Vom Labor auf den Markt

Effizienz
Substitution
Recycling

r+Impuls – Ergebnisse und Impulse für industrielle Ressourceneffizienz

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

FONA
Forschung für Nachhaltigkeit

Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – **Impulse für industrielle Ressourceneffizienz**

Fraunhofer
ISI

Effizienz
Substitution
Recycling

Vom Labor auf den Markt

r+Impuls – Ergebnisse und Impulse
für industrielle Ressourceneffizienz

Inhaltsverzeichnis

5 Vorwort . . . . . .

6 Einleitung . . . . . .

10 Cluster Effizienz . . . . . .

24 Cluster Substitution . . . . . .

36 Cluster Recycling . . . . . .

56 r+TeTra . . . . . .

58 Übersicht . . . . . .

60 Impressum

Vom Labor auf den Markt – Impulse für industrielle Ressourceneffizienz

Neue Ressourceneffizienzpotenziale auf dem Weg in tragfähige Geschäftsmodelle 6

Cluster der r+Impuls-Vorhaben 8

IVAN – Herstellung von Kontaktwerkstoffen mit reduziertem Silbergehalt 10

IMPROVE – Optimierung von Umwälzpumpen durch Leistungselektronik 12

MAREMO – Materialeffizienter Leichtbau für Mobilität 14

Re-Mining – Wertstoffgewinnung aus sulfidischen Spülhalden 16

DreamCompoundConti – Herstellung eines neuen Hochleistungsthermoplasts 18

PowderR²eSint – Kunststoff-Restpulver aus dem Lasersinterprozess 20

PUMOCON – Ressourcenoptimierung durch Systemintegration 22

ecoFluor – Innovative und umweltfreundliche, auf Fluor basierte Reinigungsprozesse in der Halbleiterindustrie 24

Eco-Pump-Drive – Innovative Umwälzpumpen 26

Production Dreams – Hochskalierung der Produktion von Polyethercarbonat-Polyurethanen 28

EKALGU – Magnesium statt Kalk in der Gusseisenproduktion 30

aha – Auftragschweißen mit alternativen Hartstoffen 32

DreamResourceConti – Herstellung von CO_2-haltigen oberflächenaktiven Materialien 34

Edelmetalladsorber – Rückgewinnung von Edelmetallen aus Reststoffströmen der metallverarbeitenden Industrie 36

EZiRec – Effizientes Zinn-Recycling aus Abfallprodukten der Leiterplattenfertigung 38

KOMPASS – Öl- und Metallrückgewinnungs-Prozessanlage für Schlämme und Späne 40

ReeL – Ressourceneffiziente Herstellung von Lederchemikalien 42

PLUS – Pilotanlage zur lasergestützten Sortierung von Sonderlegierungen 44

STRATEGO – Rückgewinnung strategischer Metalle durch Müllverbrennung 46

Circular Packaging – Recycling von Verpackungen zu gereinigten Rohstoffen 48

iCycle – Rückgewinnung von Metallen und Energie aus Rückständen der Elektroschrottaufbereitung 50

GoldRecApp – Rückführung von Edelmetallen in den Wirtschaftskreislauf 52

KONDEOS – Metalloxid-Konditionierung von Elektroofenschlacken zur Erzeugung ökologischer Baustoffe und vermarktungsfähiger Metalle 54

Wissenschaftliche Begleitung und Potenzialanalyse

Liste der Vorhaben und Förderkennzeichen

Vom Labor auf den Markt – Impulse für industrielle Ressourceneffizienz

In den Laboren deutscher Forschungsinstitute und Unternehmen wird eine Vielzahl an Ideen geboren und erprobt, die dabei helfen, die Wirtschaft ressourcenschonend und klimaneutral aufzustellen. Sie dienen einer Kreislaufwirtschaft, die den Wirtschaftsstandort Deutschland unabhängiger von Rohstoffimporten und damit resilienter machen soll und sich noch stärker dem Klimaschutz verpflichtet. Bevor diese Innovationen auf dem Markt angewandt werden können, brauchen sie eine wissenschaftlich fundierte Weiterentwicklung im industriellen Maßstab. Diese Prüfung auf technische und wirtschaftliche Machbarkeit erfolgt in Prototyp- und Demonstrationsanlagen, die wirtschaftlich nicht ohne Risiko sind.

MinR Dr. Wolf Junker, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Referatsleitung 726 Ressourcen, Kreislaufwirtschaft; Geoforschung

Deshalb rief das Bundesforschungsministerium 2014 die Fördermaßnahme »r+Impuls – Impulse für industrielle Ressourceneffizienz« ins Leben, die diesen entscheidenden und riskanten Schritt finanziell unterstützt. Im Zeitraum von 2016 bis 2023 wurden 26 Forschungsverbünde aus Wissenschaft und Wirtschaft mit rund 31 Millionen Euro gefördert. Die beteiligte Industrie hat rund 34 Millionen Euro an Eigenmitteln eingesetzt. Schwerpunkte der Verbünde waren innovative Technologien, die Rohstoffe im Kreislauf führen und den Material- und Energieverbrauch in rohstoffintensiven Produktionssystemen senken. Auch der Ersatz seltener Rohstoffe bzw. deren Rückgewinn aus Abfallströmen und die Nutzung des Treibhausgases CO_2 als Rohstoff wurden erfolgreich im Industriemaßstab erprobt.

Die vorliegenden Forschungsergebnisse zeigen signifikante Einsparpotenziale für Ressourcen. Bei deutschlandweiter Umsetzung aller Ergebnisse – so eine Hochrechnung des Transfervorhabens unter Federführung des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI – wäre es möglich, pro Jahr rund 10,6 Millionen Tonnen Material (Rohstoffäquivalente) einzusparen. Das wäre ein potenzieller Anteil von rund 27 Prozent am Ziel der Bundesregierung, jährlich 39,6 Millionen Tonnen Rohstoffäquivalente einzusparen. Dies ist ein bedeutender Beitrag zur Ressourcenschonung und zur Sicherung des Hightech-Standorts Deutschland, unter Klimaschutzaspekten in einer Kreislaufwirtschaft.

Ergänzend zu den Forschungen entstand ein Lernpaket für Schülerinnen und Schüler der Klassenstufen acht bis zehn. Jugendliche können damit selbst zu Ressourcen-Forschenden werden. Dieses Lernpaket ist deutschlandweit nutzbar und schult die nächste Generation für ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft und Klimaschutz.

Neue Ressourceneffizienzpotenziale auf dem Weg in tragfähige Geschäftsmodelle

Seit dem Start der ersten geförderten Vorhaben 2016 hat das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI die Fördermaßnahme r+Impuls mit seinem Forschungsprojekt r+TeTra wissenschaftlich begleitet (s. S. 56). Ein Rückblick auf Zielsetzung, Herangehensweise und Wirkungen von r+Impuls.

Von Dr. Katrin Ostertag, Leiterin des Competence Centers Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme, Fraunhofer ISI

Die deutsche Wirtschaft setzt jährlich etwa drei Milliarden Tonnen (Primär-)Rohstoffe entlang der Wertschöpfungsketten von Waren und Dienstleistungen ein, insbesondere Minerale und Metalle sowie Energierohstoffe. Diese Zahl ist in den vergangenen Jahrzehnten immer weiter angestiegen. Damit geht einher, dass die Rohstoffentnahmen im In- und Ausland bei Gewinnung und Verarbeitung erhebliche Kosten und zum Teil gravierende Umweltbelastungen verursachen. Gleichzeitig ist die sichere Bereitstellung von Rohstoffen eine zentrale Grundlage für die produzierende Industrie am Standort Deutschland, für das Gelingen der Energiewende und für den Wohlstand in unserer Gesellschaft.

Angesichts des weltweit steigenden Rohstoffbedarfs und großer wirtschafts-, sicherheits- und umweltpolitischer Herausforderungen verändert Deutschland seine linear geprägte Wirtschaftsweise in Richtung einer effizienten, ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft, um den Rohstoffbedarf zu senken. Auch für den Klimaschutz spielt der Ausbau der Kreislaufwirtschaft eine große Rolle. Denn wenn zum Beispiel besonders energieintensive Materialien in höheren Anteilen substituiert oder wiederverwendet werden, reduziert das die Emission von Treibhausgasen und kann entscheidend dazu beitragen, bis 2045 Klimaneutralität zu erreichen. Für die deutsche Wirtschaft eröffnen sich neue Perspektiven: Neue Ressourceneffizienzpotenziale zu entdecken und in tragfähigen Geschäftsmodellen umzusetzen, ist das Gebot der Stunde. Technologien für eine ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft sind dabei wesentliche Treiber für Innovationen und die Grundlage für neue Produkte und Verfahren. Hierdurch kann sich die deutsche Wirtschaft Wettbewerbsvorteile verschaffen und ihre Rohstoffproduktivität verbessern, d. h. eine höhere Wertschöpfung bezogen auf die eingesetzte Rohstoffmenge erzielen. Dies schafft die Grundlage eines nachhaltigen Wirtschaftswachstums, das vom Rohstoffbedarf und den damit verbundenen Umweltauswirkungen entkoppelt ist.

Aus diesen Gründen unterstützt das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die Forschung zu einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft schon seit vielen Jahren im Rahmen der Forschung für nachhaltige Entwicklung (FONA) mit verschiedenen sektoralen, technologischen und inhaltlichen Schwerpunkten. So wurden zum Beispiel im Rahmen der im Jahr 2013 abgeschlossenen BMBF-Fördermaßnahme »r²-Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Rohstoffintensive Produktionsprozesse« vielversprechende Potenziale für industrielle Effizienzsteigerungen im Rohstoff- und Recyclingsektor aufgezeigt. Auch auf dem Feld der chemischen Prozesse und stofflichen Nutzung von CO_2 hat die vom BMBF geförderte Forschung erhebliche Einsparpotenziale offenbart. Bei Realisierung dieser Potenziale wären neben Verbesserungen im Nachhaltigkeitsindikator »Rohstoffproduktivität« auch signifikante Verbesserungen in den weiteren Nachhaltigkeitsindikatoren »Energieproduktivität«, »Primärenergieverbrauch« und »Treibhausgasemissionen« möglich.

Damit die Umsetzung dieser Potenziale und der Wandel zur Kreislaufwirtschaft im gebotenen engen Zeitrahmen gelingen kann, müssen Ideen für den Umbau der Wirtschaft zügig zu Innovationen führen, die auf dem Markt ankommen. Genau hier setzte die Fördermaßnahme r+Impuls an: das Programm unterstützte die Übertragung vielversprechender FuE-Ergebnisse in die industrielle Praxis, indem es Lösungen, die bereits eine gewisse technologische Reife haben, gezielt förderte. In dieser kritischen Phase des Entwicklungsprozesses wurde die Wirtschaft dazu ermutigt, die verbleibenden Entwicklungsrisiken zu wagen und die entscheidenden Schritte bis zum Markteintritt zu gehen.

Die enge Verzahnung von FuE mit der späteren Anwendung, die Erprobung in Prototyp-, Pilot- und Demonstrationsanlagen sowie die Markteinführung neuer Technologien sind in r+Impuls zentral. Die Förderphilosophie von r+Impuls erkennt an, dass eine Übertragung von Ergebnissen aus dem Labor- in den Industriemaßstab in den allermeisten Fällen begleitende FuE zur Maßstabsvergrößerung erfordert und darüber hinaus – obwohl mit Umweltvorteilen und gleichzeitigen Gewinnerwartungen verbunden – mit hohen finanziellen und technischen Risiken verbunden ist, die einzelne Unternehmen nicht allein tragen können. Dass der Schritt in die Anwendung tatsächlich Risiken birgt, zeigen drei Vorhaben, die nach dem ersten Meilenstein abgebrochen wurden, zum Beispiel weil sich Marktverhältnisse ungünstig entwickelt haben. Demgegenüber stehen 23 Vorhaben, die erfolgreich zu Ende geführt wurden und spannende Erkenntnisse hervorbringen konnten.

Die r+Impuls-Vorhaben wurden unter industrieller Federführung und in enger Partnerschaft mit Hochschulen und/oder außeruniversitären Forschungseinrichtungen durchgeführt. Die Herangehensweisen sind integrativ und fachübergreifend. Sie berücksichtigen Stoff- und Energieeinsätze der gesamten Wertschöpfungskette und haben auch mögliche Problemverschiebungen und Leistungs- bzw. Qualitätseinbußen im Blick. Sie repräsentieren ein breites Spektrum innovativer Technologien, die Material- und Energieverbrauch in rohstoffintensiven Produktionssystemen senken, kritische Rohstoffe substituieren, wertvolle Rohstoffe aus Abfallströmen zurückgewinnen oder das Treibhausgas CO_2 als Ressource nutzen. Damit leistet die Fördermaßnahme r+Impuls signifikante Beiträge zu den Zielen der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie, insbesondere zur Steigerung der Rohstoffproduktivität. Aber auch Energieeffizienz wird adressiert und Treibhausgasemissionen sowie der Primärenergieverbrauch werden gesenkt.

Die Forschung und Entwicklung in r+Impuls war eingebettet in die Hightech-Strategie der Bundesregierung, die eine zukunftsweisende, ressortübergreifende Innovationspolitik formuliert hat. Die Ergebnisse von r+Impuls stützen nun die aktuelle »Zukunftsstrategie Forschung und Innovation«, die das Ziel einer kreislauffähigen Wertschöpfung und einer ressourceneffizienten, wettbewerbsfähigen Industrie prominent weiterverfolgt. Darüber hinaus trägt r+Impuls auch zum Aktionsplan »Circular Economy« der EU bei, der ein wesentlicher Bestandteil des Europäischen Green Deals ist und die Voraussetzungen für nachhaltiges Wachstum und Klimaneutralität schafft.

Cluster der r+Impuls-Vorhaben

Für die Steigerung der Ressourceneffizienz in industriellen Prozessen besteht über alle Branchen hinweg ein großes Spektrum an möglichen Ansatzpunkten. Das spiegelt sich auch in den Vorhaben wider, die in r+Impuls gefördert wurden. Diese Ansatzpunkte lassen sich in drei Cluster unterteilen, die unten näher beschrieben werden: Effizienz, Substitution und Recycling. Einige Vorhaben sind breit aufgestellt und verfolgen integrierte Lösungen, die Ansätze aus verschiedenen Clustern kombinieren. So kann zum Beispiel das Recycling ermöglicht werden, indem in einem Produkt ein Material substituiert und durch ein recyclingfähigeres Material ersetzt wird. In jedem Cluster finden sich außerdem ganz unterschiedliche Branchen und Materialien wieder, für

Effizienz
In das Cluster Effizienz fallen Ansätze, die den Material- und Energieverbrauch in Produktionssystemen senken und die Ressourceneffizienz auf diese Weise steigern. Die Verbesserungen können sowohl den Produktionsprozess als auch das (Zwischen-) Produkt und dessen Betrieb betreffen. Die Effekte werden zum Beispiel erreicht durch eine Miniaturisierung von Bauteilen oder die Weiterentwicklung von Leichtbauansätzen. Weitere Potenziale werden durch die Zusammenführung von und Reduktion der Zahl der Pro-

Substitution
Im Cluster Substitution werden Stoffe ersetzt, weil sie als wirtschaftsstrategische Rohstoffe von besonderen Versorgungsrisiken betroffen sind und deshalb durch leichter verfügbare Stoffe ausgetauscht werden. Eine weitere Motivation liegt darin, den Einsatz und die Freisetzung besonders treibhausschädlicher Stoffe im Produktionsprozess zu vermeiden. Und schließlich

Recycling
Typische Herausforderungen im Recycling liegen in der Beschaffenheit und Aufbereitung des Ausgangsmaterials und in der erzielten Qualität und Reinheit des Rezyklats. Im Cluster Recycling geht es um eine breite Palette verschiedener Ausgangsstoffe, die dem Recycling zugeführt werden. Auch die zurückgewonnenen Materialien sind zahlreich. Viele Lösungen adressieren die Wiedergewinnung von Metallen. Das können zum Beispiel hochwertige Edel- bzw. Buntmetalle oder Legierungselemente sein. Als Ausgangsmaterial kommen häufig feste oder flüssige Reststoffströme aus der Produktion zum Einsatz, aber auch gemischte Schrotte oder Altprodukte. Durch die Wieder-

die Lösungen zur Steigerung der Ressourceneffizienz entwickelt wurden. Alle Cluster tragen auch zur Versorgungssicherheit mit wirtschaftsstrategischen Rohstoffen bei.

Über die technologischen Entwicklungsvorhaben hinaus wurde ein übergreifendes Begleit- und Transferprojekt (r+TeTra) gefördert. Neben den Aufgaben der Vernetzung, der Wissenschaftskommunikation und der Unterstützung des Ergebnistransfers hat das Vorhaben r+TeTra auch die Wirkungen der Forschungsförderung auf die Ressourceneffizienzpotenziale und auf weitere Nachhaltigkeitsziele untersucht (s. S. 56–57).

r+TeTra

zessschritte erreicht. Auf Ebene des Produktionsprozesses spielt die Abfallvermeidung eine Rolle. Auf Produktebene können durch die Systemintegration mehrerer Komponenten Effizienzsteigerungen erreicht werden. Lesen Sie mehr zu den r+Vorhaben im Cluster Effizienz auf den Seiten 10–23.

MAREMO
IVAN
Re-Mining
DreamCompoundConti
PUMOCON
PowderR²eSint
IMPROVE

geht es in diesem Cluster um die Nutzung nicht-fossiler Kohlenstoffquellen als alternative Rohstoffbasis in der Chemie- und Kunststoffindustrie: Statt Kohlenstoff aus fossilen Quellen wird das Treibhausgas CO_2 aus der Luft oder aus Abgasen als Ressource genutzt. Lesen Sie mehr zu den r+Vorhaben im Cluster Substitution auf den Seiten 24–35.

ecoFluor
DreamResourceConti
aha
Eco-Pump-Drive
EKALGU
Production Dreams

gewinnung der Metallfraktion aus dem Ausgangsstoff entsteht in manchen Fällen die Möglichkeit, den verbleibenden mineralischen Reststoff auf ein so hohes Qualitäts- und Reinheitsniveau zu heben, dass ein vermarktbares Produkt daraus entsteht. Hier gehen die Wiedergewinnung von metallischen und mineralischen Wertstoffen Hand in Hand. Aber auch das gezielte Wiedergewinnen nicht-metallischer Roh- und Wertstoffe, zum Beispiel die Herstellung bestimmter Kunststoff-Rezyklate, waren Gegenstand in r+Impuls. Lesen Sie mehr zu den r+Vorhaben im Cluster Substitution auf den Seiten 36–55.

EZiRec
Edelmetallabsorber
KOMPASS
ReeL
STRATEGO
PLUS
GoldRecApp
KONDEOS
Circular Packaging
iCycle

IVAN – Aufbau und Erprobung von Anlagen zur Herstellung von Kontaktwerkstoffen der Niederspannungstechnik mit reduziertem Silbergehalt über innovative Verbindungs- und Aufbautechnik

Das Forschungsteam des Projekts »IVAN« spart wertvolles Silber in Kontakten für elektromechanische Schaltgeräte. Im industriellen Maßstab erprobte es die sogenannte Plus-Technologie. Dank dieser sind die silbereffizienten Kontakte hochgradig flexibel und halten länger.

Silber

Dem stetig steigenden Silberbedarf begegnet das Team von »IVAN« durch die Schaffung sparsamerer, haltbarerer Schaltkontakte.

Gefragter Hightech-Werkstoff

Das Edelmetall Silber ist als Werkstoffbasis in Schaltgeräten aufgrund seiner technischen Kontakteigenschaften unersetzbar. Nicht nur in der Elektrotechnik, auch in Zukunftstechnologien ist Silber von zunehmender Bedeutung, etwa in flexiblen Displays oder LED. Deshalb steigt der Silberbedarf. Derzeit werden allein 400 Tonnen Silber jährlich in Deutschland für Schaltgeräte der industriellen Niederspannungselektronik gebraucht, etwa für Schalter und Schaltschütze von Elektromotoren. Dank des Edelmetalls funktioniert das Ein- und Ausschalten des elektrischen Stroms problemlos.

Die neue Plus-Technologie ermöglicht es, die Lebensdauer von silberhaltigen Kontakten dieser Schaltgeräte deutlich zu erhöhen. Vorangegangene Forschungen ergaben, dass sich damit der Bedarf des Edelmetalls um bis zu 40 Prozent reduziert. Diese Technologie in den industriellen Maßstab zu überführen, war Gegenstand des zweijährigen Forschungsprojekts »IVAN«.

Testlauf für Massenproduktion

Die Firma SAXONIA Technical Materials GmbH entwickelt und produziert technische Werkstoffe, die vor allem auf den besonderen Eigenschaften von Silber, speziellen Nichteisenmetallen sowie deren Legierungen basieren. Im Vorprojekt zu »IVAN« wurde erfolgreich eine Pilotanlage zur Musterfertigung von stabilen Mehrschichtverbund-

Kontakt
Andreas Koffler
SAXONIA
Technical Materials GmbH
Rodenbacher Chaussee 4
63457 Hanau

Tel.: +49 6181 9061-3330
E-Mail:
andreas.koffler@saxonia-tm.de

Ergebnisse
Die im Projekt entwickelte Technologie zur Herstellung von Schaltkontakten mit erhöhter Lebensdauer bei gleichzeitiger Erhöhung der Produktivität und Senkung des Ressourcenverbrauchs wurde mittlerweile vollständig in die Produktion überführt und hat sich in allen Anwendungen erfolgreich bewährt.

Der größte volkswirtschaftliche Nutzen ergibt sich durch die nun mögliche exakte Auslegung der Schaltgeräte und deren verlässliche Performance in der täglichen Anwendung bis zum geplanten Lebensdauerende. Weiterhin wurden durch die effizientere Herstellung Verbrauchsmaterialien und Arbeitsschritte eingespart und Abfälle vermieden.

werkstoffen entwickelt. Lebensdauertests beim Kooperationspartner, der Firma Siemens, zeigten das Potenzial der neuen Technologie auf: Die gefertigten Kontakte enthalten weniger Silber und zeichnen sich durch hohe Verbundfestigkeit und damit hohe Abbrandfestigkeit aus.

Langlebiger und effizienter
Im Projekt »IVAN« wurde dieses Potenzial auf wirtschaftliche Machbarkeit überprüft. Besonderer Fokus des Vorhabens lag auf den Aspekten Arbeits- und Prozesssicherheit sowie Qualität und Nachhaltigkeit.

Am SAXONIA-Firmenstandort in Hanau wurden Prozessmodule zur Massenfertigung der silberreduzierten Kontaktwerkstoffe konzipiert, aufgebaut und in die Produktion integriert. Die Forscherinnen und Forscher konzentrierten sich dabei auf Produktionslinien für Schütz- und Relaiskontakte.

