

Forschungsbericht BWPLUS

## **Technologie- und Marktstudie**

von

Ursula Schließmann, Bryan Lotz, Lukas Kriem, Benjamin Wriedt

Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB

Förderkennzeichen: BWBM 21101

Laufzeit: 15.05.2021 – 30.09.2021

Die Arbeiten des Baden-Württemberg-Programms Lebensgrundlage Umwelt und ihre Sicherung (BWPLUS) werden mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg gefördert.

September 2019

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Analyse der Biomining-Technologien und Akteure .....</b>	<b>4</b>
3.1	Identifizierung und Klassifizierung aktuell eingesetzter Technologien .....	4
3.1.1	Bioleaching .....	4
3.1.2	Phosphatrückgewinnung über Bioakkumulation .....	4
3.1.3	Biominalisation und Biofällung .....	5
3.1.4	Biosorption .....	5
3.1.5	Biosynthese von Nanopartikeln .....	5
3.1.6	Bioelektrische Systeme .....	5
3.1.7	Phytomining.....	6
3.1.8	Enzymatische Reaktionen .....	6
3.2	Nachhaltigkeit ausgewählter Biomining-Technologien.....	7
3.2.1	Allgemeine ökologische Nachhaltigkeit von Biomining .....	7
3.2.2	Ökologische Nachhaltigkeit von Bioleaching.....	7
3.2.3	Ökologische Nachhaltigkeit von Biomining auf Abraumhalden und Deponien.....	7
3.2.4	Ökologische Nachhaltigkeit von Phytoremediation und Biosorption.....	8
3.3	Relevante Akteure in Baden-Württemberg .....	9
3.4	Offene Fragen und Forschungsbedarf .....	9
3.4.1	Forschungsbedarf bei der Haldenbiolaugung.....	9
3.4.2	Forschungsbedarf bei der Biosorption .....	10
3.4.3	Forschungsbedarf bei der mikrobiellen Brennstoffzelle .....	10
3.4.4	Fazit zum Forschungsbedarf .....	10
<b>4</b>	<b>Konzepterstellung für Fördermaßnahmen in Baden-Württemberg .....</b>	<b>11</b>
4.1	Marktanforderungen bei der Weiterentwicklung von Technologien .....	11
4.1.1	Grundbedingungen des Marktes.....	11
4.1.2	Anreize für Investitionen .....	11
4.1.3	Anforderungen einer idealisierten Marktsituation aus Unternehmenssicht.....	11
4.2	Definition und möglicher Umfang gezielter Fördermaßnahmen.....	12
4.2.1	Allgemein abgeleitete Schlussfolgerungen .....	12
4.2.2	Empfehlungen zu gezielten Fördermaßnahmen.....	12
4.2.3	Förderung der Vernetzung und Clusterbildung.....	13
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>14</b>
<b>6</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>15</b>

# 1 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie umfasst eine Technologie- und Marktanalyse zum Thema Biomining in Baden-Württemberg.

Zunächst wurden die aktuell relevanten und eingesetzten Biomining-Technologien identifiziert. Anschließend wurde eine Klassifizierung vorgenommen, um die unterschiedlichen Verfahren zu unterscheiden und die Anwendungsmöglichkeiten den verschiedenen Metall- und Wertstoffvorkommen zuzuordnen. Für Baden-Württemberg gegenwärtig oder möglicherweise zukünftig bedeutsame Technologien wurden hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit bewertet.

Die relevanten Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Netzwerke, die ganz oder teilweise in Baden-Württemberg ansässig sind, wurden in einer Liste zusammengestellt. Aus Befragungen von Akteuren aus Forschung und Industrie wurden detaillierte Informationen zum Forschungsbedarf und zu den Marktanforderungen abgeleitet und mit den gegenwärtigen Prozessströmen und ökonomischen Rahmenbedingungen abgeglichen. Abschließend wurden gezielte Ansatzpunkte zur Förderung von Aktivitäten mit Bezug zu Biomining in Baden-Württemberg erarbeitet.

Wesentliche Erkenntnisse zu Möglichkeiten und Grenzen von Biomining-Verfahren für die Rückgewinnung von Metallen und Phosphor stellen sich wie folgt dar:

- Einige Biomining-Technologien sind bereits etablierte Verfahren zur Rohstoffgewinnung, bspw. Bioleaching zur Metallrückgewinnung aus festen Abfallstoffen oder die Phosphatelimination über Bioakkumulation (Bio-P) in Kläranlagen. Andere Verfahren, wie z.B. die Phytoremediation zur Metallgewinnung oder Entseuchung schwermetallbelasteter Böden, sind weder ökologisch sinnvoll noch ökonomisch attraktiv, da die biologischen Prozesse gegenwärtig noch nicht schnell genug ablaufen. Bestimmte Technologien wie die mikrobielle Brennstoffzelle bergen bei weiteren Fortschritten der Forschung großes Potenzial als grüne Alternativen zu herkömmlichen Prozessen.
- Die Akteure beschreiben ihre Anforderungen an Markt und Forschung in Bezug auf Biomining als so speziell, dass eine alleinige Aktivität insbesondere als KMU nicht darstellbar ist. Es wird befürchtet, dass mögliche Erkenntnisse aufgrund sehr individueller Zusammensetzungen und Konzentrationen der Wertstoffströme nur schwer von einem Anwendungsfall auf den anderen übertragbar sind. Zudem wäre selbst bei einem technologischen Durchbruch die Nachfrage klein und die nachgefragte Form der rückgewonnenen Wertstoffe unsicher. Deshalb besteht mittelfristig keine ökonomische Nachfrage, lediglich Umweltauflagen könnten ein Interesse hervorrufen.
- Im Kontext der gesamten Recycling-Prozesskette sind ein verringerter externer Rohstoffeinsatz bei der Haldenbiolaugung, Weiterentwicklung enzymunterstützter Methoden und die Entwicklung einer kostengünstigen und robusten mikrobiellen Brennstoffzelle vielversprechende Ziele einer Förderung. Weiterhin gaben alle befragten Akteure an, einen offenen und aktiven Wissensaustausch zu unterstützen, da durch die spezifischen Anforderungen keine Konkurrenzsituation bei der Technologieentwicklung vorhanden ist.

Mit der Landesstrategie „Nachhaltige Bioökonomie für Baden-Württemberg“ hat das Land Baden-Württemberg im Jahr 2019 das Ziel einer intelligenten Nutzung knapper Rohstoffe und Energieträger vorgegeben (Landesstrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg 2019). Durch den Verbrauch endlicher fossiler Rohstoffe werden Klima und Umwelt enorm belastet. Ein wesentlicher Bestandteil dieses Wandels zu einer rohstoffeffizienten und kreislauforientierten Wirtschaft ist der Wandel zur Nutzung erneuerbarer und biologischer Ressourcen. Darüber hinaus wird die lokale natürliche Lebensgrundlage geschützt und der Wirtschaftsstandort Baden-Württemberg gestärkt.

Die vorliegende Studie umfasst eine Technologie- und Marktanalyse zum Thema Biomining in Baden-Württemberg. Biomining-Technologien umfassen biotechnologische Verfahren, die Metalle oder Wertstoffe aus unterschiedlichen Rohstoffquellen gewinnen können. Aufgrund der relativ milden Reaktionsbedingungen, niedrigen Temperaturen und der Vermeidung des Einsatzes toxischer Chemikalien stellen sie eine umweltfreundliche Alternative zu konventionellen Technologien dar. Zur Analyse der angewandten Biomining-Technologien in Baden-Württemberg wurden alle ansässigen Akteure der Industrie und Forschung identifiziert und selektiv befragt. Es wurde eine Klassifizierung von Biomining-Technologien vorgenommen, um die unterschiedlichen Verfahren zu unterscheiden und die Anwendungsmöglichkeiten den verschiedenen Metall- und Wertstoffvorkommen zuzuordnen. Die für Baden-Württemberg gegenwärtig oder möglicherweise zukünftig bedeutsamen Technologien wurden hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit, ökonomischen Rahmenbedingungen und Marktanforderungen bewertet. Ziel ist es, aus den gesammelten Erkenntnissen dieser Studie gezielte Ansatzpunkte zur Förderung von Aktivitäten mit Bezug zu Biomining in Baden-Württemberg abzuleiten.

Mit den heute zur Verfügung stehenden Technologien ist eine wirtschaftliche Behandlung von verdünnten Lösungen mit Metallgehalten nur eingeschränkt möglich. Es existieren zwar Methoden, um einzelne Metalle gezielt aus einer Lösung zu extrahieren. Jedoch bleibt die Konzentration an gewünschtem Produkt in der erhaltenen Lösung nach wie vor sehr niedrig, weshalb eine Erhöhung der Konzentration in einem weiteren nachgeschalteten Prozessschritt notwendig ist. Vorhandene Technologien befinden sich aktuell häufig noch im Technikums- oder Pilotmaßstab und sind im Vergleich zu konventionellen Methoden schwerer auf spezielle Prozesse adaptierbar. Zudem sind diese meist teurer als die etablierten Methoden. Die großtechnische Implementierung befindet sich in der Praxis in wenigen Anwendungen, z.B. Dump-, Heap-Leaching auf Erzmetallagerstätten.

