



PROJEKTVERBUND FORCYCLE II

STEIGERUNG DER RESSOURCENEFFIZIENZ IN DER BAYERISCHEN WIRTSCHAFT



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz



Inhalt

- 04** Der Projektverbund ForCYCLE II
- 06** Themenschwerpunkte Digitalisierung, Integrierte Produktpolitik und Substitution
- 08** Vernetzung und Bewertung innovativer Ressourceneffizienzpotenziale in der bayerischen Wirtschaft - Dachprojekt NetCYCLE II
- 10** Erhöhung der Ressourceneffizienz durch Einsatz von verwendungsorientierten 3D-Drucktechnologien - REV3D
- 12** Steigerung der Ressourceneffizienz in KMU und Handwerk durch ein digitales Benchmarksystem für Abfallvermeidungs- und Abfallverwertungspotenzial - KMU Digicheck Abfall
- 14** Digitale multikriterielle Materialauswahl zur optimierten Kreislauffähigkeit von Kunststoffprodukten - DIMOP
- 16** Innovative Recyclingverfahren für Elektroschrott - IRVE
- 18** Plattformtechnologie zur Verwertung chlorhaltiger Abfälle und Rückgewinnung kritischer Metalle - Chlor-Plattform
- 20** Rohstoffsicherung und -erhalt durch Aufbereitung und Verwertung von Gießerei-Stäuben - Bayerisches Konsortium für Gießereistaub-Metall-Rückgewinnung - BGMR
- 22** Recycling von Wärmeverbundsystemen - WDVS
- 24** Erhöhung der Nachhaltigkeit in der Behälterglasindustrie durch Vermeidung von Beschichtungen - VaporCoat
- 26** Optimierung der Holz-Beton-Verbundbauweise durch Verwendung natürlicher und ökologischer Werkstoffe - HB(Ca)V
- 28** Chemische Mobilisierung und Mikroalgen-basierte Bioadsorption von Seltenen Erden aus Kaolinit und anderen Wertstoffen - MiKa
- 30** Kontakte
- 32** Bildnachweise & Quellenangaben
- 33** Impressum

Vorwort

Sehr geehrte Damen und Herren,

der effiziente und sparsame Einsatz natürlicher Ressourcen schafft Unabhängigkeit, spart Kosten, schont die Umwelt und das Klima. Gleichzeitig ist ein verantwortungsbewusster Umgang mit Ressourcen ein zentrales Zukunftsthema: Er ermöglicht nachhaltiges Wachstum, generationengerechten Wohlstand und stärkt den Wirtschaftsstandort Bayern.

Die Bayerische Staatsregierung hat hierzu im Juli 2018 einen 7-Punkte-Plan beschlossen. Darin stellt der Projektverbund für mehr Ressourceneffizienz in der bayerischen Wirtschaft, insbesondere für KMU und Handwerk - ForCYCLE II für einen effizienten Ressourceneinsatz und zum Recycling einen wesentlichen Baustein dieser Initiative dar.

In den drei Themenschwerpunkten Digitalisierung, Substitution und der Integrierten Produktpolitik wurden innovative Technologien und Verfahren entwickelt, um so die Ressourceneffizienz und die Kreislaufführung, insbesondere in KMU und Handwerksbetrieben, weiter zu steigern. Der Fokus lag dabei auf der konkreten Anwendung und Praxisnähe.

Wir laden Sie herzlich ein, sich im Folgenden über die Ergebnisse des Projektverbunds ForCYCLE II zu informieren.



Thorsten Glauber, MdL
Bayerischer Staatsminister für
Umwelt und Verbraucherschutz



Prof. Dr. Mario Mockler
Ostbayerische Technische Hochschule
Amberg-Weiden



Der Projektverbund ForCYCLE II

Ziele, Themen & Projekte

Mit der festlichen Auftaktveranstaltung am 6. November im Max-Joseph-Saal der Münchner Residenz startete das Format ForCYCLE in die zweite Runde. Als Teil des 7-Punkte Plans der bayerischen Ressourcenstrategie finanzierte das bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz den Projektverbund ForCYCLE II, der die Fortschreibung des erfolgreichen Vorgängers ForCYCLE darstellte, mit knapp drei Millionen Euro. Mehrere bayerische Universitäten und Hochschulen für an-

gewandte Wissenschaften entwickelten in enger Zusammenarbeit mit außeruniversitären Forschungseinrichtungen und Unternehmenspartnern während der dreijährigen Laufzeit von 2019 bis 2022 innovative Technologien und Verfahren zum effizienten Ressourceneinsatz und zum Recycling mit dem Ziel, die Ressourceneffizienz in der bayerischen Wirtschaft weiter zu steigern. Neben einem koordinierenden Dachprojekt wurden 10 Fachprojekte in den Themenschwerpunkten Digitalisierung, Substitution und Integrierte Produkt-

politik (IPP) durchgeführt. Abbildung 1 zeigt die regionale Verteilung der Projekte sowie die Zuordnung zu diesen Schwerpunkten. Durch die enge Zusammenarbeit zwischen den Partnern aus der Wirtschaft, insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) sowie Handwerksbetrieben, und der Wissenschaft konnten praxisnahe und speziell für die beteiligten Branchen wichtige Themenfelder bearbeitet und zielgerichtete Konzepte und Lösungen erarbeitet werden. Der fachliche Austausch, die Materialbereitstellung sowie die Durchführung gemeinsamer Versuchsreihen stellten wesentliche Kooperationsaspekte mit den insgesamt 59 Wirtschaftspartnern im Projektverbund dar. Ebenso wichtig wie der Austausch mit den Projektpartnern war die Vernetzung der Projekte untereinander. Dies wurde trotz der erschwerten Bedingungen während der COVID-19-Pandemie unter anderem durch die beiden Statustreffen am 4. November 2020 und am 11. November 2021, die nur online durchgeführt werden konnten, realisiert. Hier wurden zum einen

die jeweiligen Projektfortschritte dargestellt und diskutiert. Zum anderen konnten die Treffen auch zum fachlichen Austausch genutzt sowie gemeinsame Forschungsansätze besprochen werden, wodurch beispielsweise projektübergreifende Experimente angeregt wurden. Neben dem internen Austausch wurden der Verbund sowie einzelne Projekte mittels 13 Publikationen, 9 Vorträgen, Newsletterbeiträgen etc. in der Öffentlichkeit bekannt gemacht, ein Buchprojekt zum 3D-Druck ist in Planung. In Kurzfilmen, die auf der Internetseite des StMUV (www.forcycle.de) oder dem YouTube-Kanal des StMUV zu sehen sind, werden die Projektinhalte anschaulich dargestellt. Insgesamt tragen die Entwicklungen und Erkenntnisse aus den Projekten zur Schließung von Stoffkreisläufen, zur Schonung von Ressourcen (durch einen

gezielten oder reduzierten Materialeinsatz sowie durch neue Methoden zum Recycling) oder zur Substitution kritischer Ressourcen bei. Neben der Verbesserung ökologischer Aspekte wird dadurch die Abhängigkeit von Exportländern gesenkt und die Marktfähigkeit der bayerischen Wirtschaft gestärkt. Bei der Abschlussveranstaltung am 27. Juni 2022 im Amberger Congress Centrum wurden die Ergebnisse der Öffentlichkeit vorgestellt. Die in den Einzelprojekten entwickelten Verfahren und Technologien weisen alle das Potential auf, gängige Verfahren abzulösen und großtechnisch umgesetzt zu werden. Zum Teil sind hier noch weitere Entwicklungsschritte notwendig. Hierzu stehen die Forschungseinrichtungen weiterhin in engem Kontakt mit den Wirtschaftspartnern. Einige andere innovative Verfahren stehen

bereits vor einer bauaufsichtlichen Zulassung. Zudem soll das erfolgreiche Verbundformat durch den Forschungsverbund „ForCYCLE Technikum“ in eine weitere Runde gehen. Dabei soll die Umsetzung von Technologien im großtechnischen Maßstab und die Etablierung in der Wirtschaft noch stärker im Fokus liegen, in eine weitere Runde gehen. Den hohen gesellschaftlichen und politischen Stellenwert sowie die Dringlichkeit einer verbesserten Ressourceneffizienz zeigt auch der im Jahr 2021 durch das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz eingeführte und erstmals verliehene Ressourceneffizienzpreis. Prämiert wurden hier bayerische Unternehmen, die sich mit herausragenden, zukunftsweisenden Leistungen für einen nachhaltigen Einsatz von natürlichen Ressourcen einsetzen.



Abbildung 1: Übersicht der Standorte der einzelnen Projekte im Projektverbund ForCYCLE II



Abbildung 2: Auftaktveranstaltung im Max-Joseph-Saal in der Residenz München

<p>Allgemeines</p> <p>Laufzeit: 3 Jahre (2019-2022) Finanzierungssumme: ca. 3 Mio Euro</p>	<p>Projekte</p> <p>NetCYCLE II REV3D KMU DigiCheckAbfall DIMOP IRVE Chlor-Plattform BGMR WDVS VaporCoat HB(Ca)V Mika</p>	<p>Beteiligte</p> <p>5 Universitäten 6 Hochschulen für angewandte Wissenschaften 59 Wirtschaftspartner 5 Verbände 6 wissenschaftliche Partner</p>	<p>Veröffentlichungen</p> <p>9 Vorträge/ Poster (extern) 13 Publikationen (Forschungsberichte, Tagungsbände, Broschüren, usw.) Zahlreiche universitäts- und hochschulinterne Vorträge Newsletterbeiträge</p>	<p>Veranstaltungen im Projektverbund</p> <p>6.11.2019: Auftaktveranstaltung im Max-Joseph-Saal in der Residenz München 4.11.2021: 1. Statustreffen (Online) 11.11.2021: 2. Statustreffen (Online) 27.06.2022: öffentlicher Teil der Abschlussveranstaltung im Amberger Congress Centrum (auch als Livestream verfolgbar) 28.06.2022: projektinterner Teil der Abschlussveranstaltung an der OTH Amberg-Weiden</p>
<p>weitere Informationen</p> <p>Internetseite des StMUV www.forcycle.de (QR-Code)</p>	<p>Kurzfilme</p> <p>Internetseite des StMUV www.forcycle.de QR-Code Youtube-Kanal des StMUV</p>			

Abbildung 3: ForCYCLE II Steckbriefe (QR-Code auf der Broschürenrückseite)



Themenbereiche

Erhöhung der Ressourceneffizienz durch Digitalisierung

Der Megatrend Digitalisierung ermöglicht es, in der Wirtschaft immer mehr belastbare Daten in Echtzeit aus Prozessen oder Verfahren zu gewinnen und zu nutzen. Dieses wichtige Querschnittsthema erlaubt es beispielsweise, durch die Integration neuer Produktionsmethoden wie des 3D-Drucks zunächst nur Informationen anstatt Materialien zu versenden und die benötigten Bauteile just-in-time vor Ort zu produzieren. Auch können mit der Entwicklung neuer logistischer di-

gitaler Konzepte z.B. Produktionsstandorte deutlich dezentralisierter und mit verringerten Lagerhaltungen gebaut werden, was ebenfalls Transporte, Materialverluste und Lagerkapazitäten mindern kann. Bei der Materialauswahl ermöglichen es die mit digitalisierten Komponenten gewonnenen Daten, Produkte hinsichtlich der Funktionalität und Kreislauffähigkeit zu optimieren und so Ressourcen zu schonen. Die Digitalisierung in bayerischen Unternehmen hat also ein hohes Potential,

betriebliche Prozesse effizienter und materialsparender zu gestalten und dadurch die Ressourceneffizienz zu steigern. Die drei Fachprojekte unter dem Themenschwerpunkt Digitalisierung zielten darauf ab, neue Algorithmen und weitere innovative, nutzerorientierte digitale Werkzeuge zu entwickeln, um die Verarbeitung vielfältiger Daten zum Zwecke einer gesteigerten Ressourceneffizienz voranzutreiben.



