



Circular Economy: Vom Material zum Wertstoff

Positionen und Perspektiven

Inhalt

Einleitung	4
Materialien für die Kreislaufwirtschaft	6
Monomaterialien	6
- Metallische Werkstoffe	6
- Kunststoffe	8
- Klebstoffe und Klebtechnik	10
- Keramik	11
- Glas	12
- Holz und Papier	13
Multimaterialsysteme	14
- Permanentmagnete	14
- Batteriematerialien	14
- Materialien für Windenergiesysteme	16
- Mehrschichtverpackungen	17
- Materialien in der Bauwirtschaft	18
Positionen und Empfehlungen	20
Quellen	22
Impressum	22
Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile - Materials	24

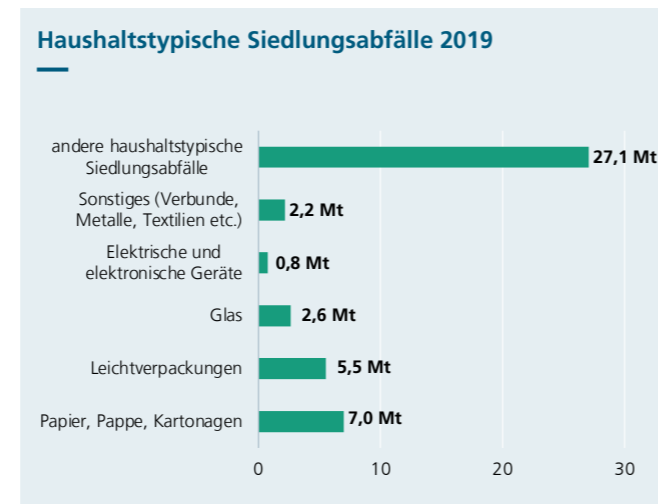
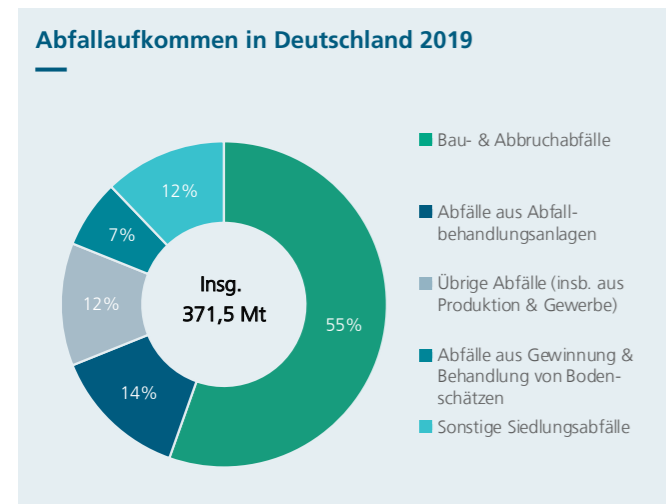
Einleitung

Angesichts des Klimawandels, einer wachsenden Weltbevölkerung, veränderter geopolitischer Rahmenbedingungen und grundsätzlich begrenzter Ressourcen kommt der sparsamen, effizienten Nutzung von Rohstoffen und insbesondere der Wiederverwendung und Verwertung von Produkten und Materialien eine immer größere Bedeutung zu. Um den Übergang zu einer effizienten, ressourcen- und klimaschonenden Kreislaufwirtschaft beschleunigt vollziehen zu können, müssen neben den politischen und rechtlichen Rahmenbedingungen auch die technischen und ökonomischen Lösungen sowie entsprechende Infrastrukturen geschaffen werden.

Die Entwicklung des Menschen ist eng an die Nutzung natürlicher Ressourcen gekoppelt. Bisher ging der Bevölkerungswachstum mit einer immer stärkeren Ressourcennutzung einher. Dem gegenüber stehen die Endlichkeit bzw. das begrenzte Wachstum der Ressourcen der Erde. In den vergangenen Jahrzehnten wandelte sich das Wirtschaftssystem in Deutschland und der EU von einer »Trade-make-dispose«-Wirtschaftsweise allmählich zu einer »Recycling Economy«, in der einige Materialien aus verschiedensten Produktzweigen in sehr unterschiedlichem Umfang aufbereitet und wiederverwendet wurden. Frühe Beispiele sind Pfandflaschen und Altmetallsammlungen. Das Zielbild bei konsequenter Weiterentwicklung des Recycling-Prinzips ist die Kreislaufwirtschaft (»Circular Economy«). Die Beschreibung der Circular Economy setzt sich dabei gemäß Cramer [1] aus zehn so genannten »R-Strategien« zusammen, die sich in drei große Kategorien einteilen lassen:

- I) Smartere Produktnutzung durch refuse (R0), rethink (R1) und reduce (R2)
- II) Verlängerte Nutzungsdauer für Produkte bzw. Produktkomponenten durch reuse (R3), repair (R4), refurbish (R5), remanufacture (R6) und repurpose (R7)
- III) Nützliche Verwendung von Materialien durch recycle (R8) und recovery (R9)

In einer Circular Economy nach Korhonen et al. [2] erfolgen Produktion und Verbrauch in geschlossenen Stoffkreisläufen und die dabei benötigte Energie ist erneuerbar. Die Bestandteile eines Produkts werden bei dessen Nutzungsende erneut als (Sekundär)Ressource genutzt und es entstehen im Idealfall keine zu deponierenden Abfälle. Vollständig geschlossene



Kreisläufe würden den Abbau von Primärrohstoffen weitgehend entbehrlich machen und somit Versorgungsrisiken minimieren. Nach diesem Ansatz beinhaltet und bedingt die Circular Economy eine systemische Betrachtung, inklusive aller Wechselwirkungen innerhalb des jeweiligen Systems [3]. Um diesem Ideal möglichst nahe zu kommen, bedarf es einer Kombination von Konzepten, die an verschiedenen Stellen des Produktlebenszyklus ansetzen:

Vor der Nutzung:

- Vermeidung: Reduktion von Abfällen durch reduzierten Konsum (Suffizienz- und »Sharing Economy«-Ansätze)
- Reduktion: Erreichen der erwünschten Funktionalität eines Produkts mit möglichst wenig Materialeinsatz (z. B. durch smarte Leichtbaukonzepte)
- Design for Recycling: Entwurf von Produkten unter Sicherstellung ihrer Kreislauffähigkeit
- Substitution: Einsatz nicht kritischer Rohstoffe, ggf. auch biogener und biologisch abbaubarer sowie nachwachsender Rohstoffe

Während der Nutzung:

- Regeneration/Selbtheilung: Nutzung von Werkstoffen, in denen Prozesse ausgelöst werden können, die einer Degradation entgegenwirken
- Condition Health Monitoring: Bessere Vorhersagbarkeit des gebrauchtsabhängigen End-of-Life

Nach dem Ende der Nutzungsdauer:

- Reuse: Wiederverwendung von intakten Komponenten oder ganzen Produkten, ggfs. in anderem Anwendungskontext
- Repair/Refurbish/Remanufacture: Aufarbeitung und Funktionsertüchtigung von Produkten oder Produktkomponenten
- Recycle: Stoffliche Verwertung einzelner Bestandteile eines Produkts

Das Konzept der Circular Economy beinhaltet somit weit mehr als Recycling. Es beginnt technologisch bereits beim Produktdesign, welches von Anfang an Reparatur, Auswechseln hochbeanspruchter Teile, Wieder- und Weiterverwendung sowie Zerlegung und Aufbereitung am Ende der Lebensdauer mitberücksichtigt.

