Silber mit Anteilen von 0,45 - 0,75% Kupfer und 0,07-0,15% Blei. Eine andere Methode ist das Sintern bei 340-370°C unter Zugabe von CaCl_2 . Die Masse wird anschließend mit gesättigter CaCl_2 -Lösung gelaugt. Dabei lösen sich Blei, Kupfer und Silber. Durch Zugabe von Na_2S werden die Metallionen als Sulfide gefällt und mit HNO_3 behandelt. Nach Zugabe von NaCl fällt schließlich Silber als AgCl aus der Lösung aus. Durch abschließendes reduzierendes Schmelzen des Chlorids wird Rohsilber gewonnen.³⁵

4. Die Wirkung des Silbers

Silber wirkt antiseptisch. Dies kommt durch die blockierende Wirkung der Silberionen auf Thiol-Enzyme in den Mikroorganismen. Außerdem wirkt Silber fungizid und bakterizid. Werden silberhaltige Medikamente längere Zeit eingenommen, kommt es zur Schwarzfärbung der Haut, aber auch der inneren Organe. Man spricht dann von Argyrie oder Argyrose. Die Schwarzfärbung wird durch die Umwandlung von Silbersalzen zu Sulfiden verursacht. Dies geschieht durch die langsame Aufnahme im Darm und die Abgabe ins Blut. An Licht exponierten Hautstellen wird dann Silbersulfid gebildet. Die Schwarzfärbung ist irreversibel und kann nicht entfernt werden, da die Sulfide tief in der Haut sitzen. Die Haut kann auch durch Kosmetika, die Silbernitrate enthalten unter Bildung von elementarem Silber, Silberoxiden oder Silbersulfiden schwarz gefärbt werden. Dennoch ist ein Anteil von 4% Silbernitrat in Kosmetika erlaubt.³⁶

Außerdem hat Silber eine hohe Affinität zu Amino- und Phosphatgruppen und bildet Komplexe, bspw. mit Aminosäuren, Pyrimiden und Nucleotiden.

³⁵ Nach: [8] R.J. Meyer, E.H. Pietsch: Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie. Band 61.

³⁶ Nach: [6] Prof. Dr. J. Falbe, Prof. Dr. M. Regitz: Römpp Lexikon: Chemie. Band 5. S.4092

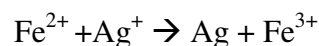
Silber kann auf Pflanzen toxisch wirken. Die akute Toxizität liegt bei 30-7500µg/L und ist abhängig von der Silberverbindung. Silbernitrate sind am giftigsten. Verbindungen mit der geringsten Toxizität sind Thiosulfate und Chlorokomplexe. Akut toxisch wirkt Silber auch auf Wasserorganismen. Bei Süßwassertieren ist die Toxizität sehr variabel und liegt zwischen 0,25µg/L bei *Daphnia magna* (Wasserfloh) und 4500µg/L bei *Gammarus pseudolinmaecus* (Bachflohkrebs). Auch auf einige Fische wirkt Silber toxisch. Hier liegt die akute Toxizität zwischen 3,9µg/L bei Dickkopfelritzen und 280µg/L bei Regenbogenforellen, wobei sich die Toxizität unter Anwesenheit von Chloridionen oder bei hartem Wasser vermindert.

Bei anderen Tieren zeigt Silber oral aufgenommen nur eine geringe Giftigkeit. Allerdings führen Einmaldosen von 2,3g Silbernitrat bei Hunden zum Tod. Beim Menschen treten Vergiftungserscheinungen nur im Zusammenhang mit Fehlmedikationen auf.³⁷

5. Silber in der Umwelt

5.1. Silber in Böden

Hohe Silbergehalte in Böden finden sich vor allem in den A-Horizonten in der Nähe von mineralischen Lagerstätten. Die Mobilität und Fixierung von Silber ist stark an den pH-Wert gebunden. Im saurem Milieu sind Silbersalze gut löslich und mobil, während sie bei einem pH-Wert von >4 immobil sind, da sie dann als unlösliche Oxide oder hydratisierte Oxide vorliegen. Huminstoffe adsorbieren Silber in Form von Chelatkomplexen, was zu einer Anreicherung in den A- Horizonten der Böden führt. Komplexbildende Anionen wie Sulfat, Nitrat, Hydrogencarbonat sowie organische Säuren erhöhen die Löslichkeit des Silbers, die Mobilität nimmt so zu. Anionen wie Phosphat, Chlorid, Bromid, Iodid, Chromat und Arsenat führen zur Fällung von unlöslichen bzw. schwerlöslichen Verbindungen und machen damit das Silber immobil. Wichtig für das Verhalten von Silber ist des Weiteren die Anwesenheit von Eisen bei niedrigen Temperatur- und Druckverhältnissen. Es findet folgende Reaktion statt:



