



**Technologie- und
Informationstransfer**

**PRAXIS
DES
TECHNOLOGIE-TRANSFERS**



Metallgewinnung mit Hilfe
von Bakterien

H. Huber
Universität Regensburg,
Lehrstuhl für Mikrobiologie

au und Mikrobiologie - das sind auf den ersten Blick zwei
g unterschiedliche Gebiete, so weit voneinander entfernt,
an kaum eine Verbindung zwischen beiden vermuten würde.
dem gibt es sie: das Bindeglied sind Bakterien, die in der
sind, unter geeigneten Bedingungen in großem Umfang Metal-
is Erzen herauszulösen. Überall dort, wo sulfidische Erze
egenwart von Wasser und Luftsauerstoff den idealen Lebens-
für diese Mikroorganismen bilden, findet diese biologische
ung spontan und unkontrolliert statt, wie z.B. auch in Berg-
en und auf Halden. Das Resultat dieser Prozesse ist jedem
mann bekannt; es sind die mit Schwermetallen angereicherten
enwässer. Obwohl diese bakterielle Laugung noch gar nicht
e bekannt ist, wird sie auch schon gewinnbringend großtech-
h angewandt und zwar vor allem in den USA, wo aus riesigen
umhalden von Kupferminen ein beträchtlicher Anteil der Jah-
produktion (mehrere tausend Tonnen) an Kupfer durch diese Bio-
gung gewonnen wird.

se gewältige Leistung wird dabei von Organismen erbracht, die
einen tausendstel Millimeter groß sind und von denen sich
r 1 Million Zellen die Arbeit an einem einzigen Gramm Erz tei-
. Die Bakterien sind dabei ziemlich anspruchslos. Sie benöti-
nur anorganisches Material, wie z.B. Schwefel und zweiwertig-
Eisen, vor allem aber sulfidische Erze wie Pyrit, Chalkopy-
oder Sphalerit, die sie mit Hilfe von Luftsauerstoff oxidie-
. Dabei entsteht zum einen aus dem Schwefelanteil des Erzes
wefelsäure, wodurch viele Metalle als Salze (Sulfate) in Lö-
g gehen, zum anderen wird zweiwertiges zu dreiwertigem Eisen

foxydiert, das seinerseits durch seine stark oxidierende Wirkung weitere Metalle in eine lösliche Form überführen kann. Mit Hilfe der dabei freiwerdenden Energie bauen diese Bakterien unter Verwendung von Kohlendioxid aus der Luft ihre Körpersubstanz auf.

Über die verschiedenen Bakterien, die diese Laugung durchführen, wissen wir noch relativ wenig, da ihre Reinigung und Kultivierung mit erheblichen Problemen verknüpft ist. Zu Beginn unserer Arbeiten - vor etwa 3 Jahren - war daher im gemäßigten Temperaturbereich praktisch nur eine einzige Art mit dem Namen "Thiobacillus ferrooxidans" als Reinkultur untersucht worden. In einem vom Bundesministerium für Forschung und Technologie geförderten Projekt setzten wir uns damals das Ziel, möglicherweise existierende neue erzabbauende Bakterien anzureichern, zu isolieren und zu charakterisieren, vor allem auch im Hinblick auf eine spätere praktische Anwendung.

Wir begannen unsere Suche nach ihnen in Lagerstätten, Bergwerken und Halden. Hierbei erwies sich besonders die nördliche Oberpfalz als außerordentlich ergiebiges Gebiet. Einen weiteren möglichen Lebensraum für diese Bakterien bilden daneben Standorte, in denen gerade Erzlager entstehen, wie das in den Vulkangebieten Italiens oder in Schwedens der Fall ist. Außerdem ergab sich dort auch die Gelegenheit, nach der Existenz von erzabbauenden Bakterien bei hohen Temperaturen zu suchen. Aus den verschiedenen Proben erfolgte im Labor die Anreicherung der Bakterien direkt auf natürlichen Erzen in kleinen Kulturflaschen. Erstes wichtiges Ziel war es dann, daraus Reinkul-

ren zu erhalten, d. h. die unterschiedlichen Bakterien voneinander trennen. Nur so sind exakte Aussagen über den Stoffwechsel, das Laugungsverhalten oder den molekularen Aufbau der Stämme möglich. Wir erhielten neben 110 Stämmen, die der bekannten Art "Thiobacillus ferrooxidans" ähnlich waren, 10 Gruppen von neuartigen Metallmobilisierern, die im folgenden genauer vorgestellt werden sollen.