Durch Bioleaching oder Biolaugung werden mit Hilfe von Bakterien Metalle aus Abraumhalden, Abfällen, Prozess- und Abwässern mobilisiert. Zur Gewinnung von gelösten Metallen werden in der Biosorption (Adsorption an Mikroorganismen oder biologischen Materialien), Bioakkumulation (Aufnahme und Speicherung von Metallen in Zellen) oder Biofällung (Ausfällung von Metallen durch die Aktivität von Mikroorganismen) neben Bakterien auch Hefe-, Pilz-, oder Algenzellen eingesetzt. Eine universelle Methode zur spezifischen Extraktion von Metallen durch Mikroorganismen existiert noch nicht. Mikrobielle Prozesse müssen teilweise auf die spezifischen Anforderungen der Rohstoffquelle optimiert werden. Zugleich kann die Ausbeute des gewünschten Zielprodukts durch die Anwendung von gezielt ausgewählten Mikroorganismen erhöht werden. Gegenstand der Forschung ist häufig das Screening nach leistungsfähigeren und robusteren Mikroorganismen.

Phytomining ist ein Teilgebiet der Phytosanierung und -remediation, bei denen Metalle aus dem Boden in der Biomasse von Pflanzen in hoher Konzentration angereichert werden (Hyperakkumulatoren). Phytomining wird vornehmlich für die Sanierung von kontaminierten Böden oder Halden (Entfernung von Schwermetallen oder radioaktiven Substanzen) verwendet.

Als relativ neues Teilgebiet der biotechnologischen Metallgewinnung wird der Einsatz von speziell resistenten Enzymen betrachtet, die auch unter biologisch herausfordernden Bedingungen, wie z.B. extremen pH-Werten oder Toxizität, aktiv sind. Damit können durch enzymatische Vorbehandlung von Prozesswässern oder anderen lebensfeindlichen Umgebungen toxische Substanzen unschädlich gemacht werden, was anschließend den Einsatz von Mikroorganismen erst ermöglicht. Auch hier mangelt es noch an der großskaligen Umsetzung und weist sowohl im Bereich des Enzymscreenings als auch einer stabilen Anwendung in realer Umgebung noch Entwicklungsbedarf auf.

## 3 Analyse der Biomining-Technologien und Akteure

### 3.1 Identifizierung und Klassifizierung aktuell eingesetzter Technologien

Der Überbegriff Biomining fasst unterschiedliche Technologien zusammen, die zum gemeinsamen Ziel haben, Metalle aus verschiedensten Vorkommen zu gewinnen. Den im Folgenden als Klassen beschriebenen Technologien lassen sich entsprechende Anwendungsgebiete und Vorgehensweisen zuordnen. Diese werden abhängig vom Ausgangsmaterial und dessen Metallgehalt in unterschiedlichen Technisierungsgraden ausgeführt.

#### 3.1.1 Bioleaching

Das Bioleaching stellt eine Klasse des Biominnings dar, die sich in drei weitere Technologien untergliedern lässt. Die erste Unterklasse ist die **Haldenlaugung**, bei der zur Metallgewinnung aus aufgeschütteten Erzalden acidophile Bakterien (*A. & L. ferrooxidans*, *Sulfolobus metallicus*, *A. brierleyi*) zum Einsatz kommen. Die technische Implementation ist dabei relativ einfach, da lediglich mit Wasser oder anderen Lösungen berieselt wird, vereinzelt ist eine Beheizung notwendig. Auf diesem Wege werden Kupfer, Kobalt, Zink, Nickel und Blei aus sulfidischen Erzen und Armerzen, deren Abbau sich sonst aufgrund des niedrigen Metallgehalts nicht mehr lohnen würde, gewonnen. Als Nebenprodukt entsteht dabei Schwefelsäure. Anderweitige Erze, meist silikatisch, oxidisch und karbonatisch, können unter Zusatz von reduzierten Schwefelverbindungen über eine Redoxreaktion aufgeschlossen werden oder mit geeigneten Reagenzien komplexiert werden. Auch die quantitative Zugabe von Elementarschwefel zur Initiierung des Löseprozesses ist möglich, dabei bildet sich ebenfalls flüssige Schwefelsäure. Alternativ kann das Erz mit heterotrophen Bakterien und Pilzen ohne Bildung von Schwefelsäure, dafür durch ständige Zugabe von Glycin, ausgebeutet werden.

Die **Tankbiolaugung** stellt die zweite Unterklasse des Bioleachings dar und gelingt als großtechnische Biooxidation in Rühr tanks für den Aufschluss komplexer Erze, sodass leicht lösliche Metalle (Nickel, Cobalt) einfach abgetrennt werden können. Die aufwendigere Gewinnung von Gold aus Arsenopyrit oder Pyrit aus dem schwerlöslichen Tanklaugungsrückstand benötigt eine Weiterverarbeitung in zusätzlichen Rühr tanks, nachdem leicht lösliche Metalle aus dem aufgeschlossenen Erz abgetrennt wurden. Dazu wird der *Acidithiobacillus* zugegeben. Außer einer Automatisierung des Mehrtankverfahrens ist eine umfassende Regelungstechnik für Temperatur, pH-Wert und Gasversorgung notwendig.

Bei der **in-situ/in-place Biolaugung** kann durch gezielte Einleitung und Auspumpen von Laugungsflüssigkeit in Böden mit natürlichem Vorkommen eine Metalllösung erhalten werden. Diese recht aufwendige und nur in großem Umfang durchführbare Methode wird primär für Uranerze angewendet.

#### 3.1.2 Phosphatrückgewinnung über Bioakkumulation

Die biologische Phosphorelimination in Kläranlagen ist die technologische Anwendung der Bioakkumulation. Durch den Aufbau von Biomasse wird der im Abwasser enthaltene Phosphor im Schlamm inkorporiert und mit dem sog. Überschussschlamm im Nachklärbecken vom Wasser getrennt. Anders als bei der chemischen Phosphor-Elimination, die Phosphate über Zugabe von Fällungsmitteln (Aluminiumverbindungen,

Kalkmilch, Eisenchloride) aus dem Abwasser entfernt, werden bei der Bioakkumulation phosphatakkumulierende Organismen (PAO) eingesetzt.

Die biologisch induzierte Phosphatrückgewinnung aus anderen festen Bioabfällen wird durch Umwandlung des Polyphosphats in Phosphat und als Energiespeicher durchgeführt. Eingesetzt werden nicht nur Mikroorganismen wie *Aspergillus niger* und *oscillatoria angustissima*, sondern auch bestimmte Pilze, Hefen, Algen für Bioabfälle, Chitosan und Cellulose.

### 3.1.3 Biomineralisation und Biofällung

Biomineralisation und Biofällung lassen sich besonders bei komplexen Erzen bevorzugt einsetzen. Aus neutralen Prozesswässern können über Fällungs- und Oxidationsreaktionen leicht trennbare Metallverbindungen erhalten werden. Beispiele für die ausgefällten Metallverbindungen sind Eisen(III)-oxidhydrat ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) und Mangan(IV)-oxid. Zur Abscheidung sind Pyrit und Markasit geeignet. In einigen Fällen können sogar perfekt kristallisierte Minerale erzeugt werden: Mithilfe des ferrooxidans *myxofaciens* lässt sich dieses Phänomen bei Magnetit auslösen.

### 3.1.4 Biosorption

Die Biosorption klassifiziert die passive Akkumulation von positiv geladenen Metallionen an negativ geladene Verbindungen an der Zelloberfläche. Alternativ kann eine aktive Akkumulation der Metalle im Cytoplasma der Zellen auftreten, bei der durch den Stoffwechsel (Membrantransport) entweder eine unveränderte oder metabolisierte Form der Metalle eingelagert wird. Darüber hinaus können Metalle auch adsorptiv auf Oberflächen von Polymeren und/oder Pflanzenreststücken als natürliche Adsorptionsmittel akkumuliert werden. Beispiele hierfür sind bestimmte Lignine, Cellulosen und Alginat. Auch teilweise entwässerte pflanzliche Adsorptionsmittel sind möglich, z.B. aus getrockneten und gemahlten Blättern der *Acacia nilotica* (Gummi-Akazie). Die Biopräzipitation ist eine Sonderform der Biosorption und ähnelt methodisch der Biomineralisierung. Dabei bilden sich biologisch bedingt schwerlösliche Niederschläge mit angereicherten Metallgehalten.

### 3.1.5 Biosynthese von Nanopartikeln

In kontinuierlich betriebenen Mikroreaktoren können Nanopartikel durch Bakterien, Pilze, Hefen, Algen und Pflanzen biosynthetisiert werden. Dabei bilden sich die Nanopartikel intra- oder extrazellulär, abhängig von diversen Faktoren wie Temperatur, pH-Wert oder der Metallkonzentration.

