

PROJEKTVERBUND FORCYCLE

ROHSTOFFWENDE BAYERN

ForCYCLE

Projektverbund
Rohstoffwende Bayern

finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



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

VORWORT

Sehr geehrte Damen und Herren,

unser Lebensstil ist stark mit der Verfügbarkeit von Ressourcen verbunden. Durch den steigenden Bedarf an Rohstoffen ist speziell in Bayern mit seinen eingeschränkten Rohstoffvorkommen ein Umdenken erforderlich: Bayern braucht die Rohstoffwende. Dazu gehört sowohl der bewusste und schonende Umgang mit Ressourcen, als auch die Entwicklung neuer Technologien und Verfahren, um Ressourcen wiederzuverwerten.

Mit der Finanzierung des Projektverbundes ForCYCLE wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz ein Meilenstein zum Ausbau der Ressourcenkompetenz in Bayern gelegt. Das strategische Konzept für ForCYCLE beruht auf einer Rohstoffbetrachtung, die den gesamten Wertschöpfungsprozess eines Rohstoffs und seiner Funktionen in den Blick nimmt. Dabei wurden seit 2014 innovative Recyclingverfahren und -technologien in den Bereichen Metalle, Komposite, Baustoffe und biogene Polymere entwickelt. Gleichzeitig stand die Nutzung der gewonnenen Sekundärrohstoffe durch Wirtschaftsunternehmen im Vordergrund.

Fünfundvierzig Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler verteilt auf zehn Forschungsgruppen haben mit dem Verbundprojekt einen wichtigen Beitrag zur Rohstoffwende Bayern geleistet. Zugleich wurde mit dem Projektverbund unter Federführung der Universität Augsburg die Grundlage für eine neue Ressourcenstrategie in Bayern zur Steigerung der Ressourceneffizienz geschaffen.

Wir laden Sie herzlich ein, sich über die Ergebnisse von ForCYCLE zu informieren.

Ihre

Ulrike Scharf MdL

Bayerische Staatsministerin
für Umwelt und
Verbraucherschutz



und

Prof. Dr. Armin Reller

Universität Augsburg
Lehrstuhl für
Ressourcenstrategie

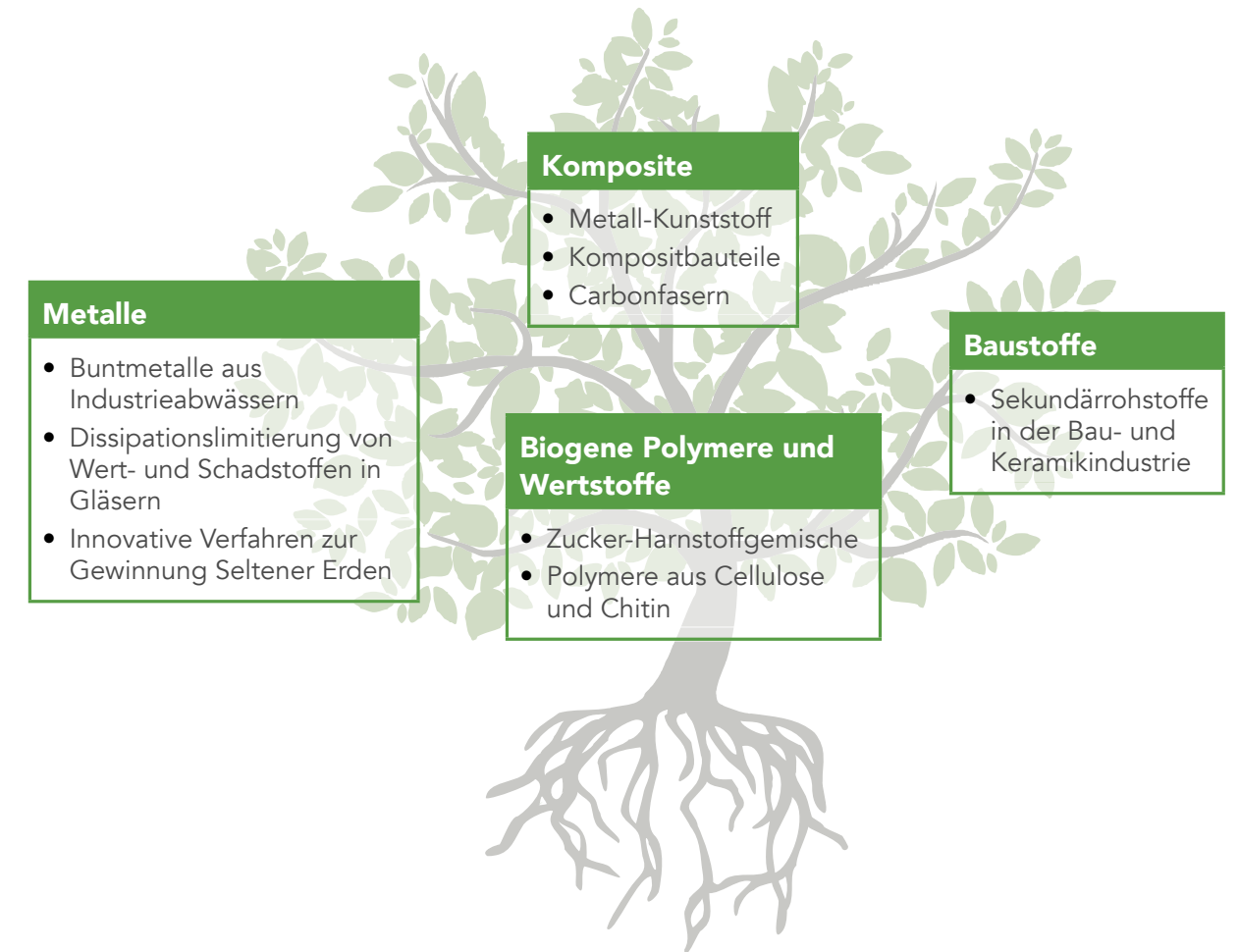
DER PROJEKTVERBUND FORCYCLE

Mit dem Ziel, die bayerische Kreislaufwirtschaft zu fördern und so aktiven Ressourcenschutz zu betreiben und die Importabhängigkeit von wirtschaftsrelevanten Ressourcen langfristig zu verringern, finanzierte das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz den Projektverbund ForCYCLE mit knapp drei Mio. Euro über eine Laufzeit von drei Jahren (2014 bis 2016). Der Verbund bestand aus zehn Forschungsprojekten, in denen innovative Recyclingverfahren und -technologien zu den Stoffklassen Komposite, biogene Polymere und Wertstoffe, Metalle und Baustoffe an verschiedenen bayerischen Forschungseinrichtungen entwickelt wurden.

Netzwerk- und Clusterarbeit

Im Verbund kam es zu zahlreichen Kooperationen innerhalb der Einzelprojekte. Über die fachliche Zusammenarbeit hinaus wurden Analysematerial, Laborausstattung und Kontakte ausgetauscht. Treffen einzelner Projektnehmer untereinander führten zu gemeinsamen Versuchen, Publikationen und der Planung weiterführender Projekte. Durch den disziplinübergreifenden „Blick über den Tellerrand“ im Rahmen des Austausches im Verbund entstanden neue Forschungsideen. Der wissenschaftliche Austausch

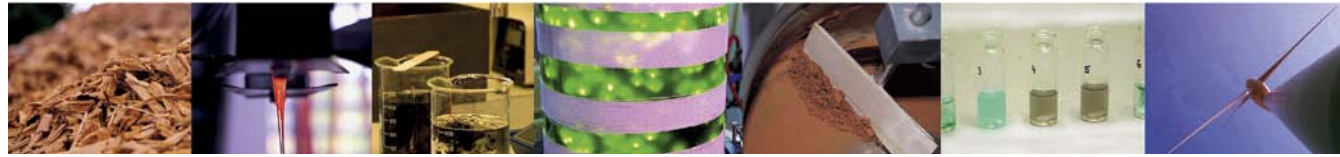
war somit ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung der Ressourcenkompetenz. Durch das breite Spektrum an Forschungsprojekten wurden die zentralen Trends des gegenwärtigen Ressourcenkonsums aufgegriffen. Durch die thematische Vielfalt des Projektverbundes erwarben die Doktorandinnen und Doktoranden eine fundierte Ressourcenkompetenz im Bereich Sekundärrohstoffe. Von einem externen Gutachtergremium wurde der Innovationscharakter des Verbundes als sehr hoch eingestuft.