Integrierte Produktpolitik(IPP) - Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus

Ein wesentlicher Beitrag zum schonenden Umgang mit Ressourcen ist die Betrachtung sämtlicher Lebensphasen eines Produkts von der Gewinnung der Rohstoffe bis hin zur Entsorgung am Ende seiner Nutzungsphase. Dadurch können mit dem Produkt verbundene Umweltauswirkungen vermieden bzw. vermindert

werden. Der Themenschwerpunkt der Integrierten Produktpolitik (IPP) im Rahmen des Projektverbunds umfasst hier vor allem Vorhaben, welche durch eine Etablierung oder Erhöhung des Recyclings der Produkte selbst sowie der anfallenden Nebenprodukte und Abfälle zu einer Steigerung der Ressourceneffizienz entlang des gesamten Lebens-

wegs von Wirtschaftsgütern führen. So ist beispielsweise die Recyclingfähigkeit wertvoller Inhaltsstoffe ein wichtiger Aspekt, der unter Beachtung technischer und ökonomischer Randbedingungen untersucht werden muss. Ein erhöhtes Recycling ermöglicht stets die Reduzierung der Rohstoffentnahme aus den endlichen natürlichen

Lagerstätten. Herausforderungen beim Recycling bestehen unter anderem in der hohen Materialdiversität der Produkte sowie im häufig sehr komplexen Produktdesign. Für Produkte, die ihr Lebensende erreicht haben, besteht somit auch in einer ausgereiften Entsorgungswirtschaft immer noch

Forschungsbedarf für die gezielte Entwicklung effizienterer Recyclingtechnologien. Die Steigerung des Recyclings kann dabei sowohl auf Massenrohstoffe wie Kunststoffe, Eisen und Buntmetalle als auch auf so genannte kritische Rohstoffe mit hohem Versorgungsrisiko oder großer wirtschaftlicher Bedeutung

abzielen. Die vier Projekte des Projektverbunds zum Themenschwerpunkt der Integrierten Produktpolitik entwickelten und erforschten beispielsweise optische, mechanische, elektrohydraulische und thermochemische Prozesse, um die Kreislaufführung von Ressourcen zu steigern.



Substitution von Werkstoffen/Materialien

In vielen unserer alltäglichen Produkten werden Materialien mit vergleichsweise hohem Ressourcenverbrauch bei deren Herstellung eingesetzt. Durch die Substitution, also den Ersatz eines oder mehrerer Einsatzstoffe durch andere Materialien mit gleicher Funktionalität aber geringerem Ressourcenverbrauch bei der Herstellung, kann die Ressourceneffizienz oft deutlich gesteigert werden. Beispielsweise lässt sich durch die Substitution versorgungskritischer Stoffe eine Entkopplung der Wirtschaft von der Importabhängigkeit erreichen. Gleichzeitig können durch Substitution kritische Stoffe oder solche, die negative Umweltauswirkungen verursachen, aus dem Stoffkreislauf ausgeschleust wer-

den. Eine Substitution kann dabei an verschiedenen Stellen der Produktionskette erfolgen, so beispielsweise bei den Rohstoffen in der Bereitstellungskette oder bei den verwendeten Hilfs- und Betriebsstoffen. Beim Ersatz von Stoffen durch Alternativen ist die Höhe des Nutzens und die Funktionalität des Materials zu beachten. Nutzen bzw. Funktionalität sollten mindestens vergleichbar bleiben, im Idealfall treten sogar Verbesserungen ein. Eine Substitution in der Bereitstellungskette liegt beispielsweise vor, wenn Technologiemetalle nicht mehr aus im Ausland abgebauten Erzen, sondern hingegen aus inländischen Produktionsrückständen gewonnen werden. Dabei ist vor allem eine gleichbleibende Qualität

der sekundären Stoffe von Bedeutung. Gegebenenfalls ist die Entwicklung neuer Technologien erforderlich. Der Sonderfall, dass durch eine Verfahrensumstellung bestimmte Rohstoffe gar nicht mehr benötigt werden, bietet naturgemäß das größte Potenzial zur Steigerung der Materialeffizienz. Unter dem Themenschwerpunkt Substitution des Projektverbundes entwickelten drei Projekte neue Technologien und Prozesskombinationen, um die Ressourceneffizienz im Bauwesen zu steigern, Erze der Seltenen Erden durch bayerische Produktionsabfälle zu ersetzen oder gänzlich auf den Einsatz von Zinnverbindungen in der Glasindustrie zu verzichten.



Prof. Dr. Mario Mocker, Markus Bär



Vernetzung und Bewertung innovativer Ressourceneffizienzpotenziale in der bayerischen Wirtschaft

Dachprojekt NetCYCLE II

Problemstellung & Zielsetzung

Die Steigerung der Ressourceneffizienz stellt eine besonders wichtige gesamtgesellschaftliche Aufgabe dar. Dabei sind Messgrößen zur Bewertung der Effizienz bzw. des Maßes ihrer Erhöhung ebenso vielfältig wie die Technologien und Maßnahmen zur Steigerung der

Ressourceneffizienz selbst. Für unternehmerische und auch politische Entscheidungsprozesse stellen vergleichbare Messgrößen einen essentiellen Faktor dar. Mit diesem Hintergrund sollte im Dachprojekt eine Methodik zur Bewertung der Ressourceneffizienz entwickelt werden, welche die Wirkun-

gen von Effizienzmaßnahmen im allgemeinen und die erhofften positiven Effekte der einzelnen Verbundprojekte im speziellen vergleichbar macht. Darüber hinaus übernahm NetCYCLE II die Administration und Repräsentation des Projektverbundes sowie die Vernetzung der Einzelprojekte im Verbund.

Umsetzung & Ergebnisse

Zur ganzheitlichen Beurteilung von ökologischen Auswirkungen wurde den in Ökobilanzen gängigen Kenngrößen Treibhausgaspotential und kumulierter Energieaufwand eine spezifische „Ressourceneffizienzkennzahl“ an die Seite gestellt. Als Basis für die geologische Knappheit eines bestimmten Rohstoffs dient der abiotische Ressourcenverbrauch ADP (Abiotic Depletion Potential). Dabei wird der Verbrauch eines chemischen Grundstoffs ins Verhältnis zu der in der gesamten Erdkruste vorhandenen Menge gesetzt und das Ergebnis mit dem Referenzelement Antimon verglichen. Mittlerweile ist es gängige Praxis, dieses Maß um die von Menschenhand

geschaffenen Vorräte zu erweitern. Diese als AADP (Anthropogenic Stock extended ADP) bekannte Kenngröße schließt also beispielsweise in Müllkippen befindliches oder in der Infrastruktur verbautes Material mit ein und errechnet sich für Metalle und Mineralien aus der seit 1900 abgebauten Rohstoffmenge. Allerdings wurde die geologische Knappheit im Projekt in mehrfacher Hinsicht modifiziert. Zum einen wird das Verhältnis des Verbrauchs nicht zur Gesamtmenge in der Erdkruste, sondern zu den so genannten Ressourcen gebildet, welche in der Rohstoffwirtschaft in etwa die globalen potentiell förderfähigen Vorräte umfassen. Als Verbrauch wird

dabei das gleitende Mittel der letzten 5 Jahre gewählt, um kurzfristige Schwankungen auszugleichen. Zum anderen wurde von den anthropogenen Vorräten diejenige Menge subtrahiert, die aufgrund von dissipativen Verlusten wohl kaum mehr zur Rückgewinnung zur Verfügung stehen wird. Diese Minderung wird in Ökobilanzen bisher nicht berücksichtigt. Schließlich ersetzt nun das jedem bekannte Element Eisen als Referenz die bisher in der Wissenschaft übliche Einheit Antimon-Äquivalente. Für das durch die alltägliche Nutzung omnipräsente Eisen liegt eine äußerst fundierte Datenbasis vor, zudem ergeben sich beim Vergleich mit fast allen anderen Elemen-

ten leicht verständliche Zahlenwerte deutlich größer 1 für die Knappheit, während bei den meist kleiner als 10^{-5} ausfallenden Antimon-Äquivalenten Rundungsdifferenzen und Fehlinterpretationen auftreten können. Neben diesen geologischen Kriterien fließen in die Ressourceneffizienzkennzahl noch sozioökonomische Aspekte ein. Diese werden aus vier quantitativen Kriterien (Länderkonzentration des Rohstoffabbaus, politische Bewertung der Förderländer gemäß Weltbank, Preis-

risiko und Importabhängigkeit) und vier qualitativen Kriterien (Bedarf für Zukunftstechnologien, Substituierbarkeit, Recyclingfähigkeit und regionale Bedeutung) gebildet, wobei die regionale Bedeutung die speziellen Verhältnisse in Bayern berücksichtigt. Diese acht Kriterien gehen im gleichen Verhältnis in die Berechnung ein. In der finalen Ressourceneffizienzkennzahl werden die geologische Knappheit mit 70 % und die sozioökonomischen Kriterien mit insgesamt 30 % gewichtet, wobei

bei Bedarf eine Modifikation möglich wäre. Die weiteren Kernaufgaben des Dachprojekts NetCYCLE II - interne Koordination und Repräsentation des Verbundes nach außen - umfassten unter anderem die Terminkontrolle, die Organisation verbundinterner und öffentlicher Veranstaltungen, die Bereitstellung von Berichts-, Präsentations- und Postervorlagen etc. und äußern sich nicht zuletzt in der vorliegenden Broschüre, deren Gestaltung ebenfalls dem Dachprojekt oblag.

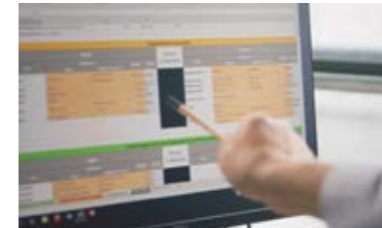


Abbildung 1: Berechnung der Ressourceneffizienzkennzahl

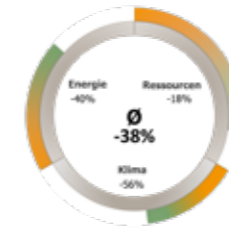


Abbildung 2: Beispielhafte Darstellung der Einsparungseffekte durch die Entwicklung neuer Technologien

Beitrag zur Ressourceneffizienz

Anhand der aggregierten Ressourceneffizienzkennzahl ist es nun möglich, im Verbund mit Treibhausgaspotential und kumuliertem Energieverbrauch unterschiedliche Verfahren oder Technologien hinsichtlich ihrer Ressourceneffizienz

bewerten und vergleichen. Nach Abschluss der Einzelprojekte werden die in den einzelnen Vorhaben erreichten Effizienzsteigerungen mittels der entwickelten Methodik bewertet und auf das Potential in Bayern hochgerechnet. Auch unabhängig vom Projektverbund

besteht nun eine verbesserte Möglichkeit neben wirtschaftlichen Aspekten die Ressourceneffizienz bei der Technologieauswahl zu berücksichtigen. Dadurch können Ressourcen eingespart und so auch die bayerische Wirtschaft gezielt unterstützt werden.

