

Zeitschrift: Minaria Helvetica : Zeitschrift der Schweizerischen Gesellschaft für historische Bergbauforschung = bulletin de la Société suisse des mines = bollettino della Società svizzera di storia delle miniere

Herausgeber: Schweizerische Gesellschaft für Historische Bergbauforschung

Band: - (2000)

Heft: 20a

Artikel: Biohydrometallurgie : eine uralte Technik zur Metallgewinnung mit Hilfe von Pilzen und Bakterien

Autor: Brandl, Helmut

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1089764>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 22.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Biohydrometallurgie

Eine uralte Technik zur Metallgewinnung mit Hilfe von Pilzen und Bakterien

Zusammenfassung

Durch die Eigenschaft einer Reihe von Mikroorganismen, organische und anorganische Säuren zu produzieren oder Redoxprozesse zu katalysieren, lassen sich Metalle aus festen Substraten (Erze, Metallkonzentrate) mobilisieren und durch geeignete Methoden als Wertstoff zurückgewinnen. Diese Techniken, deren Anfänge mehrere tausend Jahre zurückliegen, werden heute erfolgreich im Kupfer- und Goldbergbau eingesetzt und lassen sich auch für die biologische Behandlung von festen Abfällen verwenden. Mikrobiologische Laugungsverfahren werden generell als umweltfreundliche Technologien mit einem niedrigen Energieaufwand und geringen Emissionen angesehen.

Resumé

Biohydrométallurgie: Une très ancienne technique de production métallique par fungus et bactéries

Certains micro-organismes, par leur aptitude à produire des acides organiques et inorganiques ou à catalyser des processus oxydoréducteurs, permettent de remobiliser les métaux contenus dans des substrats solides (minerais, concentrés métalliques) et de les récupérer par des méthodes adéquates sous forme de produits commercialisables. Ces techniques, dont les débuts remontent à plusieurs milliers d'années, sont appliquées de nos jours avec succès dans les mines de cuivre ou d'or, et peuvent être étendues au traitement de déchets solides. Les procédés de lixiviation microbiologiques sont considérés de façon générale comme peu gourmands en énergie et peu polluants.

Der biologische Bergbau

Mikrobiologische Extraktionsverfahren («biologische Laugung», «bioleaching» oder «biomining») stellen eine alternative Möglichkeit zu traditionellen schmelztechnologischen (pyrometallurgischen) Methoden dar, um Metalle aus mineralischen Primärrohstoffen zu gewinnen. Eine Reihe von Mikroorganismen sind als Säureproduzenten zum „bioleaching“ befähigt (Krebs et al., 1997), wobei zwischen autotrophen (CO₂ als Kohlenstoffquelle) und heterotrophen Organismen (organische Kohlenstoff-

quellen) unterschieden werden muss. Autotrophe sind als Produzenten von anorganischen Säuren (Schwefelsäure) bekannt, wogegen Heterotrophe organische Säuren (Zitronen-, Glucon-, Milch-, Wein-, Äpfelsäure oder Oxalsäure) bilden.

Bei der Erzbehandlung im industriellen Massstab werden vor allem autotrophe *Thiobacillus* oder *Leptospirillum*-Arten mit einem pH-Optimum von 1 bis 3 eingesetzt, welche reduzierten (sulfidischen) Schwefel und reduziertes Eisen (Fe^{2+}) zu Schwefelsäure und Fe^{3+} oxidieren (Bosecker 1994, Rawlings 1997). Auch durch heterotrophe Pilze (z.B. *Aspergillus* oder *Penicillium*) können Primär- und Sekundärrohstoffe behandelt werden (Burgstaller & Schinner 1993, Bosshard et al. 1996, Brandl et al. 1999).

Biohydrometallurgie vereint in interdisziplinärer Weise Bereiche der Mikrobiologie, der Geologie, der Biotechnologie, der Hydrometallurgie und der Verfahrenstechnik und umfasst technische Verfahren der Metallmobilisierung mit anschliessender Ausfällung, Reduktion oder Elektrolyse. Diese Technologien werden im industriellen Massstab bereits erfolgreich in der Kupfer-, Gold-, Uran-, Kobalt- und Nickelgewinnung eingesetzt und ermöglichen eine Steigerung der Metallausbeute, welche durch konventionelle, thermische oder physikalisch-chemische Methoden nicht zu erreichen ist. So wird Kupfer in sulfidischen Erzen zu Kupfersulfat oxidiert und wasserlöslich gemacht, wobei der Wertstoff Kupfer in die Flüssigphase geht. Bei der Goldgewinnung aus goldhaltigem Pyrit oder Arsenopyrit werden diese Mineralien oxidiert, und der Wertstoff Gold bleibt als Konzentrat in der Festphase zurück. Biohydrometallurgische Verfahren sind besonders geeignet für Erze mit einem geringen Metallgehalt oder für minderwertigen Minenabraum.