Der Materials Data Space®

Ein konsequentes, auf eine zirkuläre Wertschöpfung ausgerichtetes Produktdesign beschränkt sich auf möglichst homogene Strukturen und die Verwendung einiger weniger, gut rezyklierbarer Materialien. Der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile - MATERIALS hat das Konzept des »Materials Data Space®« als Grundlage für die Werkstoffentwicklung, -herstellung und -verarbeitung entwickelt. Ein »Materials Data Space®« soll die Durchgängigkeit von Material und Werkstoffdaten über Prozessketten hinweg gewährleisten. Er eröffnet damit neue Handlungsräume für materialintensive Innovationen und unterstützt deren nachhaltige Produktion.

Kreislauffähige Produktion setzt die Zusammenarbeit von Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette und den transparenten Austausch von Daten und Spezifikationen voraus. Mit einem Produktpass, in dem alle für den Kreislaufprozess wichtigen Informationen hinterlegt sind (inklusive der in dem Produkt enthaltenen Materialien) und einer »Lebensdauerakte«, welche die Nutzungsdaten über Einsatz und Beanspruchung während des Betriebs speichert, lassen sich geeignete Verwertungsmöglichkeiten einer Komponente am Ende ihrer Erstnutzung frühzeitig ermitteln und



planen. Ist eine Reparatur oder Wiederverwendung nicht mehr möglich, bedarf es geeigneter Trenn- und Aufarbeitungsmethoden. Auch sie werden bei der Produktentwicklung und idealerweise bereits bei der Werkstoffherstellung mitgedacht.

Eine umfassende Kreislaufführung von Ressourcen steht und fällt logistisch aber auch mit dem Rücklauf ausgedienter Produkte. Digitale Informationssysteme können die Erfassung von Abfällen und die Automatisierung der Entsorgungslogistik unterstützen. Auch die Entwicklung von dezentralen, flexiblen Trenn- und Sortierverfahren kann sinnvoll sein, insbesondere dort, wo lokal große Materialströme zu bewältigen sind (z. B. bei der Bauschutttaufbereitung).

Materialien für die Kreislaufwirtschaft

Das Ziel der Kreislaufwirtschaft ist eine effiziente und nachhaltige Verwendung von Rohstoffen durch Weiter- und Wiederverwertung von Produkten, Komponenten und Materialien und die Vermeidung von Abfällen. Dabei müssen Aufbereitungsverfahren auf die zurückzugewinnenden Materialien zugeschnitten sein. Besondere Herausforderungen ergeben sich, wenn es um die Wiederverwertung von Materialverbunden und komplexen Komponenten bzw. Bauteilen geht.

Monomaterialien

Der aktuelle Stand aber auch die künftigen die Möglichkeiten und Herausforderungen für eine effizientere und nachhaltigere Aufbereitung und Wiederverwertung ausgewählter Materialien und Werkstoffklassen werden im Folgenden exemplarisch für Metalle, Kunststoffe, Klebstoffe, Keramik, Glas sowie für Holz und Papier erläutert.

Metallische Werkstoffe

Kreislaufwirtschaft ist für Metalle ein etablierter Prozess. So wird Stahl mit Blick auf die für diese Werkstoffgruppe etablierten Verfahren als »Enabler der Kreislaufwirtschaft« bezeichnet [6]. In Europa werden z. B. 84 Prozent der Stahlverpackungen recycelt. Nach einer Fraunhofer-Studie im Auftrag der Wirtschaftsvereinigung Stahl [7] wurden dadurch bereits 117 kg CO₂-Emissionen je Einwohner und Jahr eingespart (Stand 2019). Ein wesentlicher Beitrag für den Klimaschutz wird durch die deutlich reduzierten Energiebedarfe bei den metallischen Werkstoffkreisläufen geleistet. Für recyceltes Sekundäraluminium wurde zum Beispiel ein Energieeinsparpotential von 90 Prozent der Energie gegenüber Primäraluminium ermittelt [8]. Für Kupfer wird bei Sekundärmaterial eine Energieeinsparung von 80 Prozent erreicht. Bilanziert man nicht nur die Energie, sondern auch Aspekte der Erzgewinnung wie Landverbrauch und Wassernutzung, so steigert sich der Nachhaltigkeitseffekt bei metallischem Sekundärmaterial noch weiter.

Allerdings sind die verschiedenen Metalle für eine optimale Wiederverwertung möglichst sauber zu trennen, um eine entsprechende Reinheit des Sekundärmaterials zu gewährleisten

[9]. Die Trennung wird durch entsprechende Sortierung gewährleistet und ist insbesondere für Stahl, Aluminium und Kupfer etabliert. Innerhalb der jeweiligen Metalle existiert aber eine Bandbreite von Varianten, sogenannte Fraktionen. Die Verfeinerung der Sortierprozesse auch in solche Fraktionen verbessert die Kreislauffähigkeit weiter, indem entsprechend optimierte Prozesse appliziert werden.

Metallische Werkstoffe können nicht nur stofflich als Sekundärmaterial im Kreislauf geführt werden, auch das Potential der direkten Wiederverwertung von Komponenten oder Produktionsresten, z. B. aus Stanzabfällen der Stahlkarosseriefertigung, als Halbzeuge neuer Bauteile ist noch weitgehend unerschlossen. So bieten großflächige Fahrzeugbauteile die Möglichkeit, neue Blechteile zu fertigen. Es erfordert allerdings valide Informationen über den Zustand dieses »Halbzeugs«, um eine solche Weiternutzung bewertbar zu machen. Dies ist ein Beispiel von vielen, das verdeutlicht, wie die konsequente Digitalisierung der Werkstoffe über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg die Kreislaufwirtschaft befördern kann.