Projektbeteiligte





Erhöhung der Ressourceneffizienz durch Einsatz von verwendungsnahen 3D-Drucktechnologien

REV3D

Problemstellung & Zielsetzung

3D-Druck (3DD) oder auch Additive Manufacturing (AM) ist eine potentiell disruptive Technologiefamilie. Das weltweite Marktpotential von 3DD wird nach [1] für 2018 mit 9,464 Mrd. US\$ und für 2022 bereits mit 26,187 Mrd. US\$ veranschlagt. Eine neuere Studie von [2] schätzt das weltweite Marktpotential von 3DD etwas konservativer für 2030 mit 22,6 Mrd. € bei durchschnittlichen jährlichen Wachstumsraten zwischen 13 % und 23 %. Gleichzeitig hat 3DD ein hohes ökologisches Potential. Nach [3] kann 3D Druck bis 2025 Kosten um 170-593 Mrd. US\$, das gesamte Primärenergieangebot um 2,54-9,30 EJ und die CO₂ Emissionen um 130,5-525,5 Mt reduzieren. Der Einstieg in 3DD stellt

allerdings vor allem kleine und mittlere Unternehmen (KMU) im Wesentlichen vor diverse Herausforderungen: Technologieauswahlproblem (Die breite Vielfalt der unterschiedlichen Drucktechnologien macht es KMU schwer, geeignete Techniken für ihren jeweiligen Anwendungsfall zu identifizieren); Geschäftsmodellproblem (Chancen & Risiken, um Investitionen, Kosten, Geschäftsmodell & Erlöse zu bewerten, und dabei weder zu früh in eine neue Technik einzusteigen, noch das Thema zu spät aufzugreifen, und von der Konkurrenz überholt zu werden); Nachhaltigkeitsproblem (Die Nachhaltigkeit und die ökologischen Auswirkungen der 3D-Druck-Technologie hinreichend genau bewerten zu können); Weiter-

bildungsproblem (Die Beherrschung der 3DD-Technik muss in der Regel erst erlernt werden); Integrationsproblem (Die Integration von 3DD in herkömmliche Produktionsprozesse stellt KMU, die als Dienstleister in eine komplexere Supply-Chain eingebunden sind vor neue Herausforderungen in Bezug auf Qualitäts-, Zeit- und Dokumentationsnotwendigkeiten). Das Ziel des beantragten Projektes ist es daher, zum einen die ökologischen Potentiale der unterschiedlichen 3D-Druck-Verfahren (inklusive der logistischen Potentiale) in der praktischen Anwendung noch besser zu quantifizieren und zum anderen die KMU beim Bewältigen der genannten fünf Herausforderungen zu unterstützen.

Umsetzung & Ergebnisse

Für die Unterstützung der Entscheidungsträger in den KMUs wurden eine Technologieübersicht zur Lösung des Technologieauswahlproblems sowie betriebswirtschaftliche Kalkulationsvorlagen erstellt. Dadurch sollen insbesondere bayerische KMUs

beim Einstieg in die 3D-Druck Technologie unterstützt werden. Außerdem wurde eine Methode für die ökologische Bewertung von 3D-Druck (die Lebenszyklusanalyse) vorgestellt und an Beispielen erprobt, sodass den KMUs die konkrete Anwendung dieser

Methode zur Bewertung eigener Anwendungsfälle erleichtert wird. Einige identifizierte Potentiale des 3DD wurden im Rahmen von REV3D an konkreten Anwendungsbeispielen durch Lebenszyklusanalysen quantifiziert. Insbesondere wurde betrachtet, welche

Auswirkungen der verwendungsnahen 3D-Druck im Vergleich zur Fertigung mit konventionellen Verfahren in einem zentralisierten Produktionssystem auf die Umwelt hat. Ein Ausschnitt der Ergebnisse, welcher die Wirkungen der Produktion eines exemplarischen Bauteils auf das Erderwärmungspotential für unterschiedliche Transportdistanzen zeigt, wird in den folgenden Dia-

grammen dargestellt. Die digitale Bauteilakte (DBA) bündelt geometrie-, prozess- und qualitätsrelevante Parameter eines Bauteils, welche für den 3D-Druck benötigt werden und welche während des 3D-Druck Prozesses erhoben werden. Hierfür wurde ein Tool (der sogenannte DBA-Manager) entwickelt, welches bayerische Unternehmen bei der Prozess- & IT- Integration von 3D-

Druck konzeptionell unterstützen soll. Die Ergebnisse des Projekts sollen in dem geplanten Fachbuch „3D-Druck für Manager“ gebündelt veröffentlicht werden. Zusammen mit dem entwickelten didaktischen Konzept soll somit sichergestellt werden, dass die Erkenntnisse aus dem Projekt in die Praxis transferiert werden können.

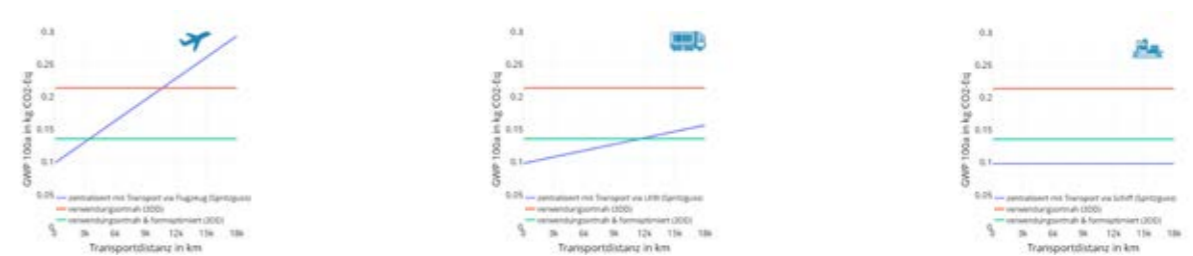


Abbildung 1: Vergleich von Umweltwirkungen aus verwendungsnahem 3D-Druck und zentralisiertem Spritzguss inklusive Transport via Frachtflugzeug, LKW und Containerschiff

Beitrag zur Ressourceneffizienz

Im Projekt REV3D wurden folgende zentrale, ökologische Potentiale des 3D-Drucks identifiziert, die zur Ressourceneffizienz beitragen: Einsparung von Materialien durch Ermöglichung von Hohlstrukturen und Leichtbau in der Produktion; Verringerung des Materialausschusses durch additives Fertigungsprinzip; Vermeidung

der Herstellung von speziellen Formen insbesondere bei der Produktion kleiner Losgrößen; Nutzung von recycelten und umweltfreundlichen Materialien; Recyclingmöglichkeiten von Materialausschuss; Einsparung von Transportdistanzen durch verwendungsnaher Produktion (Substitution von physischem Warentransport durch Daten-

transfer); Reduktion von Energie- und Flächenverbrauch bei der Bauteil-lagerung durch digitale Ersatzteil-lager und Just-in-time-Produktion; Einsparung von Verpackungsmaterialien durch verwendungsnaher Produktion und Verlängerung von Produktlebenszyklen durch verwendungsnahen 3D-Druck von Ersatzteilen.

Projektbeteiligte



Prof. Reinhard Büchl, Andreas Kuhn

Steigerung der Ressourceneffizienz in KMU und Handwerk durch ein digitales Benchmarksystem für Abfallvermeidungs- und Abfallverwertungspotenzial

KMU DigiCheck Abfall

Problemstellung & Zielsetzung

Viele Rohstoffe sind knapp und/oder unterliegen starken preislichen Schwankungen. Eine wirtschaftliche Unabhängigkeit und Stabilität kann durch einen schonenden Einsatz von Rohstoffen und durch Vermeidung von Abfällen erzielt werden. Zudem trägt eine Senkung der Primärrohstoffe zum Schutz des Klimas und der Umwelt bei. Ein Ansatz ist hier die gezielte Vermeidung und Verwertung Abfällen. Allerdings ist die Datengrundlage zu (wirtschaftszweig-)spezifischen gewerblichen Abfallströmen in Bayern sehr gering. Die wenigen vorhandenen Instrumente zur Ermittlung

der Abfallverwertungs- und Abfallvermeidungspotenziale sind meist sehr komplex, aufwendig und teuer. Außerdem gibt es aktuell keine einheitliche und einfache Methodik zur Ermittlung von Abfallvermeidungs- und Abfallverwertungspotenzialen. Die Sammlung zum Abfallaufkommen basiert meist in Eigenleistung oder geschieht im Rahmen einer Zertifizierung (wie z.B. EMAS). Genau hier setzte das Projekt an. Unter Anwendung und gleichzeitiger Testung einer Benchmarking-Methode sowie eines Tools sollten unter anderem folgende Punkte erreicht bzw. geklärt werden: Bezug zwischen Abfallaufkommen

und produktionsbezogenen Einheiten; Entwicklung von branchenspezifischen Kennzahlen für ausgewählte Branchen; Erprobung der in der Industrie etablierten Benchmark-Methode für KMU-Bedarfe; Ermittlung von Abfallvermeidungs- und Abfallverwertungspotenzialen durch Benchmarking in ausgewählten Wirtschaftszweigen und Branchen; konkrete Ansätze zur Weiterentwicklung der Methode und des Tools, um daraus im nächsten Schritt eine flächendeckende Anwendung zu ermöglichen.

Umsetzung & Ergebnisse

Die Vorgehensweise des Projekts kann in 5 Bereiche, die in Abbildung 1 dargestellt sind, eingeteilt werden. Zur qualitativen und quantitativen Datenerfassung wurden die ausgewählten 32 Unternehmen aus 6 Branchen (Bäckereihandwerk, Schreinereihandwerk, Druckereihandwerk, Kunststoffverarbeitung, Metallhandwerk und Elektroinstallation) mit

tels eigens konzipierter Fragenbögen und Checklisten befragt sowie bei vor Ort-Besuchen besichtigt. Es wurden jeweils 3 Geschäftsjahre (2019 bis 2022) betrachtet. Unter anderem konnten 66 Abfallarten in den KMU erfasst bzw. identifiziert werden. Zudem bestand die Aufgabe darin, aus den ermittelten Daten Unternehmenskennzahlen abzuleiten, die für das Bench-

marking verwendet werden konnten. Die Datenauswertung hat gezeigt, dass ein Benchmarking in produzierenden Betrieben mithilfe der Kennzahlen Umsatz, Mitarbeiter, Rohstoffe und Abfälle möglich ist. Ein Bezug zwischen den eingesetzten Rohstoffmengen und Abfallmengen lässt sich nachvollziehbar herstellen. Allerdings ist der Zeitaufwand je nach Unternehmensgröße sehr



unterschiedlich. Konkrete Maßnahmen zur Vermeidung und Verwertung sind dann zu ermitteln, wenn die quantitativen Daten mit zusätzlichen Informationen (qualitative Daten) aus den Unternehmen kombiniert werden. Aus den ermittelten Daten geht beispielsweise hervor, dass das Potenziale zu Verbesserung der stofflichen Verwertung branchen- und unternehmensübergreifend bei durchschnittlich ca. 21 % liegt. Das größte Potenzial innerhalb der untersuchten Branchen und Unternehmen ist bei den Druckereien zu erkennen, dieses liegt bei bis zu

45 %. Noch größere Potenziale für die Ressourceneffizienz liegen allerdings in der Vermeidung. Hierbei geht es allerdings nicht um Quoten, sondern um spezifische Abfallmengen, beispielsweise Altbrot je eingesetzte Tonne Mehl. Den Vorteil, den das Benchmarking mit sich bringt ist die Sichtbarmachung von Vermeidungs- und Verwertungspotenzialen mit wenig Aufwand. Betriebe können sich anhand der Kennzahlen mit anderen Betrieben aus dem gleichen Wirtschaftszweig vergleichen und so die möglichen Potenziale zur Abfallvermeidung und -verwertung er-

kennen. Man erkennt also schnell und gezielt, wo es sich lohnt, die Prozesse genauer anzusehen. Wirkungsvolle Best-Practice-Beispiele können dann auch anderen Unternehmen helfen, die Ressourceneffizienz zu steigern. Dabei gilt, je ähnlicher die Betriebe sind, desto besser und genauer funktioniert das Benchmarking, und je mehr Betriebe und Wirtschaftszweige untersucht werden, desto flächendeckender und wirkungsvoller können die Potenziale zur Abfallvermeidung und Abfallverwertung ermittelt und analysiert werden.