### 3.1.6 Bioelektrische Systeme

Bioelektrische Systeme (BES), oft pauschal als mikrobielle Brennstoffzellen (MFC) betitelt, umfassen außer der MFC noch mikrobielle Elektrolysezellen (MEC) und die bioelektrische Aufbereitung (BET). In der Anwendung nutzen elektroaktive Mikroorganismen, die in einer MFC wachsen können, feste Elektronenakzeptoren (Elektroden) für ihren Stoffwechsel, sodass sie Elektronen aus Abfallstoffen gewinnen können. Parallel werden Metalle an der Kathode reduziert und dadurch ausgefällt. Mögliche Einsatzfelder sind zahlreiche methallhaltige Wässer mit oxidierten Metallionen, z.B. Silber ( $\text{Ag}^+$ ), Gold ( $\text{Au}^{3+}$ ), Cobalt ( $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{3+}$ ), Chrom ( $\text{Cr}^{6+}$ ), Kupfer ( $\text{Cu}^{2+}$ ), Vanadium ( $\text{V}^{5+}$ ), Selen ( $\text{Se}^{4+}$ ), Uran ( $\text{U}^{6+}$ ), Nickel ( $\text{Ni}^{2+}$ ) und Cadmium ( $\text{Cd}^{2+}$ ).

### 3.1.7 Phytomining

Phytomining bezeichnet die Gewinnung von Metallen mithilfe von Pflanzen oder Pilzen. In pflanzlichen Hyperakkumulatoren reichern sich Metalle im oberflächigen Teil des organischen Pflanzenmaterials an. Die ungeladenen Metalle oder auch Ionen stammen dabei aus der Erde der unmittelbaren Umgebung und werden in Zellvakuolen oder Chloroplasten angesammelt, um die vitalen Zellorganellen zu schützen. Auf diese Weise können Schwermetalle, bioverfügbare Metalle oder radioaktive Stoffe selbst aus Verbrennungsrückständen wiedergewonnen werden.

Werden Metalle in Pilzen akkumuliert, wird von Mycoremediation gesprochen. Hauptsächlich findet Biosorption an der Oberfläche statt, ein geringer Anteil kann auch intrazellulär ins Myzel aufgenommen werden. Bei manchen Pflanzen lässt sich die Fähigkeit zur Phytoremediation durch symbiotische Beziehungen wesentlich erhöhen (z.B. Mykorrhizza, AMF). Nach dem Erreichen des Sättigungsgrads der Akkumulation wird das Metall aus den Pflanzenteilen oder Pilzen extrahiert.

### 3.1.8 Enzymatische Reaktionen

Durch den gezielten Einsatz von Enzymen können notwendige Wachstumsbedingungen von Mikroorganismen umgangen werden. Das Hauptziel ist die indirekte Verbesserung von anderen Prozessen des Biominings. Die typischste Wirkungsweise ist die Zersetzung von Verbindungen oder Polymeren, in denen Metalle gebunden sind. Geeignete Enzyme können darüber hinaus benötigte Substanzen aufbauen oder lebensfeindliche Substanzen inaktivieren, sodass Mikroorganismen überleben können. Zudem können toxische Nebenprodukte abgebaut oder bereits deren Produktion verhindert werden. Als Beispiele anführen lassen sich die Inaktivierung von Cyaniden im Bergbau und die Abspaltung von organischen Phosphorverbindungen mittels Enzymimmobilisaten, um sie einem Recycling zugänglich zu machen. Außerdem kann z.B. Laccase die Effizienz eines Adsorptionsvorgangs durch die Oxidation phenolischer Substanzen erhöhen.

## 3.2 Nachhaltigkeit ausgewählter Biomining-Technologien

### 3.2.1 Allgemeine ökologische Nachhaltigkeit von Biomining

Generell gilt für alle Methoden des Biomining, dass darauf geachtet werden muss, eine Kontamination der Umwelt mit Mikroorganismen von vornherein auszuschließen. Darüber hinaus gibt es weitere Gefahren für die ökologischen Systeme, selbst wenn die Durchführung gängigen Sicherheits- und Schutzstandards entspricht. Durch die oft sehr geringen und unspezifizierten Konzentrationen von Metallen in den Ausgangsstoffen ist die Anwendung von Biomining auf diese Restströme meist improvisiert und erfolgt ohne gezielte Prozesssteuerung zur Vermeidung von Emissionen, um den Prozess wirtschaftlich zu halten. Diese Vernachlässigung des Umweltschutzes betrifft grundsätzlich alle Aufarbeitungsmethoden für metallhaltige Reststoffe, wobei das Biomining die aussichtsreichsten Möglichkeiten bietet, wirtschaftliche Maßnahmen zur Verbesserung von Ökologie und Nachhaltigkeit zu ergreifen.

### 3.2.2 Ökologische Nachhaltigkeit von Bioleaching

In diesem Zusammenhang ist vor allem das in-situ Bioleaching zu betrachten, das geotechnische Probleme wie Grundwasserabsenkung, Verkarstung oder Bodeninstabilität hervorrufen kann. Insbesondere bei der Einleitung von Laugungsflüssigkeit besteht die Gefahr des unkontrollierten Versickerns verschiedentlich kontaminierter Wässer. Auch die im Prozess gebildete Schwefelsäure, organische Säuren und oxidische Minerale dürfen nicht in den Boden gelangen, um eine Übersäuerung zu vermeiden. Bisher gibt es noch kaum technische Lösungen zur Entsorgung von Eisensulfaten und schwacher Schwefelsäure.

Extreme Gefahren für Menschen und Tiere birgt vor allem die direkte Cyanidlaugung von Goldgesteinen, aber auch die Abwässer indirekter Laugung des Rückstands sind gefährdend. Hat der Laugungsprozess des Bodens einmal eingesetzt, kann dieser nicht aktiv gestoppt werden, was unweigerlich zum Auslaugen des Bodens führt.

### 3.2.3 Ökologische Nachhaltigkeit von Biomining auf Abraumhalden und Deponien

Eine Chance besteht allerdings beim Recycling von Reststoffen auf Deponien und Abraumhalden. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen, um umweltverträgliche mechanisch-biologische Restabfallbehandlungsanlagen (MBA) in Deutschland zuzulassen, sind die Deponieverordnung DepV und die Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen 30. BImSchV.

Klassisch werden zunächst Metalle und Bestandteile mit hohem Heizwert zur energetischen Verwertung abgetrennt (einfache Verbrennung). Für diese schwermetallbelasteten Schlacken und Aschen stellt das Bioleaching zur Phosphorrückgewinnung eine Alternative dar, deren Risiken sorgfältig abgewogen werden müssen (Pasch 2019). Der hohe Wasserverbrauch zur Auswaschung der Metalle ist nicht nur ökologisch bedenklich, sondern macht die Anwendung auch entsprechend kostenintensiv. Beim Einsatz von Mikroorganismen sind das Biowachstum und die Kontamination kaum kontrollierbar, da fortwährend große Mengen an reduzierten Schwefelverbindungen oder Glycin zugegeben werden müssen, um den Prozess aufrecht zu erhalten. Allerdings kann der Schwermetallgehalt nach einmaliger Laugung bereits auf etwa ein Drittel reduziert werden.

Alternativ werden die Abfallfraktionen nach einer biologischen Stufe zur Verringerung der biologischen Aktivität (Kompostierung, Vergärung) auf Deponien abgelagert. Diese schwermetallhaltigen Abfallstoffe werden großtechnisch nur in der

metallverarbeitenden Industrie aufgearbeitet. Rein chemische Laugungsverfahren ermöglichen die Extraktion von Metallen, um diese als Wertstoffe zurückzugewinnen.

### 3.2.4 Ökologische Nachhaltigkeit von Phytoremediation und Biosorption

Bei der Phytoremediation für Boden- oder Altlastensanierung sind selbst bei niedrigen Konzentrationen meist mehrere Vegetationsperioden (10 bis 20 Jahre) nötig, um die Bodengrenzwerte wieder einzuhalten. Unabhängig von der Geschwindigkeit der Akkumulation stellt sich darüber hinaus die Frage nach der sachgerechten Entsorgung des belasteten Pflanzenmaterials. Für die Rückgewinnung aus dem Pflanzenbestandteilen gibt es kein etabliertes Verfahren, um die gering konzentrierten Metalle sinnvoll verfügbar zu machen.

Die Biosorption weist eine hohe Umweltverträglichkeit auf, selbst Abfälle können dabei einer profitablen Einsatzmöglichkeit zugeführt werden. Allerdings sind bisher keine Anwendungsfälle mit relevanten Konzentrationen an zurückgewonnenen Metallen bekannt.

