

Forschungsberichtsblatt zum Thema **Biomining BaWü: Rohstoff- und Exportanalyse** (Biomining Potentialanalyse)

Förderzeitraum: 01.06.2021 bis 30.09.2021
Förderkennzeichen: BWBM 21102
Zuwendungsempfänger: Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Projektpartner: Projektträger Karlsruhe
Hermann-Von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

für das:
Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
Kernerplatz 9
70182 Stuttgart

1 Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Die ausgeführte Studie umfasst eine kurze Übersicht zu Biomining-Technologien und eine Potentialanalyse von Rohstoffen in Baden-Württemberg, zu deren Nutzung sich Biomining-Technologien anwenden und weiterentwickeln lassen. Dem folgte eine Analyse der Exportfähigkeit dieser Technologien für in Baden-Württemberg ansässige Unternehmen.

Zunächst wurden alle relevanten sekundären Rohstoffquellen in Baden-Württemberg identifiziert. Anschließend wurde das Potenzial dieser Rohstoffquellen zur Nutzung durch Biomining-Technologien auf der Grundlage ökologischer und wirtschaftlicher Kriterien bewertet. In dieser Studie wurden unter anderem die Phosphorrückgewinnung aus Abwässern (z. B. aus Klärschlammaschen) und die Gewinnung von seltenen Erden aus Elektroschrott betrachtet. Aus Befragungen von relevanten Akteuren aus Forschung und Industrie wurden die Potenziale der Anwendung der Biomining-Technologien auf die Rohstoffquellen abgeleitet.

Die beschriebenen Technologien wurden in Bezug auf ihren Technology Readiness Level (TRL) und ihre aktuellen Anwendungen aufgelistet. Darauf folgend wurden die Technologien aufgrund ihrer Entwicklungsfähigkeit und ihrer nationalen und internationalen Exportfähigkeit bewertet.

Erkenntnisse zur Anwendung von Biomining-Verfahren für sekundäre Rohstoffquellen und ihre Exportfähigkeit stellen sich wie folgt dar:

- Einige sekundäre Rohstoffquellen sind für die Anwendung von Biomining-Technologien zur Rückgewinnung von bestimmten Wertstoffen geeignet. Insbesondere Elektroschrott zeichnet sich durch seine reichhaltige

und diverse Zusammensetzung aus und ist prädestiniert, über Biomining-Technologien aufgearbeitet zu werden. Ebenso stellen Abwässer und Klärschlamm(aschen) eine Quelle an Nährstoffen wie zum Beispiel Phosphor dar, die normalerweise als Rohphosphor oder Mineralphosphordünger importiert werden müsste. Bestimmte Technologien wie Biolaugung, Biosorption und Bioelektrische Systeme zeigen großes Potential zur Anwendung im Bereich der sekundären Rohstoffquellen.

- Entwicklungspotentiale der Biomining-Technologien liegen vornehmlich in der Steigerung der Effizienz und Erhöhung der erzielten Ausbeute. Dabei sind Verfahren zur Extraktion, Fällung und Mineralisierung wichtige Bausteine zur Erhöhung der allgemeinen Ausbeute aus niedrig konzentrierten Metall- oder Wertstofflösungen. Alternativen für die Nährstoffzugabe für die Mikroorganismen sind notwendig (z.B. Nutzung von Abfallströmen als kohlenstoffhaltige Substrate).
- Die Weiterentwicklungen sollten vor allem die Leistungsfähigkeit der Mikroorganismen sowie die verfahrenstechnische Ausgestaltung der Prozesse betreffen sowie die Aufbereitung der sekundären Rohstoffe hinsichtlich der Maximierung der für die Mikroorganismen verfügbaren Oberflächen (Demontage, Zerkleinerung).
- Die größte Exportfähigkeit haben Biomining-Technologien zum Recycling von Elektronikschrott oder die Phosphorrückgewinnung. International sind Weiterentwicklungen in der Tankbiolaugung oder der umweltfreundlicheren Optimierung der Haldenbiolaugung exportfähig. Aber auch zukünftig werden Biomining-Technologien zur Erschließung von sekundären Rohstoffquellen oder zum Recycling immer wichtiger. Hier kann Baden-Württemberg eine Vorreiterrolle in der Entwicklung und Anwendung solcher Biomining-Technologien werden.