Schwieriger scheint es aktuell noch, hohe Recyclingquoten auch bei Edelmetallen zu erreichen [10]. So weist der SRSrocco Report darauf hin, dass 87 Prozent des Silberbedarfs nicht aus Sekundärmaterial gedeckt werden konnten (Stand 2015). Allerdings zeigen sich hier inzwischen positive Tendenzen. So hat sich etwa im Juni 2020 der weltgrößte Schmuckhersteller "Pandora" darauf festgelegt, nur noch recyceltes Silber zu nutzen und dies bis 2025 auch bei den Zulieferern umzusetzen [11]. Damit will das Unternehmen im Vergleich zum Einsatz von Primärmaterial rund 66 Prozent Treibhausgase einsparen.

Eine wichtige Quelle für Edelmetalle stellt WEEE (Waste of Electric and Electronic Equipment) dar [12]. So enthält eine Tonne Handyschrott 240 Gramm Gold und 2,5 Kilogramm Silber. Allerdings werden von rund 4 Millionen jährlich in Deutschland verkauften Handys nur 5 Prozent dem Recycling zugeführt [13]. Das könnte durch geeignete Anreizkonzepte deutlich gesteigert werden. Aber auch die Prozesse der Rückgewinnung bieten bei WEEE noch Optimierungspotential

bezüglich ihrer Umweltfreundlichkeit und bezüglich der Rückgewinnung gerade wertvoller kleiner Mengen aus dem WEEE, z. B. von Seltenerdmetallen wie Germanium oder Tantal [14]. Um Kleinstmengen aus dem WEEE zurückzugewinnen, sind neue Wege zu beschreiten, wie die Adaption der Phagen-Display Methode.

Im Bereich der Metalle setzt die Kreislaufwirtschaft vielversprechende Zeichen hinsichtlich Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit. Aber auch bei Metallen gibt es noch Ausbaupotenzial, indem die Stoffströme entsprechend optimiert werden. Wichtige Aspekte sind dabei optimierte Sortier- und Aufbereitungsprozesse mit minimierten Materialverlusten und Energiebedarfen [15]. Metalle sind bei entsprechenden Stoffströmen fast unendlich kreislauffähig mit gleichzeitig enormem Nachhaltigkeitspotential durch reduzierten Ressourcenbedarf in der Wiederverwertung und durch die besonderen werkstofflichen Möglichkeiten von Leitfähigkeit, Fertigungsmöglichkeiten bis zur mechanischen Belastbarkeit und Reparierbarkeit in der Nutzungsphase.



Sekundärrohstoffe effizienter nutzen: Die Rückgewinnung von Altmetallen spart Ressourcen. Bild von recxclind auf pixabay.



Materialien müssen so lange wie möglich im Kreislauf gehalten werden, damit aus alten Produkten immer wieder neue, gegebenenfalls auch ganz andere werden können «

Kunststoffe

Gebrauchte Kunststoffteile können selten direkt wiederverwendet werden, da Umwelteinflüsse die Oberflächen schädigen und die Teile altern lassen. Dafür bieten Kunststoffe aber gleich mehrere Recyclingwege für eine Verwertung. Diese reichen vom werkstofflichen Recycling durch thermische Verarbeitungsprozesse, über das chemische Recycling, d. h. die Rückgewinnung der Ausgangsstoffe durch Pyrolyse und Gasifizierungsverfahren, bis hin zum energetischen Recycling, bei dem der Energieinhalt der Kunststoffe durch Verbrennung genutzt wird. Aus ökologischer Sicht, d. h. hinsichtlich Energieverbrauch und CO₂-Emission, schneidet das werkstoffliche Recycling am besten ab, sofern der Aufwand für Sortierung und Aufreinigung der Altkunststoffe angemessen ist. Um ein möglichst hochwertiges Rezyklat zu erhalten, das Neuwere ersetzen kann, ist es erforderlich, geeignete Sortier- und Aufbereitungsverfahren einzusetzen. Diese müssen unerwünschte Kontaminationen entfernen (z. B. durch lösungsmittelbasierte Reinigungsverfahren), eine schonende Verarbeitung ermöglichen und Vorschädigungen der Rezyklate auf molekularer Ebene (z. B. durch maßgeschneiderte Additive) kompensieren.

Hinter dem pauschalen Begriff »Kunststoff« verbirgt sich jedoch eine Vielzahl unterschiedlicher chemischer Strukturen und Zusammensetzungen, die auf die jeweiligen Anwendungen und Verarbeitungsprozesse im Verpackungs-, Transport-, Bau-, Medizin- oder Elektronikbereich funktionspezifisch angepasst sind. Es gibt sogar eine Reihe mineralisch gefüllter oder mit Glas- bzw. Carbonfasern verstärkter Kunststofftypen.

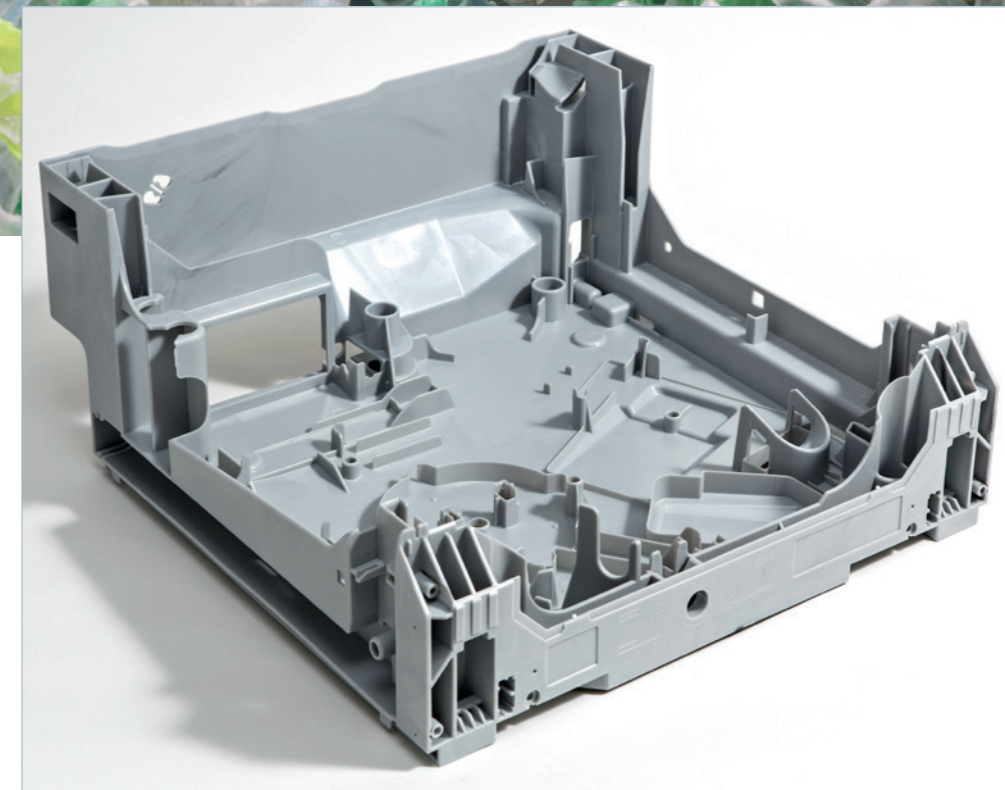
Mit Blick auf die Herstellung hochwertiger werkstofflicher Rezyklate ergeben sich Herausforderungen: Z. B. sind Duromere und Elastomere aufgrund ihrer Netzstrukturen nicht durch Umschmelzen verarbeitbar. Damit ist ein hochwertiges werkstoffliches Recycling ausgeschlossen (die Materialien werden