Industriekooperationen

Die Forschungsprojekte arbeiteten mit Partnern aus der Industrie. Seit dem Start des Projektverbundes konnten sich bis Ende 2016 bereits über 40 Kooperationen etablieren. Gegenstände der Kooperationen waren vor allem fachliche Begleitungen, Materialbereitstellungen, gemeinsame Versuche sowie Upscaling der Verfahren.

Die Zusammenarbeit mit den Industriepartnern hatte maßgeblichen Anteil am jeweiligen Projekterfolg. Der Großteil der Kooperationen soll auch über die Projektlaufzeit hinaus fortgeführt und erweitert werden. Auch neue Kooperationen sind teilweise geplant.



Ergebnisse der Projekte

Die jeweils entwickelten Verfahren und Technologien der Einzelprojekte haben das Potential gängige Verfahren abzulösen und großtechnisch umgesetzt zu werden. Insgesamt tragen die Projekte zur Verminderung der Dissipation und zur Schließung von Stoffkreisläufen bei, sodass Ressourcenschonung und Reduktion negativer Umweltbelastungen durch industrielle Umsetzung unterstützt werden. Durch die Wiedergewinnung von Stoffen, die in Kleinstmengen in Produkten des Alltags verarbeitet sind wie Metalle der Seltenen Erden wird die Importabhängigkeit reduziert. Der Einsatz von Sekundärbaustoffen im Hochbau, die Anwendung umweltschonender Recyclingverfahren und der Einsatz von Naturstoffen zur Produktion von Kunststoffen leisten einen nachhaltigen und wertvollen Beitrag zur Schonung der Umwelt.

Resümee und Highlights

Erste Ergebnisse der Projekte wurden im November 2015 beim Zwischensymposium von ForCYCLE in der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in München vor knapp 150 Gästen aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft präsentiert. Nach der Eröffnungsrede von Frau Staatsministerin Ulrike Scharf wurde, neben Fachvorträgen von Expertinnen und Experten aus Wirtschaft und Wissenschaft, der aktuelle Stand der zehn Einzelprojekte von ForCYCLE in Form von Filmen (www.forcycle.de/videos) und Postern präsentiert.

Im Verbund entstanden neben zahlreichen Vorträgen über 50 wissenschaftliche Publikationen. Dies unterstützte zusätzlich die Sichtbarkeit des Verbundes über die Landesgrenzen Bayerns hinaus.

Ausblick und Perspektive

Durch die Ausarbeitung eines strategischen Konzepts zur Weiterentwicklung einer bayerischen Ressourcenstrategie, in der strategische Kernelemente und Handlungsfelder dargestellt werden, wurde das Fundament für künftige Maßnahmen im Sinne eines zukunftsfähigen Umgangs mit Ressourcen gelegt. Es gilt auch weiterhin dieses Konzept zu spezifizieren, um den sich wandelnden Herausforderungen gerecht zu werden.

Die Etablierung des Ressourceneffizienz-Zentrums Bayern (REZ) im Jahr 2016 war ein starkes politisches Signal dafür, dass Ressourceneffizienz und Ressourcenkompetenz auch in Zukunft einen zentralen Stellenwert einnehmen. Durch die enge Zusammenarbeit zwischen den Industrie- und Handelskammern in Bayern und dem REZ wird insbesondere die Beratung für KMUs verbessert und der Dialog von Forschung und Wirtschaft gestärkt und etabliert.



Zukunftsfähige Lebensstile basieren auf effizienter, kompetenter und gerechter Ressourcennutzung!

RESSOURCENSTRATEGIE FÜR DIE ROHSTOFFWENDE BAYERN UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG VON SEKUNDÄRROHSTOFFEN

Innovative stoffspezifische Recyclingverfahren

Im Forschungsverbund ForCYCLE wurden von Projektteilnehmern aus Wissenschaft und Industrie innovative Recyclingverfahren für folgende Stoffklassen entwickelt, welche die aktuellen Trends des Ressourcenkonsums widerspiegeln.

- Metalle (Elektronik)
- Mineralische Baustoffe (Gebäudetechnik und Baustoffe)
- Komposite (Leichtbau)
- Biogene Polymere und Wertstoffe (Verpackungen)

Die Integration der neu entwickelten Verfahren ermöglicht das Schließen von Stoffkreisläufen und die Reduktion der Feinverteilung von Stoffen in die Umwelt. Dadurch können die Ressourcen effizienter eingesetzt und aktiver Umweltschutz betrieben werden. Durch preislich konkurrenzfähige Sekundärrohstoffe können langfristig Importabhängigkeiten reduziert werden. Das ForCYCLE-Verbundprojekt verfolgt das Ziel, ein Zusammenwirken von Forschung, Technologieentwicklung und industrieller Anwendung durchzuführen.

Ressourcenstrategie für Bayern

Eine bayerische Ressourcenstrategie ist für die oben genannten Stoffklassen bedeutend, da sie von Importabhängigkeiten, Angebotskonzentrationen, negativen Umwelteinflüssen bei der Gewinnung und unrentabler Substituierbarkeit gekennzeichnet sind.

Die Bayerische Ressourcenstrategie baut auf folgende vier Handlungsfelder auf: Ressourceneffizienz in der Wirtschaft, Forschung und Entwicklung, Bildung und Bewusstsein für Ressourcenschutz und aktive Ressourcenpolitik. Eine Mischung aus bereits bestehenden und neuen rohstoffpolitischen Maßnahmen sorgt für eine erfolgreiche Umsetzung.

Durch den Ausbau der Sekundärrohstoffproduktion soll die Importabhängigkeit Bayerns reduziert, der Wohlstand gesichert und die Umwelt geschont werden. Hierzu kann die Bayerische Ressourcenstrategie um fünf Kernelemente erweitert werden:

1	Bewusstsein für Ressourcenkompetenz fördern
2	Transparenz für eine zukunftsweisende Ressourcennutzung schaffen
3	Ressourceneffizienz und -verfügbarkeit optimieren
4	Substitution kritischer Ressourcen realisieren
5	Dissipation von Funktionsmaterialien minimieren

Der Vergleich mit den Ressourcenstrategien anderer Staaten zeigt, dass für das aktive Steuern von Trends, neben dem quantitativen Wissen über Ressourcen, ebenso qualitatives Wissen über die benötigten Funktionen notwendig ist, um zukunftsweisende Entscheidungen zu treffen. So sind Stoffe wie bspw. Aluminium lediglich in bestimmten Formen gesundheitsschädlich oder können wie der Massenrohstoff Sand, der zwar kein knapper Rohstoff ist, nur in bestimmten Funktionsformen im Hochbau oder der industriellen Fertigung eingesetzt werden. Das am Lehrstuhl für Ressourcenstrategie der Universität Augsburg entwickelte Konzept der Stoffgeschichten ist hierfür ein bestens geeigneter Ansatz, da es die räumlichen und zeitlichen Kontexte,

in denen Ressourcen genutzt werden, berücksichtigt. Dadurch können jene Anwendungsbereiche identifiziert werden, in denen Handlungsbedarf besteht. Außer- wie innerbetriebliche Bildung im Umgang mit Ressourcen sind grundlegend, um die Kernkompetenz Fachwissen zu stärken und damit langfristig den wirtschaftlichen Erfolg und gesellschaftlichen Wohlstand Bayerns zu sichern.