2 Welche Fortschritte ergeben sich für die Wissenschaft und/oder Technik durch die Forschungsergebnisse?

Fortschritte für Wissenschaft und Technik ergeben sich aus der Identifizierung des Anwendungspotentials der Biomining-Technologien auf die verfügbaren Stoffströme. Insbesondere die Ansätze der Biolaugung und Extraktion von löslichen Mineralien mit Biomining haben sich als zukunftssträftig herauskristallisiert.

Zur Biolaugung besteht Entwicklungspotential in der Steigerung der allgemeinen Effizienz und der erreichten Ausbeute. Die vorherrschenden Konzentrationen in den Laugungsflüssigkeiten ist meist zu gering, um diese direkt nutzen zu können. Hier ist ein weiterer Schritt zu Erhöhung der Konzentration, Extraktion oder Fällung notwendig. Auch nach Alternativen für die fortwährende Nährstoffzugabe sollte gesucht und integriert werden. Hierbei könnten Abfallströme als zusätzliche Quelle an kohlenstoffhaltigen Substraten eingesetzt werden.

Alle Ansätze zur Extraktion und Fällung von Metallen aus einer niedrig konzentrierten Lösung tragen zu einer energieeffizienteren und umweltfreundlicheren Aufkonzentration bei. In Kombination mit niedrig konzentrierten Laugungsflüssigkeiten oder Abwässern besteht großes Potential, zukünftig eine ernstzunehmende Alternative zu chemisch-, physikalischen Extraktionsmethoden zu werden. Dabei ist besonders die Weiterentwicklung der Abtrennung und Extraktion der Zielprodukte von den Zellen notwendig. Dafür kommen unter anderem unterschiedliche mechanische-, thermische-, elektrische und physiko-chemische Verfahren, je nach Anforderung als Downstream-Prozess in Betracht. Ebenfalls sollte die Erhöhung der Ausbeute bei der Biosorption, Biomineralisierung Teil von zukünftigen Weiterentwicklungen sein, um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen.

Die Präzipitation von Metallen an der Kathode einer mikrobiellen Brennstoffzelle ist eine noch recht neue Technologie, erfreut sich aber einer immer größeren Aufmerksamkeit. Besonders die Integration in bestehende Systeme und das Up-Scaling der BES-Ansätze an große Volumenströme stellen jedoch noch erhebliches Entwicklungspotential dar. Die sekundäre Nutzung der Energiegewinnung durch eine mikrobielle Brennstoffzelle ist mit den aktuell erreichbaren Stromdichten noch nicht ökonomisch sinnvoll nutzbar. Gelänge es hier, höhere Stromdichten zu erreichen, könnte zusätzlich aus Abwässern und Abfällen elektrische Energie gewonnen werden. Der Absatzmarkt für Strom ist wesentlich einfacher als für gering konzentrierte Metalle und könnte deshalb eher Anklang in der Industrie finden. Weitergehende Entwicklungen beider Anwendungszwecke fördern die Entwicklung von BES zu einer wirtschaftlich konkurrenzfähigen Technologieplattform.

Aufgrund der noch geringen Ausbeute und den niedrigen Preisen der Metalle ist die Anwendung von Phytomining über Hyperakkumulatoren zur reinen Metallgewinnung noch unwirtschaftlich. Für den Sprung in die industrielle Anwendung sollte sich die Entwicklung auf eine höhere Ausbeute der Metalle bei einer kürzeren Vegetationsperiode konzentrieren.