»nur noch« als Füllstoffe in der Bauindustrie verwertet). Für diese Polymerklassen besteht also ein Bedarf an alternativen, recyclingfähigen Materialien. Ebenso sind Verbundmaterialien, wie z. B. Verbundfolien, die häufig in Lebensmittelverpackungen eingesetzt werden, für ein werkstoffliches Recycling ungeeignet, da sie Alterungs- und Degradationsprozessen unterliegen und ihre Eigenschaften im Recyclingprozess nur unzureichend erhalten bleiben. Hier kann, neben der forcierten Nutzung von alternativen Monomaterialien, der Zusatz von Verträglichkeitsvermittlern im Recyclingprozess Abhilfe schaffen.

Wird eine direkte Wiederverwendung von gebrauchten Kunststoffteilen angestrebt, sind beispielsweise selbstheilende Strukturen oder die Verbesserung der Oberflächengüte, z. B. durch eine gesteigerte Kratzfestigkeit, mögliche Ansätze.



Rezyklate für nachhaltige Strukturbauteile in Hausgeräten.
© Fraunhofer LBF



Basisträger einer Geschirrspülmaschine aus rezykliertem Kunststoff © Fraunhofer LBF

Klebstoffe und Klebtechnik

Die Bedeutung der Klebtechnik basiert auf ihrer Fähigkeit, unterschiedlichste Werkstoffkombinationen langzeitbeständig und sicher zu verbinden. So ermöglicht die Klebtechnik bereits heute umweltfreundlichere und ressourceneffizientere Produkte und Anwendungen in vielen Bereichen. Beispielsweise ist die Erschließung alternativer Energiequellen ohne das Kleben (z. B. Fügen von Rotorblättern bei Windenergieanlagen) genauso wenig denkbar wie die Elektromobilität (z. B. Abdichten von Batteriezellen). Ferner können Klebstoffe zu erheblichen Materialeinsparungen gegenüber anderen Verbindungstechniken und damit zum Leichtbau beitragen.

Vor dem Hintergrund der angestrebten Kreislaufwirtschaft muss die Entwicklung geklebter Produkte im Sinne einer kontrollierten Langlebigkeit erfolgen. Diese verknüpft die Produktintegrität während der Nutzung mit der gezielten Werkstofftrennung im Rahmen des Recyclings. Eine gezielte Werkstofftrennung ist Voraussetzung für das in der Kreislaufwirtschaft verankerte werkstoffliche Recycling. Darüber hinaus ist sie für die Reparatur notwendig und dient damit der Erhöhung der Nutzungsdauer.

Die Demontage geklebter Produkte kann über die adhäsive oder kohäsive Beeinflussung einer Klebefuge erfolgen. Da nach dem derzeitigen Stand der Technik insbesondere bei sicherheitsrelevanten Klebungen die Beeinflussung der Adhäsion noch erhebliche Forschung erfordert, wird gegenwärtig die kohäsionsbezogene Beeinflussung vorgezogen. Kohäsive Demontagestrategien mittels Erwärmung und mechanischer Überbelastung sind besonders zielgerichtet.

Bei chemisch härtenden Klebstoffen kann das Erweichen der polymeren Klebschicht auch durch Quellung erreicht werden. Eine andere Möglichkeit ist der Abbau (Degradation) des Polymernetzwerks. Dem Nutzer des geklebten Produkts sowie dem Recycler muss die herstellerseitig vorgegebene Demontageoption bekannt sein, das gilt entsprechend auch für Reparaturprozesse. Industriell umsetzbare Demontageprozesse für



Biobasierte Polymere für Klebstoffe und Harzsysteme.
© Fraunhofer IFAM

geklebte Produkte zur Rohstoffrückgewinnung oder Reparatur werden zukünftig wesentliche Schwerpunkte des Entwicklungsprozesses und der Produkterprobung sein.

Auch der Klebstoff selbst kann entsprechend den Erfordernissen einer Kreislaufwirtschaft entwickelt werden. So sind Rezyklate oft geeignete Ausgangsstoffe für Klebstoffe. Zudem werden bereits heute vereinzelt biobasierte Klebstoffe sowie biologisch abbaubarer Klebstoffe eingesetzt. Die Entwicklung nachwachsender Rohstoffe für eine breite Nutzung in Klebstoffen befindet sich zwar auf einem guten Weg, bedarf jedoch noch weiterer Forschung, um die Qualitätseigenschaften vollsynthetischer Klebstoffe zu erreichen. Die Gewinnung alternativer Bausteine unter Verwendung von CO₂ sowie aus dem chemischen Recycling ist ebenfalls denkbar.



Nachhaltige Klebtechnik verknüpft Produktintegrität während der Nutzung mit einer gezielten Werkstofftrennung im Rahmen des Recyclings «

Keramik

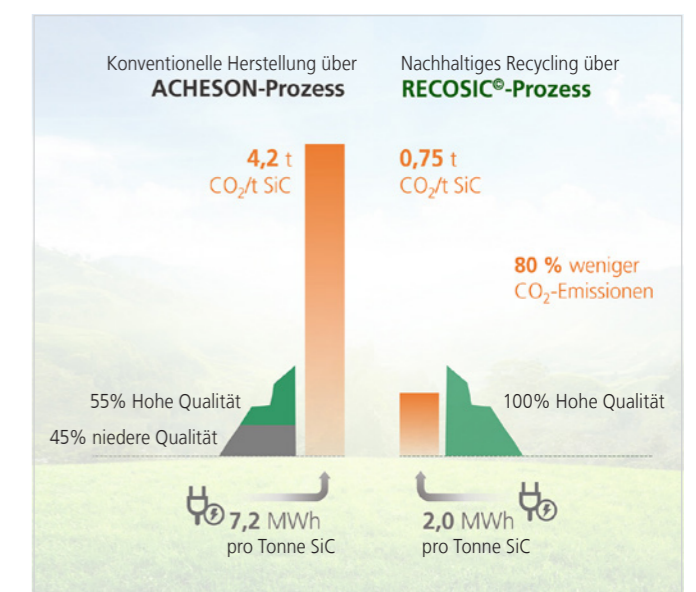
Unter »Keramik« wird eine extrem große Bandbreite an anorganisch-nichtmetallischen Werkstoffen zusammengefasst. Darunter fallen mengenmäßig in großem Umfang hergestellte Materialien der Gebrauchskeramik (Geschirr, Sanitärkeramik, Fliesen), der Feuerfestkeramik (z. B. Auskleidung von Öfen, Metallurgie), Baustoffe (Ziegel) sowie bestimmte Erzeugnisse der technischen Keramik (z. B. Isolatoren, Brennhilfsmittel). Dem gegenüber stehen sehr wertintensive, aber in geringen Tonnagen hergestellte Spezialkeramiken bis hin zu Miniaturbauteile in der Elektronik/Elektrotechnik.