ENTWICKLUNG EINER GESAMTLÖSUNG ZUR EFFEKTIVEN RÜCKGEWINNUNG VON BUNTMETALLEN AUS INDUSTRIEABWÄSSERN

Metallbelastete Abwässer: Stand der Technik vs. Effektives Recycling mit „SPOP“-Cycle

In der metallerzeugenden und -verarbeitenden Industrie fallen bei verschiedenen Produktionsprozessen metallhaltige Abwässer an. Derzeit werden diese Metalle meist mittels Kalkmilch als hochvoluminöser Hydroxidschlamm gefällt.

Das entwickelte „Spezifische Produkt-Orientierte Präzipitations“- (SPOP)-Konzept verbindet eine hochwirksame Abwasserreinigung mit der Herstellung metallischer Phasen und/oder Metall-(Eisen-) Oxiden, wie z.B. dotierte M-Oxide wie Ferrit ($M_xFe_{3-x}O_4$) oder Delafossit ($MFeO_2$). Diese Produkte mit charakteristischen Eigenschaften für spezielle technische und materialbezogene Anwendungen können unter geringem Energie- und Zeitaufwand gezielt hergestellt werden. Somit ermöglicht das „SPOP“-Cycle-Konzept die effektive Rückführung der Metalle aus Industrierwässern in den Stoffkreislauf. Im Sinne eines Urban Mining können die Metalle als Sekundärrohstoffe, bzw. in Einzelfällen als marktfähiges Syntheseprodukt, wiederverwertet werden.

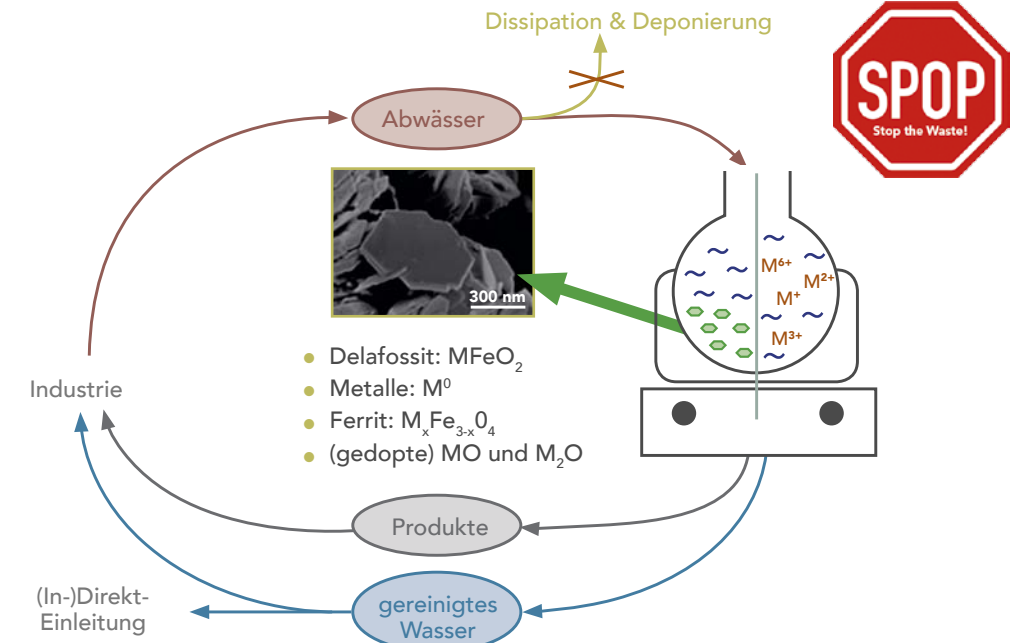
Technologieentwicklung, praktische Umsetzbarkeit und Anwendungsbreite

„SPOP“ wurde an synthetischen Abwässern im Labormaßstab entwickelt, an Industrieabwässern bestätigt und einzelne Fällungsprozesse, in enger Zusammenarbeit mit Industriepartnern, speziell auf die jeweilige Branche (Galvanik, Kupferhalbzeugherstellung, Katalysatorproduktion, Verzinkerei) optimiert. Durch Anpassung der Versuchsabläufe und Reaktionsparameter (u.a. pH-Wert,

Temperatur, Eisenzugabe) ist eine Steuerung der Wasserreinigung und der ausfallenden Phase(n)paragenesen) möglich. Mit „SPOP“ können Metalle sowohl aus stark (bis 30 g/l) als auch aus schwach belasteten Lösungen (wenige mg/l) zurückgewonnen werden. Die Rückgewinnungsquoten von Kupfer, Zink, Silber, Gold, Chrom, Blei, Palladium und Nickel liegen bei 99,98 - 100 %. Zinn konnte

zu ca. 97 % gefällt werden. Die behandelten Wässer sind einleitungsfähig. Damit sind die Voraussetzungen zur praktischen Umsetzung im Technikum erfüllt. Zukünftig ist der Bau eines modularen, mobilen Technikums und

die Weiterentwicklung des Verfahrens zur Behandlung von stark toxischen chrom⁶⁺-haltigen Wässern, Grubenwasser, Verbrennungaschen etc. geplant.



Dissipation und Potential

Die Dissipation von Buntmetallen aus Industrieabwässern korreliert mit der Masse der deponierten Neutralisationsschlämme. Ein Großteil des Aufkommens (Abfallschlüsselnummer AVV 110109: 408.400 t Schlämme und Filterkuchen, D 2014) ist Galvanikschlamm zuzuordnen. Trotz hohem Sekundärrohstoffpotential (2.000 t Cu und 5.300 t Ni je 50.000 t) werden 98 % der Schlämme deponiert.

Durch „SPOP“ entfällt die Deponierung von Neutralisationsschlamm. So werden Kosten für Transport und Entsorgung (100-200 €/t) eingespart und Deponierungsmengen werden reduziert.

AUFREINIGUNG VON GEBRAUCHS- UND SPEZIALGLÄSERN ZUR DISSIPATIONSLIMITIERUNG UND RÜCKGEWINNUNG VON WERTMETALLEN

Metallgehalt in Gebrauchs- und Spezialgläsern

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

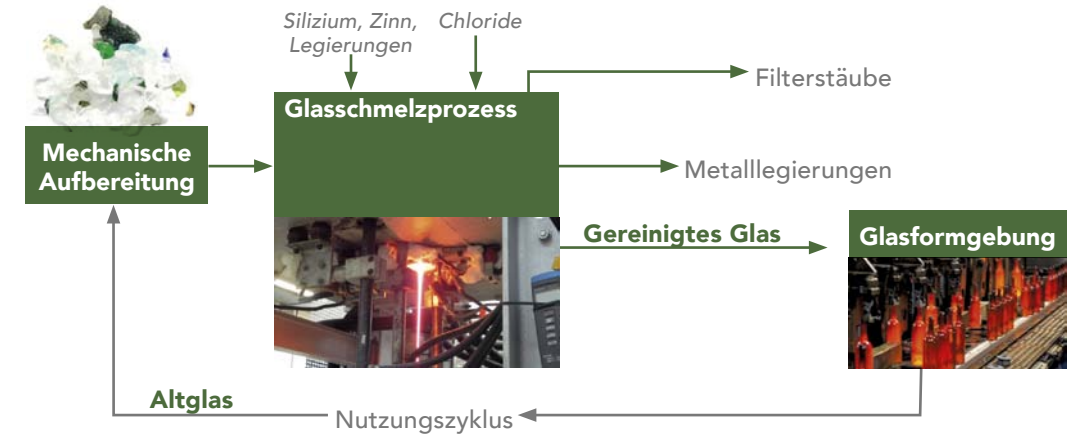
Ziel des Projektes war die Aufarbeitung dieser Gläser durch selektive Schwermetallabtrennung, um auf diese Weise sowohl hochwertige Scherben für die Glasindustrie zu generieren, als auch Wertmetalle als Sekundärrohstoffe zurückzugewinnen.