Abbildung 1: Arbeitsplan KMU DigiCheck Abfall

Beitrag zur Ressourceneffizienz

Mit dem Benchmarking können in den verschiedensten Wirtschaftszweigen Abfallvermeidungs- und auch Abfallverwertungspotenziale identifiziert werden. Dadurch können wiederum gezielt Maßnahmen umgesetzt und effektiv Ressourcen eingespart werden. Es hat sich auch ge-

zeigt, dass es oft schon einfache Maßnahmen in den Unternehmen sind, die einen sehr großen Effekt hinsichtlich der Steigerung der Ressourceneffizienz haben. Diese Maßnahmen konnten entdeckt werden, indem die Kennzahlen im Rahmen des Benchmarkings verglichen und den Unterschieden nach-

gegangen wurden. Gelingt es, dieses Benchmarking groß auszurollen und den KMU flächendeckend zugänglich zu machen, so kann dies einen großen Effekt für die Ressourceneffizienz inner- und überbetrieblich bedeuten.

Projektbeteiligte



Bäckerei Bauer, Bäckerei Conditori Erhard, Bäckerei Köglperger, Bäckerei Konditori Eberl GmbH, Backhaus Hackner, Backstube Wünsche, Bauer Unternehmensgruppe, Biber GmbH & Co. KG, CGS Prozessanalytik GmbH, Druck Pruskil GmbH, Erhard Brandl GmbH Co. KG, Erhard GmbH & Co. KG, Ermisch GmbH, FKT GmbH, Gebrüder Peters, Generation Druck GmbH, Handwerkskammer (HWK) für München und Oberbayern, Industrie- und Handelskammer (IHK) Geschäftsstelle Ingolstadt, inotec GmbH, Klasing Kabel, Lebenshilfe Werkstätten der Region 10 GmbH, Metallbau Söder GmbH & Co KG, Michael Fürbacher GmbH & Elektroinstallations Co. KG, Möbelschreinerei Michael Bauer, Mondt incoat GmbH, MT-Technologies GmbH, Rudolf Schabmüller GmbH, SAL GmbH, Schreinerei Josef Eham GmbH, Schreinerei Ludwig Mayr GmbH & Co. KG, STH Anlagenbau GmbH, Stiefel Digitalprint GmbH, Tengler Druck GmbH, Tyroller Hydraulik GmbH, Zach Elektroanlagen GmbH

Digitale multikriterielle Materialauswahl zur optimierten Kreislauffähigkeit von Kunststoffprodukten

DIMOP

Problemstellung & Zielsetzung

Um die Ziele der EU-Kunststoffstrategie zu erreichen und eine Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe zu etablieren muss insbesondere die Recycling- bzw. Kreislauffähigkeit von Kunststoffprodukten signifikant verbessert werden. Bis heute spielt das Thema „Kreislauffähigkeit“ beim Produktdesign jedoch kaum eine Rolle. Produktentwickler trafen am Beginn des Lebenszyklus wichtige Entscheidungen für den weiteren Weg eines Produkts. Recycler sollten das „Ergebnis“ dann

am Ende des Lebenszyklus verwerten. Allerdings lebten beide Parteien in völlig getrennten Welten mit geringem Informationsaustausch. In der Folge wurden oftmals Kunststoffmaterialien ausgewählt, die beim Recycling zu erheblichen Problemen führten. Um hier Abhilfe zu schaffen, stellte das Projekt „Digitale multikriterielle Materialauswahl zur optimierten Kreislauffähigkeit von Kunststoffprodukten - DIMOP“ wichtige Informationen zur Kreislauffähigkeit unterschiedlichster Kunststoff-

materialien und Materialkombinationen beim Produktdesign zur Verfügung. Dadurch können nun verschiedene Kriterien, beispielsweise Funktionalität, Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit, gegeneinander abgewogen und eine ganzheitlich optimierte Materialauswahl getroffen werden. Am Ende des Lebenszyklus ist es möglich, die Produkte besser zu recyceln und als hochwertige Wertstoffe dem Kreislauf erneut zuzuführen.



Abbildung 1 : Ablauf der Recyclingfähigkeitsbewertung in DIMOP



Abbildung 2: In DIMOP wird das multikriterielle Bewertungsverfahren TOPSIS verwendet, um basierend auf individuellen Präferenzen des Nutzers (Gewichtung) aus den verschiedenen Kennwerten zu technischen, ökologischen und ökonomischen Größen ein Ranking der Produktdesigns (Alternativen) zu ermitteln.

Umsetzung & Ergebnisse

Im Forschungsvorhaben werden relevante, materialbedingte Problemfelder des Recyclings identifiziert und adressiert. Einerseits werden diese durch geeignete Kenngrößen quantifizierbar gemacht, insbesondere durch die Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der Recyclingfähigkeit (siehe Abbildung 1). Weitere Kenngrößen, die in die Betrachtung einfließen, sind die CO²-Bilanz der Materialien sowie der damit zusammenhängende Verbrauch nicht-erneuerbarer Ressourcen. Andererseits werden für die Reduzierung der Probleme alternative Ansätze für die Materialauswahl erfasst,

systematisiert und verallgemeinert. Darauf aufbauend wird eine Methode zur multikriteriell optimierten Materialauswahl entwickelt (siehe Abbildung 2). Dabei gilt es, Zielkonflikte zu identifizieren und Hilfestellungen zu deren Vermeidung zu geben. Auf dieser Basis wird ein IT-gestütztes Entscheidungstool zur Optimierung des Ökodesigns als praxistaugliche Umsetzung des erarbeiteten Modells entwickelt. Durch Schaffung von Schnittstellen kann das Entscheidungsstool technisch in die Unternehmenssoftwares eingebunden werden, sodass die Integration in betriebliche Prozesse unterstützt wird.

Dadurch können die Bewertungsfunktionalitäten bei der Entwicklung von Kunststoff-Produkten genutzt werden, bspw. in CAD/CAE Software. Die Überprüfung der Praxistauglichkeit der Forschungsergebnisse erfolgt durch die Entwicklung einer Pilotanwendung. Als Ergebnis des DIMOP-Projekts sollen allen Unternehmen der bayerischen Kunststoffindustrie digitale Werkzeuge zur Verfügung stehen, die eine Entscheidungshilfe bei der Materialauswahl für Kunststoffprodukte liefern, um somit deren Kreislauffähigkeit zu steigern.

Beitrag zur Ressourceneffizienz

Von den Ergebnissen aus DIMOP können die unterschiedlichsten Gruppen von Unternehmen profitieren, insbesondere Kunststoffverarbeiter, Compoundeure und Recycler, wobei es sich in Bayern um zusammen mehr als 600 Unternehmen mit ca. 76.000 Beschäftigten handelt. Die Ergebnisse führen zur stärkeren Sensibilisierung für den Einfluss der Materialauswahl auf die Recyclingfähigkeit

sowie die ökologischen Auswirkungen eines Produktes. Durch den systematischen Einsatz der DIMOP-Methode wird eine Steigerung der Ressourceneffizienz und Wettbewerbsfähigkeit in Bayern durch eine verbesserte Kreislauffähigkeit von Kunststoffprodukten erreicht. So können recyclingfähige, d.h. umweltfreundlichere Produkte steigenden Marktanforderungen gerecht werden. Ferner werden Qualität und

Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen erhöht, wodurch die Kreislaufwirtschaft für Kunststoffe in Bayern gestärkt und langfristig die Abhängigkeit von importierten fossilen Rohstoffen reduziert werden. Darüber hinaus ergibt sich eine Verbesserung der Materialeffizienz bei Kunststoffverarbeitern durch das vereinfachte Recycling von Produktionsabfällen.

Projektbeteiligte



Prof. Dr.-Ing. Ulrich Bochtler, Florian Beck



Innovative Recyclingverfahren für Elektroschrott
IRVE

Problemstellung & Zielsetzung

2019 fielen in Europa gut 12 Millionen Tonnen Elektronikschrott an, wobei die Recyclingquote in der Europäischen Union bei lediglich ca. 42 % lag. Bis dato wird der recycelte Anteil an Elektronikschrott im großtechnischen Maßstab meist in mehrstufigen Zerkleinerungs- und Sortieranlagen behandelt. Geräte der IT werden im Wesentlichen manuell demontiert, um u.a. die hochwertig bestückten Leiterplatten zu separieren. Diese werden zunächst zerkleinert, um

Aluminium und Eisenmetalle abzuscheiden. Das übrige Granulat gelangt schließlich in Sekundärhütten, in denen mittels Elektrolyse- und hydro- oder pyrometallurgischer Prozesse Kupfer und Edelmetalle gewonnen werden. Eine Rückgewinnung von versorgungskritischen Metallen aus der Bestückung wie Tantal, Germanium oder Seltene Erden erfolgt i.d.R. nicht. Ziel des kooperativen Projektes zwischen der Technischen Hochschule Aschaffenburg und der Fraunhofer-Einrichtung

für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie war es, zwei Verfahren für das Recycling von Elektroschrott zu entwickeln und diese unter den Aspekten Durchsatz und Wirtschaftlichkeit zu vergleichen. Dabei wurde von den beiden Projektgruppen jeweils ein Verfahren zur Entstückung von Leiterplattenbauteilen (selektive Entstückung und elektrohydraulische Zerkleinerung) entwickelt und getestet.

Umsetzung & Ergebnisse

Bei der selektiven Entstückung (siehe Abbildung 1) werden ausgewählte Bauteilgruppen basierend auf einem 2D-Bild der Leiterplatte mittels eines künstlichen neuronalen Netzwerkes (YOLOv4) erkannt (Erkennungszeit: ca. 30 ms, Erkennungsrate: ca. 95 %) und deren Koordinaten ermittelt. Anschließend werden die Lötverbindungen durch Aufschmelzen des Lötzinns gelöst. Die Bauteile werden mittels Unterdruck durch eine Absaugvorrichtung, montiert auf einem

computergesteuerten Portalroboter, von der Leiterplatte entstückt und eingesammelt (Verfahrensgeschwindigkeit: 500 mm/s). Das Verfahren ist auf beliebige Bauteilgruppen erweiterbar. Zur industriellen Umsetzung wird die Leiterplatte von einem Förderband von einer Station zur anderen geführt. Dabei ist der Durchsatz des Verfahrens abhängig von der Anzahl der zu entstückenden Bauteile. Bei der elektrohydraulischen Zerkleinerung (siehe Abbildung 2) werden Leiterplatten durch

Stoßwellen entstückt. Die kurzen aber heftigen mechanischen Stöße werden durch gepulste Funkenentladungen in einem flüssigen Trägermedium erzeugt und auf die Leiterplatte übertragen, wodurch Schwachstellen, wie etwa Verbindungen angegriffen werden. Die entstückten Bauteile bleiben dabei größtenteils unbeschädigt und werden darauf automatisch entsprechend ihrer optimalen Verwertungswege sortiert (Siebung, Wirbelstrom-, Magnetscheidung, NIR-, Farb- und induktive

Sensorik). Die Wirtschaftlichkeit des Leiterplattenrecyclings ist stark abhängig vom Materialwert der Wertstoffe. Als Beispiel seien hierbei das Recycling von Tantalpentoxid aus Tantal-Kondensatoren und von

Gold aus integrierten Schaltkreisen aufgeführt. Die Implementierung eines Softwareprogramms zur automatischen Ermittlung der Menge und des Materialwerts der Wertstoffe auf der Leiterplatte während der Verarbeitung

der Erkennungsdaten könnte hierbei ein hilfreiches Werkzeug zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit des Leiterplattenrecyclings darstellen.