Da Keramiken zur Stoffbildung einer Wärmebehandlung >800°C unterzogen werden, besteht ein wesentlicher Ressourcenverbrauch im Energieeinsatz bei deren Herstellung. Bezüglich des Rohstoffverbrauchs werden Gebrauchskeramiken i. d. R. aus natürlich vorkommenden Rohstoffen hergestellt, während viele technische Keramiken aus synthetisch erzeugten Rohstoffen hergestellt werden, die einen wesentlich höheren Energie- und Materialverbrauch benötigen als die eigentliche Keramikherstellung.

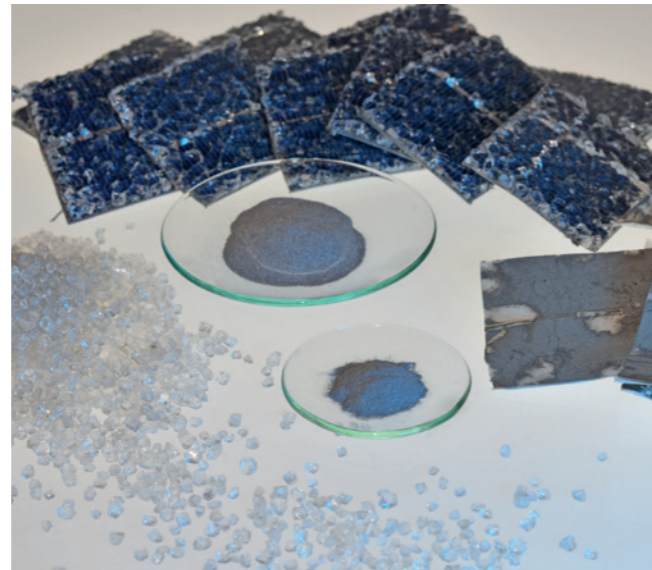
Ein direktes Recycling der meisten Keramikbauteile nach deren Lebensende ist aufgrund der Werkstoffbreite, der keramikspezifischen Eigenschaften und der Versagensmechanismen nicht möglich. Durch die erhebliche irreversible stoffliche Veränderung im Brennprozess können die Rohstoffe nur in sehr seltenen Fällen wieder aus Abfallprodukten rückgewonnen werden. Für manche Erzeugnisse ist ein Downcycling möglich, d. h. aus den Abfällen hochwertiger Erzeugnisse lassen sich minderwertigere Keramikprodukte herstellen (z. B. Zuschlagstoffe in Ziegeln, Recycling-Fliesen für Outdooranwendungen, Recycling-Körnungen aus Feuerfest-Abbruch). Allerdings steht selbst bei solchen Anwendungen die geringe Werthaltigkeit solcher Produkte oft dem hohen Aufwand der Erfassungslogistik und Rückgewinnung entgegen. Häufig ist die Entsorgung der einfachen und kostengünstigeren Weg, zumal die meisten Keramiken sehr inert sind und diesbezüglich keine Umweltprobleme bei der Deponierung verursachen. Gebrauchskeramik wird zur Zeit überwiegend über den Hausmüll oder im Bauschutt entsorgt.

Gegenwärtig wird bei vielen Keramikherstellern eine Wiederverwendung bzw. Rückschleusung von denjenigen Rohstoffen und Halbzeugen praktiziert, die im Fertigungsprozess vor dem Brennprozess anfallen. In einigen Fällen ist auch die stoffliche Verwertung von Brenngut als Zuschlagstoff möglich. Produktionsauschuss kann z. T. noch in Nebenanwendungen genutzt werden (z. B. Schmelzenfilterbruch als Aquarienfilter) bzw. als Rohstoff für andere Produkte aufbereitet werden. Das ist unter Umständen lohnend, weil hier lokal am Produktionsort größere Mengen eines homogenen Materials anfallen. Dagegen ist beim Anwender in den überwiegenden Fällen keine Erfassungslogistik von Keramikbauteilen mehr möglich bzw. wirtschaftlich nicht vertretbar.

Bei einigen sehr werthaltigen technischen Keramiken, die in der Herstellung keine starke stoffliche Umwandlung erfahren, wie z. B. 99 prozentiges Aluminiumoxid oder einige Siliciumcarbidwerkstoffe, könnte eine stoffliche Wiederverwendung möglich sein. Dies gilt allerdings nur, wenn eine Sortierung, Erfassung, Aufbereitung und Rückführung als Rohstoff gelingt, was nur bei wenigen, massenhaft angewandten Produkten und geringer Anwendungsdiversifizierung möglich sein wird. Ein gutes Beispiel würden Dieselpartikelfilter aus Siliciumcarbid darstellen: Seit deren Einführung in den 2000er Jahren wurden bis zu 14 Millionen Stück jährlich in Westeuropa produziert und eingesetzt, was ungefähr 30.000 Tonnen SiC/a entspricht. Die besondere Werthaltigkeit ergibt sich allerdings erst durch deren Edelmetallbeschichtung, wofür sich inzwischen eine Regenerationsindustrie und Erfassungslogistik etabliert hat. Der Gebrauchsverlust des Filters ergibt sich zunächst durch ein Zusetzen mit Asche, so dass nach deren Beseitigung der Filter wieder funktionstüchtig wird. Am Ende des Fahrzeuglebens werden Filter und Katalysatoren dann gesammelt und dem Edelmetallrecycling zugeführt. Bei den gegenwärtigen Prozessen der Edelmetallrückgewinnung wird allerdings das Siliciumcarbid nur als Begleitstoff gesehen und stofflich zerstört. Eine Wiederverwendung als Rohstoff würde eine Änderung des Edelmetallrecycling-Prozesses erfordern, was zwar technisch möglich ist, aber gegenwärtig nicht praktiziert wird.