Da die hohe Bleikonzentration in Behälterglas für die Glasindustrie eine besondere Herausforderung darstellt, wurde bei der Projektarbeit ein Schwerpunkt auf die Reduzierung der Bleikonzentration beim Wiedereinschmelzen von Altglas gelegt.

Aufreinigung von Scherben durch Extraktion in Glasschmelzen

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

Metalle verwendet werden, deren Oxide gewünschte Glasbestandteile wie SiO_2 oder SnO bilden. Verunreinigungen, die auf diese Weise nicht oder nicht vollständig entfernt werden, können durch selektive Verdampfung aus den Glasschmelzen entfernt werden.



Gewinn sekundärer Gläser und Wertmetalle

Bereits durch die Extraktion der verunreinigten Gläser mit Si-50 % Sn-Legierungen lassen sich bei 1.450°C in 3h Schmelzdauer Konzentrationserniedrigungen für PbO von 89 % erzielen.

Alternativ kann durch die selektive Verdampfung von Bleichlorid nach Zugabe von Kalziumchlorid in die Schmelze die Bleikonzentration um bis zu 97 % reduziert werden. Im Projektverlauf konnte gezeigt werden, dass durch Kombination beider Verfahren selbst Altglasscherben mit einem Bleigehalt von über 1.000 ppm soweit gereinigt werden können, dass die umgeschmolzenen Gläser REACH-konform sind und die Grenzwerte der Verpackungsverordnung einhalten.

Die entstehenden Metalllegierungen können direkt in der Sekundärmetallurgie eingesetzt und so auch das Blei wieder dem Stoffkreislauf zugeführt werden.

Überführung der Ergebnisse

Um Synergien auch mit weiteren Unternehmen innerhalb der bayerischen Glasindustrie besser nutzen zu können, wurde im März 2016 das EFRE-Transferprojekt **Glas-Technologie-Allianz Oberfranken-Ost Bayern (Glas-TA00)** gestartet, mit dem Ziel, branchenspezifische Innovationen schneller in die Industrie zu überführen und die nationale und internationale Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Unternehmen zu stärken.

Alle Partner des ForCYCLE-Teilprojektes sind Partner im Glas-TA00.



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

Problematik

Seltene Erden (engl. rare earth elements, REEs) sind sehr wichtige Rohstoffe der aktuellen Hochtechnologie. Problematische Abbaumethoden und steigende Preise machen es notwendig, umweltschonende Prozesse zu entwickeln, um geringe REE-Vorkommen (wieder-) nutzbar zu machen. Photoautotrophe Organismen nutzen das Sonnenlicht als Energiequelle und das CO₂ als Kohlenstoffquelle. Nach deren Anwendung als Produktionsorganismus auf dem Gebiet der Weißen Biotechnologie bleibt ein Biomasserest übrig, der meistens zu Dünger oder Energie umgesetzt wird. Es bestehen aber auch deutlich sinnvollere Nutzungsmöglichkeiten.

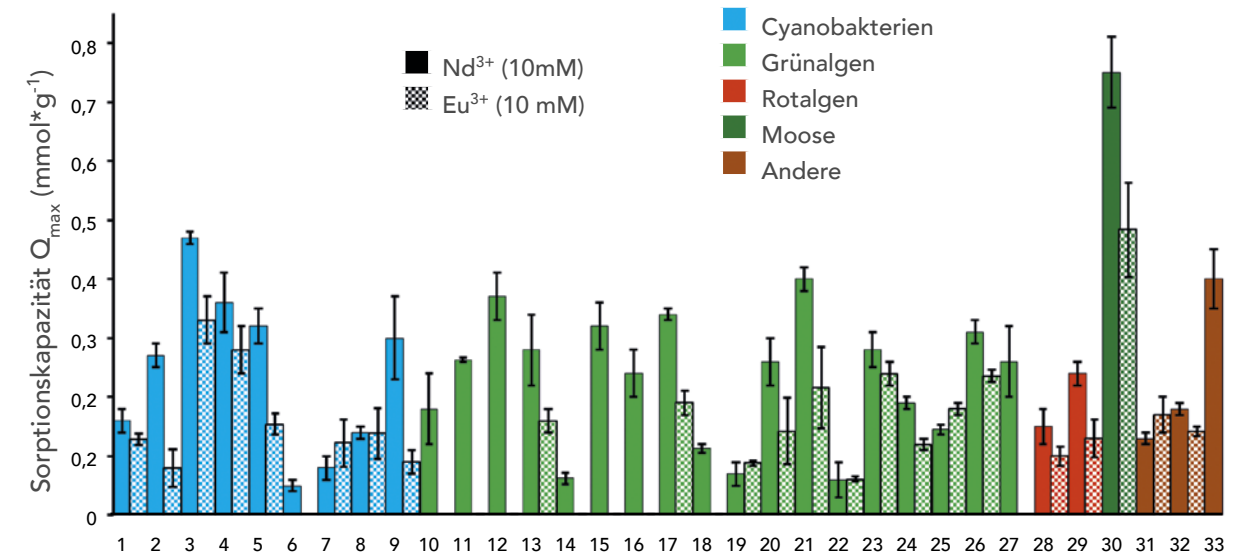
Zielsetzung und Methode

Ziel dieses Projektes ist es, photoautotrophe Organismen zu identifizieren, die REEs aus hochverdünnten Lösungen anreichern können. Dieses biologische Adsorbentmaterial lässt sich als nachwachsender Rohstoff leicht produzieren, ist umweltfreundlich und könnte vor der Adsorption sogar noch wertvolle Produkte liefern.

Durch Kartuschen mit dem Biomaterial als Adsorber könnten Laugen bzw. wässrige Lösungen mit REE-Metallen geleitet werden, um die Metallionen zu binden. Die so biotechnologisch angereicherten Metalle bzw. Metallgemische können nachfolgend klassischen metallurgischen Methoden zur Aufreinigung zugeführt werden.

Bisherige Ergebnisse

Im Rahmen des bereits durchgeführten Screenings wurden fünf Spezies identifiziert, die ein hohes Potential für die geplante Biosorption der REEs aufweisen: ein Moos, ein Cyanobakterium und drei Grünalgen. Diese photoautotrophen Mikroorganismen weisen hohe Sorptionskapazitäten für REEs auf – bis zu 0,75 mmol Nd³⁺/g Biotrockenmasse – die sich durch geschickte Prozesssteuerung noch steigern lassen (z.B. 2 mmol Nd³⁺/g Biotrockenmasse bei pH 1). Sie zeigen zudem eine höhere Affinität zu den Zielmetallen im Vergleich zu anderen Metallen wie Kupfer, Eisen oder Nickel. Aus diesem Grund werden sie weitergehend untersucht und deren Eignung für eine An-



wendung in dem Sorptionsreaktor geprüft und optimiert. Dank einer erfolgreichen Zusammenarbeit mit Firmenvertretern konnten im Laufe des Projektes Abwasserlösungen – aus der Erzverarbeitung oder der Düngemittelherstellung – identifiziert werden, die als Quelle der REEs für den beabsichtigten Prozess herangezogen werden können. Diese Proben werden im weiteren Verlauf des Projektes als Rohstoffquellen für die Entwicklung des Prototyps für die Metalleanreicherung dienen.

