

# PROJEKTVERBUND FORCYCLE

## ROHSTOFFWENDE BAYERN

**ForCYCLE**

Projektverbund  
Rohstoffwende Bayern



finanziert durch  
Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Verbraucherschutz



3	PROJEKTVERBUND FORCYCLE
6	RESSOURCENSTRATEGIE FÜR DIE ROHSTOFFWENDE BAYERN – UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG VON SEKUNDÄRROHSTOFFEN
8	ENTWICKLUNG EINER GESAMTLÖSUNG ZUR EFFEKTIVEN RÜCK- GEWINNUNG VON BUNTMETALLEN AUS INDUSTRIEABWÄSSERN
10	RESSOURCENEFFIZIENTE FASER-MATRIX SEPARATION FÜR DAS RECYCLING VON CARBONFASERSTRUKTUREN
12	NIEDRIG SCHMELZENDE ZUCKER-HARNSTOFF-GEMISCHE ZUR EXTRAKTION VON METALLEN UND ANDEREN WERTSTOFFEN
14	NEUARTIGE BIOGENE HYBRIDPOLYMERE AUS CELLULOSE UND CHITIN
16	RECYCLING VON METALL-KUNSTSTOFFVERBUNDEN UND HYBRIDWERKSTOFFEN
18	RECYCLING VON KOMPOSITBAUTEILEN AUS KUNSTSTOFFEN ALS MATRIXMATERIAL
20	PRODUKTGESTALTUNG MIT SEKUNDÄRROHSTOFFEN IN DER BAUSTOFF- UND KERAMIKINDUSTRIE
22	AUF-REINIGUNG VON GEBRAUCHS- UND SPEZIALGLÄSERN ZUR DISSIPATIONSLIMITIERUNG UND RÜCKGEWINNUNG VON WERTMETALLEN
24	GEOBIOTECHNOLOGIE: INNOVATIVE VERFAHREN ZUR GEWINNUNG SELTENER ERDEN UND ANDERER WERTMETALLE AUS HOCHVERDÜNNTEN LÖSUNGEN DURCH MIKROALGEN-BASIERTE BIOADSORPTION
28	KONTAKT PROJEKTLEITER
30	BILDNACHWEISE
31	IMPRESSUM

## PROJEKTVERBUND FORCYCLE

Mit der Finanzierung des Projektverbunds ForCycle will die bayerische Staatsregierung die Erforschung und Entwicklung innovativer Recyclingverfahren und -technologien fördern, um auf diesem Wege eine Stoffkreislaufwirtschaft in Bayern zu etablieren und damit einen wesentlichen Schritt in Richtung einer Rohstoffwende im Land zu vollziehen.

### Ausgangslage

Die weltweit steigende Rohstoffnachfrage offenbart Risiken bei der Versorgung mit Rohstoffen, die für Deutschland und insbesondere auch für Bayern mit seiner auf Rohstoffimporte angewiesenen Hochtechnologie-Industrie problematisch werden könnten. Hier gilt es gegenzusteuern. Neben Preisschwankungen und tatsächlichen oder durch Ausfuhrbeschränkungen künstlich erzeugten Rohstoffverknappungen bereitet vor allem die Konzentration essentieller Rohstoffe auf wenige Abbaugelände und die politisch instabile Lage vieler Exportregionen zunehmend Sorge. Lieferengpässe sind bei diesen Konstellationen nicht auszuschließen. Der Rohstoffmarkt und nicht selten die ganze Lieferkette sind durch Intransparenz gekennzeichnet, was die Planbarkeit zusätzlich erschwert. Die Unkenntnis über die Abläufe im Rohstoffgeschäft erstreckt sich auch auf die Bedingungen, unter denen Rohstoffabbau und -aufbereitung mancherorts vonstatten gehen, die mit westlichen Sozial- und Umweltstandards nicht zu vereinbaren sind. An dieser Stelle ist ebenfalls ein Überdenken erforderlich.

### Kreislaufwirtschaft

Die bayerische Staatsregierung sieht in Übereinstimmung mit der Bundesregierung und der Europäischen Union die Lösung in einer größeren Unabhängigkeit der heimischen Wirtschaft vom Rohstoffmarkt.

Erreicht werden soll dieses Ziel im Wesentlichen durch die folgenden drei Maßnahmen:

- Steigerung der Ressourceneffizienz,
- Substitution seltener und teurer Rohstoffe durch solche, die auf lange Sicht vorrätig sind, sowie
- Rohstoffrecycling.

Mit der Wiederverwertung von Rohstoffen nach der Nutzung und der Zuführung dieser sekundären Rohstoffe in eine Kreislaufwirtschaft soll der Sekundäranteil im Produktionsprozess erhöht und der Bedarf an primären Rohstoffen entsprechend abgesenkt werden. Eine solche Kreislaufführung könnte die Abhängigkeit der Wirtschaft vom Rohstoffhandel ein Stück weit mindern. Der dadurch erlangte Wettbewerbsvorteil hätte außerdem einen ressourcen- und damit umweltschonenden Aspekt.

## ForCycle

Zur Förderung effektiver Wiedergewinnungsverfahren und Recyclingtechnologien hat das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (StMUV) den Forschungsverbund ForCycle ins Leben gerufen und finanziert die Arbeiten der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bayerischer Universitäten und Forschungseinrichtungen mit über 3 Mio. Euro für eine Laufzeit von drei Jahren (2014-2016). ForCycle vereint zehn Projekte, die aus verschiedenen Fachperspektiven und bezogen auf unterschiedliche Stoffe effiziente Recyclingverfahren und Fragen der Nutzung der gewonnenen Sekundärrohstoffe erforschen. Das Hauptinteresse gilt dabei den Stoffgruppen der Metalle, Komposite, Baustoffe und Biogenen Polymere.

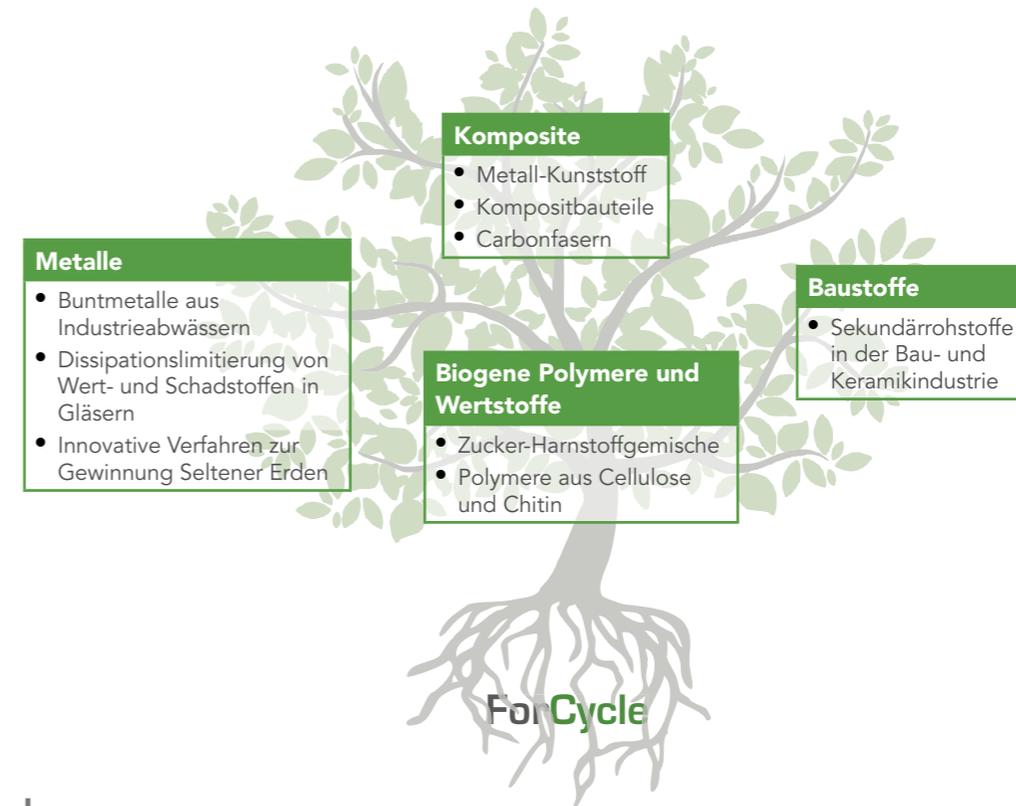
In den Forschungsprojekten werden Methoden und Verfahren entwickelt, die zur Abscheidung und Trennung von Metallen, Kunststoffen und Biopolymeren führen sollen. Die Separationsprozesse haben den Zweck Metalle aus Verbundmaterialien oder aber aus ionischen Lösungen herauszufiltern, damit einerseits die Metalle wiedergewonnen, andererseits die kontaminierten Substanzen von ihren metallischen Verunreinigungen getrennt oder die Kunststoffe von den Metallen gelöst werden, so dass die Stoffe in gereinigter Form erneut in den Produktionsprozess eingeführt oder zur Schaffung neuer und verbesserter Produktionslinien dienen können.