Frühe Wurzeln der Biohydrometallurgie

Obschon die Entdeckung durch Colmer und Hinkle (Colmer & Hinkle 1947), welche eine direkte Beteiligung von Mikroorganismen bei der Oxidation von sulfidischen Mineralien und einer damit verbundenen Versauerung von Minenabwässern belegten, im allgemeinen als Grundstein zur Entwicklung der Biohydrometallurgie angesehen wird, reichen die Wurzeln dieses interdisziplinären Gebiets mehr als 2000 Jahre zurück.

In seinem Werk über die Naturwissenschaften beschreibt der römische Schriftsteller Gaius Plinius Secundus d. Ä. (23–79 n. Chr.), wie verschiedene Kupferminerale mit Hilfe eines Laugungsverfahrens gewonnen wurden. Eine Übersetzung der entsprechenden Textstellen (33. Buch, §86; siehe Quellentext 1) lautet (König 1989): «Chrysokolla [Kupfersilikat], ist eine Flüssigkeit in den [schon] erwähnten Goldgruben, die aus der Goldader fliesst, wobei sich bei der winterlichen Kälte der Schlamm bis zur Härte des Bimssteins verdichtet. Man weiss aus Erfahrung, dass die geschätztere in Kupfergruben, die nächstfolgende in Silbergruben entsteht. Man findet sie auch in Bleigruben, die aber noch weniger Wert hat als die aus den Goldgruben. In

Liber XXXIII

§86 *Chrysocolla umor est in puteis, quos diximus, per venam auri defluens crassescente limo rigoribus hibernis usque in duritiam pumicis. Laudatiorem eandem in aerariis metallis et proximam in argentariis fieri conpertum est. Invenitur et in plumbariis, vilior etiam auraria. In omnibus autem his metallis fit et cura multum infra naturalem illam inmissis in venam aquis leniter hieme tota usque in Iunium mensem; dein siccatis Iunio et Iulio, ut plane intellegatur nihil aliud chrysocolla quam vena putris.*

Liber XXXIV

§123 *Graeci cognationem aeris nomine fecerunt et atramento sutorio; appellant enim chalcanthon. Nec ullius aequae mira natura est. Fit in Hispaniae puteis stagnisve id genus aquae habentibus. Decoquitur ea admixta dulci pari mensura ei in piscinas ligneas funditur. Immobile super has adhaerescens limus vitreis acinis imaginem quandam uvae reddit. Exemptum ita siccatur diebus XXX. Color est caeruleus perquam spectabili nitore, vitrumque esse creditur; diluendo fit atramentum tinguendis coriis.*

§124 *Fit in pluribus modis: genere rae eo in scrobes cavato, quorum e lateribus destillantes hiberno gelu stirias stalagmiam vocant, neque est purius aliud. Sed ex eo, candium colorem sentiente viola, lonchoton appellant. Fit et in saxorum catinis pluvia aqua contrivato limo gelante.*

§125 *Fit et salis modo flagrantissimo sole admissas dulces aquas cogente.*

allen diesen Bergwerken aber wird auch eine weit unter jener natürlichen stehende Art künstlich hergestellt, indem man während des ganzen Winters bis zum Monat Juni Wasser langsam der Grube zuführt; dann lässt man es im Juni und Juli vertrocknen, so dass klar hervorgeht, dass die Chrysokolla nichts anderes ist als eine zersetzte Ader.»

Weiter wird die Gewinnung Kupfersulfat erläutert (34. Buch, §123–125; siehe Quellentext 1) (König 1989): «Die Griechen haben durch den Namen eine Verwandtschaft des Kupfers auch mit der Schusterschwärze [Kupfervitriol, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$] angezeigt; sie nennen diese nämlich Chalcathon. Nichts anderes hat eine gleich wunderbare Beschaffenheit. Sie bildet sich in Spanien in Brunnen und Sümpfen, die Wasser dieser Art enthalten. Man kocht sie ein, fügt die gleiche Menge Süßwasser dazu und giesst sie in hölzerne Behälter. Über diesen hängen an beweglichen Querhölzern mit kleinen Steinen gespannte Schnüre herab, an die sich die Ausscheidung ansetzt, die infolge ihrer gläsernen Beeren das Aussehen einer Traube zeigt. Ihre Farbe ist blau, mit einem sehr ansehnlichen Glanz, so dass man sie für Glas halten könnte; durch Auflösen erhält man Schusterschwärze zum Färben der Häute. Sie entsteht auf mehrere Arten, indem man in dieser Art des Bodens Gruben aushölt, aus deren Seiten durch die Winterkälte Eiszapfen hervorkommen, die man Stalagmias nennt, und kein anderes [Schwarz] ist reiner. Wenn es aber von Veilchenblau in eine heller Farbe spielt, nennt man es Lonchoton. Es bildet sich auch in Felshöhlungen, wo der vom