### 3.3 Relevante Akteure in Baden-Württemberg

In einer online-Recherche wurden Akteure ermittelt, die entweder aktiv im Bereich Biomining aktiv sind oder aufgrund ihrer Prozessströme und Fachkompetenzen grundlegend dafür in Frage kommen. Eine Identifizierung von spezifisch eingesetzten Technologien und deren tatsächlichem Umfang war dem Betriebsgeheimnis geschuldet nicht zu ermitteln. Lediglich die generelle Bevorzugung thermischer Verfahren gegenüber biobasierten Methoden aufgrund der besseren Etablierung wurde genannt. Die mit der systematischen Auslegung thermischer Prozesse einhergehenden höheren Ausbeuten bei geringeren Ausfallzeiten haben noch keinen der befragten Akteure dazu bewegt, sich ausführlich mit Biomining-Technologien zu beschäftigen. Eine ausführliche Liste potentiell relevanter Akteure befindet sich im Anhang.

### 3.4 Offene Fragen und Forschungsbedarf

#### 3.4.1 Forschungsbedarf bei der Haldenbiolaugung

In Deutschland hat die Haldenbiolaugung nicht-sulfidischer Erze mit heterotrophen Bakterien oder Pilzen im Labormaßstab vielversprechende Ansätze gezeigt. Veröffentlichte Studien zur Effizienzbestimmung wurden bisher nur an der TU Freiberg durchgeführt (Martin et al., 2015; Akinci & Guven, 2011). Begründet werden kann dies durch die vornehmlich im Gebiet Sachsens im Untergrund vorkommende Gesteinsschicht, die vereinfacht als Kupferschiefer bezeichnet wird. Durch den hohen Anteil sulfidischer Minerale können neben den in großen Anteilen vorliegenden Zink-, Kupfer- und Bleierzen auch weitere Metalle (Silber, Kobalt, Molybdän, Germanium) durch Bioleaching zugänglich gemacht werden.

Die Forschungsarbeiten fokussieren sich dabei auf die Bestimmung und Erhöhung der Leachingeffizienz in schwefelsaurem Milieu von Indium und Cadmium für verschiedene Stufen des Scale-ups. Martin et al. extrahierten 2015 Indium aus Proben von Abraumhalden unter Zusatz von Zinksulfiterz in den Ansatzgrößen Schüttelkolben, Säulenversuche und Biolaugungsreaktoren im Pilotmaßstab. Die höchste Laugungseffizienz von 87 % wurde dabei nach 225 Tagen im Säulentest erreicht. An dieser Stelle wäre es ein zielgerichteter nächster Schritt, mechanistische Untersuchungen anzustellen, um reaktionstechnische Kennzahlen zu ermitteln und anschließend die Effizienz gezielt optimieren zu können. Sind die Einflüsse wichtiger Faktoren genau quantifiziert, kann eine systematische Maßstabsübertragung erfolgen.

Beim Einsatz acidophiler Bakterien unter Zugabe von Schwefelsäure kann noch kein allgemeingültiges Fazit gezogen werden. Potenziell interessant wäre ein Scale-up in den Pilotmaßstab, nicht nur für ein Verfahren zur Gewinnung von Nickel und Zink (hieran wird bereits geforscht), sondern auch für eine Ausweitung auf bspw. nicht-sulfidische Erze von Mangan und seltenen Erden. Bei der sulfidfreien Haldenbiolaugung gelingt es jedoch seit über 40 Jahren nicht, diese über TRL 4 zu entwickeln, da stets wirtschaftlich zu geringe Metallkonzentrationen in den Lösungen erhalten werden, um eine Wirtschaftlichkeit des Verfahrens darstellen zu können.

### 3.4.2 Forschungsbedarf bei der Biosorption

Das Verfahren der Biosorption hat zum grundlegenden Nachteil, dass gegenwärtig die nicht-biobasierten Ionenaustauschtechnologien in allen Belangen überlegen sind. Die Selektivität ist ungenügend und abhängig von den vorliegenden Anionen, da bisher Mechanismus, Kinetik und Thermodynamik noch unerforscht sind. Daraus folgt ein hoher permanenter Analytik- und Regelungsaufwand.

### 3.4.3 Forschungsbedarf bei der mikrobiellen Brennstoffzelle

Der Aufbau einer MFC ist technisch und mikrobiologisch komplex. Die Einflüsse der eingesetzten Materialien und Bauelemente (Anode, Kathode, PEM) sind Gegenstand aktueller Forschung, um systematische Erkenntnisse zu gewinnen (Harnisch 2013, Landwehr 2018). Erschwert wird die Untersuchung durch die notwendigen Rahmenbedingungen wie die fortwährende Versorgung von Mikroorganismen, die Prozesswasser mit hohem chemischem Sauerstoffbedarf (CSB) bedingen sowie Probleme wie Biofilmbildung oder Metallanreicherung. Die möglichen Vorteile, die grüne Produktion von elektrischer Energie oder gar Wasserstoff aus Abfallströmen, sind ein großer Anreiz, diese Technologie voranzutreiben.

### 3.4.4 Fazit zum Forschungsbedarf

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass eine rein konzeptbasierte Forschung zur Technologieentwicklung oder Methodenverbesserung nur in den seltensten Fällen auf einen konkreten Anwendungsfall übertragbar ist. Die maßgeblichen individuellen Rahmenbedingungen der Rohstoffquellen sind zu vielfältig, als dass eine generelle Machbarkeitsstudie oder Effizienzbestimmung einen verlässlichen Beitrag zur Erschließung neuer Vorkommen leisten kann. Beispiele für diese sehr variantenreichen Bedingungen sind:

- die lokale Bodenmorphologie bzw. Schrottdichte,
- die Porosität des Boden-, Abraum- oder Schrottmaterials,
- gesamtmineralische Zusammensetzung und Schwefelgehalt,
- Menge, Verteilung und chemische Bindung der Metalle,
- Vorkommen biologiefindlicher Spezies (Chloride, ungewollte Puffer, Toxine),
- lokale Umweltbedingungen und -bestimmungen.

Daraus resultiert die allgemeine Schwierigkeit für eine großflächige und umfängliche Implementierung von Biominingtechnologien: Im Prinzip benötigt jede einzelne Anwendung spezifisch optimierte Prozessbedingungen, um insbesondere gegenüber der wirtschaftlichen Konkurrenz durch etablierte Technologien bestehen zu können. Lediglich über eine Motivation aus Nachhaltigkeit, Ressourcenrückgewinnung und Umweltschutz lassen sich die höheren Investitions- und Betriebskosten für Biomining in der großtechnischen Umsetzung rechtfertigen. Insgesamt muss im Anbetracht dieser Rahmenbedingungen festgestellt werden, dass kein allgemeiner Forschungsbedarf zu den einzelnen Methoden formuliert werden kann. Stattdessen sollte der Fokus auf konkrete Anwendungen mit hohen Stoffströmen sowie die notwendige Grundlagenentwicklung von zukunftsorientierten Technologien, beispielsweise bioelektrische Systeme, gelegt werden sollte.

## 4 Konzepterstellung für Fördermaßnahmen in Baden-Württemberg

### 4.1 Marktanforderungen bei der Weiterentwicklung von Technologien

#### 4.1.1 Grundbedingungen des Marktes

Um einen Markt zu schaffen, in dem Biomining-Technologien von Unternehmen nachgefragt werden, bedarf es der genauen Kenntnis der Anforderungen Baden-Württembergischer Unternehmen. Nur, wenn diese erfüllt werden, ist es für diese Unternehmen attraktiv, eine lokale Wertstoffrückgewinnung zu betreiben.

#### 4.1.2 Anreize für Investitionen

Eine zentrale Marktanforderung der Technologieentwicklung zur biologischen Abwasserstrombehandlung ist die gesicherte Wirtschaftlichkeit des Prozesses. Gegenwärtig wäre eine Einführung von Biomining-Technologien aufgrund der in den allermeisten Fällen sehr geringen Metallkonzentrationen ausschließlich durch den Umweltschutzgedanken motiviert. Oftmals bietet die Aufbereitung von industriellen Abwässern keine ökonomischen Gewinnmöglichkeiten für Unternehmen, selbst wenn diese Abwasserströme versorgungskritische Metalle enthalten. Niedrig konzentrierte Lösungen sind teuer in der Logistik, eine Aufkonzentration wäre ein weiterer, kosten- und energieintensiver Schritt, der ohne gesicherte Nachfrage nicht attraktiv ist.

Daher sind die kurz- und mittelfristig einzig wirksamen Steuerhebel gesetzliche Vorgaben, wie beispielsweise die aktuelle EU-Wasserrahmenrichtlinie, um Abwasserbehandlungsverfahren in die Anwendung zu bringen und damit lokale Umweltprobleme zu lösen. Der Unterschied zwischen möglichen Erlösen aus dem Metallverkauf und aktuellen Entsorgungs- oder Nachbehandlungskosten hat nach Aussagen von Interviewpartnern vermutlich eine Spannweite von mehreren Zehnerpotenzen.

#### 4.1.3 Anforderungen einer idealisierten Marktsituation aus Unternehmenssicht

Das optimale Szenario für Unternehmen wäre gegeben, wenn eine fertig entwickelte Technologie nur für den eigenen Standort zugekauft werden müsste. Biomining-Prozesse einzuführen oder darauf umzustellen würde kein finanzielles Risiko mehr bedeuten. Allerdings ist die Forschung vergleichsweise teuer, da keine allgemeingültigen Verfahren für spezielle Abwässer bekannt oder zugänglich sind. Ohne jegliche Aussicht auf Profit, weder durch rückgewonnenes Metall noch durch die kaum nachgefragte Technologie, gibt es keine Triebkraft für Investitionen.