## Zusammenarbeit zwischen den Projekten

In der nebenstehenden Grafik werden die Stoffbereiche des Forschungsverbundes als Äste eines Baumes dargestellt. Man hat Cluster gebildet, die jeweils einer Stoffklasse gewidmet sind.

Letztlich spiegeln diese vier Stoffklassen die Tatsache wider, dass unsere Alltagsgegenstände bzw. Konsumgüter stofflich kompliziert zusammengesetzt sind und dementsprechend spezifische Recyclingverfahren notwendig sind, um die Wertstoffe separieren bzw. wiedergewinnen zu können.

Insgesamt soll ein Spektrum an Verfahren entwickelt werden, die es erlauben, die stoffliche Vielfalt der industriell-technischen Konsumgüterwelt bearbeiten bzw. die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen leisten zu können.



## Ziele

Ziel der Projekte ist es, auf neuen Wegen eine effizientere Nutzung essentieller Rohstoffe zu erreichen und sie als Sekundärrohstoffe erneut zu verwerten mit der Perspektive, in Bayern eine Stoffkreislaufwirtschaft zu etablieren – ein erster Schritt in Richtung Rohstoffwende. Für diese ökologisch und wirtschaftlich zentrale Perspektive soll ein stoff- und nutzungsspezifisches Ressourcenstrategiekonzept entwickelt werden.

Innovative technische Lösungen können nur in gemeinsamer Anstrengung von Forschung, Entwicklung und industrieller Anwendung gelingen. Aus diesem Grund sollten alle Projekte – wenn möglich schon in einem frühen

Projektstadium – mit einschlägigen Unternehmenspartnern kooperieren. Eine Zusammenarbeit kann natürlich auch noch während der gesamten Laufzeit des Projekts vereinbart werden.

Wenn Ihr Unternehmen an der einen oder anderen Projektthematik bzw. technischen Entwicklung interessiert ist, dann sprechen Sie uns bitte an.

**Wir freuen uns auf die Zusammenarbeit!**

Prof. Dr. Armin Reller, Dr. Julia Fendt



## ENTWICKLUNG EINER GESAMTLÖSUNG ZUR EFFEKTIVEN RÜCKGEWINNUNG VON BUNTMETALLEN AUS INDUSTRIEABWÄSSERN

### Buntmetallrückgewinnung aus Industrierwässern

In der metallerzeugenden und -verarbeitenden Industrie fallen bei verschiedenen Produktionsprozessen bunt- bzw. schwermetallhaltige Abwässer an. Derzeit werden diese Abwässer meist mit Natron oder Kalkmilch behandelt. Die Dissipation der Buntmetalle korreliert mit dem Aufkommen der Neutralisationsschlämme. Pro 50.000 t Neutralisationsschlamm ist mit einem Verlust von 2.000 t Kupfer und 5.600 t Nickel zu rechnen. Dies entspricht einem Wertverlust von 8,5 Mio. € für Kupfer bzw. 54 Mio. € für Nickel (Schrottwert 2015).

Ziel des Verfahrens ist, im Sinne eines effektiven Urban-Mining-Prozesses Buntmetalle aus Industrieabwässern als Sekundärrohstoff bzw. als Produkt in den Stoffkreislauf zurückzuführen. Der hier entwickelte Prozess verbindet, durch die elementspezifische Fällung metallischer Phasen und/oder Buntmetall-(Eisen-)Oxiden eine effiziente Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen (u.a. Kupfer, Nickel, Zinn, Palladium, Silber etc.) mit hochwirksamer Abwasserreinigung. Zudem entfallen die Transportkosten für die voluminösen Neutralisationsschlämme.

### Effektives Recycling: elementspezifische Fällung metallischer Phasen und/oder Buntmetall-(Eisen-)Oxiden

Die hydroxidfreie Fällung von Buntmetallen aus Industrierwässern ist eine hocheffiziente Methode zur Rückgewinnung von Buntmetallen aus sowohl stark (>20 g/L) als auch schwach belasteten Lösungen (wenige mg/L). Die Rückgewinnungsquoten von Kupfer, Zink, Silber und Nickel liegen elementspezifisch bei 99,85 – 100 %. Für Palladium und Zinn wurde derzeit eine Wasserreinigung

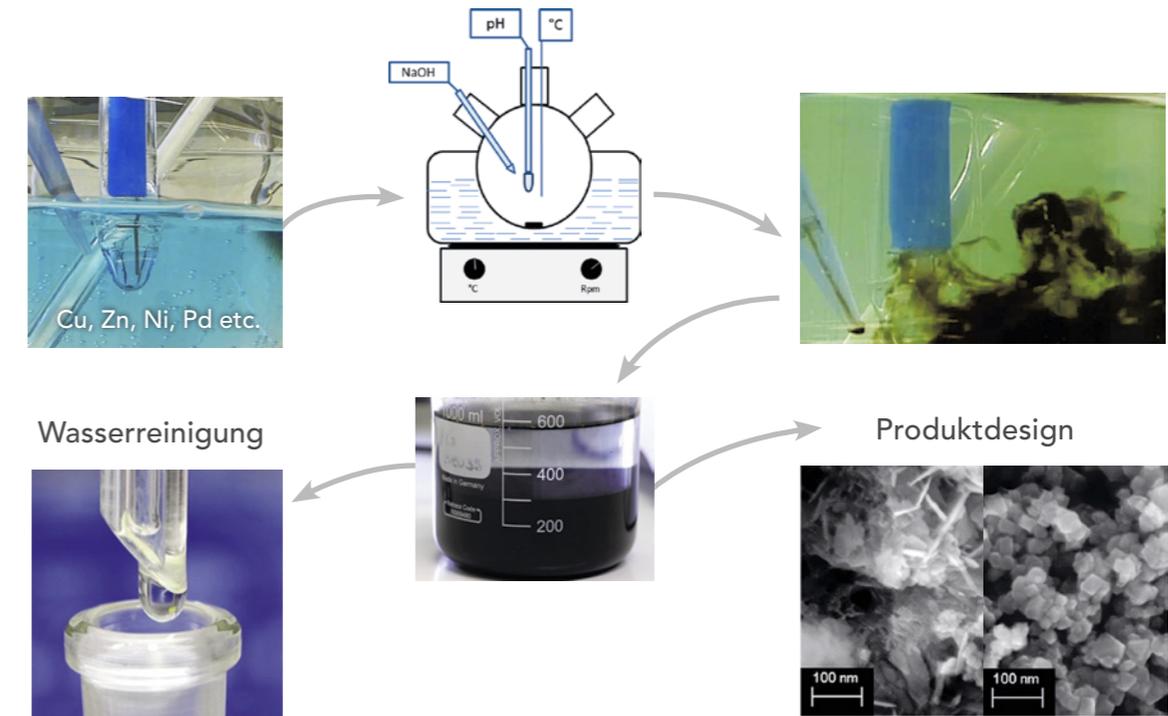
von über 95 % erreicht.

Durch die Anpassung von Prozessparametern (pH-Wert, Temperatur, Eisenzugabemenge, Alterungsbedingungen etc.) kann gezielt Einfluss auf die Ausfällungsprodukte genommen werden. Die Buntmetalle können dadurch elementspezifisch als metallische Phase und/oder Buntmetall-(Eisen-)Oxid ausgefällt werden.

Mit der Weiterentwicklung des Ferritprozesses können unter geringem Energieaufwand gezielt Produkte mit charakteristischen Eigenschaften für spezielle technische und materialbezogene Anwendungen hergestellt werden.

Der Prozess wurde bzw. wird derzeit insbesondere für die Rückgewinnung der Elementen Kupfer, Nickel, Zink, Silber, Palladium und Zinn optimiert. Die Erweiterung des Prozesses auf chromhaltige Abwässer ist geplant.