In der Übersetzung von Walsh (1927):

There was a large low house sheltering the ingress of the mine. It was dug into the hill like a cave, in width so that three men touched, in height so that the tallest could walk upright, and on a slight incline. At the bottom, about six hundred feet from the entrance, there was a lake of tepid, thick, green, greasy water. [...] The water dripping from the porous hill drop by drop is collected throughout the twenty-four hours in Roman amphorae. Slaves carried it out and poured it into square earthen-ware troughs located at the entrance of the house, where after a few days it thickened and chalcantnos [iron sulfate] was made. [...] The mine was excavated little by little by the slaves over many years. When the dripping water begins to lessen the slaves dig further into the hill.

Regenwasser zusammengeführte Schlamm gefriert; es entsteht auch wie das Salz, wenn man unter grösster Sonnenhitze zugeführtes Süsswasser zum Verdunsten bringt.» Weitere Hinweise auf eine Gewinnung von Kupfer analog zu denjenigen, die von Plinius beschrieben werden, findet man in den Reiseberichten des römischen Arzts und Naturforschers Claudius Galenus (129–199 n. Chr.). Er schildert wie auf Zypern wasserdurchlässiges, kupferführendes Gestein gelaugt und metallisches Kupfer durch die Zugabe von elementarem Eisen (Zementation) gewonnen wurde (Walsh 1927) (siehe Quellentext 2).

Aus China stammen Berichte über Laugungsverfahren zur Kupfergewinnung («solution mining»), welche neben pyrometallurgischen Techniken auch die Anwendung von hydrometallurgischen Methoden im grosstechnischen Massstab um das Jahr 1000 belegen (Pu 1986). So sollen pro Jahr etwa 3000 t Kupfer produziert worden sein, wovon 500 t auf hydrometallurgische Weise, was einem Anteil von ca. 17% entspricht. Gegen Ende der Nördlichen Sung Dynastie (im Jahre 1127) stieg der Anteil gegen 25% und soll etwa 100 Jahre später während der Südlichen Sung Dynastie 85% betragen haben (Pu 1986).

Der Arzt und Mineraloge Georgius Agricola (1494–1555) erwähnt in seinem Werk *de re metallica* ebenfalls Techniken zu Kupfergewinnung, die auf der Biohydrometallurgie beruhen (Schiffner 1977). Agricolas Ausführungen werden durch einen Holzschnitt illustriert (Fig. 1). Eines der Verfahren, das Agricola beschreibt, ist einer der ersten Hinweise auf eine Technik, die heute noch zur Behandlung von Kupfererzen mit einem geringen Metallgehalt oder von Minenabraum angewandt wird, die sogenannte Haufen-Laugung (heap leaching) (siehe Quellentext 3). Er hatte erkannt, dass genügend Feuchtigkeit und eine verstärkte Belüftung zur Auflösung des Gesteins von Bedeutung sind, und liefert so erste Hinweise auf die Beteiligung von Mikroorganismen, welche auf die Anwesenheit von Wasser und Sauerstoff angewiesen sind.

Plinius erwähnt Spanien in seinem Text. Mit grosser Wahrscheinlichkeit bezieht er sich auf die Bergbauggebiete in der Region des Rio Tinto nahe Sevilla. Die Rio Tinto



Fig. 1: Holzschnitt aus dem Buch *de re metallica* von Georgius Agricola (1494–1555): Kupfersulfat-Lösung wird in Bottichen aus einem Stollen in ein Becken zur Aufkonzentrierung (mit Hilfe von Sonnenwärme) transportiert. Im Hintergrund sieht man, wie Minenabwasser direkt in Becken aufgefangen wird.

Mine wird als Geburtsort der Biohydrometallurgie angesehen. Schon zu römischen Zeiten sollen hydrometallurgische Verfahren angewendet worden sein, um kupferführende Gesteine vor der Verhüttung zu behandeln und die Metallausbeute damit zu erhöhen (Koucky und Steinberg 1982). Eine Blüte des «bioleaching» erlebte die Rio Tinto Mine um die Jahrhundertwende, als Kupfer im grossen Massstab biologisch gewonnen wurde (Salkield 1987). Einer der Gründe für die Entwicklung von hydrometallurgischen Methoden war die Suche nach Möglichkeiten zur Reduktion der Umweltbelastung durch Säure- und Staub-Emission aus der pyrometallurgischen Behandlung.