Folglich müssen die Anwendungsbereiche wirtschaftlich und leistungstechnisch klar definiert sein. Dazu zählt vornehmlich, ob tatsächlich eine zumindest nennenswert profitable Metallrückgewinnung möglich ist. Zu den weiteren ökonomischen Punkten gehören einerseits Investitionskosten sowie Betriebskosten, andererseits der Personalbedarf und dessen Qualifikation.

Unabhängig davon, ob mit den Biomining-Technologien Metalle gewonnen oder Abfallströme gereinigt werden sollen, müssen Start- und Endkonzentration für behandelte Metallrestströme und die Toleranz für Fluktuationen genau untersucht sein. Weiterhin sollte die Steuer- und Regelungstechnik bereits etabliert und in den Prozess

integriert sein. Nur so kann sichergestellt werden, dass Grenzwertüberschreitungen für Restwässer effektiv vorgebeugt werden kann. Damit soll ausgeschlossen werden können, dass das Unternehmen keine Verantwortung zu tragen hat, falls biologische Prozesse nicht wie erwartet ablaufen oder mit der Zeit ungewöhnlich schnell an Wirksamkeit verlieren.

## 4.2 Definition und möglicher Umfang gezielter Fördermaßnahmen

### 4.2.1 Allgemein abgeleitete Schlussfolgerungen

Bevor Empfehlungen zu gezielten Fördermaßnahmen von Biomining-Technologien getroffen werden, muss darauf hingewiesen werden, dass stets die gesamtheitliche Recycling-Prozesskette im Auge behalten werden sollte. Durch die isolierte Förderung einer einzelnen spezifischen Technologie kann selbst bei einem Durchbruch nicht garantiert werden, dass sie sich am Markt durchsetzt. Nach den bisher erlangten Erkenntnissen genügt selbst die grundlegende Optimierung einer Methode nicht, um die Marktbedingungen signifikant zu verändern. Stets muss eine Anpassung an die individuellen Anforderungen der unterschiedlichen Rohstoffströme erfolgen, die das Potential aufzeigt, gegenwärtige Prozesse zu ersetzen oder gänzlich neue Anlagen zu rechtfertigen. Prinzipiell wird von Anwendern ein einfach kontrollierbarer und eine ohne viel Aufwand zu betreibender Prozess bevorzugt.

### 4.2.2 Empfehlungen zu gezielten Fördermaßnahmen

Dennoch sollen nun einzelne Forschungsfelder angesprochen werden, in denen entweder durch die ausgesprochen große Rohstoffmenge oder durch weitere Anwendungsmöglichkeiten der Technologie vielversprechende Förderungen möglich sind.

Ein erster Förderansatz ist die Untersuchung von Ideen zur ökologischen Verbesserung der Halden- und Tankbiolaugung. Einheitliches Ziel sollte die Steigerung der allgemeinen Effizienz und erreichten Ausbeute sein. Ersatzprozesse anstelle der permanenten Schwefelzugabe sollten zum Ziel haben, keinen sauren Rückstand in erheblichen Mengen zu verursachen. Auch nach Alternativen für die fortwährende Glycin-, Methanol- oder Acetatzugabe als Nährmittel für die Mikroorganismen sollte gesucht werden. Hierbei können Abfallströme als zusätzliche Quelle an kohlenstoffhaltigen Substraten betrachtet werden.

An dieser Stelle schließt sich ein weiterer Förderansatz an, der in Kombination oder separat verfolgt werden kann. Möglicherweise können Enzyme aus weiteren Bestandteilen der Restströme Substrate bilden, die analog zu Glycin die Mikroorganismen mit Energie versorgen. Darüber hinaus können auch andere Biomining-Prozesse durch maßgeschneiderte Enzyme verbessert werden. Basierend auf einer Orientierung an konkreten Anwendungsfällen ist eine gezielte Förderung möglich. Notwendige Informationen dazu sind die betrieblich festgelegten Rahmenbedingungen, also vor allem Platzbedarf, Investitionskosten und betrieblich definierte Grenzwerte der Wertstoffgehalte der zu behandelnden Prozessströme.

Die mikrobielle Brennstoffzelle zur alternativen Energieerzeugung hat bereits vielversprechende Ansätze gezeigt. Gelänge es hier, höhere Stromdichten zu erreichen, könnte 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. Ein weiteres Argument für diese

Technologie ist, dass durch das Anlegen einer sehr kleinen externen Spannung (110 mV) anstelle von Protonen sogar Wasserstoff produziert werden kann. Die aufgewendete Energie beträgt weniger als ein Zehntel gegenüber der direkten Wasserelektrolyse und bietet somit einen auf zweierlei Weise grünen Zugang zu Wasserstoff als zukunftssträchtigen Energieträger. Zudem sollte die Präzipitation von Metallen an der Kathode einer mikrobiellen Brennstoffzelle weiter und intensiver untersucht werden. Besonders in der Integration in bestehende Systeme und dem Up-Scaling der BES-Ansätze (bei besonders großen Volumenströmen) herrscht noch sehr viel Entwicklungs- Forschungspotential.

Zusätzlich sollte als Förderansatz die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften der Biomining-Technologien genauer betrachtet werden. Neue Entwicklungen wie das „Next-Generation-Sequencing“ (NGS) ermöglichen es, gesamte Populationen einer mikrobiellen Gemeinschaft immer kostengünstiger und genauer zu betrachten. So kann bei der Anwendung von Biomining-Technologien nach den effektivsten Stoffwechselwegen oder der besten Zusammensetzung an Mikroorganismenpopulationen gesucht werden.

Für die zukünftige Entscheidung, wo Biominingtechnologien an einer Rohstoffquelle ansetzen können, könnte eine Lebenszyklusanalyse (Umweltbilanz, eng. life cycle assessment – LCA) oder Stoffstromanalyse mit gleichzeitiger Integration der Rohstoffquellen hilfreich sein. Dabei sollten Vertreter aus unterschiedlichen Kompetenzgebieten mit einbezogen werden, um gezielte Handlungsempfehlungen entwickeln zu können. Besonders die Fragestellung der zentralen oder dezentralen Anwendung von Biomining-Technologien könnte mit einer LCA geklärt werden.

#### 4.2.3 Förderung der Vernetzung und Clusterbildung

Abseits der Förderung von expliziten Forschungsvorhaben gab es bei der Befragung seitens der relevanten Akteure eine sehr positive Resonanz bezüglich einer Clusterbildung bei der Technologieentwicklung. Dies gilt auch über die Grenzen von spezifizierten Industriezweigen wie Galvanik, Katalysatorentwicklung, Metallschrottrecycling und Abwasseraufbereitung hinweg. Zwar produziert oder behandelt jedes Unternehmen andere Abwässer, jedoch gibt es Überschneidungen bei den Anforderungen an eine profitable Rückgewinnung oder Aufreinigung. Durch die unabhängigen Endanwendungen gibt es gemäß den Aussagen der führenden F&E-Einheiten der Unternehmen keine nennenswerte Konkurrenzsituation bei der Forschung. Deshalb besteht generell ein großes Interesse an einer Vernetzung von relevanten Akteuren an gleicher oder anderer Stelle der Prozess- und Wertstoffkette. Mehrfach wurde die Offenheit betont, an einem möglicherweise extern moderierten, multilateralen Austausch von Forschungsansätzen oder experimentell verfolgbareren Ideen zu alternativen Rückgewinnungsmöglichkeiten von Wertstoffen teilzunehmen und sich gegebenenfalls sogar aktiv einzubringen.

30. BImSchV – Verordnung über Anlagen zur biologischen Behandlung von Abfällen. 20. Februar 2001 (BGBl. I S. 305, 317)

Akinci, G., & Guven, D. E. (2011). Bioleaching of heavy metals contaminated sediment by pure and mixed cultures of *Acidithiobacillus* spp. *Desalination*, 268(1–3), 221–226. <http://doi.org/10.1016/j.desal.2010.10.032>

Deponieverordnung – DepV. 27. April 2009 (BGBl. I S. 900), zuletzt geändert: Artikel 2 der Verordnung vom 4. März 2016 (BGBl. I S. 382)

Martin, M., Janneck, E., Kermer, R., Patzig, A., & Reichel, S. (2015). Recovery of indium from sphalerite ore and flotation tailings by bioleaching and subsequent precipitation processes. *Minerals Engineering*, 75, 94–99. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.015>

Harnisch, F.: Aufbau und Charakterisierung einer Mikrobiellen Brennstoffzelle (MBZ) im Technikumsmaßstab. Projekt der DBU, TU Braunschweig, 2012-2013.