Darüber hinaus wird in diesem Projekt auch Restbiomasse, die aus der Herstellung eines Wertproduktes eines kooperierenden Unternehmens stammt, als potentielles Adsorbentmaterial untersucht. Schlussendlich wird in der letzten Projektphase bis Ende 2017 eine Optimierung der Biomasseproduktion, die Entwicklung des Prototyps für die obengenannte Anwendung sowie dessen technische und ökonomische Evaluierung stattfinden.

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

RECYCLING VON METALL-KUNSTSTOFF-VERBUNDEN UND HYBRIDWERKSTOFFEN

Trennverfahren für Metall-Kunststoff-Verbunde

Technische Produkte bestehen zunehmend aus Metall-Kunststoff-Verbunden und nutzen die Werkstoffeigenschaften beider Materialkomponenten. So werden komplex geformte Kunststoffe im Automobil- und Sanitärbereich zum Schutz und zur optischen Aufwertung des Kunststoffkorpus galvanisiert oder aluminiumbeschichtet. Im Automobil- und Elektroniksektor werden aufwendig gefertigte metallische Komponenten – wie Verteilerdosen oder Kabelsteckverbindungen – mit Kunststoffen umspritzt 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 in der Recyclingindustrie lediglich ein geringer Teil des eigentlichen Materialwertes Erlöst. Für drei wirtschaftlich interessante Verbundabfälle mit hohem Ressourcenpotential wurden individuelle Trennverfahren entwickelt, um die wertvollen Ressourcen im Wirtschaftskreislauf zu halten.

Hochwertige Rezyklate aus Verbundabfällen

Hybridbauteile sind Komposite aus aufwendig gefertigten metallischen Komponenten, die mit einem technischen Kunststoff (z.B. PBT) vollständig oder partiell umspritzt sind. Durch die Verknüpfung des am Fraunhofer IVV entwickelten lösungsmittelbasierten CreaSolv®-Prozesses mit vorhandenen Technologien (Entbinderungsprozess der Lömi GmbH) gelingt die Wertschöpfung des Produktes durch das Freilegen der Metallelemente bei simultaner

Rückgewinnung des polymeren Anteils aus PBT oder PPA. Frontscheinwerfer aus dem Automotive-Bereich bestehen aus 300 – 500 Einzelteilen, darunter diverse Kunststofftypen, Metalle, elektrische, optische und mechanische Bauelemente. Das hohe Wertstoffpotential der Metalle sowie der Kunststoffe PC, PP und PBT wird durch eine komplexe Aufbereitungskette erschlossen, die innovative optische Sortiersysteme von UNISENSOR Sensorsysteme GmbH



und RTT Steinert GmbH einschließt, die insbesondere auch dunkle und schwarze Kunststoffe trennen. Die Entlackung metallisierter Kunststoffe gelingt durch spezielle Laugungsverfahren. Galvanisierte Kunststoffabfälle sind Verbunde aus PC/ABS- bzw. ABS-Kunststoffen mit einer Galvanikschicht aus Kupfer, Nickel und Chrom. Hochwertige Kunststoff- und Metallrezyklate entstehen durch eine effektive Verbundtrennung. Nach einer Grobvermahlung erfolgt in

Kooperation mit der Hosokawa Alpine AG eine Teilabtrennung der Metalle. Aus der Kunststofffraktion wird über eine Schmelzfiltration bei der Sysplast GmbH & Co. KG ein metallfreies Regranulat gewonnen. Als Nebenprodukt entsteht ein Metallkonzentrat, aus dem die verbleibende Kunststoffmatrix mittels CreaSolv®-Lösungsmittelformulierungen herausgelöst und zurückgewonnen werden kann, so dass es als Rohstoff für hochwertige Cu- und Ni-Produkte dienen kann.



RECYCLING VON KOMPOSITBAUTEILEN AUS KUNSTSTOFFEN ALS MATRIXMATERIAL

Recycling von Rotorblättern

Kompositbauteile mit duroplastischen Kunststoffen als Matrixmaterial gehören u. a. aufgrund ihres Potentials im Leichtbau zu den wichtigsten Zukunftsmaterialien. So stieg der Einsatz an glas- und carbonfaserverstärkten Kunststoffen in den vergangenen Jahren unter anderem durch den Einsatz in erneuerbaren Energien wie Rotorblättern von Windkraftanlagen stark an. Eine marktfähige Lösung für das Recycling von Rotorblättern konnte bislang nicht gefunden und etabliert werden. Um das Material nach der Nutzungsdauer einer Recyclinglösung zuführen zu können, muss die gesamte Recyclingkette von der Demontage über die Aufbereitung bis hin zur Bereitstellung von verarbeitungsfähigen Sekundärrohstoffen betrachtet werden.

Energetische Demontage

Für die Entwicklung eines technisch-innovativen sowie ökologisch und ökonomisch tragbaren Recyclingkonzeptes ist die Trennung der Materialverbünde eine wichtige Voraussetzung. Damit können werthaltige Materialien für das Recycling gewonnen und schadstoffhaltige Materialien getrennt werden. Durch die Wahl einer geeigneten Demontage kann Einfluss auf die Effizienz der weiteren Aufbereitung genommen werden.

Die bislang eingesetzten Technologien zur Demontage von Rotorblättern sind das Sägen mit diamantbesetzten Seilsägen und das Wasserstrahlschneiden. In diesem Projekt wurde ein neues Verfahren - die energetische Demontage - untersucht. Hierbei erfolgt die Trennung

der unterschiedlichen Materialfraktionen mittels energetischer Materialien, die in einer definierten Demontagelinie aufgebracht werden. Somit kann das großvolumige Bauteil definiert separiert werden. Es erfolgt eine genaue Trennung an der gewünschten Materialgrenze. Nachfolgend kann das separierte Bauteil einer materialspezifischen Aufbereitung zugeführt werden.

Mit dem Kooperationspartner TREE Windenergie fanden vergleichende Demontageversuche mit der Seilsäge-technologie statt. Weiterhin wurden technische Möglichkeiten zur Behandlung der entstehenden Sekundärfraktionen und zur Verschleißreduktion durch geeignete Demontagepläne entwickelt.



Positionierung der Ladung auf dem Rotorblattsteg



Probe nach der Demontage

Bewertung der materialspezifischen Demontage

Die aktuell zur Entsorgung anfallenden Rotorblätter bestehen aus einem glasfaserverstärkten Kunststoff in Sandwichbauweise mit Kunststoffschaum oder Balsaholz als Füllstoff. In den neueren Rotorblattgenerationen sind vereinzelt und je nach Hersteller auch carbonfaserverstärkte Kunststoffe in den besonders belasteten Bereichen verbaut. Mit Hilfe einer geeigneten Demontage können diese Materialien getrennt und separat aufbe-

reitet werden. So ist z.B. eine Abtrennung der carbonfaserhaltigen Bereiche von den glasfaserverstärkten Kunststoffen für eine weitere Verwertung eine wichtige Voraussetzung. Weiterhin kann durch eine Abtrennung von Balsaholz aus den Rotorblättern ein hochwertiges Sekundärmaterial für den Einsatz im Dämmstoffbereich gewonnen werden.