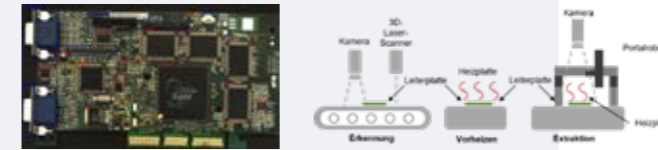


Abbildung 1: KI-gestützte Erkennung und selektive Entstückung



Abbildung 2: Elektrohydraulische Zerkleinerung

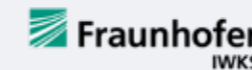
Beitrag zur Ressourceneffizienz

Die entwickelten Entstückungsverfahren zielen darauf ab, komplette Bauteile aus den Leiterplatten zu entfernen. Ziel dabei ist die Rückgewinnung von kritischen Rohstoffen wie z.B. Tantal oder Seltenen Erden, die bisher bei herkömmlichen Recyclingverfahren in die Schlacke übergehen und als Abfallprodukte gelten und nicht weiterverwertet werden. Beispielhaft hierfür ist die Rückgewinnung von Ta₂O₅ aus den Ta-Kondensatoren. Trotz der auch zukünftig

wachsenden Nachfrage und der Einstufung von Tantal als kritischer bzw. als potentiell kritischer Rohstoff durch die Europäische Union und durch die Deutsche Rohstoffagentur lag 2016 die End-of-Life-Recyclingrate von Tantal unterhalb 0,1 %. Die Konzentrationen von Tantal in Kondensatoren ist zwar niedriger als in den primären Quellen, die vorgeschlagenen Entstückungsverfahren tragen jedoch dazu bei, den Importbedarf von versorgungskritischen Materialien zu senken und damit die

Versorgungssicherheit Deutschlands zu erhöhen. Der Vorteil der beiden Entstückungsprozesse liegt zudem in deren Flexibilität. Ein Hochskalieren der Entstückung auf beliebige Bauteilgruppen der Leiterplatten ist möglich. Dabei ist allerdings eine Anpassung der Bearbeitungszeit bei variierender Bauteilanzahl bzw. der Sortierung bei Vervielfältigung der zu entstückenden Bauteilgruppen zu beachten.

Projektbeteiligte



Prof. Dr.-Ing. Burkhard Berninger, Michael Peer



Plattformtechnologie zur Verwertung chlorhaltiger Abfälle und Rückgewinnung kritischer Metalle

Chlor-Plattform

Problemstellung & Zielsetzung

Kunststoffabfälle mit Chlorgehalt und somit meist PVC-haltige Kunststoffabfälle, werden derzeit überwiegend thermisch verwertet. Der dabei entstehende Chlorwasserstoff (HCl) muss aus dem Rauchgas entfernt bzw. neutralisiert und deponiert werden, um die negativen Umweltauswirkungen wie Korrosion oder der Bildung von hochtoxischen Dioxinen und Furanen vorzubeugen. Das Chlor geht

somit dem Wirtschaftskreislauf verloren. Für besonders werthaltige Hightech-Metalle wie Platingruppenmetalle existieren optimierte Recyclingrouten, jedoch verteilt sich der überwiegende Teil auf Rest- oder Nebenfraktionen. Hier sind ihre speziellen Eigenschaften ungenutzt und gehen de Facto verloren. Somit stehen diese für die Verwendung in modernen Geräten, wie bspw. LED oder LCD-Panels in Flach-

bildfernsehern nicht mehr zur Verfügung. Die Chlor-Plattform stellt eine technische Lösung zur gemeinsamen Verbesserung der Verwertungsqualität von chlorhaltigen und Hightech-Metalle enthaltenden Abfallströmen dar. Mit ihr ist es potentiell möglich, mehrere zehntausend Tonnen HCl und daraus resultierend mehrere tausend Tonnen Hightech-Metalle aus Abfällen in Bayern wiederzugewinnen.

Umsetzung & Ergebnisse

Bei der thermochemischen Behandlung von Kunststoffabfällen mit Chlorgehalt, wie PVC-Fraktionen aus dem gelben Sack oder Fensterprofile, wurde zunächst HCl erzeugt. Hierbei konnte bis zu 99 % des darin enthaltenen Chlors verflüchtigt werden. Dieses hochwertige, HCl-haltige Gas wurde dazu verwendet, um Indium aus Abfallströmen wie LED oder LCD in ihre Metallchloride zu überführen. Aufgrund des geringeren Siedepunktes von Indiumchlorid verdampfte dieses aus den Abfallströmen, kondensierte und bildete ein metallreiches Konzen-

trat. In diesem befand sich über 90 % des Indiums aus den LCD-Panels. Im Anschluss wurde durch weitere Verfahrensschritte gediegenes Indium gewonnen. Aus dem festen Rückstand der LED wurden weitere Hightech-Metalle, wie Seltene Erden Metalle, Nickel oder Kobalt, durch eine zweistufige Laugung zurückgewonnen. Die chlorfreien Fraktionen können dem Wirtschaftskreislauf schließlich als Ersatzbrennstoff z.B. in der Zementherstellung wieder zur Verfügung gestellt werden. Nebenprodukte wie überschüssiges HCl kann als Salzsäure direkt vermarktet oder zu

FeCl₃ weiterverarbeitet werden. Durch dieses neue Recyclingverfahren können die Hightech-Metalle zu üblichen Marktpreisen dem Wirtschaftskreislauf zur Verfügung gestellt werden. Aus den LCD-Panels, die jährlich in Deutschland anfallen, könnte mit dem erprobten Verfahren Indium für die Herstellung von bis zu 78 Millionen Smartphones zurückgewonnen werden. Durch die Nutzung der chlorhaltigen Kunststoffabfälle kann der CO₂-Ausstoß um bis zu 50 % im Vergleich zur Kohlenstofffreisetzung bei der thermischen Verwertung reduziert werden.

Beitrag zur Ressourceneffizienz

Die Kombination der Verwertung von chlorhaltigen Abfällen und der Rückgewinnung von Hightech-Metallen stellt als gleichzeitige Lösung von zwei relevanten abfallwirtschaftlichen Problemen in der prakti-

schen Anwendung einen weitgehend neuen Ansatz dar. Durch die rohstoffliche Nutzung des Chlors wird dieses dem Wirtschaftskreislauf wieder zugeführt. Das Recycling der kritischen Metalle aus Abfällen kann zur Redu-

zierung der Entnahme von Primärressourcen beitragen und somit die Umwelt entlasten. Die Versorgungssicherheit der bayerischen Wirtschaft von Hightech-Metalle kann gesteigert werden.

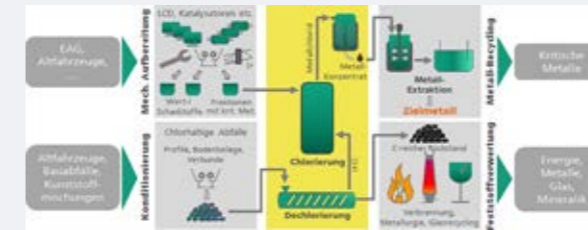


Abbildung 1: Projektschema Chlor-Plattform

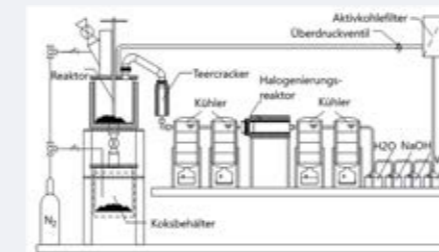
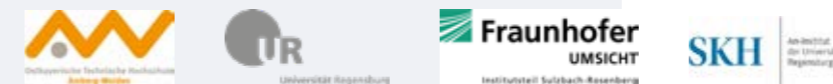


Abbildung 2: Schematischer Aufbau der Technikanlage

Projektbeteiligte



Rohstoffsicherung und -erhalt durch Aufbereitung und Verwertung von Gießerei-Stäuben - Bayerisches Konsortium für Gießereistaub-Metall-Rückgewinnung BGMR

Problemstellung & Zielsetzung

In der metallverarbeitenden Industrie und ganz besonders in den Gießereien selbst fallen wie in allen Industriebereichen unterschiedliche Abfälle an. Einen besonders hohen Anteil daran haben metallhaltige Filterstäube. Die chemische Zusammensetzung sowie die physikalischen Eigenschaften dieser Stäube variieren dabei nicht nur je nach Gießerei, sondern oft auch innerhalb einer Gießerei von Anfallstelle zu Anfallstelle. Denn eine Gießerei besteht, je nach Größe und Spezialisierung, aus verschiedenen Einheiten, die sich mit verschiedenen Aufgaben be-

fassen. Die Absaugung und Sammlung dieser Stäube ist nicht einheitlich geregelt und variiert ebenfalls von Gießerei zu Gießerei. In den allermeisten Fällen werden sie am Ende in sogenannten BigBags gesammelt (siehe Abbildung 1) und von einem Entsorgungsbetrieb abgeholt. Oft landen sie dann auf Deponien oder als Bergversatz. Generell würden sich die Inhaltsstoffe des Staubs für eine Wiederverwertung eignen, dies scheitert aber letztlich an Hürden, die die oben genannten Aspekte mit sich bringen. Hinzu kommt, dass der Abfall Staub mit seinen Inhaltsstoffen

keinen hohen finanziellen Wert besitzt. Für eine entsprechende Rentabilität, welche für eine Implementierung in der Industrie vorausgesetzt wird, muss sich ein potenzielles Aufbereitungs- oder Wiederverwertungsverfahren also auch an diesen Rahmenbedingungen orientieren. Hier setzte das Projekt BGMR an. In enger Kooperation mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft wurde sowohl die Grundlagenforschung durchgeführt als auch konkrete Ideen in den Technikumsmaßstab überführt, um so eine Umsetzbarkeit in der Industrie zu evaluieren.



Abbildung 1: Beispiel der Stäube in einem Bigbag



Abbildung 2: Übersicht über verschiedene Testreihen im Rahmen der Versuche zur Beimischung von Gießereistauben zu Siliziumkarbid-Formlingen



Umsetzung & Ergebnisse

Für eine möglichst effiziente Strategie in der Lösungsfindung wurde das Forschungsvorhaben in drei verschiedene Teilschritte untergliedert. Der erste Teil befasste sich mit der Literaturrecherche, dem Austausch mit Projektpartnern, Gießereibesuchen und schließlich der Grundlagenforschung an den Stäuben selbst. Hierfür wurden Proben bei den beteiligten Partnergießereien genommen und diese auf ihre Zusammensetzungen analysiert. Ausgehend davon wurden die Stäube, je nach Eisenanteil, klassifiziert und in verschiedenen Gruppen eingeteilt. Anschließend fanden verschiedene Versuche statt, welche zum Ziel hatten, die Stäube aufzubereiten und dadurch gewisse Inhaltsstoffe anzureichern bzw. abzureichern, also z.B. aus einem

potenziell gefährlichen Staub (z.B. durch einen erhöhten Chrom-Gehalt) einen ungefährlicheren Staub zu machen (z.B. durch entsprechende Abreicherung des Chrom-Gehalts). Dadurch sollten auch Rückschlüsse auf die generellen Eigenschaften der Stäube geschlossen werden. Im zweiten Teil wurde konkret an Methoden zur Wiederverwertung von Stäuben geforscht. Hier konnte man in Kooperation mit dem Projektpartner GPS SIC Keßl GmbH eine Methode entwickeln, in der die Stäube der Produktion von Siliziumkarbid-Formlingen beigemischt werden. Siliziumkarbid-Formlinge werden von den Gießereien selbst im Kupolofen hinzugegeben, um den Siliziumgehalt in der Schmelze zu erhöhen. In mehreren, umfangreichen Testreihen

konnten den Anforderungen entsprechende Siliziumkarbid-Gießereistaub-Formlinge produziert werden (siehe Abbildung 2). Der Staub der Gießerei kann also durch Beimischung zu SiC-Formlingen in einem weiteren Schritt in derselben Gießerei wiederverwendet werden. Der dritte Teil befasste sich mit der Quantifizierung von ökologischer Nachhaltigkeit. Besonders für die Unternehmen stellt sich die Frage: Welcher Entsorgungsweg für meinen Abfall ist eigentlich der (ökologisch) nachhaltigere? Hierfür wurde ein mathematisches Modell entwickelt, welches anhand verschiedener Umweltindikatoren eine Antwort liefert und damit als Entscheidungshilfe dienen kann.