### Elementspezifische Fällung metallischer Phasen und/oder Buntmetall-(Fe)Oxiden



### Anwendung des Ferrit-Prozesses in der galvanischen Industrie

Die in Modellsystemen entwickelte Prozedur wurde erfolgreich angewandt, um Industrieabwässer verschiedener Industriezweige (z.B. Galvanik, Kupferhalbzeugherstellung,

Verzinkerei) zu reinigen. In enger Zusammenarbeit mit unseren Industriepartnern wird das Verfahren stetig weiterentwickelt und auf seine Umsetzbarkeit hin überprüft.

## RESSOURCENEFFIZIENTE FASER-MATRIX SEPARATION FÜR DAS RECYCLING VON CARBONFASERSTRUKTUREN

### Carbonfasern

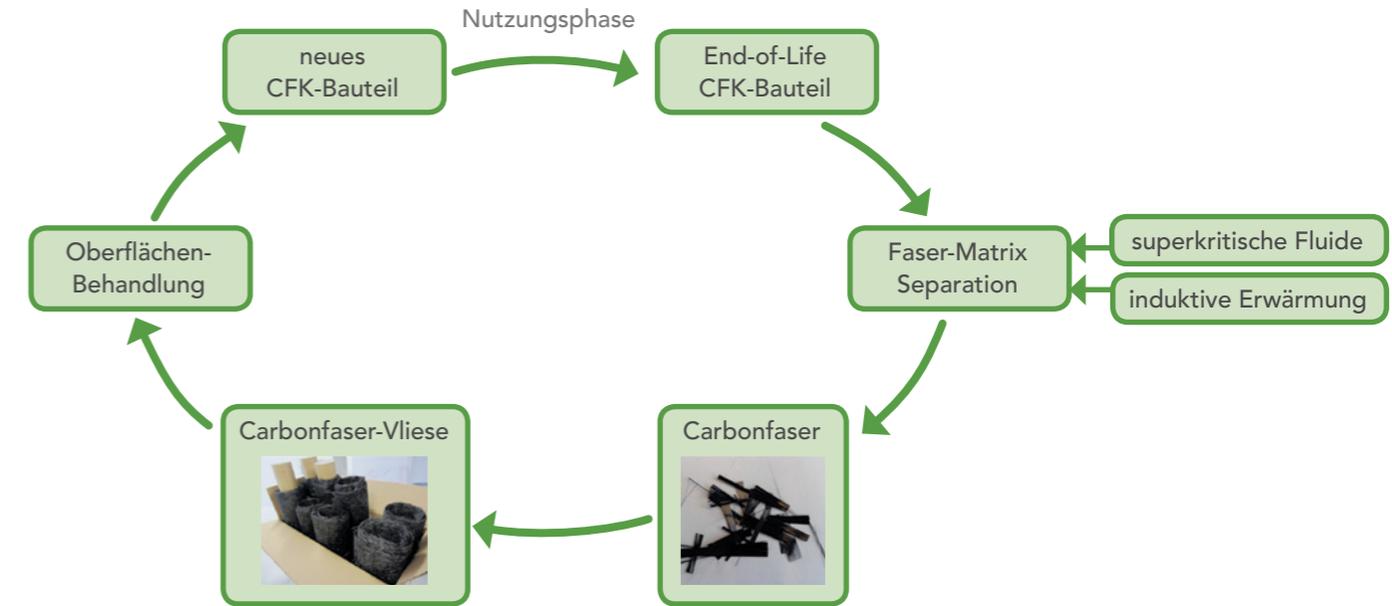
Die Leichtbauweise von Fahrzeugen und damit der Einsatz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) ist eine der wesentlichen Zukunftstechnologien zur Reduktion von Emissionen. Für einen großflächigen Einsatz von CFK im Bereich der Mobilität müssen die Voraussetzungen geschaffen werden, die einen ressourceneffizienten Gesamtlebenszyklus der Carbonfasern erlauben. Denn trotz ihrer exzellenten gewichtsspezifischen Eigenschaften erschweren derzeit u.a. die hohen Materialkosten und der hohe Energiebedarf bei der Herstellung (verbunden mit der Emission von Kohlenstoffdioxid) den Einsatz in der Serienproduktion. Das Recycling der Carbonfasern wird als mögliche Lösung für diese Problematik gesehen. Das Hauptaugenmerk gilt hierbei der Faser-Matrix Separation, die einen signifikanten Einfluss auf die spätere mechanische Performance der rezyklierten CF hat und bei der auch durch eine angepasste und optimierte Prozessführung der Aufwand für weitere Prozessschritte (z.B. Reinigung, Aufbereitung) drastisch reduziert werden kann.

### Faser-Matrix Separation

Die Anforderungen an die Rezyklatfaser (rCF) für eine hochwertige Substitution von Neufasern (vCF) verlangen eine gezielte, systematische Untersuchung von rCF-Eigenschaften, der Verarbeitbarkeit und der Performance im Bauteil. Die Untersuchungen sollen überdies den Einfluss der rCF-Faserlänge auf die nachfolgenden Teilprozessschritte bis hin zu einer Wiederverwendung in einem Bauteil der zweiten Generation ermitteln.

Als potenzialträchtiges Verfahren werden das Herauslösen

der Fasern mittels superkritischer Fluide (SCF) und die Faser-Matrix-Separation mittels induktiver Erwärmung gesehen eingeschätzt, welche daher in diesem Projekt hinsichtlich ihrer Anwendung und ihres Optimierungspotentials im Zentrum der Untersuchung stehen. Es werden optimierte Reinigungs- und Aufbereitungsverfahren der CF-Oberfläche getestet sowie eine definierte und reproduzierbare Zerkleinerung der rCF vorgenommen, die eine festgelegte Faserlänge nach dem Separationsprozess gewährleistet.



### Effizienzgewinn durch Carbonfaserrezyklate

Ziel der Vorgehensweise ist eine maximale Degradation der mechanischen Performance im Vergleich zu Neufasern von 20 %, eine Steigerung der Gesamtproduktion und der Wirtschaftlichkeit um 30 % sowie eine Reduktion des Energieverbrauchs und der klimaschädlichen Emissionen um 40 % im Vergleich zu konventionellen Pyrolyseprozessen.

Darüber hinaus kann einerseits mittels Substitution der vCF durch hochwertige rCF ein erheblicher Beitrag zur Gesamtreduktion der umweltschädlichen Emissionen geleistet und andererseits durch die Reduktion der Werkstoffkosten der Einsatz von CF in Mittel- und Großserienproduktionen vorangetrieben werden.

## NIEDRIG SCHMELZENDE ZUCKER-HARNSTOFF-GEMISCHE ZUR EXTRAKTION VON METALLEN UND ANDEREN WERTSTOFFEN

### Metallextraktion aus Substanzgemischen

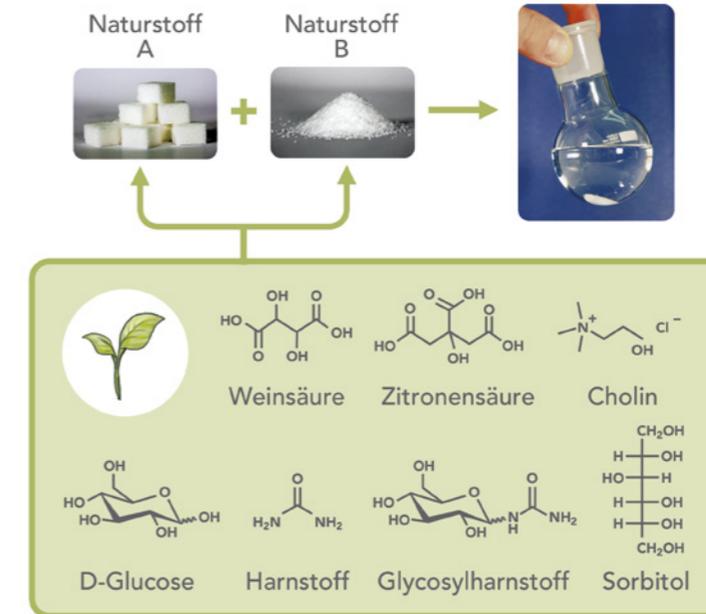
Zur Rückgewinnung von Metallen aus Substanzgemischen werden typischerweise Extraktionsverfahren und hydrometallurgische Prozesse eingesetzt. Die zur Extraktion von Metallen eingesetzten Komplexbildner, wie Cyanide oder Ethylendiamintetraessigsäure, sind aber oft selbst umweltgefährdend.