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

Prof. Dr. Klaus Drechsler, Dipl.-Ing. Jakob Wölling, Dipl.-Ing. Franz Baumann, Dipl.-Ing. Frank Manis, Maren Schmiege B.Eng.

RESSOURCENEFFIZIENTE FASER-MATRIX-SEPARATION FÜR DAS RECYCLING VON CARBONFASERSTRUKTUREN

Recycling-Prozesskette für Carbonfasern

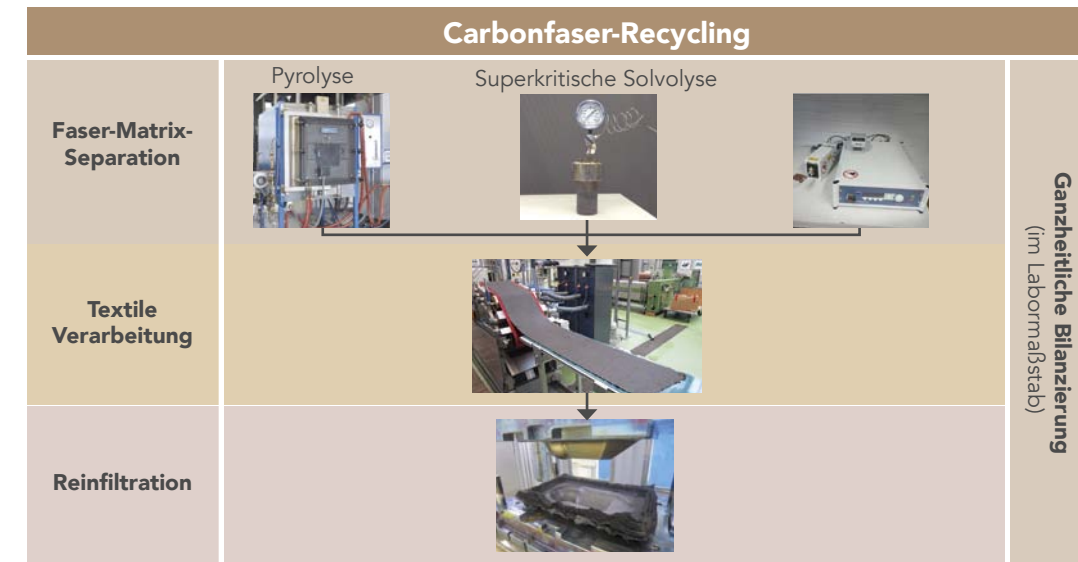
Die Leichtbauweise von Fahrzeugen durch den Einsatz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) ist eine der wesentlichen Zukunftstechnologien zur Reduktion von Emissionen im Bereich der Mobilität. Die ausgezeichneten gewichtsspezifischen Eigenschaften von CFK bieten ein hohes Potential zur Energieeinsparung gegenüber konventionellen Materialien während der Nutzungsphase. Um die Nutzungsphase der Carbonfasern zu verlängern, ist es erforderlich geeignete Recyclingstrategien zu entwerfen und rezyklierte Carbonfasern (rCF) als hochwertigen Sekundärrohstoff einzusetzen.

Im Rahmen dieses Projektes wurden daher faserschonende, ressourceneffiziente Separationsverfahren untersucht, der Einfluss von Material- und Prozessparametern auf die textile Weiterverarbeitung zu Carbonfaser-Halbzeugen bestimmt, sowie die Eigenschaften von rCF-basierten CFK-Bauteilen charakterisiert.

Faser-Matrix-Separation

Für die Faser-Matrix-Separation wurden drei Verfahren untersucht: die Pyrolyse als derzeitiges Benchmark-Verfahren, sowie als innovative Verfahren ein Solvolyse-Prozess mittels superkritischer Fluide (SCF) und ein auf induktiver Erwärmung basierendes, thermisches Verfahren. Beim SCF-Verfahren wird das hohe Lösevermögen von Lösemitteln im über- bzw. nahekritischen Zustand genutzt, wodurch umweltverträgliche Lösemittel wie z.B. Wasser eingesetzt werden können. Der Vorteil der induktiven Erwärmung gegenüber konventionellen thermischen Verfahren liegt in der unmittelbaren und sehr schnellen Erwärmung

der Carbonfasern, wodurch sich in der industriellen Umsetzung ein energieeffizientes Verfahren mit kurzen Prozesszeiten erreichen lässt. Mit allen drei Verfahren können Carbonfaser-Gewebelagen aus einem duromeren Matrixverbund gelöst werden. Die Charakterisierung der rCF zeigt, dass die mechanischen Eigenschaften der Einzelfasern bei optimierten Prozessparametern im Vergleich zu Neufasern weitgehend erhalten bleiben, während Unterschiede in der chemischen Funktionalität der Faseroberfläche eine Anpassung der nachfolgenden Verfahrensschritte erfordern.



Textile Weiterverarbeitung zu Carbonfaser-Halbzeugen

Zur Verarbeitung von rCF eignen sich die Nass- und Trockenvliesherstellung. In beiden Verfahren können unterschiedliche Faserlängen eingesetzt und die Flächen-gewichte variabel eingestellt werden. Im Nassvliesprozess werden vor allem Faserlängen von 1 bis 36 mm verarbeitet, wobei kürzere Fasern ein homogeneres Vlies bilden. Auf der Trockenvliesanlage werden hingegen längere Fasern mit 20 bis 150 mm verarbeitet. Durch die zusätzliche Kreuzlegung des Krempelflors werden ebenfalls homogene Vliesstoffe erzeugt.

Die Fasern können sowohl durch das Nass- als auch durch das Trockenlege-Verfahren in einer Vorzugsrichtung orientiert werden, wodurch sich eine Steigerung der anisotropen mechanischen Eigenschaften des Carbonfaser-Vlieses erzielen lässt. Die Industriepartner Neenah-Gessner GmbH und Pill Nassvliesstechnik GmbH ermöglichten eine fachliche Begleitung der Entwicklung in einem industrienahe Umfeld. Für die Zukunft sollen die bestehenden Kooperationen fortgeführt und durch neue Partnerschaften in den Bereichen Beschlichtung, textile Verarbeitung und Matrixpolymerentwicklung ergänzt 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 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, da sie sich nur bedingt recyklieren lassen. 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 für stoffspezifische Extraktion

Niedrig schmelzende Naturstoffgemische stellen eine ökologisch und ökonomisch vorteilhafte Alternative zu ionischen Flüssigkeiten dar. Die Substanzgemische haben, ähnlich den ionischen Flüssigkeiten einen Schmelzpunkt bei unter 100°C, deren physikalische Eigenschaften in einem weiten Bereich variieren. Durch zahlreiche Versuche konnten das gute Löslichkeitsverhalten und die unterschiedliche Selektivität von Phosphaten, Metallsal-

zen und -oxiden in Naturstoff-basierten Gemischen herausgearbeitet und grundlegende Forschungsergebnisse für mögliche Anwendungen erzielt werden. Aufgrund des selektiven Lösungsvermögens von niedrig schmelzenden Gemischen ist das entwickelte Extraktionsverfahren auf unterschiedliche Trennprobleme anwendbar. Zum einen sind wir in der Lage, Metalle der Seltenen Erden mit den Schmelzen voneinander zu trennen, die



naturgemäß sehr ähnliche Eigenschaften besitzen und mit etablierten Methoden nur mit großem Aufwand und unter massiver Umweltbelastung separierbar sind. Zum anderen gelingt unter der Verwendung von Naturstoffgemischen eine Anreicherung von Phosphaten aus dem viel diskutierten Sekundärrohstoff Klärschlamm. Weitere spezifische Trennprobleme wurden unter anderem mit Proben der Firma H.C. Starck untersucht. Für die Rückgewinnung der Metalle und Wertstoffe aus

den Schmelzen wurden je nach Eigenschaften effiziente Prozeduren entwickelt. Neben der klassischen Fällung kam hier auch die direkte Reduktion extrahierter Metalloxide und -salze durch Nutzung der Extraktionsmatrix als Reduktionsmittel zum Einsatz. Letztere Methode konnte in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IGB in Straubing optimiert werden, um aus den extrahierten Metallverbindungen direkt neues Katalysatormaterial herzustellen.