Daraus folgt, dass bei hoher Konzentration an Fe^{2+} -Ionen Silber gefällt wird, während es bei Anwesenheit von Fe^{3+} -Ionen ionisiert und mobilisiert wird.³⁸

³⁷ Nach: [4] E. Merian: Metalle in der Umwelt: Verteilung, Analytik und biologische Relevanz. S.558

³⁸ Nach: [10] K.H. Wedepohl (Hrsg.): Handbook of Geochemistry. Volume II/4. S. 47-G-1/2

5.2 Silber in natürlichen Gewässern

In natürlichen Gewässern liegt Silber in einer Vielzahl von mehr oder weniger löslichen Formen vor. Dazu zählen Chloridkomplexe mit Natrium ($\text{Na}[\text{AgCl}_2]$), Sulfid-, Polysulfid-, und Hydrosulfidkomplexe wie AgS^- , $[\text{Ag}(\text{S}_4)_2]^{3-}$, $\text{Ag}_2\text{S}_x\text{nH}_2\text{S}$, sowie lösliche organische Verbindungen. Zusätzlich tritt Silber in kolloidaler Form als Halogenid, Sulfid und Tellurid auf. Zudem ist Silber stark assoziiert mit Huminkomplexen durch Adsorption oder Bildung von Chelaten. Es kann auch an Plankton adsorbiert werden.

In Quellwässern ist der Silbergehalt deutlich erhöht gegenüber Flusswasser oder Seewasser, da saures Wasser mehr Silber transportiert als neutrales oder alkalisches Wasser, die Chloride, Sulfide sowie Eisen und Mangan führen tendieren außerdem dazu mit Silber angereichert zu sein.³⁹

5.3 Silberemissionen

Die jährliche Silberemission in die Umwelt durch industrielle Abfälle liegt bei ca. 2500 t. Davon gelangen 150 t in Klärschlämme und 80 t in Oberflächenwässern. Da Klärschlämme zu Düngezwecken verwendet werden, kann dies zu einer Verzehnfachung des Silbergehalts im gedüngten Boden führen. Somit gelangt Silber durch Anreicherungen in Pflanzen auch in die Nahrungskette des Menschen. Silberspuren befinden sich in vielen Nahrungsmitteln und Tiergeweben. In Mehl konnten unter anderem $0,3 \mu\text{g/g}$ und in Kleie $0,9 \mu\text{g/L}$ gefunden werden. Der durchschnittliche Silbergehalt bezogen auf das Trockengewicht beträgt in Rind-, Lamm-, und Schweinefleisch zwischen $0,004$ und $0,024 \mu\text{g/g}$. Das führt dazu, dass von der Bevölkerung ca. $27 - 88 \mu\text{g}$ Silber täglich aufgenommen wird und somit ein Mensch ca. 9mg innerhalb von 50 Jahren in seinem Körper anreichert.⁴⁰

³⁹ Nach: [10] K.H. Wedepohl (Hrsg.): Handbook of Geochemistry. Volume II/4. 47-H-1/2

⁴⁰ Nach: [4] E. Merian: Metalle in der Umwelt: Verteilung, Analytik und biologische Relevanz. S. 556-557

6. Verwendung

Silber findet die häufigste Anwendung in der Schmuck- und Münzherstellung, in der Photographie sowie als Überzug für Spiegel, Glas und andere Metalle. Aber es findet auch in der Medizin sowie im Elektronikbereich Verwendung.

6.1 Silber in der Photographie

Der photographische Prozess beruht auf der Anwesenheit von Silberhalogeniden, die sich auf dem unbelichteten Film befinden. Bei Belichtung werden diese mit Hilfe von Entwicklungsemulsionen zu metallischem Silber reduziert.⁴¹ Allerdings werden nicht alle Silberhalogenide reduziert, nämlich die die nicht ausreichend mit Licht versorgt wurden. Diese werden mit der Fixierlösung heraus gewaschen.⁴² Um Farbbilder zu erhalten, werden die Silberhalogenide mit Farbmolekülen überzogen. Im Jahr 2002 wurden weltweit allein für die Photographie 205 Millionen Trog Unzen an Silber verbraucht.⁴³ (1 Trog Unze = 31,1035 g Silber)⁴⁴. Das entspricht einer Menge von ca. 6.355 t.

6.2 Silber in der Elektronik

Da Silber die beste elektrische Leitfähigkeit unter den Metallen besitzt, findet es in der Elektronik eine Vielzahl von Anwendungen, bspw. als Schalter, Kontakte, Sicherung.