Durch die Einführung innovativer Prozessschritte konnte gleichzeitig die Edelmetalleffizienz der Schützkontakte sowie deren Lebensdauer erhöht werden. Für die Relaiskontakte hat das Forschungsteam den Zuschnitt der Kontakte effizienter und verlustärmer gestaltet. Dadurch können die Materialabmessungen flexibel und mit wenig Ausschuss bis hin zu Mikroprofilen skaliert werden.

Die im »IVAN«-Projekt entwickelten Prozessmodule sind erste Bausteine einer hochflexiblen Fertigungslinie, die Produktentwicklungszyklen und Markteinführungszeiten auf ein Minimum reduzieren. Bis zu 1.500 Produkte wollte die SAXONIA auf die neue Technologie umstellen.

Die im Projekt IVAN durchgeführten Arbeiten trugen in Kombination mit den Ergebnissen des Vorprojektes »RAVE« wesentlich dazu bei, eine weltweit neue und hocheffiziente Technologie zur Herstellung von Schaltkontakten zu industrialisieren. Die damit hergestellten Produkte sind wesentlich für die Fertigung von qualitativ hochwertigen und wettbewerbsfähigen Schaltgeräten in Deutschland und Europa.

IMPROVE – Anwendungsentwicklung innovativer Leistungselektronik für die Rohstoff- und Energieoptimierung von Umwälzpumpen

Das Team von »IMPROVE« forschte an der Reduzierung des Materialverbrauchs von Umwälzpumpen für Heizungs-, Klima- und Solaranlagen.

Wärmepumpen

Viele Millionen Umwälzpumpen müssen jährlich ausgetauscht werden. Miniaturisierte Leistungselektronik kann ihren Wirkungsgrad erhöhen.

Die Innovation: Kleiner, höhere Drehzahl
Umwälzpumpen werden vor allem in Gebäuden für den Flüssigkeitstransport in Heizungs-, Klimatisierungs-, Trinkwasser- und Solaranlagen eingesetzt. Auch in chemischen und verfahrenstechnischen Prozessen sowie in der Wasserversorgung werden sie benötigt. Europaweit sind mehr als 140 Millionen Umwälzpumpen in Betrieb, die im Durchschnitt alle zehn Jahre ersetzt werden müssen. Damit entsteht allein in Europa ein jährlicher Austauschbedarf von 14 Millionen Umwälzpumpen.

Der Markt für das ressourcen- und energieeffiziente Modell von »IMPROVE« ist entsprechend groß. Die Innovation des Geräts ist eine miniaturisierte Leistungselektronik, die in die Motoren der Pumpen integriert wird. So erhöht sich die Drehzahl der Pumpen, was – bei konstanter Rotorumfangsgeschwindigkeit zur Aufrechterhaltung konstanten Drucks – die Baugrößen und damit auch den Materialbedarf verringert. Das gilt für die Pumpe und für den Motor. Mit dem optimierten Pumpendurchmesser und dem drehzahlgeregelten Betrieb der Pumpe lässt sich der Wirkungsgrad der Geräte je nach Betriebszustand um etwa ein Viertel bis ein Drittel erhöhen. Der Hauptentwicklungsaufwand für die Innovation liegt in der Miniaturisierung und Integration der Leistungselektronik. Damit verbessern sich sowohl Ressourcen- als auch Energieeffizienz der Geräte signifikant.

Kontakt
Dr.-Ing. Jochen Mades
KSB SE & Co. KGaA
Johann-Klein-Str. 9
67227 Frankenthal (Pfalz)

Tel.: +49 6233 86-3260
E-Mail: jochen.mades@ksb.com

Zweistufige Strategie

Mit einer zweistufigen Strategie arbeitete »IMPROVE« an der Miniaturisierung und Integration der Leistungselektronik. Zunächst wurde die Schaltung spezifisch auf die Anwendung ausgelegt, indem zum Beispiel die Energiespeicherung durch die rotierenden Massen der Pumpe eingerechnet wurde. Im zweiten Schritt erfolgte die bestmögliche Integration der verbleibenden Komponenten mit Hilfe einer neuen Aufbautechnik: Die elektromechanische Motorkonstruktion wurde überarbeitet, die miniaturisierte Leistungselektronik produktionsgerecht ausgelegt und konstruktiv in das System integriert.

Entwicklung im Verbund

Entwicklungspartner im Vorhaben »IMPROVE« waren die KSB SE & Co. KGaA aus Frankenthal, die Hochschule Kaiserslautern mit dem Forschungsschwerpunkt Hocheffiziente technische Systeme und die Technische Universität Berlin mit dem Institut für Hochfrequenz- und Halbleiter-Systemtechnologien. Während der dreijährigen Laufzeit entwickelte die Hochschule Kaiserslautern die übergeordnete Versuchs- und Demonstrationsanlage, die Berliner Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler entwickelten die Leistungselektronik weiter. KSB führte als Entwickler und Produzent von Pumpen und deren elektrischen Antrieben und Regelungssystemen die Pumpe, den Motor und die Leistungselektronik zusammen und testete das System. Nach erfolgreichem Abschluss der Tests entstand in der Hochschule Kaiserslautern eine industrietaugliche Demonstrationsanlage. Hier wurde das Pumpensystem auf Funktionstüchtigkeit überprüft.

Ergebnisse

Durch den Einsatz von neuen Halbleitern auf Basis von Galliumnitrid (GaN) ließ sich die Schaltfrequenz um ein bis zwei Größenordnungen erhöhen. Die Power-Factor-Correction (PFC)-Schaltung des Motors wurde basierend auf der GaN-Technologie neu entworfen. Mit der »Bridgeless-PFC«-Topologie und ihrer minimierten Bauteilanzahl erreicht die neue Schaltung im Vergleich zur traditionellen Variante einen höheren Wirkungsgrad. Durch zusätzliche Kondensatoren im Rückstrompfad reduziert sich das Gleichtaktrauschen der Schalter. Zudem wurden wichtige Filterschaltungen angepasst, und die parasitäre Kommutierungsinduktivität konnte minimiert werden.

Eine größere Herausforderung war die Identifizierung und Eliminierung von durch Schaltflanken verursachten internen Funktionsstörungen. Um eine wichtige Voraussetzung für die Verringerung des Bauvolumens zu schaffen, wurde die Schaltfrequenz von 140 Kilohertz gewählt. Die Eingangsdrossel, ein für das Systemdesign entscheidendes Bauteil, wurde für einen hohen Wirkungsgrad der PFC sowohl bei maximaler Ausgangsleistung von 800 Watt als auch bei Teillasten ausgelegt.

Eine Pumpe wird sehr oft in Teillast betrieben. Anhand zahlreicher Simulationen der PFC wurde deshalb die Induktivität der Eingangsdrossel so gewählt, dass auch im Teillastbereich der Wirkungsgrad hoch ist. Das Volumen der Drossel wurde auf etwa ein Siebtel reduziert. Ein Konzept für die Einbettung der GaN-Komponenten in die Leiterplatte mit der Möglichkeit einer optimierten Entwärmung wurde ausgearbeitet, womit sich in Zukunft das Kühlkörpervolumen verkleinern lässt.

MAREMO – Materialeffizienter Leichtbau für ressourceneffiziente Mobilität

Das Projektteam von »MAREMO« nutzt recycelte Kohlenstofffasern für Fahrzeugbauteile. Die Innovation: Erstmals sind diese leichten und effizienten Bauteile für unterschiedliche Belastungen ausgelegt.

Kohlenstoff

Die »MAREMO«-Halbzeuge haben kaum Verschnitt und können je nach Beanspruchung des Bauteils gezielt geschichtet werden.

Die Vorteile der Kohlenstofffasern
Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) gehören zu den etablierten Strukturwerkstoffen im Automobilbau. Gegenüber metallischen Werkstoffen haben diese Faserverbunde technische, wirtschaftliche und ökologische Vorteile: Sie sind deutlich leichter und reduzieren damit Kraftstoffverbrauch und Kohlendioxidemissionen der Fahrzeuge. Die Herstellung von Kohlenstofffasern ist jedoch erdöl-, kosten- und energieintensiv. Damit eine Energie- und Ressourceneffizienz über das gesamte Produktleben hinweg erzielt werden kann, braucht es konstruktive und technologische Innovationen – sowohl für das Material als auch für die Herstellung.

Bislang wurden Bauteile aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen für Fahrzeuge vorwiegend als Schalenbauteile gefertigt. Sie bestehen aus geschichteten textilen Flächenhalbzeugen, sogenannten Multiaxialgelegen. Diese Produktionsweise hat zwei Nachteile: Zum einen können die verwendeten Flächenhalbzeuge zu kaum mehr als 50 Prozent ausgenutzt werden, da beim Zuschnitt der einzelnen Laminatlagen viel Verschnitt anfällt. Zum anderen sind sie in ihrer gesamten Fläche für die gleichen Belastungen ausgelegt. Werden einzelne Stellen des Bauteils höher beansprucht, muss der Schichtaufbau dort vergrößert werden, was bisher nur mit hohem zusätzlichen Produktionsaufwand möglich ist.

Hochwertige Faserabfälle
An dieser Herausforderung setzt »MAREMO« an: Seine Flächenhalbzeuge bestehen aus Faserverbunden, die beanspruchungsgerecht und endkonturnah gefertigt werden.

Kontakt
Anne Laue
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Str. 88
09126 Chemnitz

Tel.: +49 37153971022
E-Mail:
anne.laue@iwu.fraunhofer.de

Ergebnisse
Für die Entwicklung neuartiger Towpregs hat das Fraunhofer IWU eine Pilotfertigungsanlage der Firma Cetex in Betrieb genommen. Die modular aufgebaute Anlage ermöglicht die Faserspreizung, Imprägnierung mit Reaktionsharzen und Aufwicklung der vorimprägnierten Faserhalbzeuge. Durch die Variation von Faser- und Harzsystemen gelang die Entwicklung neuer Towpreg- Materialsysteme. Um die wirtschaftlichen Aspekte der Großserie im Blick zu behalten, haben die Projektpartnerinnen und -partner eine automobilgerechte kostengünstige Faserverstärkung abgestimmt. Darüber hinaus identifizierten sie trotz der langen und anspruchsvollen Anforderungsliste ein geeignetes Harzmaterial für das »MAREMO«- Vorhaben und verwendeten es für die Herstellung von neuartigem Towpreg-Material. Das neu entwickelte Towpreg wurde dann sowohl nach seinen mechanischen Eigenschaften als auch nach seinen Herstellungskosten charakterisiert.

Diese Near-Net-Shape-Halbzeuge haben kaum Verschnitt und bestehen unter anderem aus Recyclingmaterial. Auf einem flächigen Vlies aus Basismaterial werden individuell angepasste, mit Duromer vorimprägnierte Kohlenstofffaserbänder aufgebracht, sogenannte Towpregs. Je nach Belastungsgrad erhöht sich die Towpreg-Schicht. Bauteile ohne höhere Belastung bleiben ohne Endlosfaserverstärkung.

Für »MAREMO« wurde das Material des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU ausgewählt. Es wird vorimprägniert und dient dann sowohl als Ablegegrund für die Towpregs als auch – zur Verstärkung des herzustellenden Bauteils – als Recycling-Prepregs selbst. Acht Einrichtungen aus Wissenschaft und Wirtschaft haben sich im Projekt »MAREMO« zum Forschungsverbund zusammengeschlossen. Die Produktion der effizienten Halbzeuge erfolgte in einem automatisierten Prozess, bei dem die bauteilspezifischen Tape-Muster auf dem Basismaterial abgelegt und angeheftet wurden.

Schritt für Schritt hat das Forschungsteam Faserverstärkungen und Bauteilbeanspruchungen aufeinander abgestimmt. Aus der Bauteilauslegung wurden dann geeignete Ablegemuster für die Towpregs abgeleitet. Die Bauteilkonstruktion wurde bei der Wethje Carbon Composites GmbH und am Fraunhofer IWU durchgeführt. Als Prototyp diente eine von BMW spezifizierte Automobilstruktur. Die gewonnenen Erfahrungen des dreijährigen Forschungsprojekts mündeten in einer praxistauglichen Konstruktions- und Auslegungsanleitung.

Um die neuartigen Tapes zum Musterbauteil zu verarbeiten, kommt die im Projekt entwickelte »MAREMO«-Legeanlage zum Einsatz. Diese Anlage ging aus der Zusammenarbeit von AFPT, Tisora und Cetex hervor, sie wurde bereits im Hinblick auf ihre Funktionsfähigkeit erprobt und in ersten Iterationen optimiert. Das geplante »MAREMO«-Bauteil wurde unter den Vorgaben des Partners BMW von der Firma SWMS zu einem Legeprogramm aufbereitet, sodass die vollautomatische Ablage der Tapes zum Legeabbild des Bauteils an der Legeanlage möglich ist. Weiterhin veranlasste BMW die mechanische Bearbeitung des Bauteilwerkzeugs, das für die spätere Bauteilherstellung an die Firma Wethje übergeben wurde.

Re-Mining – Wertstoffgewinnung aus sulfidischen Spülhalden und deren umweltgerechte Sanierung

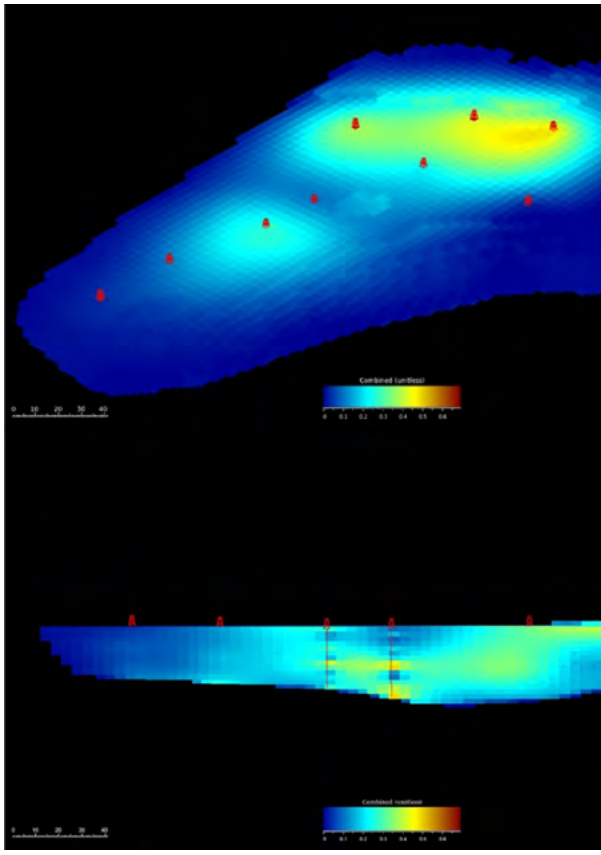
»Re-Mining« nutzt Biolaugung, um wertvolle Metalle aus Bergbauhalden zu gewinnen. Gleichzeitig befreit die Technologie den Abraum von Schadstoffen.

Indium ▪ Zink ▪ Kupfer

Die Technologie: Biolaugung
Das Augenmerk des Projekts »Re-Mining« gilt den Schätzen, die im Abraum einstiger Bergbauhalden ruhen: wichtige Metalle und Mineralien wie Indium, Zink und Kupfer. Diese werden für die Wirtschaft zurückgewonnen. Der verbleibende Abraum wird zusätzlich von Schadstoffen befreit und verbleibt als Halde ohne weitere Umweltbelastungen.

Für dieses »Re-Mining« nutzt das Projektteam die Biolaugung (Bioleaching), die in einem Vorgängerprojekt auf ihren doppelten Verwendungszweck hin weiterentwickelt wurde. Bis dahin wurden die Mikroorganismen in der Biolaugung entweder für die Rohstoffgewinnung oder für die Schadstoffbeseitigung eingesetzt. Durch das neue Verfahren gelang es, bis zu 90 Prozent der Wertstoffe Indium, Zink und Kupfer aus Bergbauhalden zurückzugewinnen und gleichzeitig das Haldenmaterial größtenteils von Schadstoffen wie Arsen und Cadmium zu befreien.

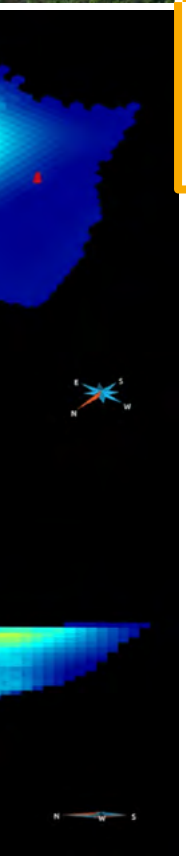
Die Module der Innovation
Das neue Verfahren wurde in einer industriellen Demonstrationsanlage am Standort Freiberg umgesetzt. Diese Anlage zeigt insbesondere auch für potenzielle nationale und internationale Kundschaft die Funktionsfähigkeit in der industriellen Praxis auf. Sie besteht aus drei Modulen und ist semimobil aufgebaut. Mit geringem Aufwand kann sie auf andere Halden transportiert und dort installiert werden. Das erste Modul der Anlage ist die Biolaugung. In dem Airlift-Schlaufenreaktor schließen Mikroorganismen das Haldenmaterial bei Raumtemperatur und einem bestimmten pH-Wert auf.



Bei der Biolaugung werden Mikroorganismen eingesetzt, die gleichzeitig Wertstoffe zurückgewinnen und Schadstoffe beseitigen können.

Kontakt
Falk Thürigen
G.E.O.S.
Ingenieurgesellschaft mbH
Schwarze Kiefern 2
09633 Halsbrücke

Tel.: +49 3731 369-133
E-Mail:
f.thuerigen@geosfreiberg.de



Um das möglichst stabile und unschädliche Restmaterial aus der Laugenlösung zu filtern, wird diese in feste und flüssige Bestandteile getrennt. Im Wertstoffmodul erfolgt die hydrometallurgische Trennung, im Umweltmodul kommt es schließlich zur Abtrennung verbliebener Schadstoffe. Das Prozesswasser wird im Kreislauf geführt und wiederverwendet.

Unter der Federführung der G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft arbeiteten die Saxonia Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH sowie das Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie. Die G.E.O.S. als geotechnische Dienstleisterin und Erfinderin der verwendeten Bioleaching-Technologie übernahm das Projektmanagement und gemeinsam mit dem Helmholtz-Institut die Planung, Konstruktion und Analyse der Anlage sowie die Marketingstrategie. Die Saxonia GmbH klärte alle Standortfragen und übernahm das Genehmigungsmanagement.

Die bisher im 0,1-m³-Bioreaktor gesammelten Erkenntnisse zur biologischen Laugung wurden auf die 2-m³-Pilotanlage hochskaliert und in die drei Hauptprozessschritte aufgeteilt: biologische Laugung im Airlift-Prinzip, Fest-Flüssig-Trennung mittels Dekanter sowie Nachbehandlung. Die gesamte Technik wurde in 20-Fuß-Seecontainern untergebracht, um ein nachträgliches Umsetzen der Anlage zu ermöglichen.

Ergebnisse

In der Projektlaufzeit wurde das Modul zur Biolaugung von der Entwicklung bis zur Errichtung und Inbetriebnahme fertiggestellt. Der Betrieb des Moduls ermöglichte die Optimierung wesentlicher Prozessparameter für die Biolaugung wie Temperatur, pH-Wert, Belüftungsintensität, die Vorkonditionierung des Haldenmaterials sowie der Anlagentechnik selbst. Insgesamt wurden ca. 8 m³ Biolaugungslösung hergestellt. Damit konnte dieser Prozessschritt von TRL4 erfolgreich in TRL5 überführt werden. Der nachgeschaltete Prozess der Schadstoffentfrachtung wurde im Labor- und Technikumsmaßstab etabliert. Die verfahrenstechnische, ökonomische Bewertung der Prozesse zeigte, dass für die Wirtschaftlichkeit der Prozesse gerade im Hinblick auf steigende Strompreise deutliche Verbesserungen bezüglich der Energieeffizienz notwendig sind. Vom ursprünglichen Plan, die gesamte Anlage auf einer Bergbauhalde zu errichten, wurde aufgrund des hohen behördlichen Genehmigungsaufwandes abgesehen.

Am Ziel der Errichtung der Anlage aus den entwickelten Modulen und Betreibung als Gesamtanlage wird nach wie vor festgehalten. Die dafür notwendigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden aktuell in dem Folgeprojekt »Re-MiningPlus« fortgeführt.

DreamCompoundConti – Ressourceneffizientes Verfahren zur Herstellung eines neuen Hochleistungsthermoplasts

Ein neuer Hochleistungskunststoff kann die Nachhaltigkeit und Leistungsfähigkeit von Produkten in Branchen wie Luftfahrt und Automobil deutlich erhöhen. In »DreamCompoundConti« wurde der Labormaßstab in einen kontinuierlichen Prozess überführt.

Thermoplast

Bei der Herstellung des Hochleistungsthermoplasts Polyoxazolidinon werden Emissionen und Energie eingespart.

Produktion eines neuen Hochleistungsthermoplasts
Die Materialpalette, auf die Ingenieurinnen und Ingenieure der Mobilitätsbranchen zurückgreifen können, ist in den vergangenen Jahren deutlich breiter geworden. Kunststoffe als Matrixmaterial in Kompositen spielen beispielsweise im Flugzeugbau eine wichtige Rolle. Bisher erfüllten jedoch nur sehr wenige dieser Materialien die spezifischen Anforderungen an Stabilität und Belastbarkeit, zudem sind ihre Herstellverfahren sehr energie- und ressourcenintensiv.

Das Forschungsteam von »DreamCompoundConti« entwickelte einen neuen Hochleistungsthermoplast (Polyoxazolidinon), der in Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit sowie in seinen mechanischen Eigenschaften anderen überlegen ist. Er beruht auf sehr gut zugänglichen Basis-Chemikalien. Zudem hat er einen ressourcenschonenderen Syntheseweg als andere Hochleistungskunststoffe. Dieser neue Kunststoff Polyoxazolidinon soll durch einen systematischen Upscalingprozess zur Industriereife gebracht werden.

Schlanker Produktionsprozess
Ein neuartiges Katalysatorsystem ermöglicht nun erstmalig die Herstellung von Polyoxazolidinon, einem modifizierten und besonders stabilen Thermoplast. Dabei werden im gesamten Prozess Kohlendioxid-Emissionen und Energie eingespart, weil im Vergleich zur Produktion herkömmlicher Hochleistungsthermoplaste aufwendige Prozessschritte entfallen. Im Vergleich zu am Markt verfügbaren Produkten ergeben sich messbare Ressourceneinsparmöglichkeiten: Ein Life Cycle Assessment der RWTH Aachen für den industriellen Herstellungsprozess hat gezeigt, dass bei der Produktion von Polyoxazolidinon mehr als 45 Pro-

Ergebnisse
Der Covestro Deutschland AG gelang erstmals der Übertrag der satzweisen Synthese von Polyoxazolidinon in den Pilotmaßstab. Grundlage hierfür lieferte die Formulierungsentwicklung auf Basis zugänglicher Basischemikalien sowie die Identifikation eines hochspezifischen Katalysatorsystems mit hoher Effizienz, das auch in Machbarkeitsstudien für ein kontinuierliches Verfahren erfolgreich eingesetzt wurde.