Landestrategie Nachhaltige Bioökonomie Baden-Württemberg (04. Juni 2019); Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg und Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg: [https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6\\_Wirtschaft/Biooekonomie/Landesstrategie-Nachhaltige-Biooekonomie-barrierefrei.pdf](https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/6_Wirtschaft/Biooekonomie/Landesstrategie-Nachhaltige-Biooekonomie-barrierefrei.pdf) (zuletzt abgerufen: 25.11.2021)

Landwehr, L: Arbeitsgruppe DEMO-BioBZ. Förderung des BMBF, TU Claustal, seit 2018.

Pasch 2019: Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen, insbesondere Phosphor aus der Asche von Klärschlamm sowie Tier- und Knochenmehl. BMBF-Kooperationsprojekt, RWTH Aachen, 2006-2009

## 6 Anhang

-----  
Anhang  
-----

**Tabelle 1 Ermittelte Biomining-Akteure der Industrie in Baden-Württemberg**

Kategorie	Name	Adresse	Schwerpunkte	Kontakt	Website
Anwender	Agosi, Allgemeine Gold- und Silberscheide anstalt AG	Kanzlerstr. 17 75175 Pforzheim	Gold (Recycling)	info@agosi.de (0) 7231 960-0	<a href="https://www.agosi.de/">https://www.agosi.de/</a>
Anwender	BEDRA GmbH	Postfach 1140 Untere Talstraße 61 D-71255 Weil der Stadt	Recycling von Edelmetallen	Telefon: +49 7033 6936-0 info@bedra.de	<a href="https://www.bedra.de/de/leistungen/edelmetall-recycling">https://www.bedra.de/de/leistungen/edelmetall-recycling</a>
Anwender	DODUCO Holding GmbH	Im Altgefäll 12 75181 Pforzheim	Wiederaufbereitung edelmetallähnlicher Abfälle	49 (0) 7231 602-0	<a href="https://www.doduco.net/">https://www.doduco.net/</a>
Anwender	Umicore AG & Co KG	Trottäcker 48 79713 Bad Säckingen	Recycling Edelmetalle	49 7761 994 8073 info@eu.umicore.com	<a href="https://www.umicore.de/">https://www.umicore.de/</a>

-----  
Anhang  
-----

Anwender	Umicore Galvanotechnik GmbH	Klarenbergstrasse 53-79   73525 Schwäbisch Gmünd	Gold (Recycling)	galvano@eu.umicore.com (0) 7171 607-01	<a href="https://ep.umicore.com/de/ueber-uns/">https://ep.umicore.com/de/ueber-uns/</a>
Anwender	ELIQUO STULZ GmbH	Beim Signauer Schachen 7 79865 Grafenhausen	Phosphorrückgewinnung und Klärschlammverwertung	Telefon: +49 7748 9200-0 info@eliquostulz.com	<a href="https://www.eliquostulz.com/de/">https://www.eliquostulz.com/de/</a>
Anwender	EnBW	Durlacher Allee 93 76131 Karlsruhe	Recycling von Phosphor aus Klärschlamm	Telefon: +49 721 63-00 kontakt@enbw.com	<a href="https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/forschung/weitere-projekte/dephosphatierung.html">https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/forschung/weitere-projekte/dephosphatierung.html</a>
Anwender	Glatt GmbH	Werner-Glatt-Str. 1 79589 Binzen	Phosphorrückgewinnung	Tel.: +49 7621 664-0 info@glatt.com	<a href="https://www.glatt.com/home/">https://www.glatt.com/home/</a>
Anwender	Wehrle-Werk AG	Bismarckstr. 1-11 79312 Emmendingen	Thermische Rückgewinnung von Phosphor aus Brennstoffen	49 76 41 5 85-0 info@wehrle-werk.de	<a href="https://www.wehrle-werk.de/">https://www.wehrle-werk.de/</a>
Anwender (potentiell)	Deutsche Rohstoff AG	Q7, 24 in 68161 Mannheim	Strategische Metalle, Öl und Erdgas	Tel: +49 621 490 817 0 info@rohstoff.de	<a href="https://rohstoff.de/">https://rohstoff.de/</a>

-----  
Anhang  
-----

Consulting	GlobalFlow GmbH	Königstraße 27 70173 Stuttgart	Abfall- und Wertstoffmanagement (Unternehmensberatung)	info@global-flow.de Tel: +49 (0) 711 490 50 194	<a href="https://global-flow.de/">https://global-flow.de/</a>
Entwickler	Vulcan Energy	Baischstr. 8, 76133 Karlsruhe, Germany	Lithiumrückgewinnung aus Altbatterien	Telefon: +49 721 570 44680 kontakt@v-er.eu	<a href="https://v-er.eu/de/startseite/">https://v-er.eu/de/startseite/</a>
Entwickler & Anwender	Carbonauten GmbH	Riedstraße 40/1 89537 Giengen, Germany		Telefon +49 7322 9589343 t.becker@carbonauten.com	<a href="https://www.carbonauten.com/">https://www.carbonauten.com/</a>
Entwickler & Anwender	JatroSolutions	ECHTERDINGER STR. 30 70599 STUTTGART	Bioakkumulatoren (z.B. Jatropha-Pflanze) und Weiterverarbeitung	TEL. +49 711 45999760 OFFICE@JATROSOLUTIONS.COM	<a href="https://jatro-solutions.com/about-us.html">https://jatro-solutions.com/about-us.html</a>
Entwickler & Anwender	Novis GmbH	Vor dem Kreuzberg 17 72070 Tübingen	Industrielle Biotechnologie für biologische Reststoffe	49 7071 795 25 00 info@novis.com	<a href="https://www.novis.me/">https://www.novis.me/</a>

-----  
Anhang  
-----

Entwickler & Anwender	Nutricon Umweltschutztechnik GmbH	Schönfeldstraße 8 76131 Karlsruhe	Fällung und Schwermetallfällung, Schlammwässerung	info@nutricon.de 0721 607865	<a href="https://www.nutricon.de/index.html">https://www.nutricon.de/index.html</a>
Entwickler & Anwender	BHU Umwelttechnik GmbH	Einsteinstraße 57 71229 Leonberg	Kommunale Schlammbehandlung, Klärschlammrecycling	Mail: info@bhu-et.de Telefon: +49 (0)7152 / 3535465	<a href="https://www.bhu-et.com/?lang=de">https://www.bhu-et.com/?lang=de</a>
Entwickler & Anwender	Greening GmbH & Co. KG	Bahnhofstraße 109 71397 Leutenbach	Recycling von Batterien	Tel.: +49 71 95 / 9 04 33 0 post@greening.de	<a href="https://greening.de/">https://greening.de/</a>
Prozessströme	Badische Stahlwerke GmbH	Graudenzer Straße 45 77694 Kehl am Rhein	Stahlhersteller	Telefon: +49 7851 83-0 info@bsw-kehl.de	<a href="https://www.bsw-kehl.de/">https://www.bsw-kehl.de/</a>
Prozessströme	BGH Edelstahl Siegen GmbH	Industriestraße 9 57076 Siegen	Edelstahlhersteller	info.siegen@bgh.de +49 271 / 701 0	<a href="https://www.bgh.de/de/">https://www.bgh.de/de/</a>
Prozessströme	Dr.-Ing. Max Schlötter GmbH & Co. KG	Talgraben 30 73312 Geislingen an der Steige,	Galvanikanlagen	Tel.: 07331 205-0 info@schloetter.de	<a href="https://schloetter.de/unternehmen/">https://schloetter.de/unternehmen/</a>

-----  
Anhang  
-----

Prozessströme	IMO OBERFLÄCH ENTECHNIK GMBH	Remchinger Straße 5 75203 Königsbach- Stein	Galvanikanlagen	Tel.: +49 7232 3006-0 info@imo-gmbh.com	<a href="https://www.imo-gmbh.com/">https://www.imo-gmbh.com/</a>
Reststoffe	AH GmbH Metall- und Schrotthand el	Fruchtbahnhofstr. 13 68159 Mannheim	Recycling von Metallschrott	info@ah-schrotthandel.de Fon: 0621 17 89 50 89	<a href="https://www.ah-schrotthandel.de/dienstleistungen/">https://www.ah-schrotthandel.de/dienstleistungen/</a>
Reststoffe	Carl Knoblauch GmbH & Co. KG	Hans-Rießer-Straße 8 74076 Heilbronn	Recycling von Metallschrott	Telefon 07131/1567-0 info@knoblauch- heilbronn.de	<a href="https://www.knoblauch-heilbronn.de/">https://www.knoblauch-heilbronn.de/</a>
Reststoffe	ESG Edelmetall- Service GmbH & Co. KG	Gewerbering 29b D-76287 Rheinstetten	Recycling von Edelmetallen	Telefon: +49 7242 95351- 77 info@scheideanstalt.de	<a href="https://www.scheideanstalt.de/edelmetall-recycling/">https://www.scheideanstalt.de/edelmetall-recycling/</a>
Reststoffe	Fischer Rohstoff- Recycling GmbH	Werkstraße 32 71384 Weinstadt	Recycling von Metallschrott	info@fischer-rohstoff- recycling.de	<a href="https://fischer-rohstoff-recycling.de/">https://fischer-rohstoff-recycling.de/</a>