Beitrag zur Ressourceneffizienz

Mit Ressourcen effizient umzugehen ist branchen- und unternehmensunabhängig stets ein Ziel, welchem ein hoher Stellenwert zugeordnet wird. Dennoch scheitert die Implementierung oft an Gründen wie fehlendem Knowhow oder finanziellen Mitteln für eigene Forschungsvorhaben. Genau hier setzt der ForCYCLE II Projektverbund an. In unserem Projekt

BGMR konnte durch Adaption eines etablierten Prozesses, nämlich der Produktion von Siliziumkarbid-Formlingen, ein neues Produkt geschaffen werden, in dem Stäube direkt durch Beimischung wiederverwertet werden können. Es bedarf keiner vorherigen Aufarbeitung der Stäube. Weiterhin besteht die Möglichkeit durch die Auswahl gezielter Stoffströme, nicht nur die Metalle aus den

Stäuben der Schmelze rückzuführen, sondern auch Quarzsand, welcher bei der aktuellen Produktion beigemischt werden muss, zu substituieren. Diese Eigenschaften sorgen für geringe Hürden Richtung einer Anwendung in der Industrie und ebnen den Weg für eine ressourceneffizientere Produktion.

Projektbeteiligte



Prof. Dr.-Ing. Ulrich Teipel, Thomas Feen, Beate Wailersbacher



Recycling von Wärmeverbundsystemen
WDVS

Problemstellung & Zielsetzung

Seit den 1970er Jahren wurden in der Bundesrepublik Deutschland nahezu 900 Mio. m² Wärme-dämmverbundsysteme (WDVS) an den Fassaden von Gebäuden angebracht. Diese WDVS bestehen grundsätzlich aus einer Dämmschicht, einem durch Gewebe verstärkten Armierungsputz (Unterputz) und einer Oberputzschicht (Abbildung 1). Aufgrund der Vielfalt der in den vergangenen Jahrzehnten verwendeten Werkstoffen, sowie et-

waiger kritischer bzw. sogar umweltgefährdender Inhaltsstoffe, bestehen viele Unsicherheiten in Bezug auf eine Aufbereitung solcher Systeme. Des Weiteren enthalten die meisten Dämmstoffmaterialien das Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD), für welches seit 2016 ein weltweites Anwendungsverbot gilt. Derzeit werden diese Systeme größtenteils thermisch verwertet, wodurch ein erhebliches Ressourceneffizienzpotential im Frei-

staat Bayern verloren geht. Durch die Entwicklung einer Aufbereitungsstrategie auf Basis von verfahrenstechnischen Prozessschritten sollen die komplexen Kompositmaterialien mechanisch so aufgeschlossen werden, dass die jeweiligen Wertstoffe sortenrein und schadstoffarm als verwertbare Sekundärrohstoffe recycelt und in den Markt rückgeführt werden können.

Umsetzung & Ergebnisse

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ForCYCLE II wurden im Zuge von Abbruchmaßnahmen die WDVS-Abfälle unterschiedlicher Generationen und Materialien beschafft und charakterisiert. Auf Basis dieser Ergebnisse konnte eine Verwertungsstrategie zur mechanischen Aufbereitung dieser Systeme entwickelt werden. Durch die Variation von Prozessparametern konnten der komplexe Verbund der jeweiligen Systeme selektiv aufgeschlossen und ein Ansatz für ein Zerkleinerungsmodell für elastische Werkstoffe entwickelt

werden. Ebenfalls kann hierdurch zielgerichtet Einfluss auf die partikulären Eigenschaften genommen werden. Hierdurch können die jeweiligen WDVS für frei definierbare Parameter (Massenstrom, Partikelgröße) so effizient wie möglich aufbereitet werden (Abb.2). Durch die Festlegung von verfahrenstechnischen Apparaturen und deren jeweiligen optimalen Prozessführung für die mechanische Trennung mittels Sieb- und Strömungsklassierung, konnten Rezyklate (EPS (a); XPS (b); Putz (c); Glasfasergewebe (e-f)) mit hoher

Reinheit verschiedener Eigenschaften generiert werden. Diese wurden im Verlauf der Prozesskette jeweils auf etwaige Stör- und Schadstoffe untersucht, um so eine Weiterverarbeitung bzw. Rückführung garantieren zu können (Abb. 3). Ein Anteil an einer Mischfraktion konnte jedoch nicht weiter aufbereitet werden (d). Des Weiteren konnten die durchgeführten Laborversuche aufzeigen, dass eine Möglichkeit zur Ausschleusung des Flammschutzmittels HBCD besteht. Hierbei wurde bereits vom Fraunhofer IVV vor einiger

Zeit ein Prozess zur Ausschleusung von HBCD aus Dämmstoffen entwickelt und dessen Anwendung im Rahmen des Forschungsvorhabens ausführlich diskutiert. Somit besteht die Möglichkeit

das rückgewonnene Styropor erneut einer hochwertigen Wertschöpfungskette zuzuführen. Insgesamt tragen die Resultate dieses Forschungsvorhabens sowie der beteiligten Projektpartner

dazu bei, dass der Stoffkreislauf von WDVS in der Bundesrepublik Deutschland wesentlich verbessert bzw. mittelfristig geschlossen werden kann.

Beitrag zur Ressourceneffizienz

Bei der Verwertung der unterschiedlich anfallenden WDVS ist zu beachten, dass in Bezug auf die Ressourceneffizienz eine Deponierung nicht sinnvoll bzw. zulässig sowie eine thermische Verwertung in Bezug auf geschlossene Stoffkreisläufe auszu-schließen ist. Durch ein werkstoffliches Recycling dieser komplexen Komposite

stehen hochwertige und überwiegend sortenreine Materialfraktionen wie Putz, Glasfasergewebe und Styropor für eine Wiederverwertung zur Verfügung. Beispielsweise können die aufbereiteten Putzfraktionen als Füllstoffmaterial für Recyclingziegel genutzt werden. Fasern können als Verstärkungsmaterial für Leichtbaumaterialien genutzt wer-

den. Aufbereitetes Styropor kann rezykliert als Verpackungsmaterial bzw. Dämmstoffplatten eingesetzt werden. Hierdurch entsteht für die Umwelt und die Bevölkerung ein erhebliches Ressourceneffizienz-Potential, was die Ressourcen schont und die Umwelt entlastet.

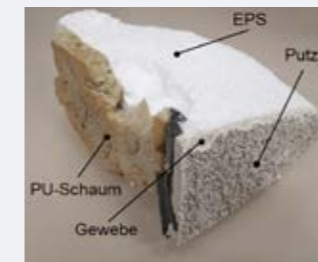


Abbildung 1: WDVS-Abbruchmaterial mit EPS als Dämmstoffmaterial



Abbildung 2: Rückgewonnene Werkstoffe aus aufbereiteten WDVS

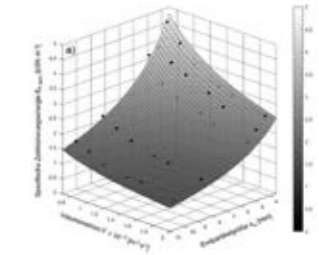


Abbildung 3: Zerkleinerungsmodell für WDVS-Abbruchmaterialien

Projektbeteiligte



Prof. Dr. Thorsten Gerdes, Frank Bayer, Barsheek Roy

Erhöhung der Nachhaltigkeit in der Behälterglasindustrie durch Vermeidung von Beschichtungen

VaporCoat

Problemstellung & Zielsetzung

Ziel des Projektes VaporCoat war die Entwicklung von Verfahren zur Vermeidung von Oberflächenbeschichtungen in der Behälterglasindustrie. Behälterglas wird derzeit mittels einer zweistufigen Beschichtung aus Zinnoxid (Heißvergütung) und Polyethylen oder Wachs (Kaltvergütung) versehen, um dadurch die Etikettierbarkeit zu gewährleisten und das Zerkratzen der Glasoberfläche zu verhindern (Abbildung 1). Die Beschichtung reduziert den Reibwert der Oberfläche und er-

leichtert so das Gleiten der Glasoberflächen aneinander. Zinn ist allerdings eine kritische Materialressource. Bisher wird das Zinnoxid in einer niedrigen Konzentration auf die Glasoberfläche abgeschieden und geht letztlich im Werkstoffkreislauf dauerhaft verloren, da es beim Wiedereinsmelzen im Glas gelöst wird. Immerhin 2 % des weltweiten Zinnbedarfs werden jährlich von der Glasindustrie für Beschichtungen genutzt. Vor dem Hintergrund knappen Zinnressourcen (Restmenge reicht

noch ca. 20 Jahre), stellt sich die Frage nach Alternativen von selbst. Primäres Ziel des Projektes VaporCoat war deshalb die Vermeidung von Zinn als Beschichtungswerkstoff für Behältergläser. Sekundäres Ziel war, die beschriebene zweistufige Glasvergütung auf einen einstufigen Prozess umzustellen. Als Alternativen hierfür wurden eine Dampfkonditionierung der Glasoberfläche sowie eine einstufige zinnfreie Sol-Gel-Beschichtung untersucht.

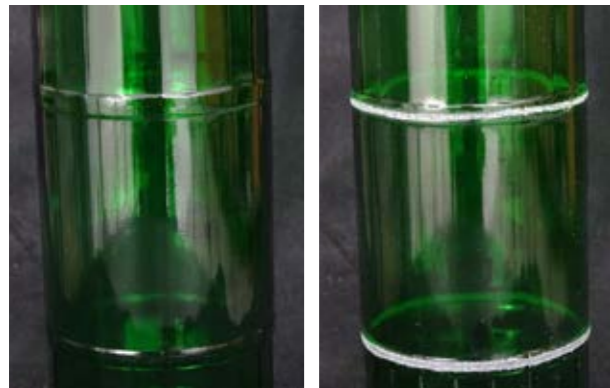


Abbildung 1: Grüne Behältergläser, (Links) fabriekneu; (Rechts) mit Gebrauchsspuren

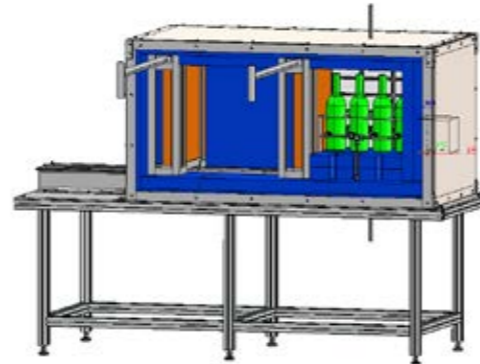


Abbildung 1: Konzept zur Übertragung der Heißdampfkonditionierung in eine Pilotlinie



Umsetzung & Ergebnisse

An der Universität in Bayreuth wurde die Konditionierung der Gläser mit Heißdampf untersucht, mit dem Ziel, die Härte und Kratzbeständigkeit von nicht-beschichteten Glasoberflächen zu erhöhen. Die nötige Dampfbehandlung wurde dabei unter Temperaturen zwischen 480 und 600 °C durchgeführt. Die Behandlungsdauer betrug zwischen wenigen Minuten und vier Stunden. Der größte Einfluss der Dampfbehandlung zeigte sich nahe der Glas-Übergangstemperatur (T_g=570 °C). Wenige Minuten Dampfbehandlung führen hier bereits zu einer deutlichen Härtesteigerung. Analysen zeigen, dass eine Veränderung des Glasnetzwerks zugunsten von Netz-

werkwandlern erzielt wurde und zusätzliche OH-Bindungen entstanden. Die Einlagerung von OH-Bindungen in die Glasoberfläche führt offensichtlich zum Anstieg von Härte und mechanischer Festigkeit. Allerdings währ dieser Effekt nur begrenzte Zeit. Nach zwei Wochen sinkt die Härte aufgrund von Migration der Oxonium-Ionen im Glasnetzwerk wieder auf den ursprünglichen Wert ab. Zudem konnte der temporäre Härteanstieg nicht für eine erhöhte Kratzfestigkeit genutzt werden, da die genauso wichtigen Gleiteigenschaften nicht gesteigert wurden. Im Praxistest zeigten die mit Dampf behandelten Oberflächen sogar eine erhöhte Kratzanfälligkeit. Für die Heiß-

dampfkonditionierung wurde dennoch ein Konzept zur Übertragung des Verfahrens in den Demonstrationsmaßstab entwickelt, auch mit Blick auf eine mögliche Anwendung als Zwischenprozess (Abbildung 2). Im Gegensatz dazu konnte die von Wiegand-Glas erprobte Sol-Gel-Beschichtung eine dauerhafte Verbesserung der Kratzbeständigkeit erzielen. Auch andere Praxisparameter konnten dabei erfüllt werden. Der Prozess steht kurz davor, eine ausreichende technische Reife zu erreichen, so dass sich ein erfolgversprechender Weg für zinnfreie Beschichtungen in der Behälterglasindustrie abzeichnet.