Seit einigen Jahren ist mit den ionischen Flüssigkeiten eine relativ neue Substanzgruppe in das Blickfeld gerückt. Doch auch sie ist mit Nachteilen beim Recycling behaftet. Eine Lösung versprechen ionische Flüssigkeiten und niedrig schmelzende Gemische (deep eutectics), die aus Naturstoffen bestehen und nicht toxisch, meist sehr preiswert und vollständig biologisch abbaubar sind.

### Niedrig schmelzende Naturstoffgemische

Sie stellen eine ökologisch und ökonomisch vorteilhafte Alternative zu ionischen Flüssigkeiten dar.

Erste Versuche zeigen bereits ein gutes Löslichkeitsverhalten und unterschiedliche Selektivität von Metallsalzen in Zucker-Harnstoff-Gemischen aufgrund des oxophilen Charakters von Metallen.



### Entwicklung stoffspezifischer Extraktionsschmelzen

Auf der Basis von preiswerten Zuckern und organischen Säuren sollen biologisch abbaubare, nicht toxische Extraktionsschmelzen entwickelt werden. Die Schmelzen nehmen aus festen Proben Metallsalze und Metalloxide mit guter Effizienz und Selektivität auf.

Für die Rückgewinnung der Metalle aus den Schmelzen werden je nach Eigenschaften effiziente Prozeduren entwickelt. Neben klassischen Fällungen wird auch die direkte elektrochemische Abscheidung aus der Schmelze

betrachtet. Besonders erfolgversprechend erscheint die direkte Reduktion extrahierter Metalloxide und Metallsalze durch Nutzung der Extraktionsmatrix als Reduktionsmittel.

Ein weiteres Ziel ist die Herstellung neuer hydrophober Schmelzen, die hohe Extraktionsselektivitäten zeigen und auch zur Extraktion von Metallsalzen aus wässrigen Proben (Klärschlammaschen, metallhaltige Abwässer) geeignet sind.

## NEUARTIGE BIOGENE HYBRIDPOLYMERE AUS CELLULOSE UND CHITIN

### Lösungsmittel für Biopolymere

Zellstoffabfälle aus Baum- und Heckenschnitten sind Wertstoffe, die in großen Mengen verfügbar sind. In der chemischen Industrie ist zwar ein Verfahren entwickelt worden, mit dem Zellstoff in ionischen Flüssigkeiten aufgelöst und zu Spinnfasern verarbeitet werden kann.

Die eingesetzten ionischen Flüssigkeiten sind allerdings relativ teuer und wenig umweltfreundliche Stoffe, die toxisch, nur gering bioabbaubar und aus Erdöl hergestellt sind. Neben Cellulose ist Chitin, vor allem aus Schalen von Meerestieren, weltweit einer der größten Bioabfälle.

Kürzlich wurde gezeigt, dass sich auch Chitin in ionischen Flüssigkeiten lösen lässt.

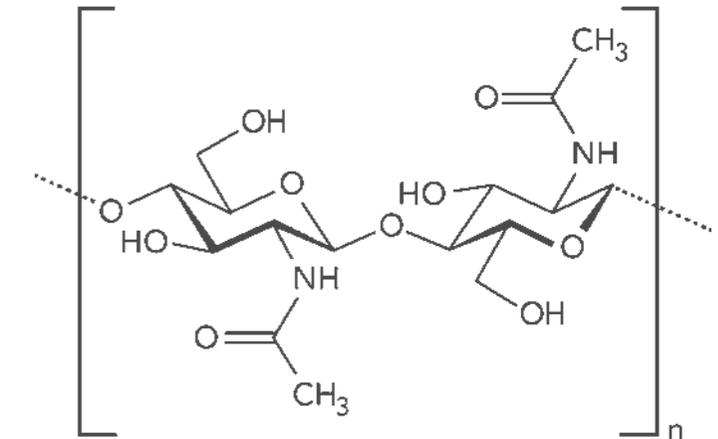
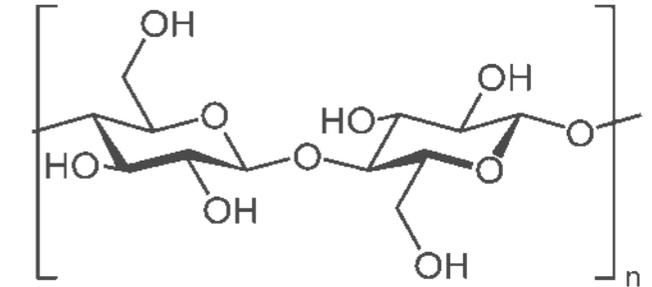
Im vorliegenden Projekt soll ein neues, umweltfreundlicheres Lösungsmittel für die simultane Auflösung beider Biopolymere gefunden werden und aus der Lösung sollen neuartige Materialien hergestellt werden.

### Umweltfreundliche Lösungsmittel

Als Lösungsmittel kommen neben ionischen Flüssigkeiten auch sogenannte tiefe eutektische Mischungen sowie klassische Lösungsmittel wie NMMO in Verbindung mit Lösungsmitteln aus nachhaltigen Rohstoffen in Frage. Wichtig ist, dass die Lösungsmittel bzw. die Lösungsmittelgemische human- und umweltverträglich sind und sowohl Cellulose als auch Chitin in nennenswerten Mengen lösen.

### Neue Kompositmaterialien aus Hybridpolymeren

Aus den gelösten Hybridpolymeren sollen innovative Kompositmaterialien entstehen. Denkbar ist auch, falls die Löslichkeit der Polymere zu gering ist, eine feine Dispergierung der Polymere als Ausgangsstoff zu verwenden. Neben Kompositmaterialien aus Chitin und Cellulose sind auch solche aus Lignin und Chitin interessant, wobei Lignin die Festigkeit und Chitin die Elastizität liefert.



Die Bandbreite möglicher Anwendungen ist hoch: Sie reicht von Viskosefaserbeschichtungen, über wasserdichtes Papier, antiseptische Filme, hydrophobe Verpackungen bis hin zu optischen Materialien.

Diese Materialien sollen in ihren Eigenschaften und in

ihrer technologischen Bedeutung charakterisiert werden, sodass – in Kooperation mit Unternehmenspartnern – Aussagen über ihre industrielle Umsetzung getroffen werden können.

## RECYCLING VON METALL-KUNSTSTOFFVERBUNDEN UND HYBRIDWERKSTOFFEN

### Trennverfahren für Metall-Kunststoffverbunde

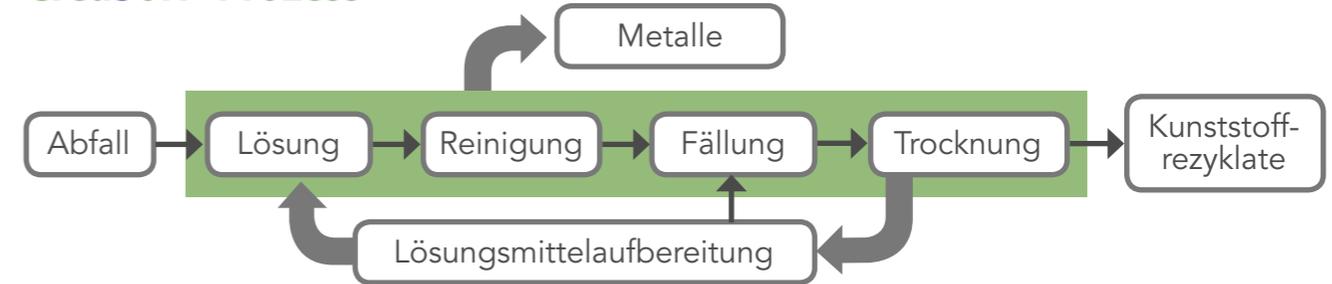
Technische Produkte bestehen häufig aus Metall-Kunststoffverbunden, um die Werkstoffeigenschaften beider Materialkomponenten optimal auszunutzen. So werden komplex geformte Kunststoffe im Automobil- und Sanitärbereich zum Schutz und zur optischen Aufwertung des Kunststoffkorpus galvanisiert. Im Automobil- und Elektroniksektor werden metallische Komponenten – wie Verteilerdosen, Kabelsteckverbindungen – mit Kunststoffen umspritzt. Die Metallkerne dieser Komponenten sind aufwendig und passgenau gefertigt und haben einen Wert, der einem Vielfachen der eigentlichen Materialkosten entspricht. Produktionsabfälle solcher Verbundmaterialien können zumeist nicht in ihre Bestandteile zerlegt werden und so wird von der Recyclingindustrie lediglich ein geringer Teil des eigentlichen Materialwertes Erlöst. Durch ein optimiertes Trennverfahren für Hybridwerkstoffe wird es möglich, die wertvollen Ressourcen im Wirtschaftskreislauf zu halten.