-----  
Anhang  
-----

Reststoffe	Hermann Gehring und Söhne	Im Entenbad 2a 79541 Lörrach	Entsorgungsberatung, Ölabscheidenservice und Sonderabfallentsorgung	Tel. +49 (0)7621/ 926920 info@gehring-gmbh.de	<a href="https://gehring-gmbh.de/">https://gehring-gmbh.de/</a>
Reststoffe	KURZ Entsorgung GmbH	Mühläckerstraße 26 71642 Ludwigsburg	Entsorgung von Gewerbeabfällen, Rückgewinnung von Wertstoffen	Tel.: 07144 8442-0 info@kurz-entsorgung.de	<a href="https://www.kurz-entsorgung.de/">https://www.kurz-entsorgung.de/</a>
Reststoffe	Ohnemus Recycling	Neckarvorlandstrasse 88 68159 Mannheim	Eisen- und Nicht-Eisen- (NE)-Abfälle	Telefon (0621) 39 17 52 – 01 info@ohnemus-recycling.de	<a href="https://www.scherrieble-gruppe.de/member/ohnemus-recycling/">https://www.scherrieble-gruppe.de/member/ohnemus-recycling/</a>
Reststoffe	REMONDIS SE & Co. KG	Brunnenstraße 138 44536 Lünen		T +49 2306 1060 info@remondis.de	<a href="https://www.remondis-entsorgung.de/dienstleistungen/uebersicht/">https://www.remondis-entsorgung.de/dienstleistungen/uebersicht/</a>
Reststoffe	SKB Rohstoff und Recycling	Rieselfeldallee 50 79111 Freiburg	Recycling von Metallschrott	info@skb-rohstoff.de	<a href="https://www.skb-rohstoff.de/sindex.html">https://www.skb-rohstoff.de/sindex.html</a>
Reststoffe	Wöhrle Rohstoffrecycling GmbH	Rappenfelsen 17 D - 78713 Schramberg	Recycling von Alteisen, Metallen, Haushaltsgeräten, Unterhaltungselektronik u.a.	Tel: +49 (0)7422-4662 info@schrott-woehrle.de	<a href="https://schrott-woehrle.de/de/">https://schrott-woehrle.de/de/</a>

-----  
Anhang  
-----

Reststoffe	HERTER Service und Recycling GmbH	Ernst-Abbe-Str. 7 72770 Reutlingen	Recycling von Schwermetallen u.a.	Telefon: +49 (0) 7121 / 9 568 0 info@herter-recycling.de	<a href="https://herterrecycling.com/">https://herterrecycling.com/</a>
Reststoffe & Anwender	Zweckverba nd Klärwerk Steinhäule (ZVK)	Reinzstraße 1, 89233 Neu-Ulm	Recycling von Schwermetallen	Tel: 0731 / 97 97 2 – 0 Fax: 0731 / 97 97 2 – 42 Mail: info@zvk-s.de	<a href="https://www.zvk-s.de/">https://www.zvk-s.de/</a>

**Tabelle 2 Ermittelte Biomining-Akteure der Forschung in Baden-Württemberg**

Kategorie	Name	Adresse	Forschungsschwerpunkte	Kontakt	Website
Forschungstelle des DVGW (Verein)	DVGW-Forschungsstelle am Engler-Bunte-Institut des KIT	Engler-Bunte-Ring 1 – 9, 76131 Karlsruhe	Direkter Ansprechpartner nicht ermittelbar		<a href="https://www.dvgw-ebi.de/">https://www.dvgw-ebi.de/</a>
Forschungstelle des DVGW (Verein)	DVGW-Technologiezentrum Wasser	Karlsruher Straße 84, 76139 Karlsruhe	Umweltbiotechnologie, Umweltmikrobiologischen Aspekte zur Verbesserung der Wasserqualität	Prof. Dr. Andreas Tiehm, +49 721 9678-137 +49 721 9678-105	<a href="https://tzw.de/">https://tzw.de/</a>
gemeinnützige Stiftung des bürgerlichen Rechts	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)	Meitnerstr. 1 70563 Stuttgart	insb. Auch regenerative Kraftstoffe (Phosphor-Recycling)	Dr. Marc-Simon Löffler +49 711 78 70-233 marc-simon.loeffler@zsw-bw.de	<a href="https://www.zsw-bw.de/forschung/regenerative-kraftstoffe/themen.html">https://www.zsw-bw.de/forschung/regenerative-kraftstoffe/themen.html</a>
Hochschule	Hochschule Albstadt-Sigmaringen Fakultät Life Sciences	Anton-Günther Straße 51 72488 Sigmaringen	Nachhaltigkeit als zentrales Thema	Sarah Lausch (Öffentlichkeitsarbeit) Telefon: +49 (0) 75 71 732 - 8234 lausch@hs-albsig.de	<a href="https://www.hs-albsig.de/hochschule/fakultaeten/life-sciences/">https://www.hs-albsig.de/hochschule/fakultaeten/life-sciences/</a>

-----  
Anhang  
-----

Industrie / Familienunternehmen	Hohenstein Institut für Textilinnovation gGmbH	Hohenstein Schlossteige 1   D-74357 Bönningheim	Textilien (Nachhaltigkeit, Abwasser, Recycling)	+49 7143 271-898 customerservice@hohenstein.com	<a href="https://www.hohenstein.de/de/">https://www.hohenstein.de/de/</a>
Land BaWü	Landesgeschäftsstelle Bioökonomie-Forschung Baden-Württemberg	Wollgrasweg 43   D 70599 Stuttgart	Biogas, Einsatz von Algen und weiteres	(0)711 459-22827 bioeconomy-bw@uni-hohenheim.de	<a href="https://biooekonomie-bw.uni-hohenheim.de/startseite">https://biooekonomie-bw.uni-hohenheim.de/startseite</a>
privates Umweltforschungsinstitut	Öko Institut e.V. Institut für angewandte Ökologie	Merzhauser Straße 173 D-79100 Freiburg	Unabhängiges Institut, zahlreiche Forschungsschwerpunkte, u.a. Recycling seltener Erden	Tel. +49 761 45295-0 info@oeko.de	<a href="https://www.oeko.de/">https://www.oeko.de/</a>
Stiftung des öffentlichen Rechts	Deutsche Institute für Textil+ Faserforschung	Körschtalstraße 26 73770 Denkendorf	Recycling von seltenen Erden	Tel.: 0711 9340101 michael.buchmeiser@ditf.de	<a href="https://www.ditf.de/de/ditf.html">https://www.ditf.de/de/ditf.html</a>
Unabhängiges Institut	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg	Wilckensstraße 3 69120 Heidelberg	breit gefächertes Themenspektrum	49 (0) 6221 / 47 67 -0 ifeu@ifeu.de	<a href="https://www.ifeu.de/">https://www.ifeu.de/</a>

-----  
Anhang  
-----

Unabhängiges Institut (Verein)	Forschungsinstitut Edelmetalle + Metallchemie	Katharinenstr. 17 73525 Schwäbisch Gmünd	Recycling von seltenen Erden	Tel.: 07171 1006-0 info@fem-online.de	<a href="https://www.fem-online.de/">https://www.fem-online.de/</a>
Fraunhofer-Institut	Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB	Nobelstr. 12 70569 Stuttgart	Das IGB entwickelt Verfahren, Technologien und Produkte für Gesundheit, Nachhaltige Chemie und Umwelt	Telefon +49 711 970-4401 Fax +49 711 970-4200 info@igb.fraunhofer.de	<a href="https://www.igb.fraunhofer.de/">https://www.igb.fraunhofer.de/</a>
Fraunhofer-Institut	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE	Heidenhofstr. 2 79110 Freiburg	Das ISE schafft technische Voraussetzungen für eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung	Telefon +49 761 4588-0 Fax +49 761 4588-9000	<a href="https://www.ise.fraunhofer.de/">https://www.ise.fraunhofer.de/</a>
	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI	Breslauer Straße 48 76139 Karlsruhe	Untersuchen die wissenschaftlichen, wirtschaftlichen, ökologischen, sozialen, organisatorischen, rechtlichen und politischen	Telefon +49 721 6809-0 Fax +49 721 689152	<a href="https://www.isi.fraunhofer.de/">https://www.isi.fraunhofer.de/</a>