CO₂-armes Recycling von Siliciumcarbid im RECOSIC®-Verfahren – entwickelt vom Fraunhofer IKTS und der ESK-SiC GmbH – im Vergleich zum energieintensiven ACHESON-Prozess © Fraunhofer IKTS



PV-Modul Recycling – intelligente Zerlegung und Trenntechnik für eine effizientere Wiederverwertung von eisenarmem Solarglas und funktionellen Komponenten. © K. Selsam, Fraunhofer ISC (Bild links: David Cristian, unsplash)

Glas

Das Recycling von Gläsern gilt als Musterbeispiel für effiziente Wiederverwertung von Ausgangsmaterialien und Energiekostenersparnis. Tatsächlich trifft dies auf den Großteil der Glasprodukte zu. Die Tatsache, dass Glas beliebig oft aufgeschmolzen werden kann und die Verwendung von Glasscherben an Stelle kristalliner Rohstoffe geringere Prozesstemperaturen benötigt, spart neben Rohstoffen auch Energie und Zeit. Überschlägig sinkt der Energiebedarf bei der Glasherstellung pro Prozent zugesetzter Glasscherben um 0,2 – 0,3 Prozent.

Im Mittel werden in der Glasproduktion ca. 65 Prozent Scherben eingesetzt, also Altglas wiederverwendet. Allerdings sind die Recyclingquoten der einzelnen Glastypeen sehr unterschiedlich. 2019 wurden in Deutschland rund 7,38 Millionen Tonnen Glas hergestellt. Aus 4,13 Millionen Tonnen davon wurde Behälterglas gefertigt, aus 2,01 Millionen Tonnen Flachglas und aus rund 276.737 Tonnen entstanden technische und optische Spezialgläser für Haushalte, Forschung und Wirtschaft. Zusätzlich wurde rund 1 Millionen Tonnen Glas- und Steinwolle für den Einsatz als Dämmmaterial hergestellt (Daten des Umweltbundesamts).

Mit dem traditionellen Sammeln in Glascontainern und einer modernen Altglasaufbereitung können mehr als 85 Prozent des Behälterglases zurückgewonnen und erneut zur Herstellung von Behälterglas und Glaswolle eingesetzt werden. In der Flachglasproduktion ist die Recyclingrate deutlich niedriger, da hier die optischen Qualitätsansprüche sehr viel höher sind. Inhomogenitäten oder Farbeffekte durch Fremdstoffe

oder färbende Glasbestandteile müssen hier ausgeschlossen werden, so dass nur sortenreine Glasscherben aus weiterverarbeitenden Betrieben und Eigenschmelzen eingesetzt werden können.

Der Großteil an Fenster- und Fassaden- sowie an Automobilglas wird aktuell als Bergversatz (Material zum Verfüllen unterirdischer Hohlräume) oder im Deponiebau beseitigt. Durch eine verbesserte Abtrennung von Fremdstoffen, Beschichtungen u. ä. sowie eine Abreicherung störender farbgebender Elemente, z. B. durch elektrochemische Abtrennung von Eisen direkt aus der Glasmelze, könnte der Recyclinganteil signifikant erhöht werden.

Bei technischen und optischen Spezialgläsern sind die Glaszusammensetzungen zu unterschiedlich und die Mengen der einzelnen Glaszusammensetzungen zu gering, als dass ein wirtschaftliches Recycling heute technisch möglich wäre. Eine Ausnahme könnten hier jedoch die Kochfeldplatten aus Lithium-Aluminium-Silicat-Glaskeramiken darstellen, deren Sammlung über die Entsorgung von Herden gewährleistet wäre. Allerdings ist die Ausgangszusammensetzung der Schmelze bei der Herstellung neuer Kochfelder eine sehr sensible Größe, da hier eine thermisch induzierte, partielle Kristallisation des Glases erfolgt. Eine ungeeignete Größe und Menge an Kristallen könnten die optischen Eigenschaften und die technisch notwendige geringe Wärmeausdehnung der Glaskeramik stören.

Holz und Papier

In Deutschland fallen jedes Jahr ca. 8 Millionen Tonnen Altholz und 15 Millionen Tonnen Altpapier an. Während die Recyclingquote von Altpapier bereits heute bei 78 Prozent liegt [16], beträgt sie bei Altholz, das fast ausschließlich in der Spanplattenindustrie verwendet wird, derzeit nur ca. 25 Prozent.

Obwohl es sich bei Holz um einen nachwachsenden Rohstoff handelt, sollte es über den ersten Produktlebenszyklus hinaus in nachhaltigen und ressourcenschonenden Anwendungen im Stoffkreislauf bleiben und für die Wertschöpfung so häufig wie möglich genutzt werden. Hierdurch werden Abfälle und Emissionen vermieden, der Ressourcenverbrauch wird verringert und gleichzeitig werden ökonomische Potenziale genutzt.

Die damit einhergehende positive Klimawirkung bei der Verwendung von Holz und Papier in Produkten wird durch die Speicherwirkung des während des Baumwachstums im Holz gebundenen Kohlenstoffs erzielt. Substitutionseffekte stellen sich darüber hinaus ein, wenn Holz sowie dessen Bestandteile und Papier herkömmliche Rohstoffe und Materialien, die mit einem höheren Energieaufwand hergestellt werden, in funktionsgleichen Produktsystemen (stoffliche Substitution) ersetzen oder letztlich als Energieträger fossile Ressourcen (energetische Substitution) ersetzen.

In diesem Sinne kommt auch der Sekundärrohstoffwirtschaft und hierbei i. B. der Sortierung und Aufbereitung von Altholz und Altpapier eine zentrale Rolle zu, um das stofflich nutzbare Potenzial des Rohstoffs Holz zu erweitern und belastete Fraktionen sicher daraus zu entfernen.

Die Herstellungs- und Aufarbeitungstechnologien zur Papier- und Holzfaserverbleiche sowie die Abwasserbehandlung müssen optimiert werden. Dabei ist auch die Aufhellung der in der Papier- und Holzwirtschaft unerwünschten dunkelbraunen Lignin Farbstoffe anzustreben.