Die reproduzierbare Herstellung des Hochleistungsthermoplasten im großen Maßstab ermöglichte nicht nur eine

Kontakt
Dr. Sohajl Movahhed
Covestro Deutschland AG
Kaiser-Wilhelm-Allee 60
51373 Leverkusen

Tel.: +49 214 6009 7780
E-Mail:
sohajl.movahhed@covestro.com

zent weniger Treibhausgase ausgestoßen werden. Gleichzeitig kommt das neue kontinuierliche Verfahren mit weniger Lösungsmitteln aus. Im Vergleich zu konventionellen Prozessen wurde daher bei »DreamCompoundConti« eine deutlich bessere Ökobilanz erreicht.

Am Projekt »DreamCompoundConti« beteiligt waren Forschende des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik (LTT) der RWTH Aachen, des Lehrstuhls für Technische Chemie/Mehrphasenreaktionstechnik der Technischen Universität Berlin sowie Fachleute des Kunststoff-Zentrums Leipzig und der Airbus SE (assoziierte Partnerin). Die Covestro Deutschland AG erarbeitete ein kontinuierliches Produktionsverfahren und trieb als Koordinatorin des gesamten Projekts die Anwendungsentwicklung voran.

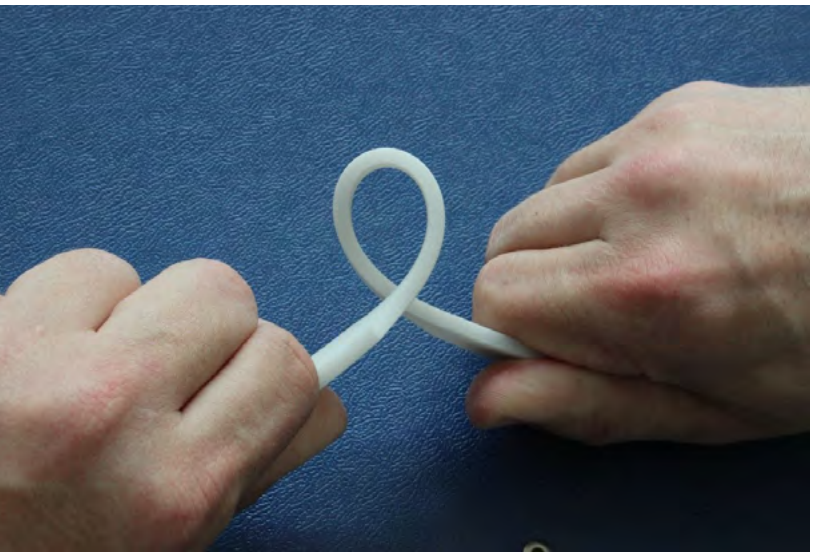
Konkretisierung der Prozess- und Anlagenparameter, welche die Basis für die technoökonomische Analyse der TU Berlin und der Lebenszyklusanalyse der RWTH Aachen darstellen, sondern auch eine umfängliche Materialevaluierung durch das Kunststoff-Zentrum in Leipzig. Mechanische Prüfungen und weitere Materialtests offenbarten eine sehr gute Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit sowie zu den Referenzmaterialien konkurrenzfähige mechanische Eigenschaften, was als Basis für die Marktevaluierung verwendet wurde.

Die ökologische Bewertung weist Ressourceneinsparmöglichkeiten verglichen mit herkömmlichen amorphen Hochleistungsthermoplasten auf, die sowohl in der Reduktion der CO_2-Emissionen als auch in der energieeffizienteren Produktion begründet liegen und somit insgesamt zu einer verbesserten Ökobilanz führen. Auf Basis einer vorläufigen Prozessanalyse und Kostenschätzung für Polyoxazolidinon konnte in einem Benchmarkvergleich mit bereits kommerzialisierten Referenzprodukten eine positive Technologiebewertung ermittelt werden. Infolge der erhaltenen Resultate wurden vielversprechende Marktsegmente und Anwendungsfelder identifiziert.

PowderR²eSint – Effizienter Kreislauf von Kunststoff-Restpulver aus dem Lasersinterprozess

Das Lasersintern ist einer der additiven Fertigungsprozesse von Kunststoffbauteilen mit hoher Qualität und guten mechanischen Eigenschaften, jedoch hinsichtlich der Ressourceneffizienz der Materialien vergleichsweise kostenintensiv und ineffizient. Im Projekt »PowderR²eSint« wurde das Verfahren ökonomischer und nachhaltiger gestaltet.

Kunststoffpulver



Verbesserte Werkstoffeigenschaften durch den Einsatz von Kreislaufwirtschaft

3D-Drucken mit Kunststoffpulver

Die additiven Fertigungsverfahren verzeichnen vor allem im industriellen Bereich eine zunehmende Nachfrage. Dabei ist insbesondere das Lasersintern (LS) durch die Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen einer der bevorzugten additiven Fertigungsprozesse von Kunststoffbauteilen mit hoher Detailgenauigkeit, Langzeitbeständigkeit und guten mechanischen Eigenschaften. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber anderen 3D-Druckverfahren wie dem Schmelzstrangverfahren oder der Verarbeitung von Fotopolymeren. Die Aufbaurate beim LS liegt bei ca. 10–15mm/h in Aufbaurichtung, was dieses Verfahren für die Serienproduktion von komplexen Kleinteilen und die Herstellung von vielfältigen großen Einzelstrukturteilen prädestiniert.

Nach bisherigem Stand der Technik ist das Lasersintern im Vergleich zu anderen additiven Fertigungsverfahren sehr kostenintensiv und ineffizient. Verfahrensbedingt werden von dem im Bauprozess eingesetzten Material nur 5–15 Prozent in Bauteile umgesetzt. Zudem ist das Kunststoffpulver aus dem Bauraum aufgrund der hohen thermischen Belastung während der Verarbeitung nur eingeschränkt wiederverwendbar. Damit kann Restpulver nur bedingt dem Prozess wieder zugeführt werden, weshalb bisher circa 30–40 Prozent entsorgt werden müssen.

Im LS-Verfahren werden neben dem ursprünglichen Anwendungsbereich, der Erstellung von Prototypen, bei denen vorrangig ein Bedarf

Kontakt
Dr. Sören Grießbach
GS-PRO GmbH
Rabensteiner Str. 3
09224 Chemnitz

Tel.: +49 371 2397626
E-Mail: info@gspro-gmbh.de

niedriger Stückzahlen vorherrscht, mittlerweile zunehmend Kleinserien gefertigt. Durch die Erschließung neuer Anwendungsfelder und die steigende Nachfrage für Serienteile, verbunden mit der Produktion höherer Stückzahlen und Losgrößen, erhöhen sich die Auslastungsquoten der Maschinen und auch die Anzahl der sich im Einsatz befindlichen Anlagen. Dieser Trend hat einen stark ansteigenden Mehrverbrauch der Ressource Kunststoff zur Folge, sodass ein Recyclingprozess unumgänglich ist.

Um das LS-Verfahren wirtschaftlicher zu gestalten, sollten im Forschungsprojekt die nachgelagerten Prozessschritte des LS-Verfahrens (Entpacken und Entpulvern) optimiert werden, damit das Restmaterial nicht verunreinigt wird und unter strenger Kontrolle der thermischen Eigenschaften erneut genutzt werden kann

Forschungsschwerpunkte und -team

Im Vorhaben »PowderR²eSint« hat das Projektkonsortium das LS-Verfahren ressourceneffizienter gestaltet. Die GEO Reinigungstechnik GmbH hat zum einen eine Entpack- und Entpulverungsanlage entwickelt, um automatisiert gedruckte Bauteile und das Bauraumpulver ohne Verunreinigungen sortenrein zu separieren, was die Taktzeit dieses bisher zeitintensiven Prozesses stark reduziert. Die GS-PRO GmbH und die Oerlikon AM haben kreislauffähige Pulvermischungen entwickelt, um einen ressourceneffizienteren, nachhaltigeren LS-Prozess zu realisieren und die Entsorgungsmengen von Altpulver auf ein Minimum zu reduzieren. Am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU und an der TU Chemnitz erfolgten die Materialuntersuchungen und Werkstoffcharakterisierungen.

Ergebnisse

Als Ziel des Forschungsvorhabens stand die Technologieentwicklung zur Widerverwendung von thermisch belastetem Altmaterial aus dem LS-Prozess im Fokus. Durch die Entwicklung einer vollständig kreislauffähigen Pulvermischung, in der das lose Restpulver aus dem Bauraum durch entsprechende Aufbereitung wiederverwendet wird, konnte dieses Ziel in Kombination mit der Entwicklung einer automatischen Entpack- und Entpulverungsanlage, die das Restpulver von den gefertigten Kunststoffteilen sortenrein separiert, erreicht werden.

Aus den Ergebnissen des Verbundvorhabens wurden die notwendigen Rahmen und Prozessbedingungen für einen effizienten Materialeinsatz abgeleitet und die Einführung und Erprobung eines geschlossenen Materialkreislaufes umgesetzt. Damit können bis zu 98 Prozent des Altpulvers zurückgewonnen werden, um es erneut dem Materialkreislauf zuzuführen.

Die Umsetzung der Projektziele ermöglicht die Optimierung des LS-Verfahrens zu einem ökonomischen, nachhaltigen Verarbeitungsprozess zur Herstellung von komplexen Geometrien für Prototypen und Kleinserien aus Kunststoff. Hierbei können die bisher angefallenen Kunststoffabfälle durch einen effizienten Ressourceneinsatz auf ein Minimum reduziert werden. Im Vergleich zur Produktion von Neupulver kann der Energieverbrauch des Aufbereitungsprozesses bis zu 45 Prozent geringer sein.

PUMOCON – Ressourcenoptimierung durch Systemintegration von Pumpe, Pumpenantrieb und -regelsystem

Ressourcenoptimierung durch Systemintegration: Für den Einsatz in Trinkwasserversorgung, Gebäudetechnik und Prozessindustrie bringt »PUMOCON« Pumpe, Pumpenantrieb und -regelung in einer gemeinsamen konstruktiven Einheit als optimiertes Aggregat zusammen.

Umwälzpumpen

Kleiner und leichter: Je weniger Material für Umwälzpumpenaggregate benötigt wird, desto mehr Ressourcen lassen sich bei der Herstellung einsparen.

Potenzial von ressourcenoptimierten Umwälzpumpen
Umwälzpumpen finden Einsatz in der Trinkwasserversorgung, in Heizungs-, Klimatisierungs- und Solarkreisläufen von Wohn-, Büro- und Gewerbegebäuden sowie in verfahrenstechnischen Kreisläufen der Prozessindustrie. Europaweit sind mehr als 140 Millionen Umwälzpumpen in Betrieb, die im Durchschnitt alle zehn Jahre ersetzt werden müssen. Um diesen Austauschbedarf zu decken, müssen allein in Europa jährlich 14 Millionen Umwälzpumpen produziert werden.

Um EU-Energieeffizienz-Anforderungen zu genügen, sind heute hocheffiziente Umwälzpumpenaggregate im Einsatz. Diese arbeiten lastabhängig mit variabler Drehzahl, bestehen aber immer noch aus verhältnismäßig langsam laufenden und daher großen und materialintensiven Pumpenstufen. Angetrieben werden solche Pumpensysteme durch ebenfalls relativ langsam drehende, große Elektromotoren sowie eine separat angeordnete Regelungseinheit mit eigenem Aluminiumkühlkörper.

Können die beschriebenen Anwendungen mit kleineren und leichteren Aggregaten bedient werden, so entsteht durch die große Verbreitung sowie den kontinuierlichen Austauschbedarf ein signifikanter Hebel, um Materialien zu sparen und damit bestehende Ressourcen durch den Einsatz optimierter Umwälzpumpen zu schonen.

Ressourceneffizienz als Entwicklungsziel
An diesem Punkt setzte die Anwendungsentwicklung von KSB mit dem Forschungsprojekt »PUMOCON« an. Der global agierende Hersteller von Pumpen, Armaturen und Serviceleistungen verfolgte mit dem Projekt

Ergebnisse
Direkte Vergleiche zwischen der »PUMOCON«- und der Vorgängerbaureihe zeigen für exemplarisch ausgewählte Arbeitspunkte deutliche Materialeinsparungen, von beispielsweise bis zu 52 Prozent Aluminium, 78 Prozent Kupfer und 54 Prozent Elektroblech. Dies resultiert dann ebenfalls in einem für dieses Beispiel um 61 Prozent kleineren CO_2-Fußabdruck. Alle für PUMOCON eingesetzten seltenerdmagnetfreien Elektromotoren erfüllen zudem die höchste Energieeffizienzklasse IE5. Dadurch, sowie durch die vorgenom-

Hohe Drehzahlen verbessern die Effizienz der Aggregate.

das Ziel, ein verkleinertes, integriertes und somit ressourcenoptimiertes Pumpensystem zu entwickeln. In diesem wurden Pumpenstufe, trockenlaufender Pumpenantrieb und Pumpenregelung zu einer gemeinsamen konstruktiven Einheit zusammengeführt. Das Aggregat wurde dabei für die genannten Anwendungsfälle in Heizungs-, Klimatisierungs- und Solarkreisläufen und deren spezifische Anforderungen qualifiziert.

Ergebnis ist ein nach multiplen Kriterien optimiertes, wirtschaftlich attraktives Umwälzpumpenaggregat, das sich durch eine erhöhte Ressourcen- und Energieeffizienz sowie die von KSB gewohnt hohe Qualität und Lebensdauer auszeichnet.

Ressourceneffizienz durch Systemintegration

Ein wichtiger Faktor, um die verbesserte Ressourceneffizienz zu erreichen, war die Erhöhung der Betriebsdrehzahlen. Dieser Schritt ermöglichte unter Beibehaltung des hydraulischen Arbeitsbereichs eine Verkleinerung aller Systemkomponenten.

Aber auch der hohe Integrationsgrad aller Komponenten spielte eine wichtige Rolle: Beispielsweise ließ sich durch ein gemeinsames Kühlkonzept von Motor und Regelungseinheit das für den Kühlkörper aufgewendete Aluminium, zusätzlich zu den durch die Drehzahlerhöhung erreichten Einsparungen, weiter reduzieren. Durch die Verkürzung von Wegstrecken innerhalb des Aggregats werden nun ebenfalls signifikant weniger wertvolle Werkstoffe benötigt.

Kontakt
Dr. Patrick Hauck
KSB SE & Co. KGaA
Johann-Klein-Straße 9
67227 Frankenthal (Pfalz)

Tel.: +49 6233 86 1530
E-Mail: patrick.hauck@ksb.com

mene Optimierung des Gesamtsystems, sind alle Pumpenaggregate der Baureihe auch heute schon auf zukünftige Verschärfungen der Verordnung 547 der EU zur umweltgerechten Gestaltung von Wasserpumpen bestens vorbereitet. Ergebnis der laufenden Anwendungsentwicklung ist somit eine hinsichtlich Energie- als auch Ressourceneffizienz optimierte und gleichzeitig unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten sehr attraktive Umwälzpumpenbaureihe.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass sich der für die Entwicklung von »PUMOCON« eingeschlagene Weg, durch Drehzahlerhöhung und Gesamtsystemoptimierung ein verkleinertes, integriertes und somit ressourceneffizientes Pumpensystem zu kreieren, eindeutig als zielführend erwiesen hat. Mit den vorliegenden Ergebnissen macht es sich KSB nun zur Aufgabe, die in »PUMOCON« entwickelte Baureihe erfolgreich in den Markt einzuführen und damit einen Beitrag zur Schonung kritischer Ressourcen zu leisten.

ecoFluor – Innovative und umweltfreundliche, auf Fluor basierte Reinigungsprozesse als Ersatz für Stickstofftrifluorid und perfluorierte Kohlenwasserstoffe in der Halbleiterindustrie

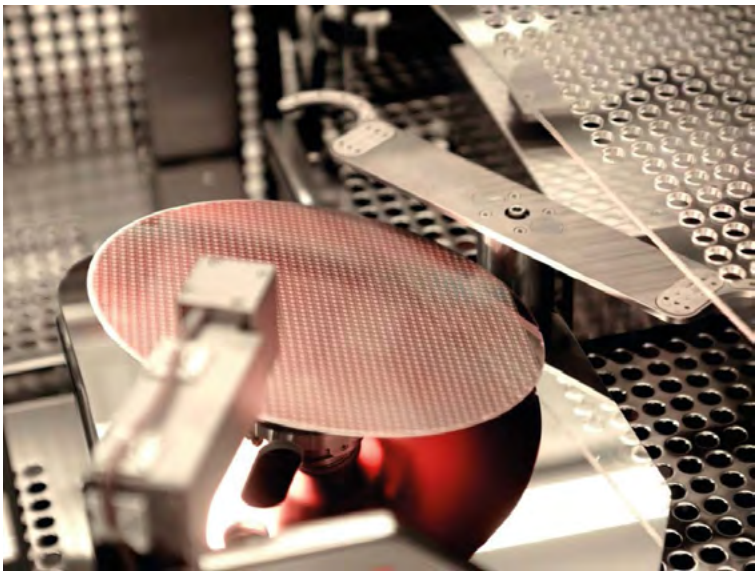
»ecoFluor« setzt auf Klimaschutz im internationalen Maßstab. Es wurde ein Reinigungsgas entwickelt, das den Treibhauswert bisher üblicher Gase in der Halbleiterbranche um das 17.000-Fache senkt. Das Mittel mit dem Klimabonus spart zudem Ressourcen, weil es effizient im Verbrauch ist.

Perfluorierte Kohlenwasserstoffe ▪ Stickstofftrifluorid

Innovation auf fundierter Basis
Mikrochips für Handys, Laptops oder Taschenrechner werden in Maschinen der Halbleiterindustrie gefertigt, die nach jedem Arbeitsschritt gründlich gereinigt werden müssen. Bisher geschieht dies mit perfluorierten Kohlenwasserstoffen (PFC) und Stickstofftrifluorid (NF_3). Diese Gase sind für die Umwelt bis zu 17.000-mal schädlicher als das bekannte Treibhausgas Kohlendioxid, da sie besonders stabil sind und daher lange in der Atmosphäre verbleiben.

Die Fraunhofer-Einrichtung für Mikrosysteme und Festkörper-Technologien EMFT untersucht seit mehreren Jahren gemeinsam mit Partnern des Chemieunternehmens Solvay verschiedene Fluorgasmischungen auf Umweltfreundlichkeit. Das Projekt »ecoFluor« setzt auf einen alternativen Gasmix aus Fluor, Stickstoff und Argon, wodurch die Fluormenge um bis zu 20 Prozent verringert werden kann. Damit ist sein Treibhauspotenzial vergleichbar mit dem des Kohlenstoffdioxids. Zudem ist die Nutzung dieser Fluorgasmischungen sehr zeit- und kosteneffizient. Im Projekt wurde die vielversprechende Gasmischung in der industriellen Anwendung getestet.

Cleantech für Hightech
Der Markt für das neue Reinigungsgas ist groß, denn jegliche Informationstechnologie und damit viele Bereiche unseres öffentlichen und wirtschaftlichen Lebens basieren auf Silizium-Mikrochips. Die kleinen Elektronikteile



Mit Gasen werden wichtige Maschinen für die Chipherstellung gereinigt. Ein neuer Gasmix soll bisher verwendete, sehr umweltschädliche Gase ersetzen.

Kontakt
Michael Pittroff
Solvay Fluor GmbH
Hans-Böckler-Allee 20
30173 Hannover

Tel.: +49 511 857-3448
E-Mail:
michael.pittroff@solvay.com

entstehen mittels planarer Halbleitertechnologie: Schicht für Schicht werden dabei abwechselnd leitfähige und isolierende Schichten auf eine Siliziumscheibe aufgebracht. Anschließend erhält der Chip seine Strukturierung. All diese Arbeitsvorgänge finden in speziellen Vakuumkammern, sogenannten PECVD-Kammern, statt. Bei dieser Feinstarbeit – die einzelnen Schichten und Strukturen sind nur wenige Nanometer groß – ist höchste Sauberkeit bei Prozessen, Maschinen und eingesetzten Materialien notwendig. Deshalb müssen nach jeder aufgebrachten Schicht die Prozesskammern mit Gas gereinigt werden. Fluorchemische Mittel sind bewährte und effiziente Reinigungsgase. Ein diffiziler chemischer Vorgang ist nötig, um sie für das Säubern zu konditionieren.

Testlauf in Teamwork

Die Partner von »ecoFluor« haben den Einsatz ihres Gases in zwei Phasen verfolgt und arbeiteten während der dreijährigen Projektlaufzeit arbeitsteilig. Solvay, der Initiator aus der Chemieindustrie, lieferte die Cleangas-Mischung und schulte das Personal im sicheren Umgang damit. Die Fraunhofer EMFT sorgte für die fortlaufende Optimierung der Gasmischung. Die Firma Muegge lieferte eine mikrowellenbasierte Technologie zur bestmöglichen Minimierung der Gasmenge. Texas Instruments schließlich setzte die Mischung in seiner Halbleiterproduktion ein. Hierzu wurde am Produktionsstandort in Freising eine Gasversorgung aufgebaut, mit der die Gasmischung der Solvay Fluor GmbH an wenigen Produktionsanlagen zur Verfügung gestellt und getestet wurde. Mit dem Aufbau der Gasversorgung für die neuartige Fluor-Gasmischung waren die Voraussetzungen für Tests unter Produktionsbedingungen erfüllt.

Ergebnisse

Auf Basis der Erkenntnisse der Fraunhofer EMFT wurden für typische PECVD-Applikationen Reinigungsprozesse entwickelt. Diese wurden in die Halbleiterproduktion überführt, um die Langzeitperformance und -stabilität in der Produktion zu demonstrieren. Mittlerweile wurden an mehreren Industriestandorten verschiedene Langzeit-Tests mit den beiden zur Verfügung stehenden Gasmischungen, Solvaclean N und NO, erfolgreich abgeschlossen, um Schwefelhexafluorid (SF_6), Hexafluorethan (C_2F_6) und Stickstofftrifluorid (NF_3) zu ersetzen. Es konnte durch Messungen Dritter belegt werden, dass Plasma-Reinigung unter Verwendung von Fluor selbst ohne fossilen Brenner nur durch den Einsatz eines Abgaswäschers quasi emissionsfrei betrieben werden kann.