Zuerst zu den mesophilen Bakterien, d. h. solche mit einem Temperaturoptimum bis etwa 37°C. Bereits in der Zellform zeigt sich unter diesen Neuisolaten eine große Variabilität (Tabelle 1). Sie reicht von kugeligen (Stamm SP5/1 und HW3) über kommaförmige (Kris 2) bis zu langen dünnen stäbchenförmigen (LM3) Zellen. Die meisten der aufgeführten Stämme repräsentieren dabei jeweils eine Gruppe von bis zu 10 sehr ähnlichen und nahe verwandten Einzelisolaten. Diese Formenvielfalt spiegelt sich auch in den unterschiedlichen Stoffwechseleigenschaften dieser Organismen wider. Zwar können alle Isolate auf Erz als alleiniger Nahrungsquelle wachsen und dabei Metalle in Lösung bringen, bei der Verwertung von Schwefel, zweiwertigem Eisen oder organischem Material gibt es aber doch deutliche Unterschiede. Besonders das Unvermögen Eisen zu oxidieren, gleichzeitig aber organisches Material (in diesem Falle Hefeextrakt) verwerten zu können, wie dies das Isolat H05 vermag, ist für Laugungsorganismen unerwartet. Aber nicht nur dadurch ist diese Gruppe um das Isolat H05 die wohl ungewöhnlichste der gesamten neuartigen Metallmobilisierer. Sie bevorzugen nämlich außerdem auch als einzige ein nur schwach saures Milieu (ca. pH 4) und sind im Gegensatz zu allen an-

eren in der Lage, selbst bei neutralen Bedingungen (ca. pH 7) noch Erze anzugreifen, was neue Anwendungsbereiche erschließt. Normalerweise läuft die bakterielle Laugung nur in stark saurer Umgebung (ca. pH 1 - 2) ab. Die größte Besonderheit liegt aber in der Metallextraktion dieser Stämme. Aus einem Erzgemenge, das z.B. aus Kupfer-, Zink-, Eisen- und Uranerzen besteht, bringen sie das Kupfer mit ungewöhnlich hoher Effizienz in Lösung, wogegen die Werte der übrigen Metalle nur unwesentlich über denen der Sterilkontrolle liegen. Eine solche Bevorzugung eines Elementes bei einer biologischen Laugung wurde zuvor noch nie beobachtet. Der zugrundeliegende Mechanismus ist allerdings noch nicht bekannt.

geben wir uns nunmehr in den heißen Temperaturbereich zwischen 60 und 90°C, d.h. also zu Organismen, die man als thermophil bzw. extrem thermophil bezeichnet. Hier war bereits die Art "Acidianus brileyi" bekannt, die bis max. 70°C in der Lage war, Metallionen aus Erzen herauszulösen. Wir konnten 12 hochthermophile Metallmobilisierer aus vulkanischen Quellen Islands und Italiens isolieren, die sich von der bekannten Art stark unterscheiden. Sie können in 5 verschiedene Gruppen eingeteilt werden und gehören ebenso wie "Acidianus brileyi" gar nicht zu den klassischen Bakterien ("Eubakterien"), sondern zu dem von dem amerikanischen Molekularbiologen Carl Woese erst vor 9 Jahren entdeckten 3. Urreich des Lebens, den sogenannten "Archaeobakterien". Die entwicklungsgeschichtliche Kluft zwischen ihnen und den Eubakterien, zu denen auch alle zuvor erwähnten mesophilen Isolepten gehören, ist dabei genauso groß wie zu den gesamten höheren Lebewesen, den Eukaryonten (also Tiere und Pflanzen).

Was zeichnet nun diese Bakterien des heißen Temperaturbereiches aus? Alle haben eine kugelige bis unregelmäßig lappige Zellform. Ihre äußere Zellhülle ist aus einzelnen Eiweißuntereinheiten, ähnlich einem Pflastersteinmuster, zusammengesetzt, da ihnen eine normale Zellwand, wie sie die Eubakterien besitzen, fehlt.