-----  
Anhang  
-----

			Entstehungsbedingungen für Innovationen und deren Auswirkungen		
universitäre Forschung	Universität Hohenheim Landesanstalt für Agrartechnik und Bioenergie	Besucheradresse: Garbenstraße 9, 70599 Stuttgart	Nachhaltige Energie- und Rohstoffsicherung Biogasgewinnung und -nutzung Aufbereitung und thermische Nutzung von Biomasse	Dr. sc. agr. Hans Oechsner (Leitung) +49 (0)711 459 22683 la740@uni-hohenheim.de	<a href="https://la-bioenergie.uni-hohenheim.de/">https://la-bioenergie.uni-hohenheim.de/</a>
universitäre Forschung	Universität Hohenheim Forschungszentrum für Bioökonomie	Wollgrasweg 43 70599 Stuttgart	verschiedene laufende Projekte; z.B. Gewinnung von Kohlenhydraten aus Algen	49 711 459 24027 rc-bioeconomy@uni-hohenheim.de	<a href="https://rc-bioeconomy.uni-hohenheim.de/aktuelle_projekte">https://rc-bioeconomy.uni-hohenheim.de/aktuelle_projekte</a>
universitäre Forschung	Universität Tübingen Angewandte Geowissenschaften	Schnarrenbergstrasse 94-96 72076 Tübingen	u.a. Sanierung von kontaminierten Grundwasser	Prof. Dr. Andreas Kappler +49-(0)7071-29-74992 andreas.kappler@uni-tuebingen.de	<a href="https://uni-tuebingen.de/fakultaeten/mathematisch-naturwissenschaftliche-fakultaet/fachbereiche/geowissenschaften/arbeitsgruppen/angewandte-geowissenschaften/angewandte-geowissenschaften-zag/">https://uni-tuebingen.de/fakultaeten/mathematisch-naturwissenschaftliche-fakultaet/fachbereiche/geowissenschaften/arbeitsgruppen/angewandte-geowissenschaften/angewandte-geowissenschaften-zag/</a>

-----  
Anhang  
-----

universitäre Forschung	Universität Stuttgart Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft (ISWA)	Bandtäle 2 D-70569 Stuttgart	umweltschonende Infrastrukturmaßnahm en, Spurenstoffen und Schadstoffen in der Umwelt sowie die Reduzierung von Ressourcen- und Energieverbrauch	49 711.685-63742 info@iswa.uni-stuttgart.de	<a href="https://www.iswa.uni-stuttgart.de/">https://www.iswa.uni-stuttgart.de/</a>
universitäre Forschung	Universität Freiburg Fakultät für Biologie	Schänzlestr. 1 79104 Freiburg	Direkter Ansprechpartner nicht ermittelbar	dekanat@biologie.uni- freiburg.de	<a href="https://www.bio.uni-freiburg.de/">https://www.bio.uni-freiburg.de/</a>
universitäre Forschung	Universität Heidelberg - Fakultät für Biowissenschaften	Grabengasse 1 69117 Heidelberg	Direkter Ansprechpartner nicht ermittelbar		<a href="https://www.bio.uni-heidelberg.de/bachelorbiosciences">https://www.bio.uni- heidelberg.de/bachelorbiosciences</a>
universitäre Forschung	Universität Konstanz - Fachbereich Biologie	Universitätsstraß e 10 78464 Konstanz	Limnologie: <a href="https://www.limnologie.uni-konstanz.de/peeters/forschung/">https://www.limnologi e.uni- konstanz.de/peeters/fo rschung/</a>	Universität Konstanz, Limnologisches Institut D-78464 Konstanz Tel.: 49-7531-88-3459 e-mail: frank.peeters@uni- konstanz.de	<a href="https://www.biologie.uni-konstanz.de/forschung/auf-einen-blick/">https://www.biologie.uni- konstanz.de/forschung/auf-einen- blick/</a>
universitäre Forschung	KIT Karlsruher Institut für Technologie - Fakultät für Biologie	Fritz-Haber-Weg 4 76131 Karlsruhe	<a href="https://www.gescherlab.de/">https://www.gescher- lab.de/</a>	Phone.: +49-721-608- 41949	<a href="https://www.biologie.kit.edu/">https://www.biologie.kit.edu/</a>

-----  
Anhang  
-----

				E-Mail: johannes.gescher@kit.edu	
universitäre Forschung	KIT Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Produktionstechnik	Campus Süd Kaiserstraße 12 76131 Karlsruhe	Kreislaufwirtschaft, Recycling, nachhaltige Produktion	Tel.: +49 721 608-44011	<a href="https://www.wbk.kit.edu/Nachhaltige-Produktion.php">https://www.wbk.kit.edu/Nachhaltige-Produktion.php</a>

**Tabelle 3 Ermittelte Verbände im Bereich Biomining, Deutschlandweit**

<b>Name</b>	<b>Adresse</b>	<b>Kontakt</b>	<b>Website</b>
DECHEMA - Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.	Theodor-Heuss-Allee 25 60486 Frankfurt am Main	Telefon: 069 / 75 64-0	<a href="https://dechema.de/">https://dechema.de/</a>
Vereinigung Deutscher Biotechnologie Unternehmen	DECHEMA e.V. Theodor-Heuss-Allee 25 60486 Frankfurt am Mai	Telefon: 069 / 7564-341 (Sekretariat) sabine.schneider@dechema.de	<a href="http://v-b-u.org/">http://v-b-u.org/</a>
Deutsche Rohstoffagentur (DERA)	Wilhelmstraße 25-30 13593 Berlin-Spandau	Tel.: +49 (0)30 36993 226 dera@bgr.de	<a href="https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Ueber-Uns/ueber-uns_node.html">https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Ueber-Uns/ueber-uns_node.html</a>
Verbund kompostierbarer Produkte e.V.	Marienstraße 20 D-10117 Berlin	kontakt@derVerbund.com Tel.: +49 (0)30/28482360	<a href="https://www.derverbund.com/kontakt.html">https://www.derverbund.com/kontakt.html</a>
Institut für seltene Erden und Metalle	Mercandor Haus, Untere Altstadt 29, 6300 Zug, Schweiz	Telefon: +41 41 5 11 11 20 info@ise-ag.com	<a href="https://institut-seltene-erden.de/">https://institut-seltene-erden.de/</a>
Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung	Fränkische Straße 2 53229 Bonn	0049 228 98849-0 info@bvse.de	<a href="https://www.bvse.de/">https://www.bvse.de/</a>

-----  
Anhang  
-----

BDSV - Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V.	Berliner Allee 57 40212 Düsseldorf	Tel.: 0211-828953-0 zentrale@bdsv.de	<a href="https://www.bdsv.org/">https://www.bdsv.org/</a>
Bundesvereinigung Recycling-Baustoffe e. V.	Haus der Kreislaufwirtschaft Von-der-Heydt-Straße 2 D-10785 Berlin	Fon: +49 30 5900335-70 info@recyclingbaustoffe.de	<a href="https://recyclingbaustoffe.de/">https://recyclingbaustoffe.de/</a>
BDE Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e. V.	Von-der-Heydt-Straße 2 D 10785 Berlin	Tel.: +49 30 5900335-0 info@bde.de	<a href="https://www.bde.de/">https://www.bde.de/</a>
Verband Deutscher Metallhändler	Hedemannstraße 13 10969 Berlin	Tel: +49 30 2593738-0 vdm@vdm.berlin	<a href="http://www.vdm.berlin/index.php">http://www.vdm.berlin/index.php</a>
Fachverband Kunststoffrecycling	Fränkische Straße 2 53229 Bonn	0049 228 98849-0 info@bvse.de	<a href="https://www.bvse.de/fachverband-kunststoffrecycling.html">https://www.bvse.de/fachverband-kunststoffrecycling.html</a>
IG Metall Baden-Württemberg	Stuttgarter Straße 23 70469 Stuttgart	Telefon: +49 (711) 16581-0 bezirk.baden-wuerttemberg@igmetall.de	<a href="https://www.bw.igm.de/">https://www.bw.igm.de/</a>
Verband der Metall- und Elektroindustrie Baden-Württemberg e. V. (Südwestmetall)	Türlenstraße 2 70191 Stuttgart	Telefon: +49 (0)711 7682-0 info@suedwestmetall.de	<a href="https://www.suedwestmetall.de/">https://www.suedwestmetall.de/</a>

-----  
Anhang  
-----

Deutscher Abbruchverband	Oberländer Ufer 180 -182 50968 Köln	Telefon: 0221/367983-0 info@deutscher- abbruchverband.de	<a href="https://www.deutscher-abbruchverband.de/">https://www.deutscher-abbruchverband.de/</a>
Wirtschaftsvereinigung Stahl	Französische Str. 8 10117 Berlin	Tel: +49 (0) 211 6707-0 info@wvstahl.de	<a href="https://www.stahl-online.de/">https://www.stahl-online.de/</a>
Deutsche Phosphor Plattform	Bornheimer Landwehr 46HH 60385 Frankfurt am Main	Telefon + 49 (0) 171 226 9953 info@deutsche-phosphor- plattform.de	<a href="https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/">https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/</a>
Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.	Lyoner Straße 9 60528 Frankfurt am Main	Telefon:+49 69 6302-0 zvei@zvei.org	<a href="https://www.zvei.org/">https://www.zvei.org/</a>
Verband Biologie, Biowissenschaften & Biomedizin Deutschland	Geschäftsstelle Berlin: Langenbeck-Virchow-Haus (2. OG). Luisenstr. 58/59 10117 Berlin  Geschäftsstelle München: Corneliusstraße 12, 2. Stock 80 469 München	Dr. Kerstin Elbing (Öffentlichkeitsarbeit) Telefon: 030 27891916 elbing@vbio.de	<a href="https://www.vbio.de/">https://www.vbio.de/</a>