Für die Fraunhofer EMFT ergaben sich daraus weitere, vom BMBF geförderte Folgeprojekte, nämlich »GreenICTatFMD« sowie ein KMU-Projekt zum Ersatz von Schwefelhexafluorid beim DRIE-Plasmaätzprozess.

Nach der Freigabe für die industrielle Produktion gibt es mittlerweile in Deutschland industrielle Halbleiterfertigungsstätten, welche die Solvaclean-Mischung seit mehr als zwei Jahren produktiv nutzen und dadurch SF_6 und NF_3 ersetzen. Des Weiteren wurde Solvaclean auch in der Solarpanel-Fertigungsindustrie erfolgreich qualifiziert und wird ab 2023 NF_3 vollständig ersetzen, sodass im Jahr 2023 etwa fünf Tonnen NF_3 vermieden werden. Diese ökologische Innovation eröffnet derzeit auch Evaluierungen im amerikanischen Markt derart, dass Solvay eine exklusive Partnerschaft mit »Electrofluorocarbons« (EFC) geschlossen hat, um den Einsatz von Solvaclean auch in den USA ermöglichen zu können.

Eco-Pump-Drive – Anwendungsentwicklung innovativer rohstoff- und energieschonender Umwälzpumpen für Heizungs-, Klimatisierungs-, Trinkwasser- und Solarkreisläufe

Sie vollbringen ihr Werk im Verborgenen in nahezu jedem Haushalt und jedem Bürogebäude: Umwälzpumpen für Heizung, Trinkwasser und Solaranlagen. Effizient, doch bisher kaum ressourcenschonend – denn ihr Motor enthält Seltene Erden. Auf diese verzichtet »Eco-Pump-Drive« vollständig und spart damit Rohstoffe und Energie.

Seltene Erden

Umwälzpumpen, wie sie in fast jedem Gebäude zu finden sind, funktionieren mithilfe von Magneten – und die können auch ohne Seltene Erden hergestellt werden.

Millionen-Markt in Europa

In einem durchschnittlichen Haushalt gibt es drei Umwälzpumpen für Wärme, Wasser und Energie. Ein Flughafen benötigt bis zu 40.000 davon. Die Zahl der Umwälzpumpen, die in Europa im Einsatz sind, beläuft sich auf rund 140 Millionen. Die Allrounder, die Heizungs-, Trinkwasser- und Solaranlagen am Leben halten, werden von Motoren betrieben, deren Magnete aus Neodym-Eisen-Bor oder Samarium-Kobalt bestehen. Diese Seltenen Erden kommen weltweit nur begrenzt vor. Etwa zehn Jahre beträgt die Lebensdauer der Motoren. Damit liegt die Zahl der Pumpen, die jedes Jahr neu in Europa gebraucht werden, bei rund 14 Millionen Stück.

»Eco-Pump-Drive« erschließt für diesen Markt eine grüne Innovation: Das Projektteam entwickelte neue elektrische Antriebskonzepte für Umwälzpumpen, deren Magnete frei von Seltenen Erden sind. Sie sind zudem leistungsfähig und in hohem Maße energieeffizient. Der Schlüssel zur neuen ressourcenschonenden Technologie ist das Prinzip des Synchron-Reluktanzmotors, das in einem höheren Leistungsbereich bereits etabliert ist, in Verbindung mit neuen Ansätzen zur Auslegung von Pumpenbaureihen auf Basis einer individuellen Festdrehzahl. Der Projektkoordinator, das Unternehmen KSB, hat diesen Synchron-Reluktanzmotor für industrielle Pumpenanwendungen zur Marktreife entwickelt.

Im Verbund mit dem Kompetenzzentrum Mechatronische Systeme an der Hochschule Kaiserslautern arbeiteten die Expertinnen und Experten daran, das Reluktanzprinzip auf die Ansprüche von Umwälzpumpen für den Hausgebrauch und für Gewerbeanlagen anzupassen.

Kontakt
Dr. Jochen Schaab
KSB SE & Co. KGaA
Johann-Klein-Str. 9
67227 Frankenthal (Pfalz)

Tel.: +49 172 7470049
E-Mail: jochen.schaab@ksb.com

Ergebnisse
Die Entwicklungsphasen wurden erfolgreich abgeschlossen. Auf Basis der festgelegten Spezifikation wurde eine Computersimulation zur Entwicklung und Optimierung von Synchron-Reluktanzmotoren für Pumpenanwendungen im kleinen Leistungsbereich aufgebaut. Die Auslegung erfolgte mit dem Ziel, eine möglichst ressourcenschonende und gleichzeitig möglichst energieeffiziente Maschine zu entwickeln. Dem Projektteam gelang es, die Leistungsklasse der Synchron-Reluktanzmotoren zu signifikant kleineren Leistungen hin zu erweitern, ohne dabei Seltenerdmagnete einsetzen zu müssen. Zum Nachweis der Funktionsfähigkeit hat die Hochschule Kaiserslautern eine Versuchs- und Demonstrationsanlage errichtet. Der entwickelte Prototyp wies das gewünschte Betriebsverhalten auf. Auftretende Herausforderungen hinsichtlich der mechanischen Stabilität sowie der Motorregelung wurden gelöst.

Prototypen bis ins Detail
Das dreijährige Projekt gliederte sich in mehrere Entwicklungsphasen: Zunächst wurde der Motor exakt elektromagnetisch ausgelegt. Dann folgten die Konstruktion des Antriebs sowie ein Entwurf und die Implementierung der entsprechenden Ansteuer-Algorithmik. Nach dieser Detailarbeit bauten die Expertinnen und Experten verschiedene Prototypen, die ihren Testlauf im Labor zu bestehen hatten, bevor sie in die industrielle Demonstration gingen.

Doppeltes Know-how
Die beiden Partner des Projekts »Eco-Pump-Drive« brachten ihre unterschiedlichen Expertisen ein: Der KSB-Unternehmensbereich »Elektrische Antriebe und Automation« entwickelt, integriert und produziert elektrische Antriebe und Regelungssysteme für Pumpen und hydromechatronische Systeme. Das Kompetenzzentrum »Mechatronische Systeme« der Hochschule Kaiserslautern beschäftigt sich in seinen Laboren insbesondere mit Expertisen für hydromechatronische Systeme sowie elektrische Maschinen, Antriebe und Leistungselektronik.

Die gewonnenen Erkenntnisse zu seltenerdmagnet-freien Antrieben und neuen Methoden der Auslegung von Pumpenbaureihen mittels individueller Festdrehzahl wurden nach Abschluss des Vorhabens in die Produktentwicklung übernommen. Auf dieser Basis wurde eine neue Pumpenbaureihe mit trockenlaufenden Antrieben entwickelt, welche 2022 für den Verkauf freigegeben wurde. Das Ziel, eine neue Pumpenbaureihe mit reduziertem Ressourcenbedarf und gesteigerter Energieeffizienz zu realisieren, wurde damit erfolgreich umgesetzt.

Production Dreams – Erarbeiten kontinuierlicher Verfahrensschritte zum Hochskalieren der Produktion von Polyethercarbonat-Polyurethanen mit kovalent gebundenem Kohlenstoffdioxid

Aus Kohlendioxid (CO_2) entsteht Kunststoff, das Treibhausgas wird die Basis für Gummibänder, Dichtungsringe und mehr: Das Projekt »Production Dreams« arbeitete an einem Verfahren, das Kohlendioxid zum Herstellen von elastischen Kunststoffen nutzt. Im industriellen Testbetrieb sollte das Gas seine Tauglichkeit als Ersatz für Erdöl beweisen.

Kohlenstoffdioxid ▪ Elastomere

Im Rahmen von »Production Dreams« wurden die Potenziale von Kohlendioxid anstelle von Erdöl für die Kunststoffproduktion erprobt.

Wie aus Treibhausgas Kunststoff wird

Kohlendioxid ist als ein Hauptverursacher des Treibhauseffekts schädlich für das Klima. Im Projekt »Production Dreams« wurde es hingegen klimafreundlich genutzt und zum Grundbaustein elastischer Kunststoffe, sogenannter Elastomere. Diese basieren normalerweise komplett auf Erdöl. Nun lassen sich bei ihrer Herstellung in einem Vorprodukt rund 25 Prozent des üblicherweise verwendeten Öls durch CO_2 ersetzen. Das Ergebnis sind sogenannte Polyethercarbonat-Polyurethane, die zu Elastomeren weiterverarbeitet werden können.

Einzelne Chargen des neuartigen Materials waren bereits im Labor hergestellt worden. Im Verlauf des dreijährigen Projekts wurde ein kontinuierliches Verfahren entwickelt, das eine wirtschaftliche Produktion im Industriemaßstab ermöglicht.

Ausgezeichnete Ökobilanz

Elastomere sind Allrounder unter den Kunststoffen: Sie werden für die Produktion von Reifen verwendet, für mechanische Bauteile in Automobilen, für Schuhe, Bauteile im Hausbau und Klebstoffe. Sie sind somit wesentlich für die Automobil-, die Elektro- und Bauindustrie sowie für den Maschinenbau und finden Verwendung in der Produktion von Haushaltsgeräten und Medizintechnik. Wie umfangreich der Markt für das innovative Produkt von »Production Dreams« ist, zeigt der weltweite Bedarf an Synthesekautschuk: Etwa 16 Millionen Tonnen des flexiblen Materials werden jährlich genutzt.

Vorherige Tests in kleinerem Maßstab hatten ergeben, dass die mithilfe von CO_2 hergestellten Elastomere dieselbe hohe Qualität haben

wie solche, die aus petrochemischen Rohstoffen bestehen. Gleichzeitig ist das technische Verfahren, das die Projektpartner erarbeiteten und umsetzten, wesentlich energieeffizienter und benötigt weniger Lösemittel. Es hat daher eine deutlich bessere Ökobilanz als konventionelle Prozesse. Da weniger Erdöl eingesetzt wird, werden zudem die Verarbeitungsschritte bis zum Einsatz im Elastomer vermieden – das spart im gesamten Prozess wiederum CO_2-Emissionen und Energie. Durch die Verwendung von Kohlendioxid wird somit die begrenzte Ressource Erdöl geschont und gleichzeitig die Rohstoffbasis der Chemie-und Kunststoffindustrie erweitert.

Ein Trio für mehr Nachhaltigkeit

Am Projekt beteiligt waren zwei wissenschaftliche Institutionen und der Kunststoffhersteller Covestro. Die RWTH Aachen University war mit dem Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV) und dem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT) vertreten. Zweiter wissenschaftlicher Projektpartner war der Lehrstuhl für Technische Chemie und Mehrphasen-Reaktionstechnik der Technischen Universität Berlin.
Der wirtschaftliche Partner Covestro gehört zu den weltweit größten Herstellern von Polymeren. Geschäftsschwerpunkte sind die Herstellung von Hightech-Polymerwerkstoffen und die Entwicklung innovativer Produkte für die Automobilindustrie, die Elektro-und Elektronikbranche sowie die Bau-, Sport- und Freizeitartikelindustrie.

Kontakt
Dr. Jochen Norwig
Covestro Deutschland AG
Chempark B211
Kaiser-Wilhelm-Allee 60
51373 Leverkusen

Tel.: +49 214 6009-4057
E-Mail:
jochen.norwig@covestro.com

Ergebnisse

Die CO_2-haltigen Kautschuke werden in zwei Stufen hergestellt. Zunächst wird CO_2 als Baustein in die Hauptkette eines Polyols, einem makromolekularen Baustein der Elastomere, eingebaut. Die entstehenden Carbonatgruppen ersetzen dabei einen Teil des ursprünglich auf fossilem Kohlenstoff basierenden Grundbausteins Propylenglycolether. Um später einen elastischen Gummi daraus machen zu können, wird zusätzlich ein ungesättigter Molekülbaustein eingebaut. Im Laufe des Projekts wurde das Verfahren, mit dem diese ungesättigten Polyetherpolyole hergestellt werden, maßgeblich weiterentwickelt. Inzwischen sind mittels kontinuierlicher Produktion Versuchsmuster von CO_2-Polyolen im Tonnenmaßstab im Technikum hergestellt worden. In einem zweiten Schritt entsteht aus dem hergestellten Polyol durch Kettenverlängerung ein Kautschuk, der zu Elastomeren weiterverarbeitet werden kann.

Die untersuchten Polyurethankautschuke konnten zum Abschluss des Förderprojekts im technischen Maßstab hergestellt werden. In einer dreijährigen Inkubationsphase wurde danach die Weiterverarbeitung der neuartigen Kautschuke von Elastomerherstellern geprüft. Die Prüfergebnisse offenbarten weiteren Entwicklungsbedarf bei der Herstellung der Urethane. Das Verfahren wurde unterdessen verfeinert. Nach ersten erfolgreichen Tests soll es technisch verifiziert und die wirtschaftliche Darstellbarkeit der Produkte auf neuer Basis beurteilt werden.

EKALGU – Automatisierte Einblasanlage zur kalkbasierten Entschwefelung und Legierungseinstellung von Gusseisen

Das Projekt »EKALGU« ersetzt in der Gusseisenproduktion das wertvolle, zu den kritischen Rohstoffen zählende Magnesium durch Kalk. Dazu wurde ein neues, ressourcen- und kostensparendes Einblasverfahren entwickelt und in die betriebliche Praxis umgesetzt.

Magnesium ▪ Kalk

Magnesium spielt bisher eine große Rolle in der Gusseisenproduktion, kann aber durch besser verfügbaren Kalk ersetzt werden.

Abhängigkeiten verringern

Im Automobil- und Maschinenbau werden hochwertige Gusseisenprodukte mit Kugel- oder Vermikulargrafit benötigt. Im Jahr 2021 entfielen 38 Prozent der deutschlandweiten Gusseisenproduktion – rund 1,1 Millionen Tonnen – auf diese Produkte, die Eigenschaften wie Zugfestigkeit, Zähigkeit und Wärmeleitfähigkeit vereinen. Dafür wird das flüssige Gusseisen mit einer Magnesiumbehandlung entschwefelt, damit sich der Grafit kugelförmig oder würmchenförmig (vermikular) ausbilden kann. Bisher geschieht dies mit Magnesium, das nach der Behandlung unwiederbringlich verloren ist, da es stark verteilt in Form von Magnesiumoxid und Magnesiumsulfid in der Schlacke gebunden vorliegt. Das Projekt »EKALGU« will den wertvollen, kritischen Rohstoff durch Kalk ersetzen, der besser verfügbar und kosteneffizienter ist. Die Verfügbarkeit von Magnesium ist dadurch gekennzeichnet, dass im Jahr 2021 in China 84 Prozent der globalen Magnesiumproduktion (993.000 Tonnen) erfolgte und somit eine deutliche Abhängigkeit bei der Versorgung mit Magnesium besteht. Diese Tatsache führte z.B. dazu, dass sich im Herbst 2020 infolge von Stromabschaltungen in China der globale Magnesiumpreis innerhalb von Tagen von 2.000 US Dollar pro Tonne auf 8.000 Dollar pro Tonne vervierfacht hat. Die Substitution von Magnesium ist somit eine zentrale Möglichkeit, Abhängigkeit zu verringern.

Kontakt
Marc Walz
Fritz Winter Eisengießerei
GmbH & Co. KG
Albert-Schweitzer-Str. 15
35260 Stadtallendorf

Tel.: +49 6428 78-840
E-Mail:
marc.walz@fritzwinter.de

Die Projektpartner haben basierend auf einer ebenfalls durch das BMBF finanzierten Vorlaufforschung (»SUBMAG«) eine Anlage entwickelt, die kalkhaltige Entschwefelungsmittel direkt in flüssige Gusseisenschmelzen einbläst, sodass auf Magnesium verzichtet werden kann.

Vorteile des Einblasverfahrens

Das Einblasverfahren ist eine Innovation in der Gießereiindustrie und bietet zahlreiche Vorteile. Das Verdrahten, also das Einfüllen des Magnesiums in einen Hohldraht, ist nicht mehr notwendig. Die Zugabe des Entschwefelungsmittels lässt sich dennoch zeitabhängig regeln und automatisiert durchführen.

Das Projekt war in zwei Phasen unterteilt: Zunächst wurde die bestehende Technik um eine Pilotanlage zum Einblasen von feinkörnigen Stoffen ergänzt. Dann folgten Prototypversuche: Die Qualität des Gusseisens und der anfallenden Schlacke wurde beurteilt. In Phase zwei errichtete das Forschungsteam eine Demonstrationsanlage und startete den Produktionsbetrieb parallel zur laufenden Produktion. Am Ende standen die Analyse der ökologischen und ökonomischen Vorteile und eine Vermarktungsstrategie.

Die Projekt-Koordinatorin, die Fritz Winter Eisengießerei GmbH, hat als größte deutsche Eisengießerei umfangreiche Erfahrungen mit der Herstellung von Vermikularguss. Die Universität Duisburg-Essen mit dem Lehrstuhl für Metallurgie der Eisen- und Stahlerzeugung verfügt über eine umfangreiche Ausstattung und vielfältige Erfahrungen auf dem Gebiet der Behandlung von Eisenschmelzen und der Erstarrung von Gusseisen. Das FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V. ist spezialisiert auf die Erforschung und Verwertung von Schlacken aus der Eisen- und Stahlindustrie in anderen Industriebereichen.

Ergebnisse

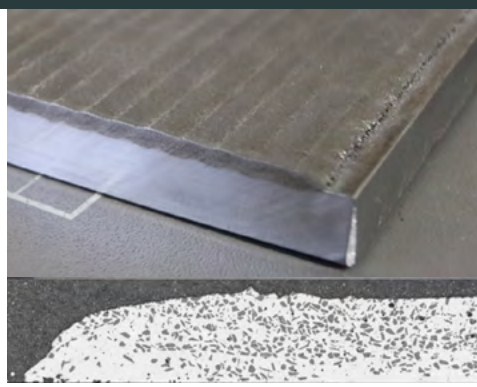
Die neue Anlage wird nach der Entwicklungs- und Testphase seit Beginn des Jahres 2022 regulär in der Produktion eingesetzt, so dass Magnesium als Entschwefelungsmittel unter Produktionsbedingungen substituiert werden kann. Probleme bei der Inbetriebnahme wurden z.B. durch den Einsatz angepasster Silos behoben und die Einblaslanze wird zukünftig von einem Manipulator geführt, um eine optimale Lanzenpositionierung zu gewährleisten. Kritische Kostenfaktoren wie Schlackenmengen und Lanzenverschleiß sind bei größeren Behandlungspfannen deutlich geringer. Durch Optimierungen in der Logistik können mit größeren Pfannen alle zukünftigen Szenarien abdeckt werden. Durch zusätzliche Software zur Steuerung und Dokumentation wird die Einblasanlage unter stabilen Förderbedingungen betrieben, sodass konstante gewünschte Entschwefelungsergebnisse gewährleistet sind.

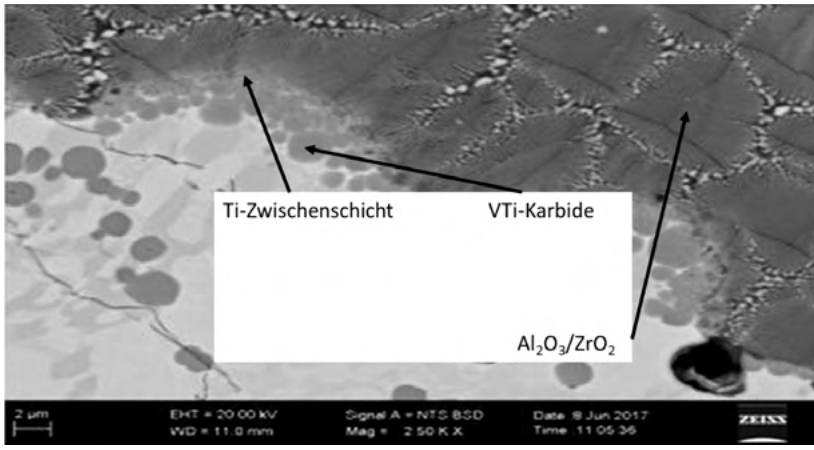
Die Ökobilanz zeigt, dass die kalkbasierte Entschwefelung deutlich weniger Emissionen erzeugt und deutlich weniger Energie benötigt, da die FeSi- und Magnesiumherstellungen sehr CO_2- und energieintensiv sind. Die ökonomische Bewertung zeigt, dass die Entschwefelungskosten deutlich von 70 bis 132 Euro pro Pfanne mit FeSi-Draht auf 33 bis 38 Euro pro Pfanne mit dem kalkbasierten Verfahren reduziert werden können. Dieses Verfahren ist für große Gießereien geeignet, in denen das Gusseisen in großen Mengen über Heißwindkupolöfen erschmolzen wird.

aha – Auftragschweißen mit alternativen Hartstoffen

Das Projekt »aha« entwickelt innovative, keramikbasierte Schutzschichten für stark beanspruchte Bauteile. Sie bilden Alternativen zu derzeit verwendeten, schwer verfügbaren und kostenintensiven Wolframkarbiden.

Keramik ▪ Wolfram





Schutzschichten für stark beanspruchte Bauteile können dank zwei neuen Beschichtungsverfahren nun ohne seltene Wolframkarbide auskommen.

Verschleißwiderstand durch Wolframkarbide
Stark beanspruchte Bauteile – beispielsweise Schaufelräder von Tagebaubaggern oder Bohrwerkzeuge bei der Erdölgewinnung – benötigen eine Schutzschicht aus Hartstoffen, um vorschnelle Verschleißerscheinungen zu vermeiden. Hierfür werden Wolframkarbide eingesetzt, die mittels Auftragschweißen aufgebracht werden. Das bisherige Beschichtungssystem besteht neben Wolframkarbid meist aus Nickel als Matrixwerkstoff und erfordert konventionelle Geräte der Schweißtechnik. Das Projekt »aha« hat sich zur Aufgabe gemacht, eine wolframfreie Auftragschweißlegierung zu entwickeln, die auf günstigeren und gut verfügbaren Hartstoffen basiert.

Das Potenzial der Ressourceneffizienz dieser neuen Legierung: Allein in Deutschland werden jährlich 300 Tonnen Wolfram für die thermische Beschichtung benötigt. Dieser strategische Werkstoff ist jedoch nur sehr begrenzt verfügbar und unterliegt dadurch starken Preisschwankungen.

Innovative keramikbasierte Hartstoffe
Im Vorgängerprojekt »SubsTungs« war ein alternatives System aus keramikbasierten Hartstoffen in Verbindung mit eisenhaltigen Matrices entwickelt worden. Die Funktionsweise wurde in labortechnischen Untersuchungen nachgewiesen. Auf diese

Weise wird der Einsatz des seltenen Rohstoffs Wolfram vermieden. Herausforderungen sind die metallische Einbindung der Keramik in die Matrix sowie das Aufschwimmen der leichten Keramikpartikel im verwendeten Schmelzbad.