Schon in den frühen 20er Jahren wurde die Oxidation von Pyrit und von Zinksulfid durch schwefeloxidierende Bakterien beschrieben und eine industrielle Anwendung zur Zinkgewinnung vorgeschlagen (Rudolfs 1992, Rudolfs & Helbrunner 1922) (siehe Quellentext 4). Rudolfs untersuchte die Oxidation von Pyrit zu Schwefelsäure, um damit Phosphate besser für Pflanzen verfügbar zu machen.

Bis in die 40er Jahre hielt man aber die Metallmobilisierung aus Gesteinen für eine rein chemische Reaktion unter Beteiligung von Wasser und Sauerstoff und schenkte offensichtlich den Arbeiten von Rudolfs und Helbrunner wenig Beachtung. Ausgehend von den erwähnten Versuchen von Colmer und Hinkle entstand 1958 ein erstes Patent zur biologischen Gewinnung von Kupfer aus kupferhaltigen Erzen (Zimmerley et al. 1958). Anfang der 60er Jahre wurde in den USA die erste kommerzielle Anlage («copper dump leaching») in Betrieb genommen.

In der Übersetzung von Schiffner (1977):

Vitriol kann nach vier Verfahren gewonnen werden; nach zwei Verfahren aus Vitriolwasser, nach einem aus Lösungen, die grauen, schwarzen oder roten Vitriol enthalten, und schliesslich nach einem Verfahren aus vitriolhaltigen Erden, Steinen oder gemischten Mineralien. Vitriolwasser wird in Behältern gesammelt; und wenn es von da nicht abgeleitet werden kann, so schöpfen es die Arbeiter mit Eimern heraus und giessen es in warmen Gegenden und im Sommer auf Plätze, die unter freiem Himmel etwas vertieft angelegt sind, oder man bringt das Vitriolwasser mit Hebezeugen aus den Schächten heraus und leitet es durch Rinnen in die Gruben, in denen es durch Sonnenwärme verdichtet wird.

[...]

Nach dem vierten Verfahren wird Vitriol aus vitriolhaltigen Erden und Gesteinsarten gewonnen. Solche Stoffe werden zunächst zusammengefahren, aufgehäuft, fünf bis sechs Monate lang dem Frühjahrs- oder Herbstregen, der sommerlichen Wärme und dem Winterfrost ausgesetzt und öfters mit Schaufeln umgewendet, damit die Teile, die unten lagen nach oben kommen. Auf diese Weise wird alles der Luft ausgesetzt und abgekühlt; die Erde wird lose und locker, und das Gestein, das vorher hart war, wird weich.

Rudolfs 1922 (Soil Science 14:135)

Conclusions: (1) From these studies it seems evident that iron pyrites can be attacked by microorganisms and changed into the sulfate form. [...]

Rudolfs und Helbrunner 1992 (Soil Science 14:459)

From the data presented the following tentative conclusions may be drawn: (1) Microorganisms are able to transform zinc sulfide to zinc sulfate. [...] (5) A possible biological method can be worked out for economical utilization of low-grade zinc sulfide ores.

Heutige industrielle Anwendungen

Die Fähigkeit der mikrobiellen Metallmobilisierung wird heute mittels verschiedener Verfahren für einen industriellen Einsatz genutzt: *in situ* Laugung (*in situ* leaching), Haldenlaugung (dump leaching), Haufenlaugung (heap leaching), Laugung im Bioreaktor (tank leaching). Tabelle 1 gibt einen Überblick über verschiedene Standorte und Technologien. Es ist daraus ersichtlich, dass die Verfahren vor allem für die Gold- und Kupfergewinnung, in kleinerem Massstab für Uran und seit kurzem auch für die Kobalt- und Nickelgewinnung eingesetzt werden (Krebs et al. 1997).

Um nach Beendigung des Untertagebergbaus noch Wertstoffe aus dem Erzvorkommen zu gewinnen, werden die Stollen und Schächte mit einer Bakteriensuspension