In Tabelle 2 sind die wichtigsten Eigenschaften dieser Neuisolate mit denen ihrer wahrscheinlich nächsten Verwandten unter den Archaeobakterien, der "Sulfolobus"-Gruppe, gegenübergestellt. Unsere thermophilen Neuisolate sind also wie die mesophilen Isolate in der Lage, allein auf natürlichen Erzen zu wachsen. Unter ihnen gibt es signifikante Stoffwechselunterschiede, beispielsweise in der Fähigkeit, elementaren Schwefel zu oxidieren. Weitere Unterschiede sind an den oberen Temperaturgrenzen des Wachstums ersichtlich. Die Isolate VE6 und Hv5 zeigen mit 95°C die höchsten Temperaturmaxima aller bekannten erzabbauenden Bakterien. Sie sind derartig an die hohen Temperaturen angepaßt, daß sie sich unterhalb von 50°C nicht vermehren können; sie verfallen dort praktisch in eine Art "Kälteschlaf".

Da die thermophilen Isolate in ihren Eigenschaften so ungewöhnlich sind, interessiert natürlich besonders die Frage nach ihrem Laugungsvermögen. Dabei zeigt sich, daß z.B. die Stämme VE2 und TH2 bereits bei 65°C innerhalb von 2 - 3 Wochen die Metalle Kupfer, Zink und Uran zu 100 % aus ihren Erzen herauslösen, eine Leistung, die mesophile laugungsaktive Bakterien nie erreichen. (Die besten bekannten Stämme würden für die gleiche Extraktionsleistung etwa 4 - 6 Monate benötigen). Daher würden sich diese thermophilen

akterien besonders auch für Laugungsversuche in abgeschlossenen Reaktoren eignen, da mit ihnen extrem kurze Verweilzeiten zu erreichen wären. Eine weitere Anwendung bestünde auch in der Ausbeutung tiefliegender Erzlager, die durch die Erdwärme bedingten hohen Temperaturen einem klassischen Bergbau nicht mehr zugänglich sind.

Unsere Untersuchungen haben demnach ergeben, daß sowohl bei niedrigen als auch bei hohen Temperaturen vielfältige Bakterien existieren, die sich auf den Erzabbau spezialisiert haben und die nunmehr in ihrer praktischen Anwendung zur Verfügung stehen.

Tabelle 1: Zellform und Stoffwechseleigenschaften der neuartigen mesophilen Isolate

Stamm	Biotop	Herkunft	Zellform	Wachstum auf			
				Erz	Schwefel	FeSO ₄	organischem Material
T. ferrooxidans	Bergwerke, Solfataren	ubiquitär	kürzere, mittel- dicke Stäbchen, Länge 1 - 2 µm	+	+	+	-
SP5/1	Solfataren	Neapel	Kokken Ø 0.8 - 2 µm	+	+	+	-
LM3	marine Hydro- thermalsysteme	Vulcano	lange, dünne Stäbchen, Länge bis 4 µm	+	(+)	(+)	-
HW3	Solfataren	Azoren	Kokken Ø 1 µm	+	+	-	-
Kris 2/2	Solfataren	Island	kommaförmige Zellen; Länge 1 µm	+	(+)	-	(+)
Hö5	Bergwerke	Oberpfalz	kurze, dünnere Stäbchen; Länge bis 1 µm	+	+	-	+

(+) = schlechtes Wachstum

(Ø) = Durchmesser

1 µm = 1/1000 mm

Abbildung 2: Merkmale der thermophilen Isolate

Stamm	Wachstum auf				Temperatur Maximum
	Erz	Schwefel	Schwefel + Hefeextrakt	Hefe- extrakt	
PH2	+	+	+	+	80°C
ra23	+	+	+	-	70°C
PE2	+	-	-	-	85°C
PE6	+	-	+	+	95°C
iv5	+	-	-	-	95°C
<i>S. acidocaldarius</i>	-	-	+	+	85°C
<i>S. brierleyi</i>	-	-	+	+	75°C