3 Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen

Die praktische Verwendbarkeit der Ergebnisse lässt sich aus der Evaluation der nationalen und internationalen Nachfrage nach Biomining-Technologien ableiten. Biomining-Technologien haben zukünftig ein sehr hohes Exportpotential, da sie mit ihren besonders milden Reaktionsbedingungen und einem meist geringen Energieverbrauch direkt gegen umweltschädliche Technologien konkurrieren können. Aufgrund des Klimawandels sind mehr und mehr Technologien gefragt, die CO₂-neutral und gleichzeitig auch einen geringen Wasser-footprint aufweisen und durch beispielsweise gekapselte Prozesse und Kreislaufführungen Wertstoffe produzieren können. Werden Biomining-Technologien auf das Recycling und die Wiedergewinnung von Metallen und Wertstoffen optimiert, trägt dies erheblich zur Selbstversorgung nachgefragter Ressourcen bei. Dadurch wird die Abhängigkeit von Importen gesenkt und natürliche Ressourcen werden geschont. Gleichermaßen erfüllt das Metallrecycling die Kriterien einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft. Die meisten Metalle können ohne Qualitätsverlust und unbegrenzt recycelt werden. Dies schützt die noch vorhandenen Bodenschätze und Umweltsysteme vor unnötigem Abbau und senkt insgesamt den Energiebedarf. Ebenfalls wird dadurch die Biodiversität geschützt und langfristig gefördert.

Eine erhöhte internationale Nachfrage an Biomining-Technologien entsteht also bei Ländern, die arm an natürlichen Bodenschätzen sind oder sich unabhängig von externen Bezugsquellen machen wollen. Außerdem können Biomining-Technologien den Energieverbrauch einer Region senken, wenn nasschemische, thermophysikalische Verfahren oder der klassische Bergbau ersetzt oder zumindest reduziert werden können. Länder mit Wasserknappheit könnten ebenfalls eine Nachfrage an Biomining-Technologien zeigen, da mit dem klassischen Bergbau ein starker Wasserverbrauch einhergeht und den Grundwasserspiegel senkt. Die Haldenbiolaugung ist bereits im internationalen Markt, respektive bei Minengesellschaften etabliert, weswegen das Exportpotential hier beschränkt ist. Ein großer Nachteil der Haldenbiolaugung ist die Umweltbelastung durch die Laugungsflüssigkeiten. Aufgrund der offenen Betriebsführung können diese Laugungsflüssigkeiten im schlimmsten Fall in das Umweltsystem gelangen und durch Toxizität Schaden anrichten oder das Grundwasser kontaminieren.

Mögliches Exportpotential kann sich in der Weiterentwicklung von Haldenbiolaugung zu umweltverträglicheren Bedingungen ergeben. Eine weitere Möglichkeit ist die Weiterentwicklung von Technologien der Tankbiolaugung, die als konkurrenzfähige Alternative zu Haldenbiolaugung platziert werden kann. Durch die Tankbiolaugung können die Verfahrenstechnik optimiert, viel spezifischere biologische Prozesse implementiert und Nachteile der Umweltbelastung minimiert werden. Zusätzlich müssen die bisherigen Tankbiolaugungsverfahren durch günstigere Wachstumsnährstoffe effizienter gestaltet und die Produktausbeute verbessert werden. Aktuell arbeiten große und wirtschaftsstarke Industrien im Bergbau, beispielsweise in Südafrika und Chile, mit konventionellen Haldenbiolaugungsverfahren die die Umwelt negativ beeinflussen (toxische Substanzen, Laugungsflüssigkeit, enormer Wasserverbrauch). Besser kontrollierbare Tankbiolaugungsverfahren oder auf Umweltschutz optimierte Haldenbiolaugungsverfahren stellen ein Exportpotential für großtechnische Anwendungen in diesen Ländern dar.