Bezeichnung Lokalität (Land)	Metall	Ausgangsmaterial	Technologie	Kapazität (t/Tag)	Ertrag (t/Jahr)
Wiluna (Australien)	Au	Flotationskonzentrat	Tanklaugung (480 m ³)	155	
Girilambone (Australien)	Cu	Chalcocit	Haufenlaugung	2'000	14'000
Gunpowder (Australien)	Cu	Chalcocit, Bornit	<i>in situ</i> Laugung		13'000
Maggie Hays (Australien)	Ni	Konzentrat	Tanklaugung (Pilotanlage)		7
Sao Bento (Brasilien)	Au	Flotationskonzentrat	Tanklaugung (550 m ³)	150	
Goldbridge (Canada)	Au	Au-haltiger Pyrit, Markasit, Arsenopyrit	Tanklaugung (225 m ³)	75	
Cerro Colorado (Chile)	Cu	Chalcocit	Haufenlaugung	16'000	60'000
Quebrada Blanca (Chile)	Cu	Chalcocit	Haufenlaugung	17'300	75'000
Ashanti (Ghana)	Au	Flotationskonzentrat	Tanklaugung (900 m ³)	960	
Malanjhand (Indien)	Cu	Malachit, Chalkosin, Bornit, Covellin	Haufenlaugung	2.5	
Fairview (Südafrika)	Au	Flotationskonzentrat	Tanklaugung (90 m ³)	40	
Kasese (Uganda)	Co	Flotationskonzentrat	Tanklaugung (4x1350 m ³)		1'000
Carlin (USA)	Au	goldhaltiges sulfidisches Erz	Haufenlaugung	10'000	
Chino (USA)	Cu	Chalcocit, Chrysokoll	Haufenlaugung		55'000
San Manuel (USA)	Cu	Chalcocit	<i>in situ</i> Laugung		20'000

Tabelle 1: Eine Auswahl industrieller «bioleaching» Anlagen für Gold, Nickel, Kupfer und Cobalt (nach Rawlings 1997).

geflutet (*in situ* Laugung). Die Laugungsflüssigkeit wird nach einer gewissen Reaktionszeit wieder abgepumpt und für eine weitere Aufbereitung gesammelt. Voraussetzung für eine *in situ* Laugung ist eine gute Wasserdurchlässigkeit des Gesteins sowie eine ausreichende Sauerstoffverfügbarkeit.

Für eine Haufen- oder Haldenlaugung werden Abraummateriale oder minderwertige Erze, die für eine konventionelle Aufbereitung wegen zu hoher Transport- und Energiekosten nicht geeignet sind, auf einer wasserundurchlässigen Unterlage (Kunststoffolie, Betonwanne) zu Halden aufgeschüttet (Fig. 2). Die Einbringung der Laugungsflüssigkeit (Nährmedium) erfolgt in den obersten Teil der Halde entweder durch kontinuierliche Besprühung, durch Überflutung oder durch Injektion mittels perforierter Leitungen und Rohre. Weil die bakterielle Sulfidoxidation im Vergleich zu anderen biotechnologischen Prozessen sehr langsam abläuft, wird in einem Kreislaufsystem gearbeitet, d.h. die Laugungsflüssigkeit wird ständig über das Erz gepumpt. Die Halden brauchen nicht erst mit Bakterien beimpft zu werden, sondern deren Wachstum wird durch geeignete Agentien (z.B. Nährstoffe, Schwefelsäure) stimuliert. Nach der Durchsickerung der Halde wird die Laugungslösung gesammelt und der Weiterverarbeitung zugeführt.

Im Gegensatz zur Haufen- oder Haldenlaugung ist die Tanklaugung ein Suspensionsverfahren und verlangt den Betrieb eines Bioreaktors und somit den höchsten technischen Aufwand der verschiedenen Verfahrensarten. Sie ermöglicht aber eine optimale Prozesssteuerung bezüglich pH, Temperatur und Belüftung. Bezüglich der Verarbeitungskapazität (t/Tag) sind dem Verfahren aber gewisse Grenzen gesetzt.



Fig. 2: Abraumhalden (Rio Tinto Mine, Spanien), aus welchen Kupfer mit Hilfe von Bakterien gewonnen wurde (Foto H. Brandl).

Für Verfahren zur biologischen Gewinnung von Metallen aus Feststoffen sind eine Reihe von Patenten erteilt worden (Brombacher et al. 1997), wobei nicht nur Erze, sondern auch Flugaschen, Klärschlamm und andere mineralische Industrieabfälle eingesetzt wurden. Neben den erwähnten Elementen Kupfer, Gold, Uran, Nickel und Kobalt werden dabei auch die Gewinnung anderer Metalle wie Silber, Platin, Gallium, Germanium, Cadmium, Blei, Mangan, Chrom, Aluminium, Titan oder Zink in Erwägung gezogen.

Technische Aufbereitung

Die gesammelten metallhaltigen Laugungsflüssigkeiten müssen einer weiteren Aufarbeitung unterzogen werden, um vermarktbare Produkte zu erhalten. Das Beispiel der Kupfergewinnung illustriert die verschiedenen technischen Möglichkeiten: Die einfachste, traditionellste und älteste Methode ist die Zementation mit Eisen; ein Prozess, welcher schon um das Jahr 1000 in China angewandt wurde (Needham et al. 1980). Die Zugabe von Eisenspänen oder Eisenschrott führt zur Präzipitation von metallischem Kupfer ($\text{CuSO}_4 + \text{Fe} \rightarrow \text{Cu} + \text{FeSO}_4$). Das Kupfer weist aber einen niedrigen Reinheitsgrad auf und muss weiter aufbereitet werden.