Im Labor bestätigte Lösungsansätze wurden im Projekt »aha« zur Industriereife gebracht. So ermöglicht die Einführung von Zwischenschichten eine bessere Einbindung der Keramik. Außerdem müssen konventionelle Anlagen für das Auftragschweißen um einen Partikelbeschleuniger ergänzt werden, damit sie auch leichtere Keramiken verarbeiten können. Angestrebt wurde die Entwicklung von innovativen Hartstoff-Matrix-Systemen für zwei Beschichtungstechnologien: dem Plasmapulver sowie dem Fülldraht-Auftragschweißen. Neben weiteren Laboruntersuchungen zur genauen Charakterisierung der Schichtsysteme wurde eine Anlage gebaut und erprobt.

Als Projektkoordinatorin übernahm die DURUM Verschleißschutz GmbH die Entwicklung und Herstellung der Werkstoffe und erstellte ein Verfahren zum Plasmapulver-Auftragschweißen. Die Impuls Verschleißtechnik GmbH fertigte eine Beschichtungsanlage für Fülldraht-Auftragschweißungen. Die Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg übernahm als wissenschaftliche Forschungspartnerin die theoretische und versuchstechnische Begleitung des Projekts.

Kontakt
Dr.-Ing. Frank Schreiber
DURUM Verschleißschutz GmbH
Carl-Friedrich-Benz-Str. 7
47877 Willich

Tel.: +49 2154 4837-15
E-Mail: schreiber@durum.de

Ergebnisse

Die Umsetzung der theoretischen Betrachtungen führte zu zwei neuen Beschichtungsverfahren: dem Pulverstrahl-Plasma- und dem Pulverstrahl-Lichtbogenschweißen. Hier werden konventionelle Energiequellen (Plasmen und Lichtbögen) zusammen mit dem entwickelten Pulverbeschleuniger verwendet. Die erzielte kinetische Anregung der Hartstoffe (Geschwindigkeiten von bis zu 150 Metern pro Sekunde) genügt, um die Partikel ausreichend tief in die Schmelze zu bewegen. Für eine metallurgische Einbettung der Oxide in der Beschichtung war es erforderlich, Zwischenschichten zu entwickeln: Als vorteilhaft erwiesen sich dünne Titan-Basis-Beschichtungen, die infolge thermischer Energie zum einen mit dem Sauerstoff des Oxids und zum anderen mit der Schmelze reagieren. Durch die im oberflächennahen Bereich veränderte Bindung wirkt das Oxid keimbildend. Wird nun der Zusatzwerkstoff so konfiguriert, dass hochschmelzende Elemente in ausreichender Menge existieren, erstarren diese in unmittelbarer Nähe zum Oxid. Der Prozess wurde bisher an zwei entwickelten Legierungen beobachtet. Diese sind als Fülldrähte und als Pulver konfiguriert. Die hergestellten Proben haben sehr geringe Verschleißraten: Registriert wurden bis zu 35 Volumenprozent Hartstoffe in der Beschichtung, ihre Verteilung ist sehr gleichmäßig.

Ersetzt werden konventionell für die schweißtechnische Herstellung von abrasionsbeständigen Beschichtungen benutzte Hartstoffe auf Wolframbasis. Eingeschätzt wird, dass jährlich durch den Einsatz von AlZr-Oxid ca. 150 Tonnen Wolfram bei der Herstellung von Verschleißteilen eingespart werden können. Die Anwendbarkeit der Projektergebnisse konnte nachgewiesen werden. Es kommt nun darauf an, die Kundschaft von den Vorteilen der Nutzung alternativer Hartstoffe in Beschichtungen zu überzeugen. Da die Nutzungszeiten der hergestellten Beschichtungen durchschnittlich zwei Jahre beträgt, werden frühestens 2025 praktische Ergebnisse vorliegen.

DreamResourceConti – Ressourceneffiziente Herstellung von CO_2-haltigen oberflächenaktiven Materialien

Waschen, spülen, reinigen – oberflächenaktive Materialien begegnen uns täglich. Im Projekt »DreamResourceConti« wurde ein Verfahren entwickelt, um durch den Einsatz von CO_2 als alternativem Rohstoff diese Materialien nachhaltiger zu machen und fossile Ressourcen zu schonen.

Kohlendioxid

Anstelle von Erdölderivaten kann CO_2 in oberflächenaktiven Materialien zum Einsatz kommen, um zum Beispiel Wasch- und Reinigungsmittel nachhaltiger zu machen.

Rohstoffalternative CO_2

Oberflächenaktive Materialien sind sehr vielseitig und finden in vielen Bereichen unseres Alltags Einsatz: Sie werden unter anderem in Waschmitteln und Haushaltsreinigern verwendet. Aber auch in der Textil- und Ölindustrie, der Pharmazie und der Landwirtschaft gibt es vielfältige Anwendungen mit grenzflächenaktiven Stoffen. Ihre Herstellung erfolgt im großindustriellen Maßstab und bietet somit einen leicht skalierbaren Hebel für nachhaltigere Lösungen.

Im Vorgängerprojekt »DreamResource« wurde bewiesen, dass mehr als 16 Prozent des Erdölderivats Ethylenoxid (EO) ersetzt werden können, indem Kohlendioxid (CO_2) als alternativer Baustein für reaktive Polyole wie Hart- oder Formschaum genutzt wird. Auch für oberflächenaktive Substanzen ist der Einsatz von CO_2 möglich.

Neues Ziel: Prozessoptimierung und -intensivierung

An diese Ergebnisse knüpfte das Verbundprojekt »DreamResourceConti« an, um den technologischen Reifegrad des Verfahrens zu erhöhen. Wesentliche Bestandteile des Verbundvorhabens bestanden darin, das Verfahren zu optimieren und den Produktionsmaßstab zu vergrößern. Zudem wollten die Projektpartner einen kontinuierlichen Herstellungsprozess entwickeln und die Nutzung von CO_2 auf zusätzliche Anwendungsgebiete ausweiten.

Hauptanspruch dieses Verbundvorhabens war, die Ressourceneffizienz zu steigern, indem CO_2 für die Herstellung zahlreicher Produkte ver-

Kontakt
Dr. Olga Linker
Covestro Deutschland AG
Kaiser-Wilhelm-Allee 60
51373 Leverkusen

Tel.: +49 214 6009-6130
E-Mail:
olga.linker@covestro.com

Ergebnisse
Im Rahmen des Projektes wurde ein kontinuierlicher Prozess und dessen Skalierung in den Demonstrationsmaßstab zur Herstellung oberflächenaktiver Subtanzen mit einem CO_2-Anteil von bis zu 30 Prozent untersucht. Neben der technischen Entwicklung des Prozesses wurden zudem umfangreiche Charakterisierungsmethoden entwickelt und die Charakterisierung der Materialien vorgenommen. Hier standen vor allem die Untersuchung der Oberflächenaktivität und das Verhalten in Lösungen, sowie die ökotoxikologischen Eigenschaften und die Waschleistung im Fokus. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die neuartigen Materialien eine zu Standard-Materialien vergleichbare Waschleistung aufwiesen. Zudem konnte erfolgreich die verbesserte Oberflächenaktivität gezeigt werden, sowie die Bioabbaubarkeit der Materialien. Intensive Untersuchungen zeigten ein hohes Potenzial zur Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen bedingt durch effektive und effiziente Prozessführung.

wendet wird. Der Einsatz von CO_2 als zusätzlicher Baustein für Kunststoff-Komponenten und oberflächenaktive Materialien verbreitert die Rohstoffbasis für viele Anwendungen. Darüber hinaus wird das Treibhausgas CO_2 in den Materialkreislauf rezykliert, was ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer funktionierenden, klimafreundlichen Kreislaufwirtschaft ist.

Durch Zusammenarbeit gemeinsam ans Ziel
In dem Verbundprojekt »DreamResourceConti« bündelten zwei akademische Partner und ein Unternehmen ihre Kräfte. Die RWTH Aachen University war mit dem Lehrstuhl für Technische Thermodynamik (LTT, Analyse, Bewertung und Optimierung von industriellen Energie- und Produktionssystemen), dem CAT Catalytic Center (Katalysatorforschung) und dem Institut für Umweltforschung (IUF, Nutzung und Entwicklung von Testsystemen für die ökotoxikologische Charakterisierung) vertreten. Das Institut der Chemie der Technischen Universität Berlin unterstützte bei der physikalisch-chemischen Charakterisierung der oberflächenaktiven Substanzen und mit der Verfahrensbewertung durch die techno-ökonomische Analyse. Der wirtschaftliche Partner Covestro brachte seine langjährige Expertise in der Produktion von Polymerwerkstoffen ein und unterstützte damit vor allem die Prozessentwicklung und die Verfahrensumsetzung.

Die Zusammenarbeit der Verbundpartner förderte das Verständnis durch die intensive Charakterisierung und Analyse der neuartigen Substanzen. Zudem ließ sich durch ökologische sowie techno-ökonomische Bewertungen das Potenzial dieser Innovation besser abschätzen.

Durch die Wahl geeigneter chemischer Bausteine sowie effektiver und effizienter Prozessführung konnte erfolgreich der Zugang zu oberflächenaktiven Materialien erarbeitet werden. Diese weisen einen signifikanten Anteil an Kohlendioxid (CO_2) auf, womit eine nachhaltige Alternativen zu Standard-Materialien im Wasch- und Reinigungsmittelbereich geschaffen wurde.

Edelmetalladsorber – Rückgewinnung von Edelmetallen aus Reststoffströmen der metallverarbeitenden Industrie mithilfe von faserfixierten Adsorbern

Textilien, die kostbare Metalle aus industriellen Abwässern filtern und wieder wirtschaftlich nutzbar machen: Das Projekt »Edelmetalladsorber« setzt auf neuartige Fasern, die Palladium, Platin und Gold als Ressourcen im industriellen Maßstab zurückgewinnen.

Palladium ▪ Platin ▪ Gold

Filter-Fasern für wertvolle Metalle: Das Adsorbertextil nimmt Palladium auf, das anschließend wiederverwertet werden kann.

Gold und Palladium im Wasser
Industrielle Prozessabwässer sind bedeutende Wertmetallquellen. Der Bedarf an innovativen Technologien, die hochwertige Edelmetalle wie Platin, Gold, Palladium und Silber aus diesen Quellen zurückgewinnen, liegt auf der Hand: Ebenso wie die strategischen Metalle Indium, Gallium, Niob, Tantal und Seltene Erden werden sie für den Hightech-Standort Deutschland benötigt.

Es existieren unterschiedliche Methoden für die Rückgewinnung und Aufarbeitung von Metallen aus Prozesswässern. Dazu gehören unter anderem das Verwenden von Ionenaustauschern, diverse Fällungsverfahren, elektrolytische Verfahren und die pyrometallurgische Metallrückgewinnung. Ihre Nachteile sind ein hoher Energiebedarf sowie der Einsatz von organischen Lösemitteln und weiteren Hilfschemikalien. Auch sind die meisten dieser Verfahren nicht ausreichend selektiv: Die Edelmetalle können also nicht genügend gut von anderen Störstoffen getrennt werden. Damit erweisen sie sich als unwirtschaftlich, vor allem für gering konzentrierte Prozess- und Spülwässer. Die Folge: Wertvolle Ressourcen gehen verloren.

Das »Goldene Vlies«
Durch ein am Deutschen Textilforschungszentrum Nord-West entwickeltes Verfahren können Polyelektrolyte dauerhaft und in hoher Auflage an textilen Trägermaterialien fixiert werden. Polyelektrolyte sind organische Verbindungen, die unterschiedliche Metallionen adsorbieren, also binden, können. Das Adsorbertextil besteht aus Polyester und Polyvinylamin – preiswerte Grundmaterialien, die sich effizient kombinieren lassen.

Damit ist es in der Lage, unterschiedliche Edelmetalle – insbesondere auch aus niedrig konzentrierten Prozesswässern der metallverarbeitenden Industrie – herauszufiltern. Ihre Praxistauglichkeit hatten die innovativen Fasern bereits beim Probefiltern eines Industriewassers mit Palladiumgehalt bewiesen: Sie banden das Palladium vollständig an sich. Die nachfolgende Verhüttung lieferte das reine Edelmetall.

Praxistest Industrie

Anknüpfend an diesen Probelauf erhöhte das Projekt den technologischen Reifegrad des Verfahrens. Das Adsorbertextil ging in die industrielle Produktion und wurde zum Filtern industriellen Abwassers bei einem Leiterplattenhersteller eingesetzt.

Für einen industriellen Praxistest arbeitete ein Verbund entlang der gesamten Wertschöpfungskette zusammen: Kayser Filtertech sorgte für die Textilherstellung, Setex Textil übernahm die Ausrüstung und Konfektionierung, die Cornelsen Umwelttechnologie verantwortete den Anlagenbau für die Filtereinheit. Der Leiterplattenhersteller Unimicron Germany setzte das Textil für seine industriellen Wässer ein, die Firma Wieland Edelmetalle übernahm das abschließende Recycling der Edelmetalle.

Kontakt
Dr. Bert Gilleßen
KAYSER FILTERTECH GmbH
Standort Düren
An Gut Nazareth 73
52353 Düren

Tel.: +49 5561 7014030
E-Mail: b.gillessen@kayser-filtertech.com

Ergebnisse

Gemeinsam wurde die Machbarkeit des Gesamtkonzepts unter industriellen Bedingungen am Beispiel der Rückgewinnung von Palladium aus Prozesswässern der Leiterplattenindustrie nachgewiesen. Das Geschäftsmodell des Konsortiums sieht sowohl stationäre als auch mobile Filtermodule vor, die bei Kundinnen und Kunden vor Ort edelmetallhaltige Prozesswässer abreichern. Dabei wird das wertstoffbeladene Textil in eine wertvolle Metalllösung überführt, die entweder in den Produktionsprozess zurückgeführt oder dem Kunden vergütet wird.

Zudem wurde nachgewiesen, dass sich das entwickelte Adsorbertextil auch für andere Fälle der selektiven Edelmetallrückgewinnung sowie bei der Adsorption von umweltproblematischen Metallen wie Chrom, Arsen oder Cadmium aus niedrigkonzentrierten Wässern einsetzen lässt. Daraus ergeben sich für das Konsortium weitere vielversprechende Arbeitsfelder.

Das innovative Adsorbertextil ist schon heute konkurrenzfähig bei der Rückgewinnung von wertvollen Edelmetallen, wobei neben der Wertschöpfung auch ein wesentlicher Beitrag für den schonenden Umgang mit Ressourcen im Sinne der Kreislaufwirtschaft geleistet wird. Zukünftig soll das Konzept auf weitere ungenutzte Edelmetallquellen und unterschiedlichste Branchen ausgeweitet werden. Damit eröffnen die innovativen Adsorbertextilien neue Wege, wichtige Ressourcen effizient und kostengünstig zurückzugewinnen, auch in bisher unwirtschaftlichen Bereichen. Gleichzeitig kann die branchenübergreifend nutzbare Technologie einen erheblichen Beitrag zum Umweltschutz leisten. So wird zum Beispiel auch die Möglichkeit betrachtet, die erarbeitete Technik bei der Gewinnung von Primärrohstoffen – etwa aus Sickerwässern im Bergbau oder aus Oberflächengewässern – zu nutzen.

EZiRec – Effizientes Zinn-Recycling aus Abfallprodukten der Leiterplattenfertigung

Mit einer neuen Technologie bereitet das Projekt »EZiRec« Zinnschlämme aus der Elektronikbranche auf. Zwar existieren bereits Methoden und Patente, die diese Rückstände der Leiterplattenherstellung recyceln könnten, doch bisher war kein Prozess im industriellen Maßstab dauerhaft etabliert.

Zinn ▪ Kupfer ▪ Nitrat

Die Basis moderner Elektronikteile
Zinn ist ein traditioneller und zugleich moderner Allrounder. Es ist ein wichtiges Metall zur Herstellung von Lötmaterial für die Elektronikbranche sowie von Weißblech und Chemikalien für die Galvano- und Katalysatorbranche. Seine Einsatzgebiete erweitern sich stetig. Das Wachstum der Zukunftsbranche Elektronikindustrie erhöht weltweit den Bedarf an Zinn – entsprechend steigen auch die Preise auf dem Weltmarkt.

Das Unternehmen TIB Chemicals AG nutzt die in den sogenannten Zinn-Strippern enthaltenen Metallanteile und führt sie einer Wiederverwertung zu. Zinn-Stripper werden im Produktionsprozess verwendet, um überflüssige Zinnschichten von den Leiterplatten zu entfernen, also zu »strippen«. Sie basieren auf konzentrierter Salpetersäure und enthalten mehrere Zusatzstoffe. Dieser chemische Mix ist notwendig, damit beim Entfernen des Zinns die Leiterbahnen aus Kupfer nicht beschädigt werden. Deutschlandweit werden bis zu 1.000 Tonnen Zinn-Stripper jährlich genutzt.

Zinn-Stripper werden verwendet, bis ihre Kapazität erschöpft ist. Entsprechend hoch ist in der gesättigten Lösung der Gehalt an Zinn. Zudem enthält die Flüssigkeit geringe Anteile an Kupfer. Die verbrauchten Zinn-Stripper werden bisher in der Regel ungenutzt entsorgt, eine Verwertung der Metallgehalte findet gegenwärtig nicht statt.

Zinn-Stripper aus der Elektronikbranche werden wieder zu reinem Zinn und Kupfer: Möglich macht das die hydrometallurgische Aufbereitung.

Intelligente Vernetzung
Das Projekt »Effizientes Zinn-Recycling aus Abfallprodukten der Leiterplattenfertigung«, durchgeführt vom Unternehmen TIB Chemicals AG,

hat eine Methode entwickelt, um Zinn effizient zu recyceln. Im Zentrum der Innovation steht eine hydrometallurgische Aufbereitung. Die technologische Herausforderung lag in der sauberen Trennung der Metalle Zinn und Kupfer von der verunreinigten, nitrathaltigen Ausgangslauge. Das entwickelte Verfahren ermöglicht diesen Schritt auf effiziente Weise, ohne die technologische Machbarkeit aus den Augen zu verlieren.

Das aufbereitete zinnhaltige Material wird an Sekundärhütten verkauft, die durch ein pyrometallurgisches Verfahren aus den hydrometallurgisch behandelten Wertstoffen die Metalle Zinn und Kupfer in hoher Reinheit herstellen.

Entwicklung des Verfahrens

Schritt für Schritt näherte sich das Projekt im Verlauf seiner dreijährigen Dauer dem Test im technischen Maßstab: Zunächst wurde auf Basis von Ergebnissen aus dem Labor und aus Betriebsversuchen der Aufbau der Anlagentechnik vorbereitet. Dafür wurden auch die Anlieferung der Rohstoffe, die Lagerung, der interne Transport sowie die effiziente Verarbeitung und Trennung berücksichtigt. Für den Betrieb der Anlage im technischen Maßstab wurde ein neuer Gebäudeteil auf dem Gelände der TIB Chemicals AG errichtet.

Ziel des Projekts war ein stabiles Verfahren, das auch bei Zinnschlämmen unterschiedlichster Qualität kontinuierlich hohe Produktqualität für die Sekundärhütten sicherstellt. Es ist in der Lage, Abfälle mit hohem Zinngehalt aus unterschiedlichsten Industrien zu verwerten, die heute nicht oder nur schlecht in pyrometallurgischen Recyclingverfahren verarbeitet werden. Damit steht die Technologie auch anderen Nutzern offen.

Kontakt
Dr. Matthias Weiß
TIB Chemicals AG
Mülheimerstr. 16–22
68219 Mannheim

Tel.: +49 621 8901-205
E-Mail: matthias.weiss@tib-chemicals.com

Ergebnisse

Ende 2017 wurde der Bau der Anlage und des dazugehörigen Gebäudes abgeschlossen und beides danach erfolgreich in Betrieb genommen. Seitdem wurden neben technischen Parametern der Anlage weitere interne Einflussfaktoren verbessert. Die Logistik der verbrauchten Zinn-Stripper, deren präzise Analytik und die Kommunikation der Ergebnisse mit Kundinnen und Kunden haben sich etabliert. Im Zeitraum von 2018 bis 2022 wurden mehr als 1.200 Tonnen beladener Zinnstripper verarbeitet. Daraus konnten ca. 500 Tonnen Zinn-Konzentrat hergestellt werden, die zur Weiterverarbeitung an Sekundärhütten gingen. Auf diese Weise konnten etwa 100 Tonnen Zinnmetall in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden.

Die Verwertungspartner des erzeugten Zinn-Konzentrats sind mit dessen Qualität sehr zufrieden und haben Interesse an einer Fortsetzung und Ausweitung der Zusammenarbeit geäußert. Der Zulauf an beladenem Zinn-Stripper aus der Elektronikbranche konnte über die Jahre konstant gehalten werden. Mit Blick auf weitere Betriebe, bei denen Zinn-Stripper anfallen, die aber diese Recycling-Option noch nicht nutzen, laufen fortwährend Bemühungen, auch deren Anfall an beladenem Zinn-Stripper zu akquirieren.

KOMPASS – Kontinuierliche Öl- und Metallrückgewinnungs-Prozessanlage für Schlämme und Späne

Das Projekt »KOMPASS« trennt, was in der Metallverarbeitung vermischt anfällt: Metallspäne und Öle. Gereinigt und aufbereitet, können die Späne anschließend wiederverwertet werden – ein Novum für die Branche.

Wolfram ▪ Niob ▪ Vanadium ▪ Kobalt

Blick in die Trocknerrinne

Die Richtung: Ressourceneffizienz
»KOMPASS« trägt seine Innovation im Namen und weist die Richtung zur Ressourceneffizienz – mit einer »Kontinuierlichen Öl- und Metallrückgewinnungs-Prozessanlage für Schlämme und Späne« bereitet das Projekt wertvolle Metalle aus industriellen Rückständen auf. In metallverarbeitenden Betrieben fallen jährlich durch spanende Fertigungsverfahren wie Drehen, Bohren und Fräsen etwa 1,5 Millionen Tonnen an Metallspänen an. Zur Kühlung der Werkstücke und Werkzeuge, um die Reibung während des Bearbeitungsprozesses zu verringern und um die abgetrennten Metallteilchen aus dem Arbeitsbereich zu entfernen, werden Kühlschmierstoffe (KSS) und Öle verwendet. Danach sind die anfallenden, hoch werthaltigen Späne mit mineralischen oder synthetischen Ölen belastet, sodass diese verunreinigten Späne nicht wieder direkt in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden können, um daraus hochwertige Stähle gleicher Zusammensetzung und Güte herstellen zu können. Dies würde aber besonders bei Spänen aus der Bearbeitung hochlegierter Stähle wirtschaftlich Sinn machen. Für diese Werkstoffe, bei denen die Gehalte der Legierungselemente (Nickel, Molybdän, Niob, Chrom, Vanadium, Wolfram usw.) im einstelligen bis zweistelligen Prozentbereich liegen, sind hohe Legierungskosten die Regel.