Beitrag zur Ressourceneffizienz

Der Projektansatz „Weglassen statt Ersetzen“ durch die Behandlung mit Dampf weist im Life Cycle Assessment (LCA) erfolgreich eine Reduzierung abiotischer Primärmaterialien auf, vor allem von Zinn. Jedoch ist die Dampferzeugung mit erhöhtem Energieaufwand verbunden. Beim Vergleich des Stands

der Technik ist bei einer Heißdampfkonditionierung im industriellen Maßstab der kumulierte Energieaufwand für die Dampfbehandlung höher als beim Status Quo. Beim derzeitigen Strommix liegt der CO₂-Ausstoß über dem der klassischen Heiß- & Kaltendvergütung. Hingegen wäre bei 100 % Ökostrom-Einsatz die Dampfbehandlung

CO₂-effizienter. Grundsätzlich besteht jedoch bei der Dampferzeugung die Möglichkeit, Energieeinsparung durch Abwärmenutzung im Glaswerk zu erzielen. Auch die Sol-Gel Beschichtung von Wiegand-Glas leistet einen Beitrag zur Ressourceneffizienz, da der Einsatz von Zinn als Beschichtungswerkstoff vollständig vermieden wird.

Projektbeteiligte





Optimierung der Holz-Beton-Verbundbauweise durch Verwendung natürlicher und ökologischer Werkstoffe
HB-(Ca)V

Problemstellung & Zielsetzung

Mit der Holz-Beton-Verbundbauweise (HBV) – bei der Holz an der Unterseite (Zugzone) und Beton an der Oberseite (Druckzone) im Verbund zusammen wirken – können höhere Spannweiten, ein günstigeres Schwingungsverhalten und ein besserer Brandschutz erreicht werden. Nachteilig ist dabei die Verwendung der Werkstoffe Zement als Bindemittel und Stahl als Bewehrungsmaterial, welche herstellungsbedingt mit hohen CO₂-Emissionen verbunden sind. Öko-

logische Alternativen sind jedoch nicht marktreif und auch nicht bauaufsichtlich für tragende Zwecke im Holz-Beton-Verbundbau zulässig. Das Gesamtziel des Projekts war es daher, baupraktische Lösungen für die Verwendung von natürlichen und ökologischen Werkstoffen im Bau von Geschossdecken in HBV-Bauweise zu entwickeln. Durch die Substitution von Zement und Stahl sollte die Ressourceneffizienz und CO₂-Bilanz der HBV-Bauweise verbessert werden. Insgesamt wurde eine Redu-

zierung der CO₂-Emissionen um min. 50 % als Ziel gesetzt. Hierfür wurde das natürlich vorkommende Mineral Anhydrit bzw. Calciumsulfat CaSO₄ als Bindemittel sowie Faserbewehrung aus Basalt vorgesehen. Dabei war wichtig, dass durch die Verwendung der alternativen Baustoffe die Leistungsfähigkeit der HBV-Bauweise erhalten bleibt, d.h. es sollten mind. gleichhohe Tragfähigkeiten wie bei gängigen HBV-Decken mit Zementbeton erreicht werden.

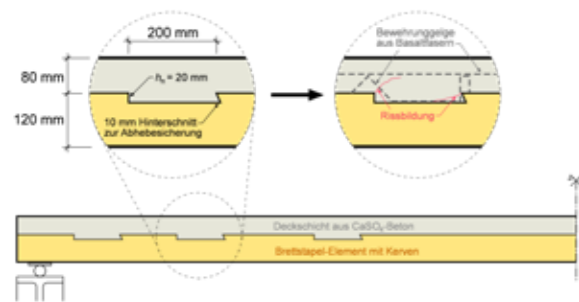


Abbildung 1: Ausführung der Kerne mit Bewehrungsgelege aus Basaltfasern

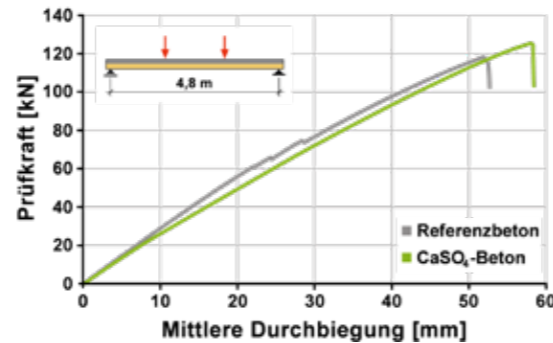


Abbildung 2: Vergleich der Last-Verformungskurven der HBV-Biegeträger mit Referenzbeton und CaSO₄-Beton

Umsetzung & Ergebnisse

Zunächst wurden geeignete Rezepturen für Beton und Prüfverfahren erarbeitet und anhand des Treibhauspotentials ausgewählt. Die Betonrezeptur mit Calciumsulfat als Bindemittel zeigte im Vergleich zum Referenzbeton ähnliche Festigkeitseigenschaften und deutliche Vorteile beim Schwind- und Kriechverhalten. Die herstellungsbedingten CO₂-Emissionen sind dabei ca. 50 % niedriger als beim Referenzbeton mit Zement als Bindemittel. Im weiteren Projektverlauf wurden in experimentellen und rechnerischen Untersuchungen die Betone auf ihre Leistungsfähigkeit in HBV-Bauteilen

geprüft. Dabei wurden kleinformative Abscherversuche zur Ermittlung der Verbundsteifigkeit und Tragfähigkeit, sowie großformatige Bauteilbiegeversuche zur Untersuchung des Kurzzeit- und Langzeitverhaltens durchgeführt. Die Erprobung des Calciumsulfatbetons (CaSO₄-Beton) in HBV-Bauteilen ergab, dass unter Einsatz von Basaltfasergelegen als Bewehrung der Kerne (siehe Abbildung 1), mindestens gleichhohe Traglasten möglich sind (siehe Abbildung 2). Die im Vergleich zu den Bauteilen mit Referenzbeton etwas geringere Steifigkeit wird durch die günstigen Schwind- und Kriech-

eigenschaften des CaSO₄-Betons ausgeglichen und damit eine geringere Durchbiegung in Hinblick auf das Langzeitverhalten erwartet. Die Anwendung ist jedoch nicht in oder über Räumen mit Feuchtebeanspruchung geeignet. Abschließend war die Herleitung von Bemessungsansätzen und baupraktischen Herstellungsempfehlungen Inhalt des Projekts. Damit wurde die Basis für das laufende Verfahren zur Erlangung einer bauaufsichtlichen Zulassung geschaffen und alle im Projekt definierten Ziele erreicht.

Beitrag zur Ressourceneffizienz

Insgesamt wurden durch die im Projekt erarbeiteten Lösungen und Optimierungen die notwendigen Grundlagen für bauaufsichtliche Zulassungen von ressourceneffizienteren HBV-Decken geschaffen. Außerdem können damit weitere Impulse für Neu- und Weiterentwicklungen gesetzt werden, um den Fortschritt der (Holz-)Bauwirtschaft nachhaltig zu stärken und einen

vermehrten, ressourceneffizienten Einsatz von nachwachsenden und natürlichen Werkstoffen zu fördern. In Hinblick auf das steigende Marktpotenzial von HBV-Decken, sind durch die im Projekt erarbeiteten Lösungen deutliche CO₂-Einsparungen und durch die vermehrte Verwendung von Holz zusätzlich CO₂-Speicherung möglich. Generell ist die verstärkte Verwendung von

ökologischen und nachwachsenden Baustoffen eine sehr wirksame Maßnahme zum Erreichen der geplanten Klimaschutzziele, da der Bausektor weltweit für ca. 1/3 der Treibhausgasemissionen verantwortlich ist und der Bedarf an Wohnraum und Infrastruktur weiter steigt.

Projektbeteiligte



Prof. Dr. Thomas Brück, Prof. Dr. Tom Nilges, Max Koch, Michael Paper



Chemische Mobilisierung und Mikroalgen-basierte Bioadsorption von Seltenen Erden aus Kaolinit und anderen Wertstoffen

MiKa

Problemstellung & Zielsetzung

Seltene Erden (SE) sind für die Herstellung von Hochleistungselektronik und auch Magneten in Windkraftanlagen bzw. Elektromotoren essentiell. Nachhaltige Energiekonvertierung, der Ausbau der Elektromobilität und die Weiterentwicklung von Elektromotoren sind Kernthemen der Energiewende. Eine stabile SE-Versorgung und Preise sind daher für den Technologiestandort Deutschland essentiell. Viele Länder unternahmen in den letzten Jahren Anstrengungen eine eigenständige SE-Produktion aufzubauen, um wirtschaftlich und macht-

politisch unabhängiger zu sein. Die weltweite jährliche Produktion lag im Jahr 2021 bei ca. 280.000 Tonnen. Aus einer Mitteilung der EU-Kommission im Jahr 2020 geht hervor, dass SE in Europa weiterhin zu 98-99 % aus dem asiatischen Raum importiert werden. Da es keine relevanten lokalen SE-Produktionsstätten gibt, besteht weiterhin eine nahezu 100%ige Importabhängigkeit. Konventionelle Verfahren zur Gewinnung von SE verwenden umweltschädliche Chemikalien und weisen einen hohen Energiebedarf auf. Für eine nachhaltige SE-Produktion

müssen in Zukunft neue Prozesse entwickelt werden. Das Projekt MiKa soll die Sicherung der Rohstoffversorgung mit SE in Bayern unterstützen, indem SE aus vorhandenen Rohstoffquellen gewonnen werden. Das Ziel des Projekts MiKa war daher die Entwicklung eines umweltfreundlichen SE-Anreicherungsverfahrens basierend auf der Adsorption an Algenbiomasse (siehe Abbildung 1). Als Ausgangsrohstoff wurden dabei Reststoffströme aus der Kaolinproduktion bei den Amberger Kaolinwerken verwendet.