Durch die Zugabe von Lösungsmitteln (LIX, Exxsol), welche bestimmte Metalle selektiv aus der Laugungsflüssigkeit entfernen, kann Kupfer in eine organische Phase überführt werden. Aus dieser organischen Phase wird mit Hilfe von elektrochemischen Methoden («electrowinning») hochreines Kupfer an einer Kathode abgeschieden. Das Lösungsmittel kann recycelt und für weitere Extraktionen verwendet werden.

Ökologische Auswirkungen

Kupfer-«bioleaching» und die Aufarbeitung der Laugungsflüssigkeit mittels Lösungsmittelextraktion und anschliessender Elektrogewinnung wird generell als umweltfreundlicher Prozess beurteilt. Als Produkt entsteht reines Kupfer ohne Einbezug konventioneller Verhüttungstechnologien. Prozessemissionen sind minimal, und alle Prozesslösungen werden wiederverwertet. Die Staubbildung beim Abbau und beim Mahlen, die Bildung von sauren Aerosolen bei der Elektrogewinnung sowie der Prozesswasserverbrauch bedingt durch Evaporationsverluste (v.a. bei der grossflächigen Haufenlaugung) stellen die grössten Umweltprobleme dar.

Im Vergleich zu pyrometallurgischen Verfahren weisen biohydrometallurgische Techniken eine Reihe von Merkmalen auf, welche sie gegenüber konventionellen Methoden bevorteilen: Biologische Laugungsverfahren zeichnen sich durch einen geringeren Energie- und Materialverbrauch und sowie durch niedrige Kapital- und Betriebskosten aus; die *in situ* Bildung von Laugungsmitteln durch Mikroorganismen macht einen Transport überflüssig; Erzvorkommen mit geringen Metallkonzentrationen sind immer noch ausbeutbar und damit rentabel; Metallausbeuten (wie z.B. für Au) werden erhöht; die Wahl der Mikroorganismen und Kultivationsbedingungen erlaubt eine gewisse Selektivität bezüglich der Mobilisierung eines Metalls; die Bildung von oberflächenaktiven Substanzen kann eine effiziente Laugung bewirken; und schliesslich werden keine gasförmigen Schadstoffe emittiert.

Gewisse Nachteile sollen aber nicht verschwiegen werden: Neben dem schon erwähnten Wasserverbrauch sind vor allem die relativ langen Reaktionszeiten, die Klimaabhängigkeit (v.a. für Anlagen im Feld), die begrenzte Sauerstoffzufuhr ins Innere der Halden sowie die limitierten Schwermetallresistenzen der Mikroorganismen zu erwähnen.

Ökonomische Rahmenbedingungen

Neben ökologischen Vorteilen von «bioleaching»-Prozessen zeichnen sich diese Technologien auch durch ihre Wirtschaftlichkeit aus. Aus dem Goldbergbau ist bekannt, dass nur durch den Einsatz von mikrobiologischen Techniken die Metallausbeute gesteigert werden kann. Weder mechanische noch physikalisch-chemische Verfahren erhöhen die Zugänglichkeit von Lösungsmitteln für eine Goldextraktion. So steigen die Ausbeuten von 50 bis 60% auf über 95%.

Die Wirtschaftlichkeit von biohydrometallurgischen Verfahren muss im Vergleich zu konventionellen Techniken (Röstverfahren aus der Pyrometallurgie, Druckoxidation aus der Hydrometallurgie) beurteilt werden. Einschränkend sei aber erwähnt, dass ökonomische Daten nur sehr spärlich erhältlich sind: Für eine Anlage mit einer Verarbeitungskapazität von 100 Tonnen goldhaltigem Erz pro Tag ergeben sich Erstellungskosten von 2.4 bis 3.8 Mio US\$. Für eine Druckoxidation müssen 3.4 bis 7.5, für ein Röstverfahren 4.4 bis 4.9 Mio US investiert werden. Für alle

Metall	Produktion [Tausend t]	Jahr	Biologische Gewinnung [%]	Marktpreis [US\$ pro kg]	Wert [Mrd US\$]
Au	2.0	1995	20	8433	3.4
Co	18	1996	10	60	0.11
Cu	9988	1995	15–30	1.51	4.5
Ni	1100	1998	2*	5.40	0.12
U	32.7	1995	10–15	35	0.17
Zn	6791	1995	2*	1.04	0.14

Tabelle 2: Weltjahresproduktion von Metallen: Anteil der biologischen Produktion und Wertschöpfung gemäss aktuellen Rohstoffpreisen vom August 1999. * = %-Anteil der biologischen Produktion unbekannt. Es wurde daher ein Wert von 2% angenommen.

drei Verfahren liegen die jährlichen Betriebskosten bei 5 bis 6 US\$ pro Tonne Erz, was zeigt, dass biologische Verfahren durchaus mit physikalisch-chemischen konkurrieren können.