Das Grundprinzip der Späne-Entölung ist das Waschen des Materials mit einer wässrigen Tensidlösung, was im Technikumsmaßstab in einen Senkrechtschneckenförderer (50 kg/h) realisiert wurde. Auf Basis der Ergebnisse aus diesen Versuchen hat die RHM-Gruppe eine industrielle Anlage konstruiert, aufgebaut und in Betrieb genommen. Der wesentliche Unterschied zum Technikumsmaßstab ist eine horizontale Anordnung, die bei einer Hochskalierung weniger Platz nach oben benötigt.

Komplettaufbau der Entölungsanlage mit der Aufgabeeinheit am rechten und dem Späneaustrag am linken Bildrand.

Kontakt
Max Hoffmann
RHM Rohstoff-Handelsgesellschaft mbH
Rheinstr. 141
45478 Mülheim an der Ruhr

Tel.: +49 151 40431349
E-Mail:
m.hoffmann@rhm-rohstoffe.de

An die Entwicklung dieser Anlage zur Entölung von Spänen wurden folgende Anforderungen gestellt:

- Durchsatz von mindestens 1 t/h bei kontinuierlicher Betriebsweise,
- variable Anlagensteuerung zur Anpassung an unterschiedliche Einsatzmaterialien und Entölungsanforderungen,
- geringe Materialverschleppung, d. h. auch gute Reinigungsmöglichkeiten bei Wechsel des Einsatzgutes,
- geringer Verschleiß und hohe Wartungsfreundlichkeit,
- geringer Ressourcenverbrauch an Energie, Wasser und Chemikalien,
- Einhaltung geltender umweltrechtlicher und arbeitsschutzrechtlicher Anforderungen.

Kernstücke dieser Anlage sind Reinigungs- bzw. Spültrommeln, in denen die aufgegebenen Späne so weit vereinzelt werden, dass das Reinigungs- bzw. Spülmedium die gesamte Oberfläche benetzen und somit seine volle Wirkung entfalten kann. Das »KOMPASS«-Verfahren gewinnt die Metalle ohne Einsatz von umweltbelastenden Chemikalien für den Wertstoffkreislauf zurück.

Neben der koordinierenden RHM Rohstoff-Handelsgesellschaft mbH waren das Institut für Technologien der Metalle der Universität Duisburg-Essen, das Institut für Energie- und Umwelttechnik Duisburg und das Unternehmen Federal-Mogul Burscheid GmbH beteiligt.

Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes ist es gelungen, einen industriellen Entölungsprozess (ca. 5.000 t/a) zu entwickeln, mit dem werthaltige Metalle, die als Legierungselemente in Bearbeitungsspänen enthalten sind, zurückgewonnen werden können. Das Waschen von ölbehafteten Metallspänen mit Tensidlösungen ergibt Restölgehalte von unter einem Prozent. Somit sind die Späne keine belasteten Abfälle mehr und können ohne weitere Behandlung in metallurgischen Prozessen eingesetzt werden. Anders als bei den Spänen wurde beim Waschen von Schleifschlämmen mit Tensidlösungen – aufgrund der deutlich geringeren Korngrößen (µm-Bereich) – keine ausreichende Entölung erzielt, weshalb das Verfahren der trockenen Entölung im Pilotmaßstab entwickelt wurde. Der Schleifschlamm wird mit einer gröberen Aktivkohle gemischt, die das Öl adsorptiv aufnimmt und die anschließend durch einen Siebprozess wieder abgetrennt wird.

Auf der Basis im Projekt durchgeführter Forschungsarbeiten hat der Projektkoordinator RHM eine industrielle Entölungsanlage konstruiert und in Betrieb genommen, in der Späne in einem mehrstufigen Prozess mit Wasser und Tensiden gewaschen werden. Im Vergleich zu bisher genutzten thermischen Verfahren werden der Energieeinsatz um ca. 40 Prozent und die CO_2-Emissionen um gut zwei Drittel gesenkt. Für die Entölung von Bearbeitungsschlämmen wurde eine Pilotanlage (300 kg/h) entwickelt, mit der Schlämme in einem trockenen Prozess entölt werden können.

ReeL – Ressourceneffiziente Herstellung von Lederchemikalien

Alt verhilft Neu zu Individualität: Das Projekt »ReeL« verwendet Reste aus der Lederproduktion zum Gerben neuen Leders. Die nachhaltige Innovation wurde in einer Anlage vor Ort im Gerbereibetrieb installiert. Damit schließt sich der Kreislauf vom Abfall zum neuen Produkt dort, wo er gebraucht wird. Das spart nicht nur Ressourcen, sondern auch Logistik.

Leder

Aus Lederresten werdenn Gerbstoffe für neues Leder gewonnen – dank der »ReeL«-Anlage direkt vor Ort im Gerbereibetrieb.

Produktionsnähe verkürzt Logistik

Die Technologie von »ReeL« (Ressourceneffiziente Herstellung von Lederchemikalien) ist auch eine Innovation in Sachen Logistik: Lederreste werden nicht zentral in industriellen Großanlagen im Irgendwo aufbereitet, sondern dort, wo sie anfallen. Das Forschungsprojekt hat eine modulare Pilotanlage für den Betrieb in einer Gerberei errichtet. In unmittelbarer Nähe zur Lederherstellung wird in der Anlage die hauptsächliche Innovation umgesetzt, aus den angefallenen Lederresten Gerbstoffe zu gewinnen. Die Zutaten des nachhaltigen Nachgerbstoffes bestehen aus den Schnittabfällen und Falzspänen des Leders sowie pflanzlicher Biomasse.

Aus der Werkstatt in die Werkstatt

Bis eine Tierhaut in Leder für Schuhe, Taschen, Jacken und Co verwandelt wird, durchläuft sie einen vierstufigen Produktionsprozess. Zunächst wird sie in einer Wasserwerkstatt auf den Gerbprozess vorbereitet. Dann erfolgt die Gerbung – die Haut wird stabilisiert, indem ihre Kollagenfaser chemisch fixiert wird. Beim anschließenden Nachgerben erhält das Leder seinen artikelspezifischen Charakter, indem die fixierte Ledermatrix je nach Anwendung mit Nachgerbstoffen gefüllt, mit Farbstoffen gefärbt und mit Fettungsmitteln auf Weichheit und Funktionalität eingestellt wird. Im letzten Arbeitsgang erhält die Lederoberfläche einen dünnen Schutzfilm aus Lack. Erst danach erfolgt die Verarbeitung zu den vielfältigen Lederprodukten.

Der im Projekt »ReeL« wiederverwertete Lederabfall entsteht vor allem bei der Einstellung der Lederstärke, dem Falzen: Das halbfertige Leder wird nach der Gerbung durch eine rotierende Walze über die gesamte

Kontakt
Dr. Dietrich Tegtmeyer
TFL Ledertechnik GmbH
Otto-Bayer-Straße
51061 Köln

Tel.: +49 21717914534
E-Mail:
dietrich.tegtmeyer@tfl.com

Ergebnisse
In der Anlage wurden viele Muster des Standardprodukts »X-Biomer RLX-M« hergestellt, das zu etwa 90 Prozent aus Falzspänen besteht. Einige Mustermengen wurden an potenzielle Interessierte geliefert. Die Versuche zeigen, dass das Produkt gut einsetzbar ist, die Mengen aber nicht ausreichen, um eine Produktionsanlage mit etwa 1.500 Jahrestonnen Kapazität auszulasten. Aus diesem Grund wurden weitere Produkttypen mit anderen Eigenschaften entwickelt, die ebenfalls in der Anlage hergestellt werden können und den Gerbereien ein breiteres Einsatzspektrum ermöglichen. Der Fokus lag nun nicht mehr auf maximaler Recyclingrate, sondern auf maximaler Auslastung der Anlage. Mittlerweile gibt es ein Produktportfolio von sechs Typen, weitere sind in der Entwicklung. Alle diese Produkte wurden bereits pilotiert und an Kundschaft bemustert, Versuche laufen.

Fläche auf seine gewünschte Dicke genormt. Die dabei anfallenden Falzspäne summieren sich allein in Deutschland jedes Jahr auf etwa 7.000 Tonnen, weltweit wird die Menge auf 600.000 Tonnen jährlich geschätzt. Neben den Falzspänen entstehen auch Schnittreste – in Deutschland schätzungsweise 1.500 bis 2.000 Tonnen jährlich. Den überwiegenden Teil dieser Abfälle entsorgen die Gerbereien derzeit mit teilweise erheblichen Kosten.

Die »ReeL«-Pilotanlage ist seit November 2017 erfolgreich bei Heller-Leder im Betrieb. Die chemische Synthese läuft einwandfrei. Per Remote-Zugriff können externe Expertinnen und Experten bei Problemen direkt eingreifen. Zur Dosierung der Vorprodukte wurden optimierte Zugabesysteme getestet, insbesondere die Dosierung der Falzspäne erforderte mehrere Entwicklungsschleifen. Im Oktober 2019 wurde ein neuer Rohrkettenförderer in Betrieb genommen, der problemlos die benötigten Mengendosierungen (500 Kilogramm in einer Stunde) erreicht und im Scale-up auch die erforderlichen Produktionsmengen (zehn Tonnen pro Stunde) schaffen würde.

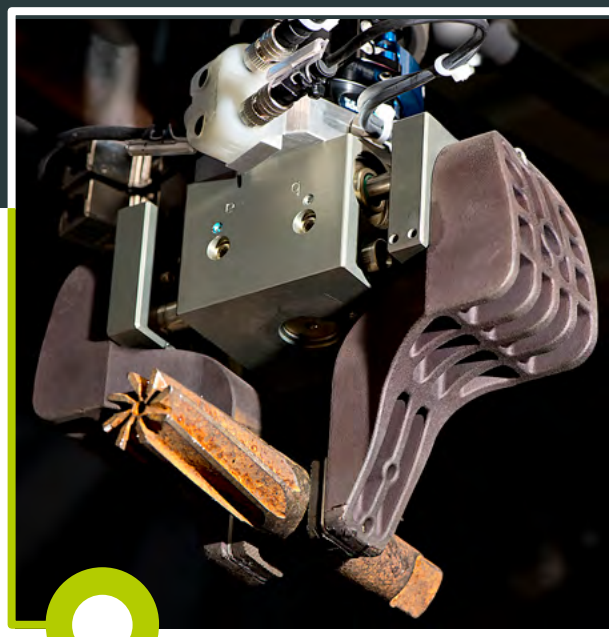
Zum Vorhaben »ReeL« hatten sich das Forschungsinstitut Invite, das Chemieunternehmen Lanxess und die Gerberei Heller-Leder zusammengeschlossen. Im weiteren Verlauf hat die TFL Ledertechnik GmbH das Geschäft mit organischen Lederchemikalien von Lanxess übernommen. Da das Interesse im Markt für eine Produktionsanlage nach dem Vorbild von »ReeL« weiterhin hoch ist, wird die TFL die Aktivitäten weiterführen.

Weiterhin wurde an der Projekterweiterung hin zu chromhaltigen Falzspänen gearbeitet. Die Idee ist, das Chrom nach der Hydrolyse abzutrennen, aufzuarbeiten und ebenfalls als Gerbstoff in den Prozess zurückzuführen. Für dieses Verfahren wurde ein Patent eingereicht. Vorversuche im Labor haben die Machbarkeit bestätigt. Derzeit ist ein Anlagenmodul im Bau, mit dem die Vorversuche im Pilotmaßstab validiert werden sollen. Darüber hinaus hat das Projektteam zusammen mit dem Deutschen Textilforschungszentrum Nord-West eine Anwendung des Proteinhydrolysats als Flammschutzmittel für den Einsatz bei Textilien untersucht. Auch diese Arbeiten befinden sich in der Entwicklung.

PLUS – Pilotanlage zur lasergestützten Sortierung von Sonderlegierungen

Das Projekt »PLUS« sortiert gemischte Metallschrotte mittels Lasertechnik. Wertvolle Sonderlegierungen mit hohen Wolfram-, Kobalt- oder Titangehalten können so zurückgewonnen und verwertet werden. Die erste industrielle Anlage von »PLUS« ist flexibel und wirtschaftlich einsetzbar.

Wolfram ▪ Kobalt ▪ Niob ▪ Chrom ▪ Titan



Das Ausgangsmaterial: gemischte Metallschrotte
Sekundärrohstoffe aus dem Metallrecycling sind eine wichtige nachhaltige Alternative zu Primärrohstoffen. Auch seltene Metalle wie Wolfram, Kobalt, Niob, Chrom und Titan können – als Reinmetalle oder Legierungen – recycelt werden.

Metallschrotte sind jedoch häufig vermischt. Unterschiedliche Metalle liegen in verschiedenen Legierungen, Größen und Formen vor. Diese Vermischungen, verbunden mit Verunreinigungen und Schmelzverlusten, senken die Recyclingquote deutlich. Oft haben die Recyclingprodukte zudem nur geringe Qualität. Für viele Schmelzwerke ist das Aufbereiten dieser Schrotte deswegen unwirtschaftlich, denn die notwendigen Sortierprozesse sind sehr aufwendig. Gemischte Schrotte sind damit ein bisher wenig genutztes Potenzial.

Bisher konnten diese gemischten Fraktionen nur manuell sortiert werden. Die Fachleute nutzen dafür Klassifiziergeräte der optischen Emissionsspektroskopie oder Röntgenfluoreszenzanalyse. Das »PLUS«-Verfahren hat den Sortierprozess mittels neuer Technologie wirtschaftlicher gestaltet. Die große Herausforderung dabei: Innerhalb der Materialgruppen Schnellarbeitsstahl, Hartmetall und Titan müssen

Ergebnisse
Im Projekt konnte die Eignung des technologischen Ansatzes nachgewiesen werden. Die Schrottteile lassen sich mit optischer Messtechnik geometrisch erfassen. Anhand dieser Bilddaten werden die Einzelteile identifiziert und die beiden Kernprozesse der weiteren Verarbeitung gesteuert. Die zu trennenden Materialklassen sind laserspektroskopisch mit guter Reinheit identifizierbar. Auch innerhalb einer Schrottart, z. B. Schnellarbeitsstahl, werden mehrere Legierungsklassen anhand ihrer chemi-

Kontakt
Martin Geisler
CRONIMET Ferroleg. GmbH
Südbeckenstraße 22
76189 Karlsruhe

Tel.: +49 721 95225-507
E-Mail:
geisler.martin@cronimet.de

mehr als 20 verschiedene Legierungen unterschieden werden. Erkannt und sortiert werden sollen auch kleine und kleinste Schrottteile. Pro Teil sollen Analyse und Sortierung in wenigen Sekunden erfolgen.

Die Innovation: gut sortierter Schrott

Für die industrielle Pilotanlage nutzte das Forschungsteam, die Firma CRONIMET und das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, die Methode der Laser-Emissionsspektrometrie. Deren Vorteil gegenüber dem zeitaufwendigen Sortieren per Hand ist, dass die Messung des Schrotts schnell und berührungslos erfolgt. Damit die Lasertechnologie erfolgreich ist, müssen ihr die Bestandteile des gemischten Metallschrotts einzeln zugeführt und sortiert werden.

Die »PLUS«-Pilotanlage ist eine automatisch arbeitende Sortieranlage mit Materialzuführung, laseranalytischer Klassifizierung und Robotik-basierter Sortierung. Zunächst erhalten die Metallschrotte mittels 3D-Objekterkennung eine erste Identifizierung. Dann übernimmt die Laserspektrometrie die sortenreine Analyse und Klassifizierung. Anschließend werden die Stücke automatisiert einzeln erfasst und sortenrein in Sammelbehältern abgelegt. Das Verfahren ermöglicht ein wirtschaftliches Recyceln von stark vermischten Metallschrotten.

Die Projektkoordinatorin CRONIMET aus Karlsruhe ist weltweite Spezialistin für Edelstahlschrott, Ferro- und Sonderlegierungen sowie Primärmetalle. Das Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT in Aachen hat das Laser-Messverfahren zur schnellen und berührungslosen Bestimmung von Werkstoffqualitäten entwickelt. Seine Methode der Laser-Emissionsspektrometrie wurde im Laufe des Projekts an den industriellen Prozess angepasst. Fachleute aus Anlagenbau und Steuerungstechnik unterstützten das Duo bei einzelnen Arbeitsschritten.

schen Zusammensetzung unterschieden. Nach der Identifikation können die Schrottteile mit einem mechanischen Greifer von einem bewegten Förderband aufgenommen werden, um sie anschließend der entsprechenden Materialfraktion zuzuführen. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde die Pilotanlage gemeinsam nach Projektende weiterentwickelt und wird nun bei der CRONIMET für die Sortierung gemischter Metallschrotte genutzt.

Die legierungsspezifische Sortierung gemischter Metallschrotte ist wirtschaftlich sinnvoll, trägt zur Rohstoffsicherung des Industriestandorts Deutschland bei und hat enormes Klimaschutzpotential. Mit der Pilotanlage werden derzeit vorwiegend Schnellarbeitsstahl- und Titanschrotte sortiert. Hierbei können durch die Sortierung bereits jetzt jährlich ca. 4.200 Tonnen CO_2-Äquivalente gegenüber der Verwendung von Primärrohstoffen eingespart werden.

STRATEGO – Bau und Betrieb einer HMVA-Aufbereitungsanlage zur Maximierung der Rückgewinnung von strategischen Metallen

»STRATEGO« gewinnt Kupfer und andere Metalle aus kleinsten Partikeln der Müllverbrennungsrückstände zurück. Die Pilotanlage bereitet zudem die mineralischen Reststoffe zu Materialien für den Bausektor auf.

Kupfer ▪ Aluminium ▪ Edelmetalle

Schlackepartikel aus Hausmüllasche werden durch Hochgeschwindigkeitstechnologie zerkleinert und die dadurch freigesprengten Metalle für das Recycling gewonnen.

Kleinste Körner aus der Hausmüllverbrennung
Jedes Jahr fallen in Deutschland rund fünf Millionen Tonnen Hausmüllverbrennungsschlacke an. Sie enthalten rund zehn Prozent Metall, größtenteils Eisenmetalle; zu einem kleineren Teil Nichteisenmetalle wie Aluminium, Kupfer und Edelmetalle. Bisher war eine Metallrückgewinnung nur aus dem Ascheanteil möglich, der eine Korngröße von mehr als drei Millimetern hat. Die kleinere Feinfraktion wird häufig vorab ausgesiebt und deponiert, die hier konzentrierten Wertstoffe gehen verloren.

An diesem Punkt setzte »STRATEGO« an: Das Projekt hat eine industrielle Anlage entwickelt und errichtet, die auch kleinste Partikel mit einer Größe zwischen 0,5 und 3 Millimetern aufbereiten kann. In diesen ist etwa die Hälfte aller in der Schlacke vorhandenen Nichteisenmetalle enthalten. Die Qualität der zurückgewonnenen Metalle entspricht den jeweiligen Primärmetallen. Ein weiteres Augenmerk des Projekts lag auf den Mineralien, die fast 90 Prozent der Hausmüllschlacke ausmachen. Auch diese werden aufbereitet und können als Ersatzbaustoff verwendet werden.

Technologie mit Hochgeschwindigkeit
In einem Vorgängerprojekt war bereits eine Technologie entwickelt und im Technikumsmaßstab erprobt worden. Die Menge der aus Hausmüllschlacke zurückgewonnen Nichteisenmetalle wurde verdoppelt. So kann deutschlandweit eine Rückgewinnung von jährlich 27.000 Tonnen Nichteisenmetallen aus 5,4 Millionen Tonnen Hausmüllasche erreicht werden.

Im anschließenden Vorhaben entwickelte die Kooperative aus Wirtschaft und Wissenschaft die Technologie im großtechnischen Maßstab

Kontakt
Prof. Dr.-Ing. Kerstin Kuchta
TU Hamburg
Institute of Circular Resource,
Engineering and Management
Blohmstraße 15
21079 Hamburg

Tel.: + 49 40 42878 3054
E-Mail: Kuchta@tuhh.de

Ergebnisse
Die »STRATEGO«-Anlage wurde im Juni 2019 fertiggestellt. Im August 2019 wurde der Probe- und Testbetrieb aufgenommen. Schon vorher war gezeigt worden, dass mit abnehmender Korngröße (unter drei Millimetern) der Anteil an Rohkupfer und Edelmetallen im Nichteisenmetallgemisch auf mehr als 45 Massenprozent ansteigt. Von der Aurubis AG durchgeführte Schmelzanalysen dieser Schwermetallkonzentrate wiesen Silbergehalte um 2.500 Gramm und Goldgehalte um 110 Gramm pro Tonne aus. Auch wurden Spuren von Palladium und Platin nachgewiesen. Insgesamt konnten mit dem neuen Verfahren 95,6 Prozent der enthaltenen Nichteisenmetalle zurückgewonnen werden. Nach Inbetriebnahme der Anlage wurde zunächst das Beta-MR-Programm (Beta-Metal Refining) mit den Nichteisen-Metallfraktionen 0/1,5 mm, 1,5/4,0 mm und 4,0/16,0 mm optimiert. Die Reinheit der veredelten Nichteisen-Metalle aus Hausmüllverbrennungsschlacken liegt danach über den Erwartungen. Das veredelte Kupferkonzentrat enthält nach den Schmelzanalysen der Firma Aurubis bis zu 130 Gramm Edelmetalle wie Gold, Platin und Palladium pro Tonne Kupferkonzentrat. Der Gehalt an Silber beträgt bis zu 3.500 Gramm pro Tonne Kupferkonzentrat.

weiter. Herzstück ist die Hochgeschwindigkeitsprallzerkleinerung der Schlackepartikel mit einer Geschwindigkeit von bis zu 1.280 Kilometern pro Stunde. Durch den Aufprall werden die Metalle freigesprengt und für das Recycling erschlossen. Neben der Optimierung dieser Technologie wollte »STRATEGO« auch die Rahmenbedingungen effizienter gestalten, unter anderem die Anlage komplett mit erneuerbaren Energien betreiben sowie Kreisläufe innerhalb der Schlackeaufbereitung schaffen.