Im Haushalt ist Silber in einer Vielzahl von Schaltern enthalten, da diese selbst bei Überhitzung nicht korrodieren und somit für Starkstromleitungen, wie bspw. in Kühlschränken, geeignet sind. Auch in anderen Haushaltsgeräten wird Silber verwendet, wie z.B. Kontakte in Waschmaschinen, Ölpumpen der Heizung, Wäschetrocknern und ähnliches. In einem Auto werden ca. 40 Schalter aus Silber eingebaut, um den Motor zu starten, für die Bremse und andere elektronisches Zubehör. Silberkontakte finden sich auch in Aufzügen, Rolltreppen bis hin zu Lokomotiven. Allein in den USA werden jährlich 20 Millionen Trog Unzen Silber für den Elektronikbereich verbraucht.⁴⁵ Dies entspricht einer Menge von ca. 620 t.

⁴¹ Nach: [15] <http://www.silverinstitute.org/uses.php>

⁴² Nach: [24] http://www.phototec.de/sw_magazin/wissen_main.php3

⁴³ Nach: [15] <http://www.silverinstitute.org/uses.php>

⁴⁴ Nach: [15] <http://www.silverinstitute.org/uses.php>

⁴⁵ Nach: [16] <http://www.goldseiten.de/wissen/info.htm>

6.3 Silber in der Medizin

Schon früh war die keimtötende Wirkung des Silbers bekannt. So verwendeten schon die Phönizier Wassergefäße aus Silber, um Wasser auf langen Reisen sauber zu halten. Auch heute werden silberhaltige Tabletten zur Wasserreinigung, bspw. als Campingausrüstung, verkauft. In der Medizin von Heute gibt es silberhaltige Medikamente, die vor allem in der Wundheilung, als Augentropfen bei Säuglingen oder in der Kathetermedizin eingesetzt werden. Silber vor allem wegen seiner geringen Nebenwirkungen geschätzt. Außer der Argyrie gibt es keine, die mit geeigneter Dosierung unter Kontrolle zu halten sind. Es wurde man festgestellt, das Silbersulfadiazin förderlich beim Aufbau neuer Zellen ist und findet deshalb wird es vor allem bei starken Verbrennungen seine Anwendung eingesetzt.⁴⁶

⁴⁶ Nach: [15] <http://www.silverinstitute.org/uses.php>

III. Literaturangabe

1. Buchquellen

- [1] S. Matthes: Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2001.
- [2] K. Fent: Ökotoxikologie. Umweltchemie, Toxikologie, Ökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 2003.
- [3] L. D.de Lacerda, W. Salomons: Mercury from Gold and Silver Mining: A Chemical Time Bomb?. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 1998.
- [4] E. Merian: Metalle in der Umwelt: Verteilung, Analytik und biologische Relevanz. Verlag Chemie, Weinheim 1984.
- [5] Prof. Dr. J. Falbe, Prof. Dr. M. Regitz: Römp Lexikon: Chemie. Band 2. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1997
- [6] Prof. Dr. J. Falbe, Prof. Dr. M. Regitz: Römp Lexikon: Chemie. Band 5. Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1998
- [7] R.J. Meyer, E.H. Pietsch: Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie. Band 62. Verlag Chemie GmbH, Weinheim 1954
- [8] R.J. Meyer, E.H. Pietsch: Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie. Band 61. Verlag Chemie GmbH, Weinheim 1970
- [9] R.J. Meyer, E.H. Pietsch: Gmelins Handbuch der Anorganischen Chemie. Band 61. Verlag Chemie GmbH, Weinheim 1970
- [10] K.H. Wedepohl (Hrsg.): Handbook of Geochemistry. Volume II/4. Springer-Verlag, Berlin 1974
- [11] K.H. Wedepohl (Hrsg.): Handbook of Geochemistry. Volume II/5. Springer-Verlag, Berlin 1974
- [12] Lexikon der Geowissenschaften, Band 5. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Stuttgart 2002
- [13] H. Füchtbauer (Hrsg.): Sediment-Petrologie Teil II: Sedimente und Sedimentgesteine. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart 1988
- [14] P. Ramdohr: Die Erzminerale und ihre Verwachsungen. Akademie Verlag, Berlin 1974

2. Internetquellen

[10] <http://www.silverinstitute.org/uses.php>

[11] <http://www.goldseiten.de/wissen/info.htm>

[12] <http://goldschmiede-bender.de/wissen/metall/silber.html>

[13] http://www.gold.org/discover/knowledge/aboutgold/industrial_uses/index.html

[14] http://www.gold.org/discover/knowledge/aboutgold/gold_jewellery/index.html

[15] <http://www.gold.org/jewellery/technology/caratage/index.html>

[16] <http://www.gold.org/jewellery/technology/alloys/index.html>

[17] <http://www.goldseiten.de/wissen/gewinnung.htm>

[18] <http://www.seilnacht.tuttlingen.com/Lexikon/psframe.htm>