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 teuer, toxisch, nur gering biologisch abbaubar sowie aus Erdöl hergestellt und damit nicht umweltfreundlich.

Neben Cellulose ist Chitin, vor allem aus Schalen von Meerestieren, aber auch aus Pilzen, weltweit einer der größten Bioabfälle. Kürzlich wurde gezeigt, dass sich auch Chitin in ionischen Flüssigkeiten lösen lässt.

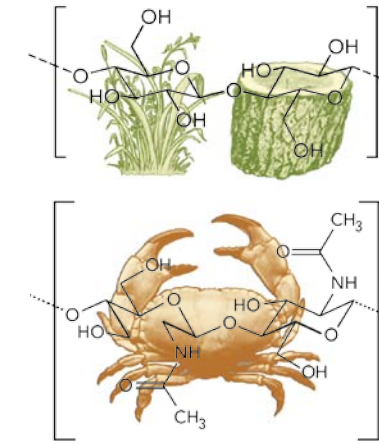
Im vorliegenden Projekt wurden die Lösungsmittel sowohl im Hinblick auf ihre Umweltverträglichkeit, als auch für die simultane Auflösung beider Biopolymere verbessert und aus ihrer Lösung neuartige Bio-Hybridmaterialien mit interessanten Eigenschaften hergestellt.

Umweltfreundliche Lösungsmittel

Die verbesserten flüssigen Medien enthalten besonders für die Lösung von Cellulose einen signifikanten Anteil eines aus Zucker gewonnenen „grünen“ Lösungsmittels. Die daraus erhaltenen Spinnfasern wurden in Kooperation mit den Firmen Lenzing (Österreich) und Kelheim Fibres getestet und weiter optimiert.

Neue Kompositmaterialien aus Biopolymeren

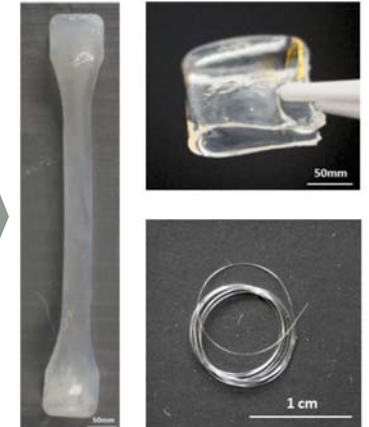
Aus den gelösten Hybridpolymeren wurden innovative Kompositmaterialien gewonnen, sowohl als Fasern als auch durch Beschichtung verschiedenster Zellstoffvliese. Neben Kompositmaterialien aus Chitin und Cellulose sind auch solche aus Lignin und Chitin interessant, wobei Lignin die Festigkeit und Chitin die Elastizität liefert. Die Bandbreite möglicher Anwendungen ist hoch:



Auflösung von Biopolymeren in umweltfreundlichen Lösungsmitteln



Herstellung von Hybridpolymer-Produkten



Sie reicht von Viskosefaserbeschichtungen über wasser- und öldichtes Papier (z.B. zum Ersatz perfluorierter Barrieren in Verpackungen), antiseptische Filme, hydrophobe Verpackungen, bis hin zu optischen Materialien.

Zusammen mit potentiellen Kunden in der Textil- und Verpackungsindustrie werden die Materialien optimiert, um sie als marktfähige Produkte zu etablieren.



PRODUKTGESTALTUNG MIT SEKUNDÄRROHSTOFFEN IN DER BAUSTOFF- UND KERAMIKINDUSTRIE

Recycling kritischer Baustoffe

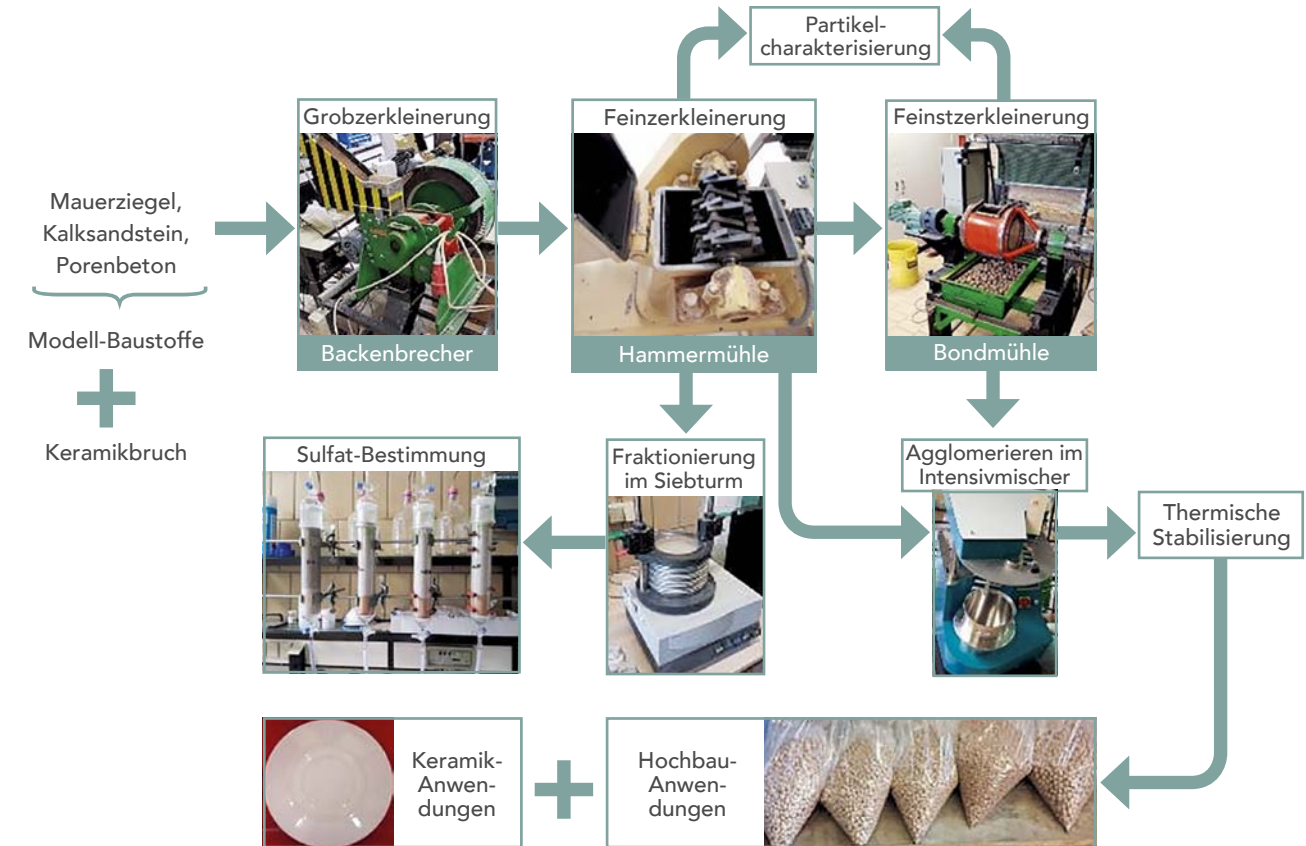
Mineralische Bauabfälle und Böden stellen mit einem Gesamtaufkommen von etwa 192 Mio. t den größten Abfallstrom in Deutschland dar. Davon entfielen im Jahr 2012 rund 46 Mio. t allein auf Bayern, wobei circa 8 Mio. t als Bauschutt zu bewerten sind. Dieser besteht hauptsächlich aus Beton, Ziegeln und weiteren mineralischen Bestandteilen. Während Recyclingbeton inzwischen vermehrt Anwendung in der Bauindustrie findet, werden Ziegel und weitere Bauabfälle wie Porenbeton oder Kalksandstein bisher kaum einem hochwertigen Recycling zugeführt.