Für »STRATEGO« haben sich die Unternehmen H-U-R Hamburg GmbH Hamburger-Umwelt-Recyclingtechnologien und C.C. Umwelt AG aus Krefeld mit der Technischen Universität Hamburg zusammengeschlossen. Die Ingenieurinnen und Ingenieure von H-U-R sind Fachleute auf dem Gebiet der Hochgeschwindigkeitsaufpralltechnologie. Die C.C. Umwelt AG unterhält in Krefeld, Hagen, Würzburg und Schwandorf große Aufbereitungszentren für Hausmüllverbrennungsschlacken mit einer Jahreskapazität von 750.000 Tonnen. Forschende des Lehrstuhls für Circular Resource Engineering an der TU Hamburg waren für die Modellierung, Simulation, Beprobung und Analytik der neuen Anlage zuständig.

Die metallische Leichtfraktion, die zu 75 Prozent aus reinem Aluminium besteht, wird direkt an Umschmelzbetriebe geliefert. Bis Ende Januar 2020 konnte der Projektpartner C.C. Umwelt AG darüber hinaus mehr als 700 Tonnen Kupferkonzentrat an die Kupferhütte Aurubis AG liefern. Auch konnten weitere erfolgreiche Tests mit der Beta-FFR-Linie (Beta-Fine-Fraction-Recovery) absolviert werden. Als Inputmaterial wurden die Schlacken-Fraktion 0/4 mm verwendet, die bis dahin großtechnisch nicht optimal verwertet werden konnten.

Circular Packaging – Demonstrationsanlage zum Recycling von Post-consumer-Verpackungs- und Verbundabfällen zu gereinigten Rohstoffen

Kunststoffverpackungen basieren zunehmend auf Mehrschichtlaminatfolien, die hochwertige Füllgüter vor Licht, Sauerstoff und anderen Umwelteinflüssen schützen. Sie konnten jedoch bisher nicht recycelt und in den ursprünglichen Verwendungszweck zurückgeführt werden. Mit dem CreaSolv® Prozess des Projekts »Circular Packaging« kann ein Großteil der Laminatkunststoffe recycelt werden.

Mehrschichtlaminate

Verpackungsabfälle aus Mehrschichtlaminaten können dank CreaSolv®-Prozess in ihre verschiedenen Bestandteile aufgetrennt und recycelt werden.

Geringe Recyclingfähigkeit von Verpackungen

Durch zunehmende Ansprüche an den Schutz von Gütern und Produkten sowie an lange Mindesthaltbarkeiten müssen Lebensmittel- und Konsumgüterverpackungen heute vielseitigen Anforderungen entsprechen. Diese werden im Design durch komplexe Systeme verschiedener Materialien realisiert, beispielsweise durch mehrschichtige Kunststofflaminate. Die häufig eingesetzten Mehrschichtlaminate aus nicht kompatiblen Polymeren, wie zum Beispiel PE/PA oder PP/PET, sind nach dem heutigen Stand der Technik nicht recyclingfähig, da die effiziente Trennung der Verbundmaterialien nicht möglich ist.

Zudem setzt sich das neue Verpackungsgesetz herausfordernde Ziele: Die Recyclingquote für Kunststoffverpackungen ist zum 1. Januar 2022 auf 63 Prozent gestiegen. Dies stellt die Recyclingbranche vor große technologische Herausforderungen, da viele bestehende Aufbereitungsanlagen nur Verpackungen aus Kunststoffmonomaterialien recyceln können. Mehrschichtlaminate aus Haushaltsabfällen werden daher thermisch verwertet.

Der CreaSolv®-Prozess als Lösung

Innovative Verfahren wie der CreaSolv®-Prozess ermöglichen die Verbundtrennung von Mehrschichtlaminaten. Diese Ansätze sind am Markt bisher weitgehend unbekannt und stehen aufgrund fehlender oder zu geringer Anlagenkapazitäten noch nicht als Branchenlösungen zur Verfügung. Doch die Technologie hat in enger Kooperation mit einem globalen Hersteller von Konsumgütern inzwischen den gesicherten Pilotanlagenmaßstab erreicht. Zudem besteht eine solide Datenlage zur hohen Qualität der aus Mehrschichtverpackungen erstellten Polyolefin-

Rezyklate. Das Projekt »Circular Packaging« sollte die Wirtschaftlichkeit und das Potenzial dieser Technologie aufzeigen.

Im Rahmen der Wertstofferfassung hat die Projektkoordinatorin, die Lober GmbH & Co. Abfallentsorgungs-KG, zahlreiche potenzielle Abfallfraktionen akquiriert und gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV deren Eignung analysiert. In Laborversuchen evaluierte das Forschungsteam die Qualität und Reinheit des extrahierten Kunststoffs. Gemeinsam mit potenziellen Interessierten bewertete es die aus Musterproduktionen erhaltenen Rezyklate auf deren industrielle Verwendbarkeit und ermittelte realisierbare Absatzpreise. Weiterhin wurden die Abfallfraktionen mit verschiedenen Vorbehandlungstechnologien konditioniert und deren Einfluss auf die Ausbeute und Rezyklatqualität in verschiedenen Szenarien monetär betrachtet.

Die Federführung für den Anlagenbau hatte die LÖMI GmbH. Sie verwendete die vom Fraunhofer IVV zur Verfügung gestellten verfahrenstechnischen Parameter, um die Anlagenkomponenten im Rahmen des Basic- und Detailed-Engineerings auszulegen und zu optimieren. Die Prozesseinheiten wurden in einer Skid-Bauweise vorgefertigt und am Lober-Standort Neunburg zu einer gesamten Anlage verschaltet. Gemeinsam erarbeiteten alle drei Projektbeteiligten die erforderlichen Unterlagen für ein reibungsloses Genehmigungsverfahren. Die Inbetriebnahme der Anlage erfolgte im April 2020.

Kontakt
Ulrich Weig
Lober GmbH & Co.
Abfallentsorgungs-KG
Industriestr. 4
92431 Neunburg vorm Wald

Tel.: +49 9672 9201-23
E-Mail:
u.weig@lober-entsorgung.de

Ergebnisse

Das entwickelte Verfahren stellt einen Durchbruch beim Recycling von Mehrschicht-Verbunden dar. Durch die durchgeführten Arbeiten, verfahrenstechnische Entwicklung und den Anlagenbetrieb konnte das selektive Auftrennen der Mehrschicht-Verbunde und die Rückgewinnung der Zielpolymere in vollem Umfang gezeigt werden. Die hergestellten Rezyklate weisen hierbei eine Reinheit von mehr als 99 Prozent auf und sind in den thermischen und mechanischen Eigenschaften identisch zu denen von Neuware. Parallel dazu konnte mit Anheben der TRL-Stufe infolge des Detailed Engineering der Grundstein für die erfolgreiche Einführung des Prozesses im Industriemaßstab gelegt werden. Die Bilanz des Prozesses im Hinblick auf die Energieeffizienz zeigt, dass für die Herstellung von einem Kilogramm Polyethylen-Rezyklat mind. 40 Prozent weniger Energie benötigt wird als für die Produktion von einem Kilogramm der substituierten PE-Neuware. Gleichzeitig kann dabei auch der CO_2-Fußabdruck deutlich reduziert werden.

Die Firma Lober GmbH wird das Verfahren bis 2026 in die industrielle Produktion überführen. Die erste Anlage wird in der Lage sein, jährlich 10.000 Tonnen an Mehrschichtlaminaten aus dem gelben Sack zu recyceln. In den Folgejahren sollen nach Erreichung der TRL-Stufe 9 weitere Anlagen mit einer Recyclingkapazität von mehr als 30.000 Tonnen Input pro Jahr folgen. Bereits heute konnten erste Kundinnen und Kunden gewonnen und Produkte entwickelt werden. Diese erfüllen den Recyclinganspruch »vom gelben Sack zurück in den Supermarkt«. Zukünftig wird die Freigabe für Lebensmittelkontakt nach Anforderung der US-amerikanischen und der Europäischen Behörden (FDA und EFSA) angestrebt.

iCycle – Rückgewinnung von Metallen und Energie aus Rückständen der Elektroschrottaufbereitung

In alten Elektro- und Elektronikgeräten stecken wertvolle Rohstoffe, die bisher jedoch schlecht trennbar sind und daher nur in geringem Umfang recycelt werden. Im Projekt »iCycle« werden die metallhaltigen Shredderrückstände so behandelt, dass das entstehende Konzentrat zur Rückgewinnung der Metalle in integrierten Kupferhütten genutzt werden kann.

Kupfer ▪ Gold ▪ Silber ▪ Platingruppenmetalle

Recycling von Elektroschrott
Elektro- und Elektronikaltgeräte (EAG) sind der am schnellsten wachsende Abfallstrom weltweit. Obwohl in den Altgeräten global recycelbare Materialien im Wert von mindestens 55 Milliarden US-Dollar stecken, werden aktuell nur rund 20 Prozent auf offiziellen Recyclingwegen aufbereitet.

Global betrachtet ist der Hauptgrund eine unzureichende Erfassung, doch selbst bei einem gut funktionierenden Recycling nach dem besten verfügbaren Stand der Technik gibt es Grenzen der Wertstoffrückgewinnung aus Altgeräten. Gründe für die unvollständige Separation und Sortierung sind vor allem verklebte, miniaturisierte oder auf ähnliche Weise nicht beziehungsweise schlecht trennbare Materialien. Könnte dieses Material direkt in integrierten Kupferhütten eingesetzt werden, würde dies eine deutlich verbesserte Rückgewinnung von bis zu 17 Metallen ermöglichen, darunter Kupfer, Gold, Silber und Platingruppenmetalle.

Der iCycle®-Prozess für Shredderrückstände
Das Verbundvorhaben »iCycle« hat die Anwendbarkeit eines im Vorgängerprojekt »gagendta+« entwickelten Verfahrens erprobt. Bei dem Verfahren handelt es sich um den innovativen Prozess iCycle®, der vom Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT in Sulzbach-Rosenberg entwickelt worden war.

Dieser Prozess ermöglicht eine Rückgewinnung von Metallen aus heterogenen und kunststoffreichen Abfallströmen wie Elektroschrott. Das auf einer Pyrolyse basierende Verfahren zersetzt die in Shredderrückständen vorhandenen Kunststoffe so, dass die enthaltenen Metalle

Ergebnisse
Im Rahmen des Projektes »iCycle« konnte die noch innovative Technologie zur thermo-chemischen Verwertung von Shredderrückständen aus der Aufbereitung von Elektro- und Elektronikaltgeräten zur Marktreife weiterentwickelt werden. Mit Abschluss des Projektes wird der erste Demonstrator

Kontakt
Prof. Dr. Peter Hense
RSL Recycling Solutions Lippetal GmbH
Schoneberger Str. 8
59510 Lippetal

Tel.: +49 2923 516-9311
E-Mail: p.hense@rsl-recycling.de

gebaut, durch den sich das Recycling vieler Metalle, insbesondere von Kupfer und der Edelmetalle Gold, Silber sowie der Platingruppenmetalle, signifikant verbessert. Gleichzeitig ermöglicht die iCycle®-Technologie auch die effiziente Nutzung der in den Rückständen enthaltenen Energie.

schonend aufkonzentriert werden. Das gewonnene Metallkonzentrat wird zur finalen Rückgewinnung der Metalle in integrierten Kupferhütten eingesetzt. Als Nebenprodukte entstehen Öl und Gas, die als Energieträger oder Grundstoffe für die chemische Industrie ebenfalls weiterverarbeitet werden können.

Da der Abfallstrom dieser sogenannten Shredderrückstände trotz voranschreitender Trenn- und Sortierungstechnik wächst, war das Ziel des Projekts »iCycle«, den Prozess auf einen Maßstab zu vergrößern, der eine breite industrielle Anwendung erlaubt.

Die gesamte Wertschöpfungskette im Blick

Für »iCycle« haben sich drei Kooperierende aus Wissenschaft und Wirtschaft zusammengefunden. Zunächst hat Fraunhofer UMSICHT den Prozess anhand eines Prototyps optimiert, um beispielsweise die Produktausbeuten und -qualitäten weiter zu steigern. Dazu standen unterschiedlichste Shredderrückstände von EAG-Aufbereitenden zur Verfügung, die das Projekt in assoziierter Zusammenarbeit unterstützten. Auch eine integrierte Kupferhütte als assoziierte Partnerin unterstützte das Projektkonsortium durch Analysen und Bewertungen erzeugter Metallkonzentrate.

Parallel erarbeiteten die Firmen Becklönne Maschinenbau und RSL Recycling Solutions Lippetal das Engineering und Upscaling des geplanten Demonstrators und der dazugehörigen Peripherie. Mit Abschluss des Projektes wird das Verfahren nun in Form eines Demonstrators mit einer Durchsatzkapazität von 500 kg/h gebaut und am Standort einer Müllverbrennungsanlage in Betrieb genommen.

Für den Stoffstrom der Shredderrückstände aus EAG besteht – konservativ gerechnet – ein Potenzial von mindestens 18 weiteren Anlagen der mit dem Demonstrator umgesetzten Größe in Deutschland bzw. 75 in der EU. Neben E-Schrott können mit iCycle® auch weitere Verbundstoffströme wie Lithium-Ionen-Batterien oder glas- oder carbonfaserverstärkte Kunststoffe verwertet werden. Mittelfristig soll iCycle® ein Recycling jedoch nicht nur aus der festen Produktfraktion heraus ermöglichen, sondern im chemischen Recycling zudem auch aus dem Pyrolyseöl.

GoldRecApp – Rückführung von Edelmetallen in den Wirtschaftskreislauf mittels Biotechnologie

Die Materialstärken von industriellen edelmetallhaltigen Beschichtungen werden durch neue Technologien und Verfahren immer geringer. Das Forschungsprojekt »GoldRecApp« untersucht, wie die in Abfällen enthaltenen Edelmetalle dennoch zurückgewonnen werden können. Dazu werden die edelmetallhaltigen Rückstände einer biotechnologischen Behandlung mithilfe spezieller Bakterienstämme unterzogen, wodurch die Wert- und Edelmetalle vom Trägermaterial getrennt und so aufkonzentriert werden können.

Gold ▪ Kupfer

Die Rückgewinnung geringer Mengen von Edelmetallen aus industriellen Bauteilen war bisher kaum wirtschaftlich möglich, kann aber dank Bioleaching mithilfe von Bakterien realisiert werden.

Separation von Goldstreifen

Goldbeschichtete Materialien für industrielle Anwendungen, z. B. Kontaktstreifen auf Leiterplatten, bestehen zumeist aus einer Kupfer-Trägerschicht, auf die das Edelmetall in einer extrem dünnen Schicht aufgebracht wurde. Diese Beschichtungen sind nur wenige Mikrometer stark und machen im Masseverhältnis zum polymeren Trägermaterial lediglich einige Zehntel-Prozent aus. Deshalb ist die Rückgewinnung derartiger Beschichtungen von Produktionsresten, Ausschussteilen und separierten Abfällen mit konventionellen Schmelztechnologien oft unwirtschaftlich. Erfolgversprechender scheint eine weitgehende Abtrennung und Separation der edelmetallhaltigen Beschichtungen vor der Schmelze, wobei in der Goldfraktion geringe Verunreinigungen enthalten sein dürfen.

Biologische Helfer separieren wertvolle Komponenten

Das Forschungsvorhaben »GoldRecApp« nutzt die bakterielle Laugung (Bioleaching) für derartige Recyclingprozesse und hat in diesem Zusammenhang eine spezielle Apparatur realisiert. Das Bioleaching nutzt in der Natur frei vorkommende Bakterien, die für Mensch und Umwelt ungefährlich sind, um Metalle aus schwer verarbeitbaren oder wertstoffarmen Erzen, Konzentraten und Tailings (feinkörnige Rückstände und Schlämme) freizusetzen.

Acidogene Eisen- und Schwefel-oxidierende Bakterien, beispielsweise Acidothiobacillus ferrooxidans oder Leptospirillum ferrooxidans, lassen sich für die Lösung von Kupfer nutzen. Diese Bakterien verwenden Eisen[II]-oxid als Energiequelle. Das dabei gebildete Eisen[III]-oxid kann das metallische Kupferträgermaterial oxidieren und wird dabei selbst zu

Kontakt
Dr. Anja Lohse
m&k GmbH
Im Camisch 49
07768 Kahla

Tel.: +49 3642 4811-0
E-Mail:
a.lohse@mk-edelmetall.de

Eisen[II]-oxid reduziert. Es steht den Bakterien damit wieder als Energiequelle zur Verfügung. Zum Wachstum benötigen die Bakterien neben den Eisenionen lediglich Kohlenstoff in Form von CO_2 aus der Luft und wenige weitere Elemente wie Stickstoff, Phosphor und Schwefel, die in Form einer Nährlösung zugeführt werden.

Diese biotechnologischen Verfahrensschritte werden für die Rückgewinnung der dünnen Goldbeschichtungen und ihrer Kupferträger angewendet. Im Leachingprozess wird das Kupferträgermaterial gelöst, die Goldbeschichtung fällt als Flitter an und wird im weiteren Verlauf abgetrennt. Mit dieser Technologie können die gewonnenen Goldpartikel den Schmelzprozessen weitgehend separat zugeführt werden.

Gegenüber der konventionellen, ausschließlich pyrometallurgischen Behandlung reduziert sich die thermisch zu behandelnde Metallmenge um deutlich mehr als 90 Prozent. Die sonst verbrannten polymeren Trägerstrukturen bleiben bei der biologischen Behandlung erhalten und können separat verwertet werden. Neben dem Gold wird auch das Kupfer mittels elektrochemischer Prozesse aus der Lösung zurückgewonnen. Die biologische Laugungslösung wird anschließend regeneriert und kann über mehrere Monate verwendet werden.

Das Forschungskonsortium bestand aus der m&k GmbH als Edelmetallrecycler, dem Fachgebiet Kreislaufwirtschaft der BTU Cottbus-Senftenberg als forschungsintensive Universität mit starker Anwendungsorientierung sowie der Rhode und Wagner GmbH als Anlagenbauer mit Erfahrung im Bau von nass-chemischen Versuchs- und Pilotanlagen.

Ergebnisse

Mit dem Projekt »GoldRecApp« gelang es, die bisher nur im Labor realisierten Recyclingprozesse unter Nutzung von Bioleachingtechnologie in eine industriell nutzbare Größenordnung zu überführen. In der in Phase I genutzten Technikumsanlage mit apparativen Elementen wie Reaktoren, Pumpen, Dosierungs- und Heizelementen wurde der Aufbau unter industriellen Bedingungen erprobt und die einzelnen Betriebsphasen optimiert. Dabei konnte z. B. die zeitkritische Phase der elektrolytischen Rückgewinnung des Kupfers um 40 Prozent reduziert und die Mehrfachverwendung der Leachinglösung optimiert werden. In Phase II erfolgten das Upscaling der Gesamtanlage um den Faktor 30 und ein Probebetrieb über mehr als acht Monate, bei dem Mengen von bis zu 15 kg pro Woche verarbeitet werden konnten. Mit der Realisierung der Anlage wurde ein Entwicklungsstand auf dem TRL-Niveau 7 nachgewiesen.

Die mittels Bioleaching realisierte Rückgewinnung der Edel- und Wertmetalle verringert die Abhängigkeit von Rohstoffimporten. Zudem wird ein Beitrag zur Ressourcenschonung geleistet, indem signifikante Mengen von Primärrohstoffen (insbesondere Gold und Kuper) substituiert werden können.

Der Beitrag zur Reduzierung von CO_2-Emissionen durch die biologischen Prozesse und die Substitution der Pyrometallurgie wird Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Darüber hinaus sollen weitere potenzielle goldhaltige Inputmaterialien auf ihre Verarbeitungsfähigkeit untersucht werden.

KONDEOS – Metalloxid-Konditionierung von Elektroofenschlacken zur Erzeugung ökologischer Baustoffe und vermarktungsfähiger Metalle

Schlacken aus der Herstellung von Stahl und Roheisen werden heute als Baustoff eingesetzt. Um dies künftig auch bei geänderten gesetzlichen Anforderungen zu gewährleisten und die Ressourceneffizienz weiter zu steigern, wird im Projekt »KONDEOS« die Schlacke im noch flüssigen Zustand behandelt.

Roheisen ▪ Stahl ▪ Schlacken

Schlacken: Abfall oder Rohstoff?
Bei der Herstellung von Stahl entstehen Schlacken. Dabei handelt es sich um Verbindungen aus Metallen und anderen Elementen, vor allem Sauerstoff. Die Ersatzbaustoffverordnung (EBV) tritt im August 2023 in Kraft. Sie wird bundesweit die Verwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen im Straßen- und Wegebau regeln und damit auch das Bewertungsverfahren, ob ein Material als Baustoff zugelassen wird. Nach dem jetzigen Stand der Technik würde ein Großteil der in Deutschland produzierten Schlacken, die aus einem Elektrolichtbogenofen stammen, als nicht vermarktungsfähig eingestuft – und müsste deponiert werden.

Das Forschungsprojekt »KONDEOS« hat zum Ziel, eine industrietaugliche Referenzanlage zu entwickeln, mit der Elektroofenschlacke (EOS) für die neuen Anforderungen der Umweltverträglichkeit gezielt konditioniert werden kann. Damit ist sie für bautechnische Zwecke verwendbar.

Konditionierung der Schlacke
Die »KONDEOS«-Expertinnen und -Experten haben eine großtechnische Anlage entwickelt, mit der unterschiedliche Behandlungsmittel direkt beim Abstich der heißen, flüssigen Schlacke zugegeben werden. Im »KONDEOS«-Projekt wurde durch die Konditionierung die Struktur und die Zusammensetzung der Schlacke so verändert, dass zum einen die Umwelteigenschaften und zum anderen mechanische Festigkeiten denen natürlicher Gesteine ähneln oder sogar

übertreffen. So wird bei Einhaltung neuer Grenzwerte ein vermarktbarer Baustoff erzeugt. Des Weiteren wurden die in der Schlacke enthaltenen Metalle durch die Konditionierung im flüssigen Zustand und die nachfolgende Aufbereitung zurückgewonnen. Auf diese Weise werden nachhaltig Primärrohstoffe und Deponiekapazitäten geschont.

Im Verbundprojekt »KONDEOS« kooperierten drei Unternehmen und zwei wissenschaftliche Institute in enger Zusammenarbeit. Die Georgsmarienhütte GmbH übernahm die Projektleitung. Sie war zuständig für die Entwicklung und Durchführung von Konditionierungsversuchen an der Prototyp-Anlage und die anschließende Bewertung der Reaktionsprodukte.

Die Hermann Rauen GmbH & Co. ist seit 70 Jahren Spezialistin auf dem Gebiet der Aufbereitung von Eisenhüttenschlacken und brachte ihre Erfahrung in diesem Bereich ein. Dafür wurde bei der Firma eine Aufbereitungsanlage speziell für diese Materialien entwickelt und gebaut.

Die DK Recycling und Roheisen GmbH & Co. ist das weltweit größte Unternehmen zur Aufbereitung von eisenhaltigen Reststoffen der Stahlindustrie und untersuchte die bei der Aufbereitung entstandenen metallischen Reaktionsprodukte.