Ansatzpunkte, um Holz möglichst lange im Stoffkreislauf zu halten und für die Wertschöpfung so häufig wie möglich nutzbar zu machen sind:

- Innovative Produktideen aus der Bioökonomie sollten stärker genutzt, aber auch stärker gefördert werden, z. B. der Einsatz von Holz als Plastikersatz oder die Nutzung bei der Herstellung von Plattformchemikalien.
- Bei der Produktentwicklung müssen die Verlängerung der Lebensdauer, ein auf die zirkuläre Wertschöpfung ausgerichtetes Design (Design for Reuse and Recycling), eine einfache Reparierbarkeit der Holzprodukte und ein verbesserter konstruktiver Holzschutz in den Fokus gerückt werden.
- Am Ende eines Produktlebenszyklus sollten auch für Holz Wiederverwendung und Recycling an erster Stelle stehen. Die sichere Aufbereitung von Abbruchholz (Urban Mining, selektiver Rückbau) oder Sperrmüll kann hochwertig verwertbare Holzsortimente generieren. Papierprodukte sind nach ihrem Gebrauch dem Altpapierkreislauf zuzuführen, so dass daraus neue Papierprodukte hergestellt werden können.



Altholz der Kategorie A II und A III, das zum Teil auch noch zur Herstellung von Holzwerkstoffen geeignet ist. © Fraunhofer WKI, Meinschmidt

Multimaterialsysteme

Am Beispiel der für die Energie- und Mobilitätswende wichtigen Magnet- und Batteriematerialien wird im Folgenden die Verwertungsthematik von Funktionsmaterialien adressiert.

Für Verbund- bzw. Hybridmaterialien werden die Herausforderungen des Recyclings exemplarisch an den komplexen Materialzusammensetzungen von Rotorblättern, modernen Verpackungen und Bauschutt beschrieben.

Permanentmagnete

Seltenerdhaltige Hochleistungspermanentmagnete auf Basis von Nd-Fe-B werden in einer Vielzahl von Anwendungen zur Dekarbonisierung unterschiedlicher Sektoren eingesetzt. Beispielsweise werden Traktionsmotoren in Elektrofahrzeugen und Windkraftanlagen zur Energieerzeugung genannt. Sie werden in Zukunft eine hohe Nachfrage nach Permanentmagneten generieren. Die Versorgungssituation für Seltene Erden wird aufgrund der Relevanz für die Industrie als äußerst kritisch und unsicher bewertet. Um die Nachhaltigkeit von Produkten, die Permanentmagnete einsetzen, zu erhöhen und um einen Beitrag zur Versorgungssicherheit zu leisten, muss eine Kreislaufwirtschaft für diese strategisch wichtigen Materialien etabliert werden.

Permanentmagnete können heute bereits mit vorhandenen Technologien recycelt werden. So können die Magnete in die einzelnen Elemente (Oxide bzw. Metalle) zerlegt werden, um daraus neue Produkte herzustellen. Andere Recyclingrouten (funktionelles Recycling) erhalten das Legierungssystem Nd-Fe-B. Entsprechende »short loop« Prozesse benötigen daher bei der Umsetzung weniger Ressourcen (Energie, Chemikalien), was sie insbesondere in Europa angesichts der vergleichsweise hohen Energiekosten attraktiv macht.

Die Schwierigkeit bei der Etablierung einer effizienten Kreislaufwirtschaft besteht hier vielmehr in der Sammlung und Aufarbeitung von Altmagneten aus sehr diversen Stoffströmen. Um eine Dissipation von Seltenen Erden aus Magnetwerkstoffen zu vermeiden, müssen Initiativen zur Sammlung von Altprodukten und Altmagneten ergriffen werden. Zur Herstellung leistungsfähiger Recyclingmagnete, muss sodann die sorgfältige Trennung der Permanentmagnete von den nicht-magnetischen Komponenten sichergestellt werden. Zur Verbesserung der Sammlungs- und Aufbereitungsprozesse mit dem Ziel einer effizienten Kreislaufführung werthaltiger Materialien, könnten auch digitale Methoden eingesetzt werden, um die Versorgung mit Permanentmagneten in Europa zu gewährleisten.

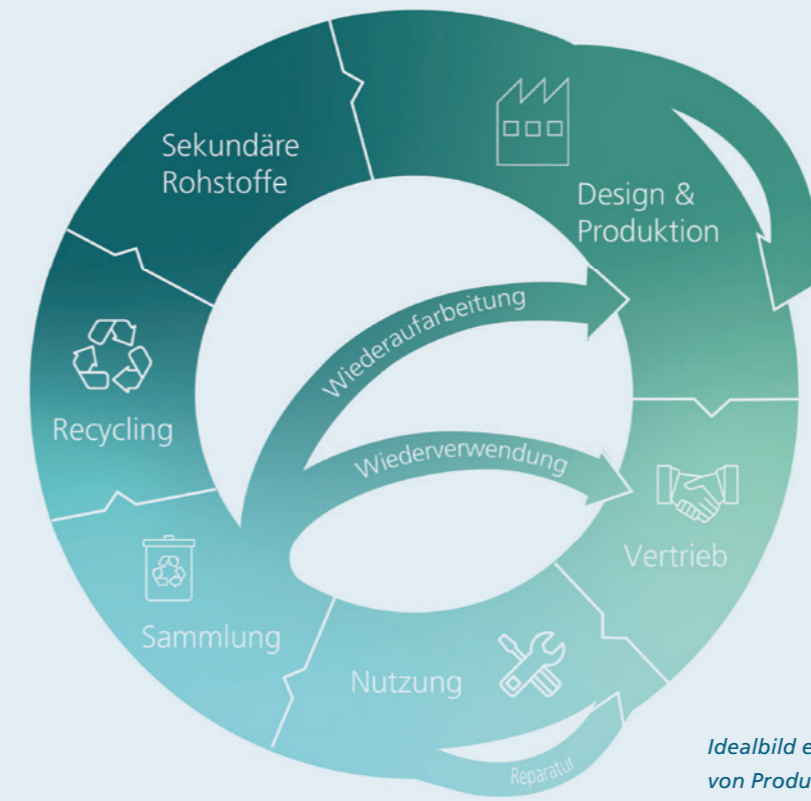
Batteriematerialien



Batteriezellen vom Typ 18650 und aufkonzentrierte Materialfraktionen: Metalle, Kunststoffe und Schwarzmasse.
© Fraunhofer-Projektgruppe IWKS

Lithium-Ionen-Batterien beinhalten eine Vielzahl wertvoller, seltener und teilweise sogar versorgungskritischer Rohstoffe wie Lithium, Nickel oder Kobalt. Der größte Teil dieser Stoffe ist in den Kathodenaktivmaterialien wie $\text{Li}(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Mn})\text{O}_2$ konzentriert, auf deren Recycling ein besonderer Fokus liegt. Darüber hinaus gibt es weitere Funktionsmaterialien mit relevantem Materialwert und auch Energiebedarf bei der Herstellung. Hierzu zählen die Anodenaktivmaterialien wie Graphit, die Leitadditive aus graphitischem Kohlenstoff sowie das Leitsalz des Elektrolyten, meist LiPF_6 .