National bieten besonders Biomining-Technologien zur Anwendung im Recycling-Bereich die besten Exportpotentiale. Durch gesetzliche Änderungen und absehbare Fristen für die verpflichtende Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm(aschen), den Mobilitätswandel (Batterierecycling) und der angestrebten CO₂-Neutralität werden bereits jetzt neue oder optimierte Technologien gefordert. Dabei haben besonders die Biolaugungsverfahren und die biologischen Verfahren zur Extraktion, Fällung von Metallen (Biosorption, Biomineralisierung, BES) die Chance zu exportfähigen Technologien zu werden.

Aufgrund des niedrigen TRL von vielen Biomining-Technologien verschaffen frühzeitige Technologieweiterentwicklungen bis zur Anwendungsreife einen Marktvorteil. Mit dem Aufbau der Biomining-Kompetenz in Baden-Württemberg und eines möglichen Wissensvorsprungs, könnten auch nationale und internationale Interessenten beraten werden. Deshalb ist es wichtig, das Baden-Württemberg in der Entwicklung von Technologie und praktischen Anwendung von Biomining-Technologien eine Vorreiterrolle einnimmt.

Zukünftig können auch andere Biomining-Technologien international und national interessanter werden, wenn gemeinsame Bestrebungen zum Abmildern des Klimawandels angegangen werden. Hier gelten vorherige Beispiele der Anwendung von Biomining-Technologien zum Recycling.

4 Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Die Ergebnisse der Studie dienen der Klärung, inwieweit biobasierte Verfahren zur weiteren ressourcenschonenden Nutzung von verschiedenen Rohstoffquellen beitragen können.

Zur weiteren detaillierteren Betrachtung der Potentiale und des idealen Ansatzpunktes einer Biominingtechnologie an einer Rohstoffquelle könnte eine Lebenszyklusanalyse (Umweltbilanz, eng. *life cycle assessment – LCA*) oder Stoffstromanalyse mit Vertretern aus unterschiedlichen Kompetenzgebieten gezielte Handlungsempfehlungen entwickeln. Besonders könnte die Fragestellung der zentralen oder dezentralen Anwendung von Biomining-Technologien innerhalb einer LCA geklärt werden. Damit soll die Etablierung von bioökonomischen Lösungswegen, die in Baden-Württemberg entwickelt wurden, sowohl was den Transfer von Knowhow betrifft als auch der damit einhergehende Export von Anlagen, befördert werden.

Konkrete Empfehlungen für tiefergehende Untersuchungen lassen sich aus der Studie wie nachfolgende beschreiben ableiten:

- Zukünftige Etablierung der biobasierten Verfahren an Standorten der Stahl, Öl und Metallverarbeitenden Industrie
- Adaptation von Verfahrensschritten der Bioakkumulation und –fällung an Prozessabwässer mit hoch toxischen Bedingungen. Beispielsweise Galvanik oder metallverarbeitende Industrie
- Komplementäre Anwendung oder Ersetzen von chemisch,- physikalischen Fällungsverfahren
- Screening-Verfahren über Next-Gen-Sequencing-Genomanalysen zur gezielten Identifikation von effektiveren Organismen in einer Population oder Transkriptomanalysen zur Analyse der aktiven Gene im Metabolismus von Mikroorganismen, die zur Metallrückgewinnung beitragen
- Biomining-Verfahren zum Aufarbeiten von Altholz, beispielsweise Eisen aus Eisenbahnschwellen, Möbel oder Sperrgut
- Adaptation des Verfahrens an die Gewinnung von hochwertigen Metallen im Sinne des *urban mining*
- Untersuchungen der Wurzel-Mikroben Interaktion im Prozess des Phytominings. Beispielsweise Interaktion zwischen Pilzen und Pflanzenwurzeln – Mykorrhiza
- Gezielte Bioaugmentation zur doppelten Nutzung: (1) In der Metallrückgewinnung und (2) Verhinderung von pathogenen Verkeimungen in Prozessanlagen, beispielsweise in wassergemischten Kühlschmierstoffen