Mit dem Lehrstuhl für Metallurgie der Eisen und Stahlerzeugung der Universität Duisburg-Essen und dem FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V wurden die Unternehmen durch wissenschaftliche Ansprechpersonen unterstützt.

Kontakt
Dr. Manuel Foppe
Georgsmarienhütte GmbH
Neue Hüttenstraße 1
49124 Georgsmarienhütte

Tel.: +49 5401 39-4351
E-Mail:
manuel.foppe@gmh-gruppe.de

Ergebnisse

Durch den erfolgreichen Abschluss des Forschungsprojekts »KONDEOS« ist es möglich, ca. 100.000 Tonnen Elektroofenschlacke pro Jahr so zu behandeln, dass diese weiterhin als mineralischer Ersatzbaustoff eingesetzt werden kann. Mit der entwickelten Konditionierungsanlage sowie der nachfolgenden Aufbereitung wird die neue Ersatzbaustoffverordnung vollumfänglich eingehalten. Des Weiteren wird eine Metallfraktion gewonnen, die in den Wertstoffkreislauf zurückgeführt werden kann. Durch das Forschungsprojekt wurde erreicht, dass die Schlacke vollständig verwendet wird sowie nachhaltig Primärrohstoffe und Deponiekapazitäten geschont werden.

Durch die entwickelte Konditionierungsanlage und Aufbereitungstechnik ist eine Weiterverwendung der produzierten Schlacke auch bei zukünftig steigenden Umweltanforderungen gesichert. Hierdurch wird ein maßgeblicher Anteil an einer ressourcenschonenden Stahlherstellung geleistet.

In naher Zukunft soll die entwickelte Technik in den betrieblichen Ablauf integriert werden. Des Weiteren soll das eingesetzte Konditionierungsmittel aus sekundären Quellen stammen.

r+TeTra: Wissenschaftliche Begleitung und Potenzialanalyse

Von Dr. Katrin Ostertag, Leiterin des Competence Centers Nachhaltigkeit und Infrastruktursysteme, Fraunhofer ISI

Über die gesamte Laufzeit der Fördermaßnahme r+Impuls hat das Fraunhofer ISI zusammen mit der TU München ein Begleit- und Transfervorhaben durchgeführt – r+TeTra. Es zielte darauf ab, die Innovationskraft in r+Impuls zu stärken. Dazu hat r+TeTra zahlreiche Veranstaltungen zur Vernetzung durchgeführt und durch Öffentlichkeitsarbeit beim Transfer der Ergebnisse unterstützt. Zu übergreifenden Querschnittsfragen wurden Workshops veranstaltet. Durch die fortgeschrittene Marktnähe der Entwicklungsvorhaben in r+Impuls standen hier insbesondere genehmigungsrechtliche Aspekte und Möglichkeiten der Gestaltung von Geschäftsmodellen im Fokus. Auch die junge Generation wurde im Rahmen eines Projekts für Schulen mit den Fragen rund um Ressourceneffizienz vertraut gemacht. Was r+Impuls insgesamt zu den verschiedenen Facetten der Nachhaltigkeit beigetragen hat, hat r+TeTra in eigenen Analysen untersucht.

Ökologische Potenziale der r+Impuls-Lösungen

Ein wesentliches Anliegen von r+Impuls ist die Steigerung der Ressourceneffizienz. Es unterstützt damit das Ziel der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie, die Gesamtrohstoffproduktivität pro Jahr um 1,5 Prozent zu steigern. Dieser Indikator misst, wie viel Wertschöpfung mit den direkt und indirekt eingesetzten Rohstoffen erzielt werden kann. Für ausgewählte Vorhaben wurde ihr Beitrag zu diesem Indikator quantifiziert. Bei vollständiger Umsetzung könnten in Summe ca. 10,6 Millionen Tonnen Rohstoffe pro Jahr eingespart werden. Das sind etwas mehr als ein Viertel des jährlichen Reduktionsziels. Weitere noch nicht quantitativ bewertete r+Impuls-Vorhaben versprechen bedeutende zusätzliche Beiträge zur Ressourceneffizienz.

Zusätzliche ökologische Potenziale liegen in der Reduktion des Primärenergieverbrauchs und der Treibhausgasemissionen (gemessen in CO_2-Äquivalenten). Des Weiteren wird als vierte Wirkungskategorie das Versauerungspotenzial (gemessen in SO_2-Äquivalenten) bewertet. Es wird insbesondere durch die Substitution von Primärrohstoffen und fossilen Energieträgern günstig beeinflusst. Die bisherige Auswertung der Vorhaben zeigt eine große Bandbreite bzgl. der Wirkungen in den verschiedenen ökologischen Dimensionen (vgl. Abb. 1). In Summe werden die ökologischen Belastungen gegenüber dem Referenzfall bedeutend reduziert.

Beitrag der r+Impuls-Lösungen zur Versorgungssicherheit

In r+TeTra wurden auch die Einsparpotenziale für wirtschaftsstrategische Rohstoffe analysiert. Durch einen Vergleich mit dem derzeitigen deutschen Verbrauch sowie Informationen zur Kritikalität eines jeden Rohstoffes erfolgte eine Abschätzung des möglichen Einflusses der r+Impuls-Lösungen auf die Versorgungssicherheit Deutschlands mit wirtschaftsstrategischen Rohstoffen. Aus den Untersuchungen von r+TeTra liegen quantitative Ergebnisse vor, die auf eine Verbesserung der Versorgungslage mit Rohstoffen durch eine Verbreitung der in r+Impuls entwickelten Verfahren schließen lassen. Die Effekte werden im Prinzip auf zweierlei Wegen erreicht: Manche Verfahren erhöhen die Effizienz im Einsatz des Rohstoffs, andere widmen sich der Wiedergewinnung aus einem Abfallstrom und somit der Bereitstellung eines Sekundärrohstoffs.

Die potenziellen Effekte betreffen insgesamt 16 wirtschaftsstrategische Rohstoffe, davon acht derzeit auf der Liste der kritischen Rohstoffe der EU. Die Rohstoffe lassen sich in Massenmetalle (z. B. Eisen/Stahl, Aluminium, Kupfer), Stahlveredler (Chrom, Kobalt, Molybdän, Vanadium), Edelmetalle (Silber, Gold, Palladium) und Technologiemetalle (Magnesium, Neodym, Zinn, Titan, Wolfram) sowie ein Industriemineral (Flussspat) kategorisieren. Das Potenzial zur Verbesserung der Versorgungssicherheit wurde unter der Annahme quantifiziert, dass sich die r+Impuls-Lösungen vollständig in ihrem gesamten Anwendungsfeld durchsetzen. Ein positiver Beitrag zur Versorgungssicherheit zeigt sich zum Beispiel bei der Versorgungssituation mit Kobalt. Bereits heute durch seine Herkunft hauptsächlich aus dem Kongo als sehr kritisch in seiner Versorgungslage eingeschätzt, wird für die kommenden Jahre ein stark steigender Bedarf erwartet. Die r+Impuls-Lösungen könnten ein Potenzial von 19 Prozent Einsparung bzw. Rückgewinnung im Verhältnis zum derzeitigen Kobaltbedarf von knapp 4.000 Tonnen erreichen und so signifikant zur Entspannung der Versorgungslage beitragen. Ein zweites Beispiel ist das Edelmetall Silber: hier ist der potenzielle Gesamteffekt mit 5 Prozent des heutigen Bedarfs ebenfalls substanziell.

Abbildung 1: Ökologische Einsparpotenziale der Vorhaben in r+Impuls

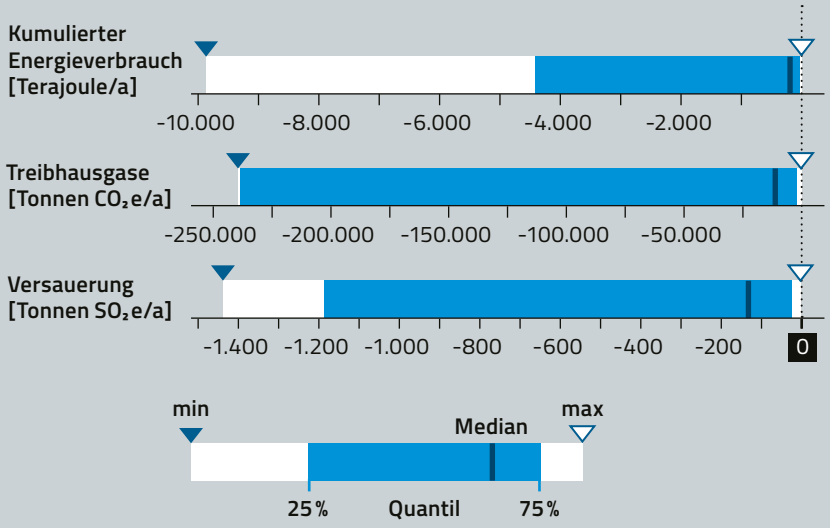
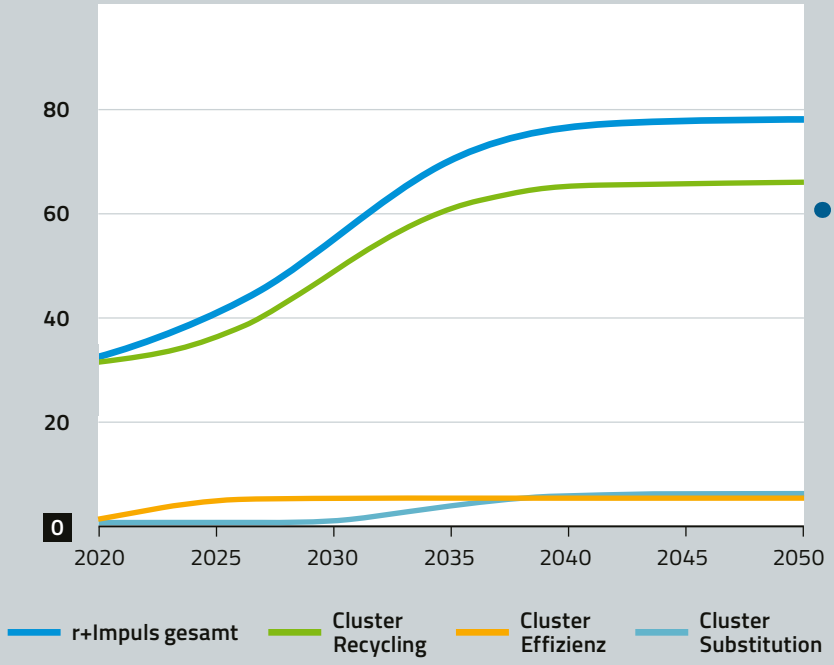


Abbildung 2: Geschätzter Diffusionsverlauf der r+Impuls-Lösungen

Aggregierte jährliche Rohstoffeinsparung (Anteil am maximalen Potenzial)



Ausblick

In r+Impuls wurden gezielt Lösungen gefördert, die bereits eine gewisse technologische Reife haben, um auf diese Weise die Übertragung vielversprechender FuE-Ergebnisse in die industrielle Praxis zu beschleunigen. Dieser Ansatz zeigt sich in der vergleichsweise hohen Marktnähe und häufig bereits absehbaren Wirtschaftlichkeit der Ergebnisse. Somit sind die Chancen auf eine breite Diffusion der r+Impuls-Lösungen gut (vgl. Abb. 2). Manche haben den Markteintritt bereits geschafft.

Liste der Vorhaben und Förderkennzeichen

aha 033R202
Auftragschweißen mit alternativen Hartstoffen
- **DURUM Verschleißschutz GmbH**
- Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg – Fakultät 3 – Fachgebiet Fertigungstechnik
- Impuls Verschleißtechnik GmbH

Circular Packaging 033R198
Demonstrationsanlage zum Recycling von post-consumer Verpackungs- und Verbundabfällen zu gereinigten Rohstoffen für hochwertige Packstoffe
- **Lober GmbH & Co. Abfallentsorgungs-KG**
- LÖMI GmbH
- Fraunhofer-Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung IVV

DreamCompoundConti 033R199
Ressourceneffizientes Verfahren zur Herstellung eines neuen Hochleistungsthermoplasts
- **Covestro Deutschland AG**
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen – Fakultät 4 – Maschinenwesen – Lehrstuhl für Technische Thermodynamik
- Technische Universität Berlin – Fakultät II – Institut für Chemie – Fachgebiet Mehrphasenreaktionstechnik, Sekretariat TC 8
- Kunststoff-Zentrum in Leipzig gemeinnützige Gesellschaft mbH

DreamResourceConti 033R222
Ressourceneffiziente Herstellung von oberflächenaktiven Materialien
- **Covestro Deutschland AG**
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen – Fakultät 4 – Maschinenwesen – Lehrstuhl für Technische Thermodynamik
- Technische Universität Berlin – Fakultät II – Institut für Chemie – Fachgebiet Mehrphasenreaktionstechnik, Sekretariat TC 8

ecoFluor 033R151
Innovative und umweltfreundliche, auf Fluor(F2)-basierte Reinigungsprozesse als Ersatz für NF3 und PFCs in der Halbleiterindustrie
- **Solvay Fluor GmbH**
- Texas Instruments Deutschland GmbH
- Muegge GmbH
- Fraunhofer-Einrichtung für Mikrosysteme und Festkörper-Technologien EMFT

Eco-Pump-Drive 033R154
Anwendungsentwicklung innovativer Rohstoff- und Energie-schonender Umwälzpumpen für Heizungs-, Klimatisierungs-, Trinkwasser- und Solar-Kreisläufe
- **KSB SE & Co. KGaA**
- Hochschule Kaiserslautern

Edelmetalladsorber 033R153
Rückgewinnung von Edelmetallen aus Reststoffströmen der metallverarbeitenden Industrie mit Hilfe von faserfixierten Adsorbern
- **KAYSER Filtertech GmbH (ehemals Heimbach Filtration GmbH)**
- DTNW Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West gemeinnützige GmbH
- SETEX-Textilveredelung-GmbH
- Cornelsen Umwelttechnologie GmbH
- Unimicron Germany GmbH
- Wieland Edelmetalle GmbH

EKALGU 033R183
Automatisierte Einblasanlage zur kalkbasierten Entschwefelung und Legierungseinstellung von Gusseisen
- **Fritz Winter Eisengießerei GmbH & Co. KG**
- Universität Duisburg-Essen – Fakultät für Ingenieurwissenschaften – Institut für Technologien der Metalle – Lehrstuhl Metallurgie der Eisen- und Stahlerzeugung
- FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e.V.

EziRec 033R158
Effizientes Zinn-Recycling aus Abfallprodukten der Leiterplattenfertigung
- **TIB Chemicals AG**

GoldRecApp 033R220
Pilotanlage zur Rückführung von Edelmetallen in den Wirtschaftskreislauf mittels innovativer biotechnologischer Verfahrenstechnik
- **m&k GmbH**
- Rhode und Wagner Anlagenbau GmbH
- Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg – FG Aufbereitungstechnik

iCycle 033R223
Rückgewinnung von Metallen und Energie aus Rückständen der Elektroschrottaufbereitung
- **RSL Recycling Solutions Lippetal GmbH**
- Becklönne Maschinenbau GmbH & Co. KG
- Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT – Institutsteil Sulzbach-Rosenberg

IMPROVE 033R179
Anwendungsentwicklung innovativer Leistungselektronik für die Rohstoff- und Energieoptimierung von Umwälzpumpen
- **KSB SE & Co. KGaA**
- Technische Universität Berlin – Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik – Institut für Hochfrequenz- und Halbleiter-Systemtechnologien – Forschungsschwerpunkt Technologien der Mikroperipherik
- Hochschule Kaiserslautern – Fachbereich Angewandte Ingenieurwissenschaften – AG Elektrotechnische Systeme der Mechatronik

IVAN 033R175
Aufbau und Erprobung von Anlagen zur Herstellung von Kontaktwerkstoffen der Niederspannungstechnik mit reduziertem Silbergehalt über Innovative Verbindungs- und Aufbautechnik
- **SAXONIA Technical Materials GmbH**

KOMPASS 033R159

Kontinuierliche Öl und Metallrückgewinnungs-Prozessanlage für Schlämme und Späne

- **RHM Rohstoff-Handelsgesellschaft mbH**
- Universität Duisburg-Essen – Fakultät für Ingenieurwissenschaften – Institut für Metallurgie und Umformtechnik – Lehrstuhl Metallurgie der Eisen- und Stahlerzeugung
- Federal-Mogul Burscheid GmbH
- Institut für Energie- und Umwelttechnik e. V. (IUTA)

KONDEOS 033R216

Anlage zur definierten Metalloxid-Konditionierung von Elektroofenschlacken zur Erzeugung ökologischer Baustoffe und vermarktungsfähiger Metallfraktionen

- **Georgsmarienhütte GmbH**
- Hermann Rauen GmbH & Co. (vorm. Steinhandel Rauen)
- DK Recycling und Roheisen GmbH
- FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V.
- Universität Duisburg-Essen – Fakultät für Ingenieurwissenschaften – Institut für Technologien der Metalle – Lehrstuhl Metallurgie der Eisen- und Stahlerzeugung

MAREMO 033R177

Materialeffizienter Leichtbau für eine ressourceneffiziente Mobilität

- **Wethje Carbon Composites GmbH**
- Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft – Forschung, Neue Technologien, Innovationen E/E Architektur, Technologien (LT-3)
- Tisora Sondermaschinen GmbH
- AFPT GmbH
- SWMS Systemtechnik Ingenieurgesellschaft mbH
- AT – Automation Technology GmbH
- Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
- Cetex Institut gGmbH

PLUS 033R181

Pilotanlage zur lasergestützten Sortierung von Sonderlegierungen

- **CRONIMET Ferroleg. GmbH**
- Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT

PowdeR²eSint 033R221

Entwicklung eines Prozesskreislaufes zur ressourceneffizienten Wiederverwendung von Kunststoff-Restpulver aus dem selektiven Lasersinterprozess

- **GS-Pro GmbH**
- Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
- Technische Universität Chemnitz – Fakultät für Maschinenbau – Institut für Strukturleichtbau (IST) – Professur Strukturleichtbau und Kunststoffverarbeitung
- Oerlikon AM Europe GmbH
- GEO Reinigungstechnik GmbH

Production Dreams 033R150

Erarbeiten kontinuierlicher Verfahrensschritte zum Hochskalieren der Produktion von Polyethercarbonatpolyurethanen mit kovalent gebundenem Kohlenstoff

- **Covestro Deutschland AG - PUR-INN-CAT, CHEMPARK B103**
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen – Lehrstuhl für Kunststoffverarbeitung
- Technische Universität Berlin – Fakultät II Mathematik und Naturwissenschaften – Institut für Chemie – Fachgebiet Technische Chemie
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen – Fakultät 4 – Maschinenwesen – Lehrstuhl für Technische Thermodynamik

PUMOCON 033R218

Ressourcenoptimierung durch Systemintegration von Pumpe, Pumpen-Motorantrieb und -Kontrollsystem für Trinkwasserversorgung, Gebäude- und Prozesstechnik

- **KSB SE & Co. KGaA**

ReeL 033R157

Ressourceneffiziente Herstellung von Lederchemikalien

- **TFL Ledertechnik GmbH (ehemals Lanxess Deutschland GmbH)**
- INVITE GmbH
- HELLER-LEDER GmbH & Co. KG
- DTNW Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West gemeinnützige GmbH

Re-Mining 033R178

Anlage zur Wertstoffgewinnung aus sulfidischen Spülhalden und deren umweltgerechte Sanierung

- **G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH**
- SAXONIA Standortentwicklungs- und -verwaltungsgesellschaft mbH
- Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf e. V. – Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie

STRATEGO 033R180

Bau und Betrieb einer HMVA-Aufbereitungsanlage zur Maximierung der Rückgewinnung von strategischen Metallen unter Optimierung der Verwertbarkeit der dabei erzeugten Mineralikfraktionen

- **H-U-R Hamburg GmbH Hamburger-Umwelt-Recyclingtechnologien**
- Technische Universität Hamburg – Institut für Umwelttechnik und Energiewirtschaft – Abfallressourcenwirtschaft (V-9)
- C.C. Umwelt GmbH

Impressum

Herausgeber und Redaktion
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe

www.isi.fraunhofer.de

Ansprechpartnerin
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Dr. Katrin Ostertag
E-Mail: katrin.ostertag@isi.fraunhofer.de

Ansprechpartner
Bundesministerium für Bildung und Forschung
Thomas Bartelt
Referat 726 - Ressourcen, Kreislaufwirtschaft; Geoforschung
E-Mail: thomas.bartelt@bmbf.bund.de

Ansprechpartnerin
Projektträger Jülich
Anja Degenhardt
E-Mail: a.degenhardt@fz-juelich.de

Gestaltung und Illustration
Peer und Stefanie Ziegler, scientific design

Bildnachweise
S. 5: W. Junker
S. 10: Umicore AG
S. 12: KSB SE & Co. KGaA
S. 14: Anne Laue, Fraunhofer IWU
S. 16 oben: G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH
S. 18: Covestro Deutschland AG
S. 19: Covestro Deutschland AG
S. 20: GS-PRO GmbH
S. 22: KSB SE & Co. KGaA
S. 23: KSB SE & Co. KGaA
S. 24: Texas Instruments Deutschland GmbH
S. 26: KSB SE & Co. KGaA
S. 28: Covestro Deutschland AG
S. 30: Universität Duisburg-Essen
S. 32 oben: DURUM Verschleißschutz GmbH
S. 34: Covestro Deutschland AG
S. 36: Klaus Opwis/DTNW Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West gemeinnützige GmbH
S. 40 oben: NDABCREATIVITY/Adobe Stock
S. 40 unten: H. Kissler
S. 41: RHM Rohstoff-Handelsgesellschaft mbH
S. 42 oben: Dietrich Tegtmeyer
S. 42 unten: Ivan Ozerov/Stocksy/Adobe Stock
S. 44: Cronimet Ferroleg. GmbH
S. 45: Cronimet Ferroleg. GmbH
S. 48: Fraunhofer IVV
S. 50: Fraunhofer UMSICHT
S. 51: Fraunhofer UMSICHT
S. 52: Jens Markowski, Brandenburgische Technische Universität Cottbus
S. 54: Georgsmarienhütte GmbH

Druck
oeding print GmbH, 38126 Braunschweig
Unternehmenszertifizierung: EMAS, ISO14001, ISO9001, ISO12647(PSO)

BLAUER ENGEL DAS UMWELTZEICHEN UZ 195 XQ4
www.blauer-engel.de/uz195
- ressourcenschonend und umweltfreundlich hergestellt
- emissionsarm gedruckt
- überwiegend aus Altpapier

Stand Mai 2023

1. Auflage 250 Stück

www.r-plus-impuls.de