Biologische Verfahren liefern einen wesentlichen Beitrag zur Weltjahresproduktion von gewissen Metallen: 15% des Goldes werden biologisch gewonnen; für Kupfer liegt der Anteil gar bei 30% (Tabelle 2). Basierend auf aktuellen Rohstoffpreisen an der Börse ergibt sich daraus insgesamt eine Wertschöpfung von gegen 10 Mrd US\$!

Perspektiven

Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit mineralischer Rohstoffe ist die Entwicklung von Technologien erforderlich, welche einerseits Rohstoffquellen, die durch konventionellen Bergbau nicht zugänglich sind, erschliessen und andererseits vermehrt metallhaltige Abfälle und Rückstände als sekundäre Rohstoffe verwerten. Die Umweltverträglichkeit dieser neuer Techniken ist aber eine absolute Voraussetzung. Biologische Verfahren können diesen Voraussetzungen erfüllen und einen Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung leisten: Zum Beispiel können im Bereich der Abfallbehandlung Metalle aus Rückständen schonend mobilisiert und zurückgewonnen werden (Fig. 3), metallische Verunreinigungen in Materialien können entfernt und das Ausgangsprodukt somit veredelt werden, oder durch die Kombination von biologischen und physikalisch-chemischen Verfahren kann die Metallausbeute eines Prozesses gesteigert werden.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten des «bioleaching» liegen in der Sanierung von metallkontaminierten Böden. Mikrobiologische Laugungsverfahren können im Kontext einer industriellen Zukunft gesehen werden, wo Technologien zunehmend mit globalen Stoffkreisläufen der Biosphäre in Einklang stehen müssen.