Diese Abfälle werden aktuell meist im Straßen- oder Erdbau eingesetzt oder deponiert. Im Hinblick auf die Verknappung von Ressourcen und Deponieraum müssen neue Wege im Umgang mit Bauabfällen gefunden werden. Die in den mineralischen Bauabfällen enthaltenen Schadstoffe wie Sulfat erschweren das Recycling dabei zusätzlich. In diesem Vorhaben wurden deshalb Schadstoffuntersuchungen von typischen Baustoffen und Wege ihrer Wiederverwendung entwickelt.

Anwendungen für die Keramik- und Bauindustrie

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Porzellanfabrik Walküre GmbH & Co. KG entstand die Idee, einen hybriden Wertstoff durch Mischen von Mauerziegel- und Keramikbruch zu schaffen. Dieser kann im Hochbau, als Zuschlagstoff für Leichtbeton, zur Wärmedämmung, für den Schallschutz oder auch als Trägermaterial für Pflanzennährstoffe eingesetzt werden. Weiterhin soll durch die Herstellung eines gießfähigen Schlickers aus den beiden Abfallströmen ein günstiges und daher besonders konkurrenzfähiges Keramikprodukt entstehen.

Im Rahmen des Projektes konnte dabei die notwendige Prozesskette zur Herstellung eines Keramik- oder Baustoffproduktes entwickelt werden. Diese besteht aus verschiedenen Zerkleinerungsschritten des Ausgangsmaterials, simultaner Partikelcharakterisierung und anschließender Formgebung durch Agglomerieren der Stoffströme. Die so entstandenen Grüngranulate wurden bei der Porzellanfabrik Walküre bei verschiedenen Temperaturen



thermisch stabilisiert. Als Alternative zum klassischen Brennen der Grünkörper wurde außerdem beim Projektpartner Fraunhofer ICT das Verfahren der hydrothermalen Härtung, welches beispielsweise beim Herstellen von Kalksandstein Anwendung findet, eingesetzt. Die so erzeugten Granulate wiesen bei beiden Verfahren gute mechanische und thermische Eigenschaften auf. Ferner

konnte für sulfathaltige Baustoffe eine Datengrundlage durch Messungen des Sulfatgehaltes nach den gängigen Normen und Vorschriften erstellt werden. Durch Fraktionierung der Baustoffe und Ausschleusen der schadstoffbelasteten Fraktionen konnte außerdem eine Möglichkeit für ein besseres Baustoffrecycling geschaffen werden.

Ressourcenstrategie für die Rohstoffwende Bayern unter besonderer Berücksichtigung von Sekundärrohstoffen

Prof. Dr. Armin Reller, Dr. Julia Fendt, Christian Böckenholt M.A.
Universität Augsburg, Lehrstuhl für Ressourcenstrategie,
Wissenschaftszentrum Umwelt (WZU), Universitätsstr. 1a, 86159 Augsburg,
Tel.: 0821-598-3000, armin.reller@physik.uni-augsburg.de

Entwicklung einer Gesamtlösung zur effektiven Rückgewinnung von Buntmetallen aus Industrieabwässern

Prof. Dr. Soraya Heuss-Aßbichler, Dr. Melanie John-Stadler, Dipl.-Min. Alexandra L. Huber
Ludwig-Maximilians-Universität München, Department für Geo- und Umweltwissenschaften, Theresienstr. 41, 80333 München, Tel.: 089-2180-4252, heuss@lmu.de

Aufreinigung 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, gerdes@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
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

Recycling von Metall-Kunststoff-Verbunden und Hybridwerkstoffen

Dr. Martin Schlummer, Dr. Andreas Mäurer, Fabian Knappich M.Sc.
Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV
Giggenhauser Str. 35, 85354 Freising
Tel.: 08161-491-750, martin.schlummer@ivv.fraunhofer.de

Recycling von Kompositbauteilen aus Kunststoffen als Matrixmaterial

Prof. Dr. Ulrich Teipel, Dipl.-Ing. Elisa Seiler
Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Verfahrenstechnik, Wassertorstr. 10,
90489 Nürnberg, Tel.: 0911-5880-1471, ulrich.teipel@th-nuernberg.de
Fraunhofer Institut für Chemische Technologie ICT, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 7,
76327 Pfinztal, Tel.: 0721-4640-354, elisa.seiler@ict.fraunhofer.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;
Prof. Dr. Klaus Drechsler, Dipl.-Ing. Jakob Wölling, Dipl.-Ing. Franz Baumann, Dipl.-Ing. Frank Manis
Fraunhofer IGCV, Am Technologiezentrum 2, 86159 Augsburg,
Tel.: 0821-90678-209, klaus.drechsler@igcv.fraunhofer.de

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

Prof. Dr. Burkhard König, Dr. Petra Hilgers, Anika Söldner M.Sc., Dipl.-Ing. Julia Zach
Universität Regensburg, Fakultät für Chemie und Pharmazie,
Institut für Organische Chemie, Universitätsstr. 31, 93053 Regensburg,
Tel.: 0941-9434575, 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;
Prof. Dr. Cordt Zollfrank, Yaqing Duan M.Sc
Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Straubing,
Professur für Biogene Polymere, Tel.: 09421-187-450, cordt.zollfrank@tum.de

Produktgestaltung mit Sekundärrohstoffen in der Baustoff- und Keramikindustrie

Prof. Dr. Ulrich Teipel, Kevin Hefele M.Eng.
Technische Hochschule Nürnberg, Fakultät Verfahrenstechnik, Wassertorstr. 10,
90489 Nürnberg, Tel.: 0911-5880-1471, ulrich.teipel@th-nuernberg.de

Bildnachweise

Fotos S. 3
v.l.n.r. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt
und Verbraucherschutz; Lehrstuhl für Ressourcen-
strategie, Universität Augsburg

Grafik S. 5 und Fotos S. 6 und 7
Lehrstuhl für Ressourcenstrategie,
Universität Augsburg

Grafik S. 11
Department für Geo- und Umweltwissenschaften,
Ludwig-Maximilians-Universität München

Grafik S. 13
Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung,
Universität Bayreuth

Grafik S. 15
Lehrstuhl für Bioverfahrenstechnik,
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Fotos S. 17
Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und
Verpackung IVV

Fotos S. 19
Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT,
Pfinztal

Grafik S. 21
Lehrstuhl für Experimentalphysik II,
Universität Augsburg

Grafik S. 23
Institut für Organische Chemie,
Universität Regensburg

Grafik S. 25
Institut für Physikalische Chemie,
Universität Regensburg

Grafik S. 27
Fakultät Verfahrenstechnik,
Technische Hochschule Nürnberg

Impressum

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

Redaktion: Dr. Julia Fendt, Christian Böckenholt M.A.
Gestaltung: Saba Busmann
Druck: dieUmweltDruckerei, Langenhagen

Augsburg, 2017