Umsetzung & Ergebnisse

Zur Entwicklung eines umweltschonenden SE-Anreicherungsverfahrens wurden zunächst geeignete Ausgangsrohstoffe aus Reststoffströmen der Kaolinproduktion bestimmt (siehe Abbildung 1). Hierbei zeigte vor allem der Aluminium-Silikat Reststoff „Rejekt1“ einen hohen SE-Anteil mit ca. 2,5 g/kg. Durch ein neuartiges, semi-kontinuierliches Verfahren mit verdünnten Säuren konnten (siehe

Abbildung 2). 1,4-1,8 g/kg aus dem Rohstoff gelöst werden. Zusätzlich lösten sich weitere Metalle wie z. B. Aluminium, Blei, Silicium oder Eisen. Die Konzentration dieser Störmetalle wurde durch eine chemische Konditionierung mit Natronlauge (NaOH) oder Kalilauge (KOH) gesenkt, wobei vor allem die Konzentrationen von Eisen und Blei erfolgreich reduziert werden konnte. Das SE-haltige Eluat konnte anschließend

in einen mikroalgen-basierten Anreicherungsprozess überführt werden. Um geeignete Biomasse für den mikroalgen-basierten Anreicherungsprozess zu produzieren, wurde ein Screening mit 19 unterschiedlichen Grünalgen und Cyanobakterien-Stämmen durchgeführt (siehe Abbildung 3). Dabei zeigten vor allem Cyanobakterien gute Metallbindungseigenschaften mit einer Adsorptionskapazität von ca. 0,5-0,7

mmol/g. Als aussichtsreichster Stamm wurde hierbei Synechococcus elongatus ermittelt, da dieser Stamm neben guten Adsorptionseigenschaften eine besonders schnelle Wachstumsrate aufweist, was eine spätere Produktion

in industriellem Maßstab erleichtert. Relevante Parameter für den späteren Prozess (pH-Abhängigkeit, Adsorptionskinetik, Adsorptionsisotherme und Bindungsspezifität) wurden näher untersucht und beschrieben. Der ent-

wickelte Prozess wurde an Realproben getestet. Für eine rentable Anwendung des Adsorptionsverfahrens ist eine weitere Optimierung der chemischen Konditionierung sinnvoll, um SE effektiver an die Algenbiomasse zu binden.



Abbildung 1: Schematischer Aufbau des semi-kontinuierlichen Elutionsprozesses



Abbildung 2: Rührkesselreaktor der SE-Elutionsanlage mit einem Volumen von 5 Litern

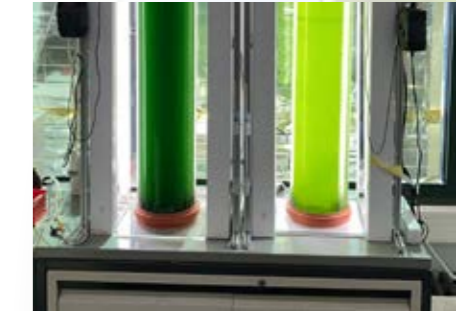


Abbildung 3: Kultivierung der Mikroalgen in Photobioreaktoren

Beitrag zur Ressourceneffizienz

Das in diesem Projekt entwickelte Verfahren soll eine Alternative zu den umweltschädlichen und energieintensiven industriellen Verfahren zur Gewinnung von SE darstellen. Die für die Gewinnung der SE eingesetzten Ausgangsrohstoffe stellen Reststoffströme aus der Kaolinproduktion dar, die normalerweise auf

Halde auf dem Werksgelände der AKW gelagert und nicht weiterverwendet werden. Während der Kultivierung der Mikroalgen kann CO₂ aus laufenden industriellen Prozessen gebunden werden. Der Einsatz verdünnter Säuren ist zu dem ressourcenschonender als konventionelle Prozesse. Durch den neu entwickelten Prozess können diese de-

ponierten Reststoffe in eine neue Wertschöpfungskette überführt werden, wodurch auch die bisher deponierten Abfallmengen zur Gewinnung der SE aufgearbeitet werden. Die Endprodukte sollen anschließend gewinnbringend weiterverwendet werden können.

Projektbeteiligte



Kontakte

Vernetzung und Bewertung innovativer Ressourceneffizienzpotenziale in der bayerischen Wirtschaft - NetCYCLE II

Prof. Dr. Mario Mocker

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik
Kaiser-Wilhelm-Ring 23, 92224 Amberg
Tel. 09621/482-3335
E-Mail m.mocker@oth-aw.de

Erhöhung der Ressourceneffizienz durch Einsatz von verwendungsortnahen 3D-Drucktechnologien - REV3D

Prof. Dr.-Ing. Oliver Kunze

Hochschule für angewandte Wissenschaften Neu-Ulm
Institute for Logistics, Risk- and Resource Management (ILR)
Wileystraße 1, 89231 Neu-Ulm
Tel. 0731/9762-1418
E-Mail: oliver.kunze@hnu.de

Prof. Dr.-Ing. Johannes Schilp

Universität Augsburg
Lehrstuhl für Ingenieurinformatik mit Schwerpunkt Produktionsinformatik
Eichleitnerstraße 30, 86159 Augsburg
Tel. 0821/598-3368
E-Mail: johannes.schilp@informatik.uni-augsburg.de

Steigerung der Ressourceneffizienz in KMU und Handwerk durch ein digitales Benchmarksystem für Abfallvermeidungs- und Abfallverwertungspotenzial - KMU DigiCheck Abfall

Prof. Reinhard Büchl

Technische Hochschule Ingolstadt
Institut für angewandte Nachhaltigkeit
Gumpfenbergstraße 7, 85057 Ingolstadt
Tel. 0841/99322300
E-Mail reinhard.buechl@thi.de

Digitale multikriterielle Materialauswahl zur optimierten Kreislauffähigkeit von Kunststoffprodukten - DIMOP

Prof. Dr. Axel Winkelmann

Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Lehrstuhl für BWL und Wirtschaftsinformatik
Josef-Stangl-Platz 2, 97070, Würzburg
Tel. 093/ 31-89640, Fax 0931/31-80680
E-Mail axel.winkelmann@uni-wuerzburg.de

Plattformtechnologie zur Verwertung chlorhaltiger Abfälle und Rückgewinnung kritischer Metalle - Chlor-Plattform

Prof. Dr. Burkhard Berninger

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden
Fakultät Maschinenbau / Umwelttechnik
Kaiser-Wilhelm-Ring 23, 92224 Amberg
Tel. 09621/482-3305, Fax 09621/482-4305
E-Mail b.berninger@oth-aw.de

Rohstoffsicherung und -erhalt durch Aufbereitung und Verwertung von Gießerei-Stäuben - Bayerisches Konsortium für Gießereistaub-Metall-Rückgewinnung - BGMR

Prof. Dr. Richard Wehrich

Universität Augsburg
Institut für Materials Resource Management
Universitätsstraße 1, 86159 Augsburg
Tel. 0821/59869131
E-Mail richard.wehrich@mrm.uni-augsburg.de

Recycling von Wärmeverbundsystemen - WDVS

Erhöhung der Nachhaltigkeit in der Behälterglasindustrie durch Vermeidung von Beschichtungen - VaporCoat

Optimierung der Holz-Beton-Verbundbauweise durch Verwendung natürlicher und ökologischer Werkstoffe - HB(Ca)V

Chemische Mobilisierung und Mikroalgen-basierte Bioadsorption von Seltenen Erden aus Kaolinit und anderen Wertstoffen - MiKa

Innovative Recyclingverfahren für Elektroschrott - IRVE

Prof. Dr. Ulrich Teipel

Technische Hochschule Nürnberg
Fakultät Verfahrenstechnik/ Mechanische Verfahrenstechnik
Wassertorstraße 10, 90489 Nürnberg
Tel. 0911/58801471, Fax 0911/58805475
E-Mail: ulrich.teipel@th-nuernberg.de

Prof. Dr.-Ing Thorsten Gerdes

Universität Bayreuth
Keylab Glastechnologie, Lehrstuhl Keramische Werkstoffe
Prof.-Rüdiger-Bormann-Str.1, 95447 Bayreuth
Tel. 0921/55-6503, Fax 0921/55-6502
E-Mail glas@uni-bayreuth.de

Prof. Dr.-Ing. Sergej Rempel

Hochschule für angewandte Wissenschaften Augsburg
Fakultät für Architektur und Bauwesen
An der Hochschule 1, 86161 Augsburg
Tel. 0821/5586-3637, Fax 0821/5586-3110
E-Mail sergej.rempel@hs-augsburg.de

Prof. Dr. Thomas Brück

Werner Siemens-Lehrstuhl für Synthetische Biotechnologie
Technische Universität München
Fakultät der Chemie
Lichtenbergstraße 4, 85748 Garching
Tel.: 089/289-1325
Fax: 089/289-13255
E-Mail: brueck@tum.de

Prof. Dr. Tom Nilges

Fachgebiet Synthese und Charakterisierung Innovativer Materialien
Technische Universität München
Lichtenbergstraße 4, 85748 Garching
Tel.: 089/289-13110
Fax: 089/289-13762
E-Mail: tom.nilges@tum.de

Prof. Dr. Ulrich Bochtler

Technische Hochschule Aschaffenburg
Fakultät Ingenieurwissenschaften
Würzburger Straße 45, 63743 Aschaffenburg
Tel. 06021/4206816, Fax 06021/4206801
E-Mail ulrich.bochtler@th-ab.de

Bildnachweise

Bildarchiv /Bildquelle: Envato Elements Pty Ltd, Urheberbezeichnungen zu den unter Envato Elements-Lizenz (<https://elements.envato.com/de/license-terms>) erworbenen und verwendeten digitalen Assets:

Seite 01: infrastructure-background

Seite 04: max-joseph-platz-with-bavarian-state-opera-munic

Seite 05: texture-solar-panels-generate-power-energy

Seite 09: renewable-resources

Seite 10: 3d-printing-machine-operation-in-the-laboratory

Seite 13: paper-waste-background-many-keeping-records-in-he

Seite 15: close-up-of-male-hand-holding-plastic-polymer-gran

Seite 16: close-up-electronic-circuit-board-with-micro-chips

Seite 17: close-up-of-colored-micro-circuit-board

Seite 18: science-chemistry-technology-biology-and-people

Seite 19: complex-machines

Seite 21: workers-pouring-molten-metal-into-moulds-from-flas

Seite 22: house-wool-insulation

Seite 24: bottling-plant

Seite 27: construction-worker-pouring-cement-on-stairs-crea

Seite 28: algae-seaweed-in-science-experiments-laboratory-r

Seite 29: algae-seaweed-research-biofuel-industry-science

Seite 34: infrastructure-background

Abbildungen wurden intern von den einzelnen Projektpartnern erstellt bzw. aus den Projektfilmen entnommen.

Quellenanmerkungen

[1] Wohlers, T. (2017): 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report Wohlers. The Middle East, and Other Countries.

[2] PwC Strategy& (Germany) GmbH (Hg.) (2018): Marktvolumen für gedruckte Produkte steigt bis 2030 auf 22,6 Milliarden Euro. Online verfügbar unter <https://www.strategyand.pwc.com/de/de/presse/3d-druck.html>, zuletzt aktualisiert am 03.06.2022, zuletzt geprüft am 03.06.2022.

[3] Gebler, Malte; Schoot Uiterkamp, Anton J.M.; Visser, Cindy (2014): A global sustainability perspective on 3D printing technologies. In: Energy Policy 74, S. 158-167. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.08.033.

Impressum

Prof. Dr. Mario Mocker

Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden

Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik

Kaiser-Wilhelm-Ring 23, 92224 Amberg

Tel. 09621 482-3335, Fax 09621 482-4335

E-Mail m.mocker@oth-aw.de

www.forcycle.de

Redaktion: Prof. Dr. Mario Mocker, Markus Bär

Gestaltung: Tobias Schwarz

Druck: StMUV, gedruckt auf 100 % Recyclingpapier

Finanziert durch

Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz

Rosenkavalierplatz 2, 81925 München

Amberg, 2022

WEITERE INFORMATIONEN ZUR RESSOURCENEFFIZIENZ UNTER
WWW.STMUV.BAYERN.DE
WWW.REZ.BAYERN.DE

MEHR ZUM PROJEKTVERBUND UNTER
WWW.FORCYCLE.DE