### CreaSolv® Prozess

Zur Trennung der Komponenten werden derzeit Zerkleinerungsverfahren eingesetzt, wie Schredder oder Mühlen, die den Verbund mechanisch aufschließen. Nachteilig an diesen Verfahren sind der hohe Dissipationsgrad und die mitunter ebenfalls hohen Metallverluste im Mahlstaub. Dagegen können lösungsmittelbasierte Kunststoffrecyclingtechnologien Verbunde schonender und vollständiger separieren und hochwertige Kunststoff- und Metallprodukte erzeugen. Ein solcher Lösungsmittelprozess ist der am Fraunhofer IVV entwickelte CreaSolv® -Prozess. Die Verbundtrennung gelingt durch Auflösen der Kunst-

stoffmatrix in sicheren Flüssigkeiten (CreaSolv® Formulierungen). Die freigelegten Metalle werden abfallspezifisch für die weitere Verwertung aufgereinigt, die gelösten Kunststoffe zu Rezyklaten verarbeitet. Um den Prozess auch für geringe Abfallmengen rentabel zu machen, ist die technische Umsetzung mit den bestehenden Entbinde- und Extrusionstechnologien der Partner LÖMI und Sitraplas vorgesehen. Produktionsabfälle galvanisierter Kunststoffe werden vom Projektpartner Wafa geliefert und die Galvanikmetalle bei der Fa. Sysplast aufkonzentriert.

### CreaSolv® Prozess



### Hochwertige Kunststoff- und Metallrezyklate

Unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit werden im Projekt abfallspezifische Recyclingprozesse entwickelt, deren Produkte im Idealfall ausreichende Qualitäten für den Einsatz in der Originalapplikation aufweisen. Es entstehen hochwertige Kunststoffrezyklate und Metalle, die auf einem hohen Veredelungsniveau wieder in die Fertigungsprozesse integriert werden können. Sowohl für die technischen Kunststoffe als auch für die Metalle sind die bayerische Elektro- und Automobilindustrie wichtige Zielmärkte.

Durch das Projekt eröffnen sich hohe Sparpotenziale für die abfallliefernden Unternehmen durch die stoffliche Nutzung bislang entsorgter Abfälle und neue Recyclingmärkte für die beteiligten Aufbereitungsunternehmen.

## RECYCLING VON KOMPOSITBAUTEILEN AUS KUNSTSTOFFEN ALS MATRIXMATERIAL

### Demontage von Kompositbauteilen

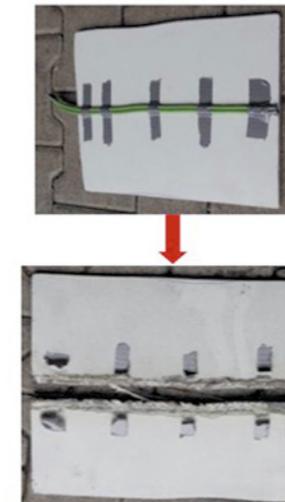
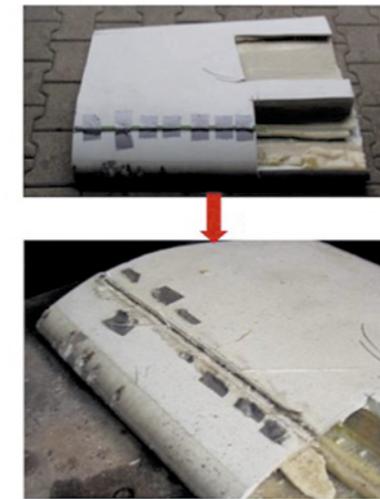
Kompositbauteile mit duroplastischen Kunststoffen als Matrixmaterial gehören wegen ihres Leichtbaupotentials zu den wichtigsten Zukunftsmaterialien. Der Vorteil, der dem Material als Verbundwerkstoff von großformatigen Bauteilen aus duroplastischer Matrix und Füll- oder Verstärkungsstoffen aus Mikrofasern und/oder Partikeln zukommt, erweist sich im Hinblick auf die Entsorgung bislang als Nachteil. Das Recycling dieser Verbundmaterialien ist noch ungelöst.

Im Jahr 2012 wurden in Deutschland 182.000 t glasfaserverstärkte Bauteile produziert. In knapp zehn Jahren wird allein aus den Rotorblättern der Windkraftanlagen mit bis zu 32.000 t Faserverbundmaterialien gerechnet. Eine nachhaltige Methode zur Rückführung der Komposite ist also dringend erforderlich.

### Trennverfahren: Energetische Demontage

Für die Entwicklung eines technisch innovativen sowie ökologisch und ökonomisch tragbaren Recyclingkonzeptes ist die Entscheidung über das Trennverfahren der Materialverbünde die wichtigste Voraussetzung. Damit wird nicht nur festgelegt, welche Materialien für das Recycling gewonnen werden. Durch die Demontage wird bereits Einfluss auf die spätere Faserqualität und die Effizienz der weiteren Aufbereitung genommen.

In diesem Projekt wird als neuer Ansatz die Vorzerkleinerung der Bauteile mittels energetischer Demontage systematisch untersucht. Damit dieses Verfahren im Vergleich zu anderen Trenntechniken überprüft werden kann, werden auch Versuche mit alternativen Techniken durchgeführt. Für Vergleich und Bewertung der verschiedenen Trennverfahren werden folgende Kriterien zugrunde gelegt: Wirtschaftlichkeit, Faserqualität/Reinheit, Energiebilanz, Innovationsgrad und Entwicklungspotenzial. Mit diesem Bewertungssystem sollen optimale Kombinationsmöglichkeiten identifiziert werden.



Anbringung von Sprengschnüren an der gewünschten Trennstelle

Trennung des GFK Materials nach Zündung im Bunker

### Bewertungssystem für die Entwicklung von Recyclingverfahren

In ersten Machbarkeitsexperimenten am Fraunhofer ICT wurden Sprengschnüre (grün) auf Rotorblattmaterial fixiert und anschließend im Bunker gezündet. Im Rahmen des Projektes sollen anhand weiterer Versuchsreihen die „idealen“ Demontagelinien zur effektiven Stofftrennung und die notwendige Ladungsstärke festgestellt werden.

Das Projekt betrachtet die einzelnen Prozessschritte der Demontage und stofflichen Verwertung großformatiger Bauteile und führt abschließend eine Bewertung verschiedener Demontagetechniken durch.

Damit einher geht eine materialspezifische Aufbereitung der zwei- oder mehrphasigen Materialverbünde, d.h. der Aufbereitung der Polymermatrix auf der einen sowie der Aufbereitung der in der Matrix dispergierten Fasern oder Partikel auf der anderen Seite. Zweck der Aufbereitung ist die Bereitstellung von qualitativ hochwertigem Sekundärmaterial, das erneut dem Produktionsprozess zugeführt werden kann.

Das Projekt wird in Kooperation mit der Firma TREE Windenergie durchgeführt.

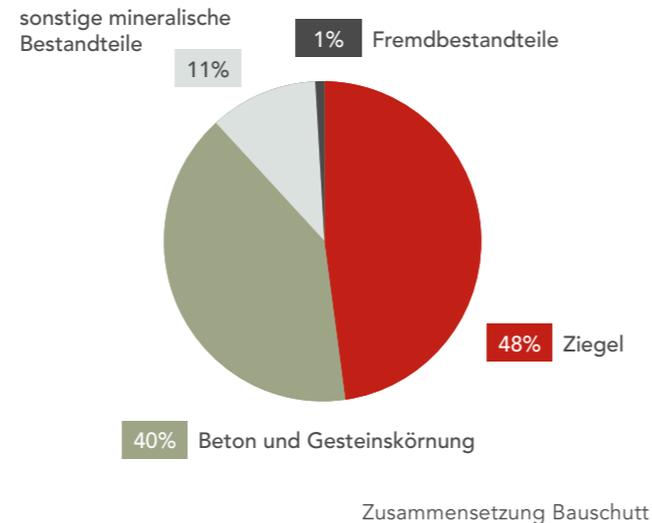
## PRODUKTGESTALTUNG MIT SEKUNDÄRROHSTOFFEN IN DER BAUSTOFF- UND KERAMIKINDUSTRIE

### Vom Bauschutt zum Bauwertstoff

Sekundärrohstoffe aus der Bauindustrie, vor allem aus Bauschutt, stellen einen der größten Stoffströme in Deutschland und somit auch in Bayern dar. Die Abnahme an natürlichen Ressourcen und die zunehmende Verknappung von Deponieraum können mit dem gegenwärtigen Stand der Technik auf dem Sektor des Bauschuttrecyclings nicht beantwortet werden. Vom Bauschutt, der sich hauptsächlich aus Ziegel, Beton und Mörtel zusammensetzt, werden gegenwärtig zwar 65 % recycelt, doch nur knapp 5 % davon gelangen erneut in den Hochbau. Recycling-Baustoffe werden derzeit vornehmlich im Straßen- oder Erdbau eingesetzt oder deponiert. In dem Projekt sollen Aufbereitungsverfahren für Bau- und Keramikabfall entwickelt werden, um hochwertige Sekundärrohstoffe mit definierten Eigenschaften zu erzeugen.