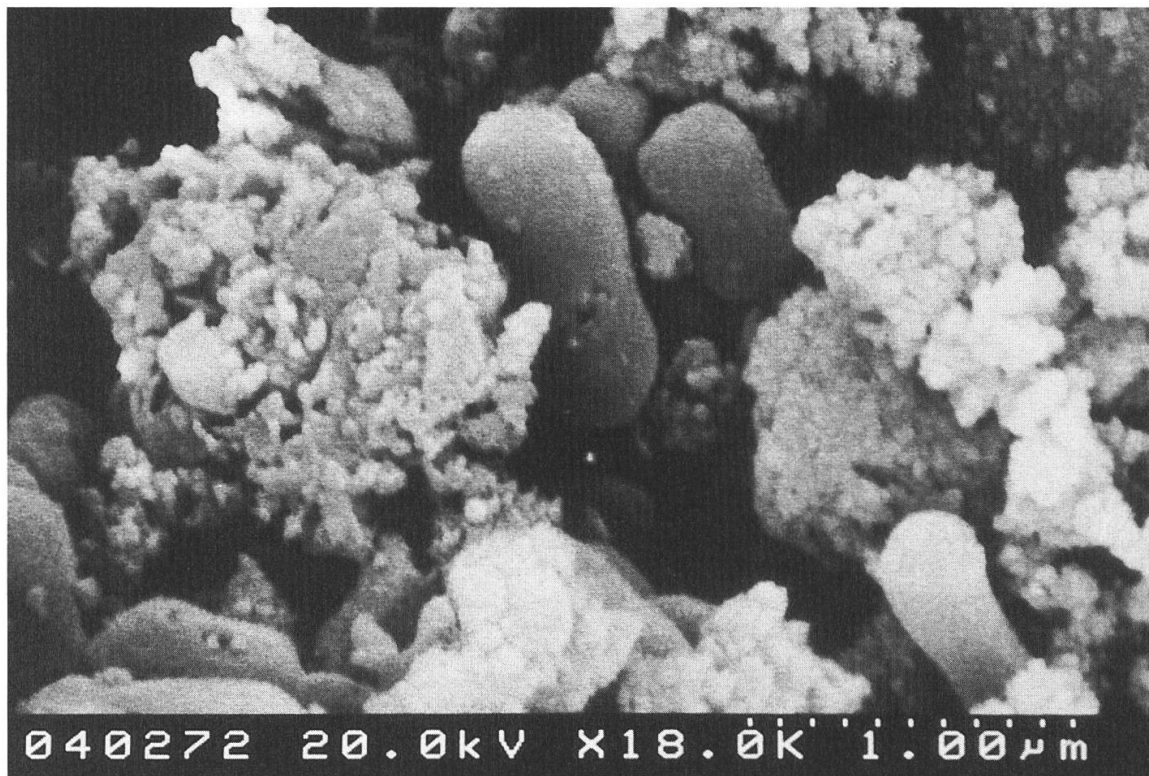


Fig. 3: Eine Kultur von *Thiobacillus* wächst in der Anwesenheit eines festen metallhaltigen Materials. Es handelt sich in diesem Fall um Flugasche aus der Kehrichtverbrennung (Foto Dr. Christoph Brombacher, Institut für Pflanzenbiologie, Universität Zürich).

Verdankungen

Der Autor dankt dem Schweizerischen Nationalfonds für die finanzielle Unterstützung innerhalb des Schwerpunktprogramms Umwelt (<http://www.IP-Waste.unibe.ch>). Experimentelle Untersuchungen wurden im Rahmen von Forschungsarbeiten von Regula Bosshard, Philipp Bosshard, Pascal Burri, Christoph Brombacher, Lorenz Diethelm, Roland Frei, Tabea Kipfer, Walter Krebs, Lukas Lüchinger, Janine Ryser, George Scott, Tobias Überwasser und Manuel Wegmann an der Universität Zürich durchgeführt.

Bibliographie

- Bosecker K. (1994) Mikrobiell Laugung (Leaching). In: Präwe P., Faust U., Sittig W., Sukatsch D.A. (Eds.) Handbuch der Biotechnologie. Oldenbourg, München, pp. 835–858.
- Bosshard P.P., Bachofen R., Brandl H. (1996) Metal leaching of fly ash from municipal waste incineration by *Aspergillus niger*. Environmental Science and Technology 30:3066–3070.
- Brandl H., Bosshard R., Wegmann M. (1999) Computer-munching microbes: Metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi. Process Metallurgy 9B:569–576.

- Brombacher C., Bachofen R., Brandl H. (1997) Biohydrometallurgical processing of solids: a patent review. *Applied Microbiology and Biotechnology* 48:577–587.
- Burgstaller W., Schinner F. (1993) Leaching of metals with fungi. *Journal of Biotechnology* 27:91–116.
- Colmer, A.R., Hinkle M.E. (1947) The role of microorganisms in acid mine drainage – a preliminary report. *Science* 106:253–256.
- König, R. (1989) C. Plinii secundi – *Naturalis historiae*, Libri XXXVII. Artemis, München.
- Kouky F.L., Steinberg A. (1982) Ancient mining and mineral dressing on Cyprus. In: Wertime T.A., Wertime S.F. (Eds.) *The evolution of the first fire-using industries*. Smithsonian Institution Press, Washington, pp. 149–180.
- Krebs W., Brombacher C., Bosshard P.P., Bachofen R., Brandl H. (1997) Microbial recovery of metals from solids. *FEMS Microbiology Reviews* 20:605–617.
- Needham J., Yü, H.P., Gwei-Djen L., Sivin. N. (1980) *Science and civilisation in China*. Vol. 5, Teil 4. Cambridge University Press, London.
- Pu Y.D. (1982) The history and present status of practice and research work on solution mining in China. In: Schlitt. W.J. (Ed.) *Interfacing technologies in solution mining*. AIME, Denver, pp. 13–20.
- Rawlings D.E (Ed.) (1997) *Biomining*. Springer, Berlin.
- Rudolfs W. (1922) Oxidation of iron pyrites by sulfur-oxidizing organisms and their use for making mineral phosphates available. *Soil Science* 14:135–147.
- Rudolfs W., Helbrunner A. (1922) Oxidation of zinc sulfide by microorganisms. *Soil Science* 14:459–464.
- Salkield L.U. (1987) A technical history of the Rio Tinto mines: some notes on exploitation from pre-Phoenician times to the 1950s. *Institution of Mining and Metallurgy*, London.
- Schiffner C. (1977) *Georg Agricola – Vom Berg- und Hüttenwesen*. dtv, München.
- Walsh (1927) Galen visits the Dead Sea and the copper mines of Cyprus (166 A.D.). *Bulletin of the Geographical Society of Philadelphia* 25:93–110.
- Zimmerley S.R., Wilson D.G., Prater J.D. (1958) Cycling leaching process employing iron oxidizing bacteria. US Patent 2,829,964.

Adresse des Autors: PD Dr. Helmut Brandl
 Universität Zürich
 Institut für Umweltwissenschaften
 Winterthurerstrasse 190
 8057 Zürich
 e-mail: hbrandl@uwinst.unizh.ch