### Zerkleinerung und Klassierung

Durch die Verfahrensschritte der Zerkleinerung und Sortierung wird ein Vorprodukt aus recycelten Sekundärbaustoffen erzeugt mit unterschiedlichen Stoffzusammensetzungen, je nach verfügbarem Abfallmaterial. Nach Charakterisierung soll es als Vorprodukt für die Baustoffindustrie und für die Keramikindustrie aufbereitet werden.

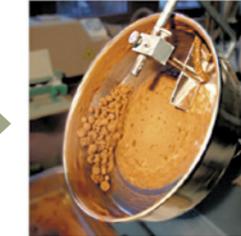


Aufbaukörnung der Sekundärrohstoffe:

Vorbehandelter Rohstoff



Granulierteller



Agglomerate



+



Intensivmischer

### Hochwertige Sekundärrohstoffe für Bau- und Keramikindustrie

Mit den neuen Aufbereitungsverfahren sollen aus Mauerwerksbruch und Kalksandsteinbruch recycelte Wertstoffe entstehen, aus denen ökonomisch und qualitativ konkurrenzfähige Produkte hergestellt werden können. Hochwertige Granulate können als leichte Gesteinskörnung mit geringem Eigengewicht sowie mit wärme- und/oder schalldämmenden Eigenschaften im Betonbau Anwendung finden. Aus einem aufbereiteten Keramikschlicker soll ein marktfähiger Sekundärrohstoff entwickelt werden.

In dem Keramikschlicker enthalten sind: Pressgranulatabfall, Rohnscherbenbruch, fehlerhafte ungebrannte Keramikprodukte, Keramikbruch sowie Sekundärmaterial aus der Sprühgranulation und Mauerziegelbruch. Im Ergebnis soll eine Keramikherstellung mit einem sehr hohen Anteil des sekundären Materials erfolgen können.

Das Projekt wird in Kooperation mit der Bayreuther Porzellanfabrik Walküre durchgeführt.

## AUF-REINIGUNG VON GEBRAUCHS- UND SPEZIAL-GLÄSERN ZUR DISSIPATIONSLIMITIERUNG UND RÜCKGEWINNUNG VON WERTMETALLEN

### Metallgehalt in Gebrauchs- und Spezialgläsern

Infolge der Beimischung von schwermetallhaltigen Spezialgläsern in den Recyclingskreislauf von Behälterglas stoßen die Konzentrationen dieser Metalle an die vom Gesetzgeber verordneten Grenzen (250 bzw. 100ppm). Bereits bei der mechanischen Aufbereitung von Scherben aus End-of-Life-Gläsern (EoL) fallen Reststoffströme an, die bisher deponiert werden müssen.

Ziel des Projektes ist die Aufarbeitung dieser Gläser durch selektive Schwermetallabtrennung, um auf diese Weise sowohl hochwertige Scherben für die Glasindustrie zu generieren, als auch um Wertmetalle als Sekundärrohstoffe zurückzugewinnen.

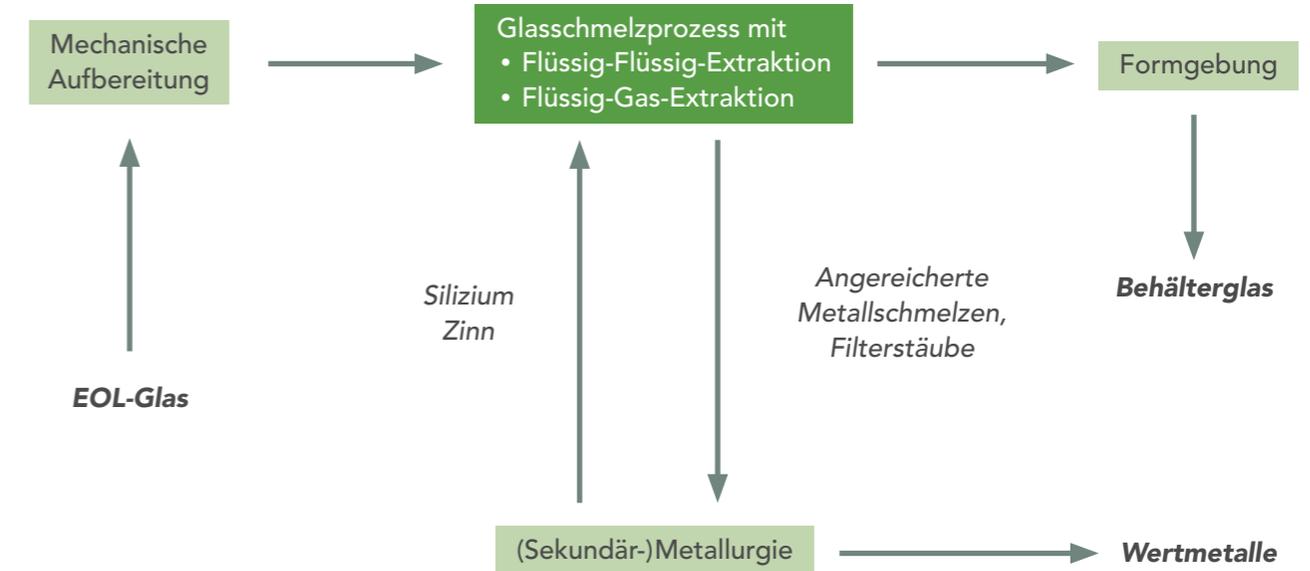
Der Focus liegt auf der Abtrennung von Eisen-, Chrom-, Blei- und Antimon-Oxiden.

### Aufreinigung von Scherben durch Extraktion in Glasschmelzen

Als grundsätzliche Methode zur Extraktion der unerwünschten Oxide wird deren Reduktion und Lösung in einer Metallschmelze untersucht. Als Extraktionsmittel werden Zinn- und Siliziumschmelzen eingesetzt. Da beide Metalle bei den Schmelzbedingungen zu einem geringen Teil an der Grenzfläche Glas/Metall oxidiert werden, können nur Metalle verwendet werden, deren

Oxide gewünschte Glasbestandteile wie  $\text{SiO}_2$  oder  $\text{SnO}$  bilden.

Verunreinigungen, die auf diese Weise nicht entfernt werden können, werden durch selektive Verdampfung durch reaktive Flüssig-Gas-Extraktion aus den Glasschmelzen entfernt.



### Gewinn sekundärer Gläser und Wertmetalle

Im Labormaßstab konnte bereits gezeigt werden, dass durch Extraktion mit einer Zinnschmelze der Bleigehalt im Glas bereits bei einer Verweilzeit von einer Stunde bei 1350°C um etwa 80% reduziert werden kann.

Somit zeichnet sich bereits jetzt ab, dass bisher nicht verwendbare Glasströme wieder in den Stoffkreislauf einbezogen werden können.

Das Projekt wird in Kooperation mit dem Technologie-Anwenderzentrum Spiegelau, TAZ und den Industriepartnern Füller Glastechnologie und Wiegand-Glas durchgeführt.

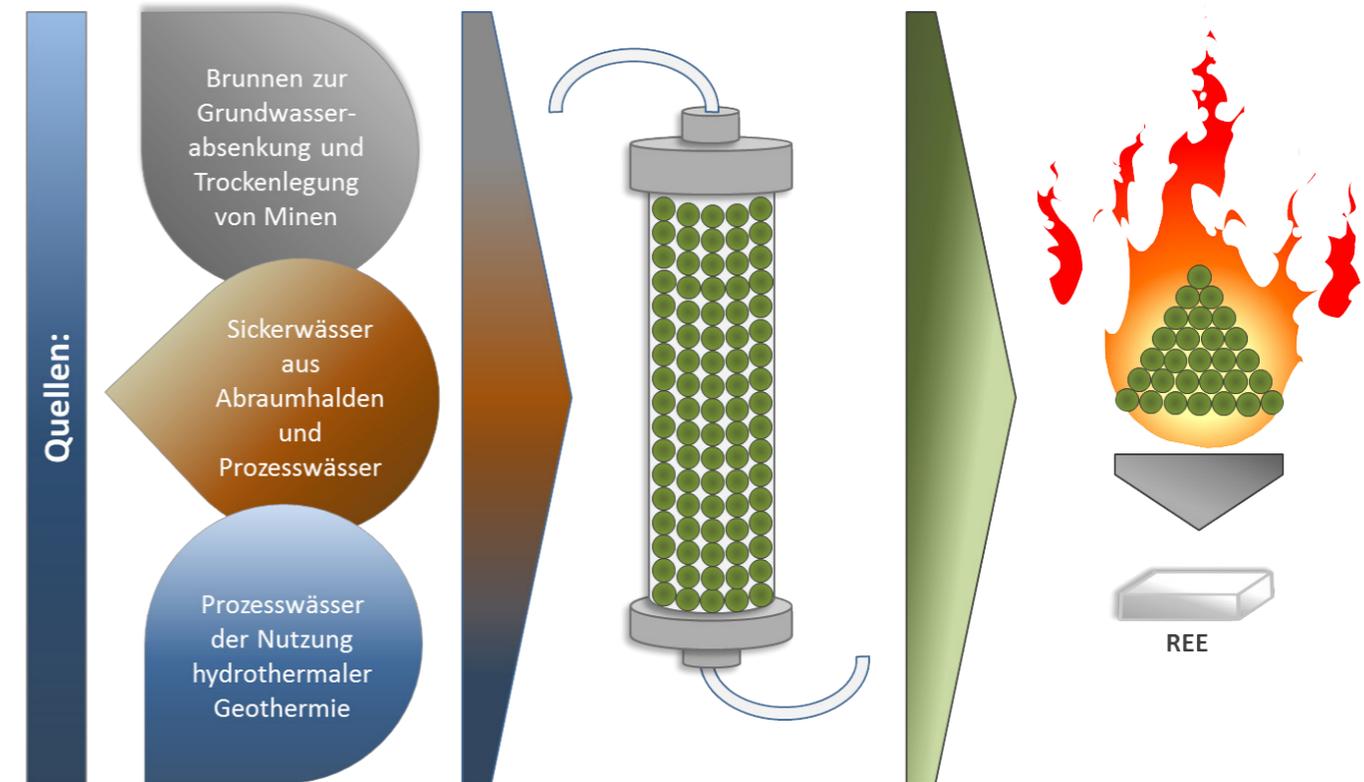
## GEBIOTECHNOLOGIE: INNOVATIVE VERFAHREN ZUR GEWINNUNG SELTENER ERDEN UND ANDERER WERTMETALLE AUS HOCHVERDÜNNTEN LÖSUNGEN DURCH MIKROALGEN-BASIERTE BIOADSORPTION

### Themenstellung

Metalle der Seltenen Erden (bzw. engl. rare earth elements, REE) sind sehr wichtige Rohstoffe der aktuellen Hochtechnologie. Ohne sie sind die Hochleistungsdatenübertragung, die Kommunikation über Smartphones, die Hybridautomobiltechnik und vor allem die alternative Energieversorgung kaum denkbar. Fast alle Strategien zur Modernisierung unserer Technik sind von diesen Rohstoffen abhängig. Dem steht allerdings eine eingeschränkte Versorgungssituation gegenüber, die sich u. a. auch auf die umwelttechnologische Entwicklung in Bayern auswirken könnte.

Zwar sind Seltene Erden nicht wirklich selten, sie sind aber so gleichmäßig in der Lithosphäre verteilt, dass sie nur sehr selten in konzentrierter Form abgebaut werden können. Von den jährlich 130.000 Tonnen global produzierter REE werden 97 % von China bereitgestellt, das somit eine Monopolstellung für diese Hochtechnologierohstoffe hat. Da die neue Erschließung von Vorkommen extrem kostenintensiv ist, besteht ein hohes Interesse, umweltschonende Prozesse zu entwickeln, um geringe REE-Konzentrationen aufzuarbeiten, die für klassische Gewinnungsmethoden uninteressant sind.

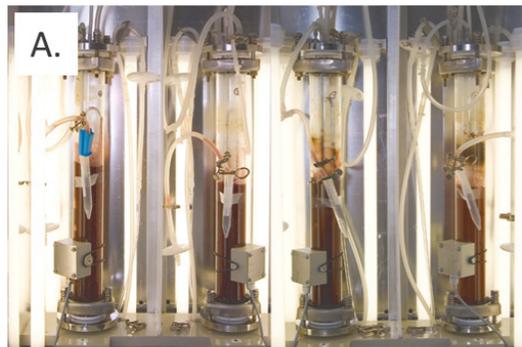
Mikroalgen sind phototrophe Organismen, die Sonnenlicht als Energiequelle und CO<sub>2</sub>, z. B. auch aus Industrieabgasen als Kohlenstoffquelle zum Wachsen nutzen können und oft sehr interessante Inhaltsstoffe besitzen. Deshalb werden sie gerne in dem Gebiet der weißen Biotechnologie als Produzenten angesehen, mit denen wertvolle Produkte für die chemische und pharmazeutische Industrie kostengünstig und umweltschonend hergestellt werden können. Letztlich bleibt bei solchen Prozessen dann ein Biomasserest übrig, der meistens zu Dünger oder Energie umgesetzt wird und sich möglicherweise deutlich sinnvoller einsetzen lässt.



### Ziel:

Unabhängig davon, ob es um Recycling geht oder um die Nutzung von Rest- oder Abfallstoffen wie Haldengestein oder Laugen aus dem Bergbau oder aus Deponien – das zentrale Problem beim Recycling der REE bzw. der Nutzung von Rest- oder Abfallströmen ist ihre besonders geringe Konzentration. Es müssen deshalb besonders effektive Anreicherungsprozesse entwickelt werden.

Schon seit mehr als 10 Jahren liegen Ergebnisse vor, die demonstrieren, dass Mikroalgen Schwermetalle binden und in metallischer Form abscheiden können. Bei diesen Adsorptionsvorgängen ist eine gewisse Selektivität bezüglich der Metalle zu beobachten. Über den Mechanismus ist bisher allerdings nur wenig bekannt.



Photobioreaktor-Systeme:  
 a. 1-L Photobioreaktor-Screening-Module;  
 b. Photobioreaktor, Typ Medusa, 25 L;  
 c. Photobioreaktor, Typ Medusa, 100 L

- Katalysatoren
- Glas
- Polieren
- Metalllegierungen
- Magneten
- Phosphor
- Keramik
- Andere



Globaler Bedarf Seltener Erdelemente nach Anwendung in 2010 und 2015 (modifiziert nach Humphries 2012)

Ziel dieses Projekts ist es deshalb, Algenspezies zu identifizieren, die REE-Spezies in hochverdünnten Lösungen binden und somit anreichern können. Dieses biotechnologische Adsorbermaterial lässt sich als erneuerbarer Rohstoff leicht produzieren, ist umweltfreundlich und könnte vor der Adsorption möglicherweise sogar noch wertvolle Inhaltsstoffe liefern. Durch Kartuschen mit dem Bio-Material könnten Laugen bzw. wässrige Lösungen mit REE-Metallen geleitet werden, um die Metallionen zu binden. Es ist denkbar, die adsorbierten Metalle wieder auszuwaschen, prinzipiell können sie aber durch Verbrennen der Biomasse isoliert werden, sodass selbst die Energiegewinnung noch berücksichtigt würde. Die so biotechnologisch angereicherten Metalle bzw. Metallgemische können nachfolgend mit klassischen metall-

urgischen Methoden weiter verarbeitet werden. Sollte diese Methode wie vorgesehen etabliert werden, könnte zumindest ein Teil des REE-Bedarfs umweltfreundlich aus Quellen gewonnen werden, der unabhängig von China wäre. Dies wäre ein signifikanter Beitrag der Biotechnologie zur regionalen Förderung von Hochtechnologien in Deutschland.



**Ressourcenstrategie für die Rohstoffwende Bayern – unter besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen**

**Prof. Dr. Armin Reller**

Universität Augsburg, Lehrstuhl für Ressourcenstrategie, Wissenschaftszentrum Umwelt (WZU), Universitätsstr. 1a, 86159 Augsburg, Tel.: 0821-598-3000, [armin.reller@physik.uni-augsburg.de](mailto:armin.reller@physik.uni-augsburg.de)

**Dr. Julia Fendt**

Universität Augsburg, Lehrstuhl für Ressourcenstrategie, Wissenschaftszentrum Umwelt (WZU), Universitätsstr. 1a, 86159 Augsburg, Tel.: 0821-598-3558, [julia.fendt@wzu.uni-augsburg.de](mailto:julia.fendt@wzu.uni-augsburg.de)

**Entwicklung einer Gesamtlösung zur effektiven Rückgewinnung von Buntmetallen aus Industrieabwässern**

**Prof. Dr. Soraya Heuss-Abbichler, Dipl.-Min. Alexandra Huber, Melanie John M.Sc.**

Ludwig-Maximilians-Universität, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Theresienstr. 41, 80333 München, Tel.: 089-2180-4252, [heuss@lmu.de](mailto:heuss@lmu.de)

**Ressourceneffiziente Faser-Matrix Separation für das Recycling von Carbonfaserstrukturen**

**Prof. Dr. Siegfried Horn, Dr. Wolfgang Müller, Anna Schneller M.Sc.**

Universität Augsburg, Lehrstuhl für Experimentalphysik II, Universitätsstr. 1, 86159 Augsburg, Tel.: 0821-598-3438, [horn@physik.uni-augsburg.de](mailto:horn@physik.uni-augsburg.de);

**Prof. Dr. Klaus Drechsler, Dipl.-Ing. Jakob Wölling, Dipl.-Ing. Franz Baumann, Dipl.-Ing. Frank Manis**

Fraunhofer Projektgruppe FIL, Am Technologiezentrum 2, 86159 Augsburg, Tel.: 0821-90678-209, [klaus.drechsler@ict.fraunhofer.de](mailto:klaus.drechsler@ict.fraunhofer.de)

**Niedrig schmelzende Zucker-Harnstoff Gemische zur Extraktion von Metallen und anderen Wertstoffen**

**Prof. Dr. Burkhard König, Dr. Petra Hilgers, Anika Kolb M.Sc.**

Universität Regensburg, Fakultät für Chemie und Pharmazie, Institut für Organische Chemie, Universitätsstr. 31, 93053 Regensburg, Tel.: 0941-9434575, [Burkhard.koenig@chemie.uni-regensburg.de](mailto:Burkhard.koenig@chemie.uni-regensburg.de)

**Neuartige biogene Hybridpolymere aus Cellulose und Chitin**

**Prof. Dr. Werner Kunz, Dr. Didier Touraud, Auriane Freyburger M.Sc.**

Universität Regensburg, Institut für Physikalische Chemie, Tel.: 0941-943-4044, [Werner.Kunz@ur.de](mailto:Werner.Kunz@ur.de);

**Prof. Dr. Cordt Zollfrank, Yaqing Duan**

Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Straubing, Fachgebiet Biogene Polymere, Tel.: 09421-187-450, [Cordt.Zollfrank@tum.de](mailto:Cordt.Zollfrank@tum.de)

**Recycling von Metall-Kunststoffverbunden und Hybridwerkstoffen**

**Dr. Martin Schlummer, Dr. Andreas Mäurer, Fabian Knappich M.Sc.**

Fraunhofer-Institut Verfahrenstechnik und Verpackung IVV Giggenghauser Str. 35, 85354 Freising Tel.: 08161-491-750, [Martin.Schlummer@ivv.fraunhofer.de](mailto:Martin.Schlummer@ivv.fraunhofer.de)

**Recycling von Kompositbauteilen aus Kunststoffen als Matrixmaterial**

**Prof. Dr. Ulrich Teipel<sup>1</sup>, Dipl.-Ing. Elisa Seiler<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Verfahrenstechnik, Wassertorstr. 10, 90489 Nürnberg, Tel.: 0911-5880-1471, [ulrich.teipel@ohm-hochschule.de](mailto:ulrich.teipel@ohm-hochschule.de)

<sup>2</sup>Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT), Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7, 76327 Pfinztal, Tel.: 0721-4640-354, [elisa.seiler@ict.fraunhofer.de](mailto:elisa.seiler@ict.fraunhofer.de)

**Produktgestaltung mit Sekundärrohstoffen in der Baustoff- und Keramikindustrie**

**Prof. Dr. Ulrich Teipel, Alexander Köster M.Sc.**

Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Verfahrenstechnik, Wassertorstr. 10, 90489 Nürnberg, Tel.: 0911-5880-1471, [ulrich.teipel@ohm-hochschule.de](mailto:ulrich.teipel@ohm-hochschule.de)

**Auf-Reinigung von Gebrauchs- und Spezial-Gläsern zur Dissipationslimitierung und Rückgewinnung von Wertmetallen**

**Prof. Dr. Monika Willert-Porada, Dr.-Ing. Thorsten Gerdes, Kanat Kyrgyzbaev M.Sc.**

Universität Bayreuth, Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung, Universitätsstr. 30, 95447 Bayreuth, Tel.: 0921-55-7201, [monika.willert-porada@uni-bayreuth.de](mailto:monika.willert-porada@uni-bayreuth.de)

**Geobiotechnologie: Innovative Verfahren zur Gewinnung Seltener Erden und anderer Wertmetalle aus hochverdünnten Lösungen durch Mikroalgen-basierte Bioadsorption**

**Prof. Dr. Rainer Buchholz, Dr. Anna Becker, Marcus Heilmann M.Sc.**

Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Bioverfahrenstechnik Paul-Gordan-Straße 3, 91052 Erlangen, Tel.: 09131-85-23003, [rainer.buchholz@fau.de](mailto:rainer.buchholz@fau.de)

**Prof. Dr. Thomas Brück, Dipl.-Ing. Wojciech Jurkowski**

Technische Universität München, Zentrum für Weiße Biotechnologie Fachgebiet Industrielle Katalyse, Lichtenbergstr. 4, 85748 Garching b. München Tel.: 089-289-13253, [brueck@tum.de](mailto:brueck@tum.de)

## Bildnachweise

*Grafik Seite 5*  
Lehrstuhl für Ressourcenstrategie,  
Universität Augsburg

*Grafik Seite 7*  
Lehrstuhl für Ressourcenstrategie,  
Universität Augsburg, Dr. Volker Zepf

*Grafik und Fotos Seite 9*  
Department für Geo- und  
Umweltwissenschaften,  
Ludwig-Maximilians-Universität München

*Grafik oben Seite 11*  
Lehrstuhl für Experimentalphysik II  
Universität Augsburg, Dr. Wolfgang Müller

*Fotos und Grafik Seite 13*  
Institut für Organische Chemie,  
Universität Regensburg, Anika Kolb

*Illustrationen Seite 15*  
Lehrstuhl für Ressourcenstrategie  
Universität Augsburg

*Grafik Seite 17*  
Fraunhofer IVV, Freising

*Grafik Seite 19*  
Fraunhofer ICT, Pfinztal

*Grafik Seite 20 und Fotos Seite 21*  
Technische Hochschule Nürnberg,  
Fakultät für Verfahrenstechnik, Ulrich Teipel

*Grafik Seite 23*  
Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung,  
Universität Bayreuth

*Grafik Seite 25*  
Lehrstuhl für Bioverfahrenstechnik,  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg,  
Anna Becker

*Fotos Seite 26*  
Matthias Schirmer

*Grafik Seite 27*  
Modifiziert nach Humphries M. Rare earth elements: The global supply chain, Congressional Research Service, June 8 (2012)

## Impressum

Prof. Dr. Armin Reller  
Universität Augsburg, Lehrstuhl für Ressourcenstrategie  
Wissenschaftszentrum Umwelt (WZU)  
Universitätsstr. 1a, 86159 Augsburg  
Tel.: 0821-598-3000  
[www.forcycle.de](http://www.forcycle.de)

Redaktion: Dr. Sigrun Schmid, Dr. Julia Fendt  
Gestaltung: Saba Bussmann  
Druck: dieUmweltDruckerei, Langenhagen

Augsburg, 2015