Mit bestehenden Recyclingverfahren können die nickel- und kobalthaltigen Lithium-Ionen-Batterien zwar wirtschaftlich recycelt werden, ein Teil der wertvollen Rohstoffe sowie der Synthesewert der Funktionsmaterialien gehen dabei aber unwiederbringlich verloren. Darüber hinaus gibt es noch keine rentablen Lösungen für das Recycling von LiFePO_4 -basierten Batterien, die gerade in kostengünstigen, kleinen Elektrofahrzeugen verstärkt zum Einsatz kommen.



Idealbild einer Kreislaufführung innerhalb der Wertschöpfung von Produkten, in dem keine Abfälle mehr entstehen und die Produktion ausschließlich aus Sekundärrohstoffen erfolgt.

Die etablierten pyro- und hydrometallurgischen Recyclingrouten bieten jeweils unterschiedliche Vor- und Nachteile. Pyrometallurgische Verfahren sind einerseits relativ flexibel einsetzbar, bereits vergleichsweise hoch skaliert und garantieren hohe Rückgewinnungsraten für die Metalle Nickel, Kobalt oder Kupfer. Andererseits sind sie energieintensiv, Wertstoffe wie Graphit oder graphitische Kohlenstoffe gehen durch Verbrennung verloren und Aluminium und Lithium werden zunächst in die Schlacke überführt. Bei den hydrometallurgischen Ansätzen ist der Energieaufwand zwar geringer und eine stoffliche Verwertung von weiteren Bestandteilen wie des Elektrolytmittels oder der Kohlenstoffe möglich, die erforderliche mechanische Vorbehandlung sorgt allerdings für einen signifikanten Materialverlust, insbesondere bei den besonders wertvollen und kritischen Bestandteilen.

Neue Forschungsansätze zur materialelektiven Zerkleinerung von Batteriezellen, zur effizienten physikalischen Vorsortierung der so generierten Materialfraktionen sowie zur Regeneration und zum direkten Wiedereinsatz von Funktionsmaterialien (Direct Recycling) haben hier zu deutlichen Verbesserungen geführt. Der Verzicht auf eine erneute Materialsynthese aus den Elementen reduziert sowohl Materialverluste als auch den Energieaufwand.

Vielversprechende Technologien für diese Recyclingroute sind die elektrohydraulische Fragmentierung mit einem nachgeschalteten Skimming und Sieving-Prozess zur Fraktionierung von Kunststoffen, Metallen und Aktivmaterial sowie einer sensorbasierten Sortierung zur weiteren Trennung verschiedener Metalle und Kunststoffe. Mit innovativen Zentrifugationsverfahren lassen sich insbesondere aktivmaterialhaltige Feinfraktionen isolieren. Die Relithierung und Regeneration kann mittels Autoklavenprozessen oder Festkörperreaktionen erfolgen. Perspektivisch ist hier auch das »Upcycling« von alten Aktivmaterialien zu neuen nickelreichen Hochleistungsmaterialien denkbar.



Vielversprechende Technologien sind elektrohydraulische Fragmentierungen mit nachgeschalteten Prozessen zur Fraktionierung «



80 m langes Rotorblatt während der ersten Segmentierung © Fraunhofer IWES

Materialien für Windenergiesysteme (Rotorblätter)

Eine moderne Windenergieanlage besteht je nach Bauweise, (On- oder Off-shore Anlage) massenanteilig zu über 90 Prozent aus Beton und Stahl, Materialien, die im Wesentlichen etablierten Recyclingverfahren mit einer Recyclingquote von 85 bis 90 Prozent zugeführt werden können. [17][18]

Deutlich schwieriger sind die bis zu 100 m langen Rotorblätter zu recyceln. Sie bestehen zum größten Teil aus Glasfaserverbundmaterialien (GFK). In größeren und neueren Rotorblättern finden sich zusätzliche Kohlenstofffaserverbundmaterialien (CFK). Gleichzeitig werden große Mengen Matrixkunststoffe, Harzkleber sowie Kernwerkstoffe (Balsaholz oder Polymerschäume) eingesetzt. Derzeit wird der überwiegende Teil der zu entsorgenden Blätter mechanisch aufbereitet und in der Klinkerherstellung für die Zementindustrie verwendet. Die Harz- und Klebstoffkomponenten dienen dabei als Brennstoff und werden energetisch verwertet. Der Glasanteil sowie die Asche werden für die Substitution von Zuschlagstoffen verwendet und damit stofflich verwertet [19]. Die CFK-Fraktion aus dem Blattrecycling ist heute bisher klein [20]. Typischerweise erfolgt eine mechanische Aufbereitung und anschließende Nutzung des Materials als Füll-, bzw. Zuschlagstoff in der Kunststoffindustrie. Z. T. kann über eine pyrolytische Aufbereitungsrouten eine Weiterverarbeitung zu kurz- bzw. langfaserfaserverstärkten Vliesen erfolgen.

End-of-Life Rotorblätter werden nach etwa 20 Jahren Lebensdauer heute nur noch selten für Repowering in anderen Windenergieanlagen eingesetzt. Die erneute effiziente Nutzung von Rotorblattabschnitten, großer Teile oder Materialien wäre im Sinne einer zirkulären Kreislaufwirtschaft wünschenswert. Sich daraus ergebende Forschungsfragestellungen und Maßnahmen sind u. a. die Schaffung von Rahmenbedingungen, die einen wirtschaftlichen Wiedereinsatz alter Rotorblätter an den Standorten über die typische Nutzungsdauer hinaus erlaubt sowie die Erweiterung und Optimierung von Standards und

Richtlinien zur ökologisch und ökonomisch sicheren Demontage und Aufbereitung von Rotorblättern und deren technische Unterstützung [21]. Weitere notwendige Maßnahmen sind eine Produktentwicklung, die große Stücke alter Rotorblätter als Teile neuer Produkte mit einplant (Design for Recycling / Recovery), begleitet von der Entwicklung neuer Konzepte und Technologien, die eine Zerlegung des Rotorblattes und die Trennung der einzelnen Materialien vereinfacht. Dazu zählen Zerlegetechniken der Rotorblätter abgestimmt auf die jeweiligen Recyclinganlagen, die Erzeugung und Nutzung von GFK- und CFK-Faser-Rezyklat (unter Beachtung gesundheitsrelevanter Aspekte) in homogener Qualität, die Produktentwicklung für Holzkernwerkstoffe und Schaumstoffe aus Rotorblattabfall, die Rückführung von Harzsystemen in neue Ausgangsmaterialien (z. B. Klebstoffe oder Basischemikalien) und die Weiterentwicklung von thermoplastischem Harz, bzw. funktionell rezyklierbarem duroplastischem Harz für die neue Rotorblattproduktion. [22]



Rotorblätter einer 5MW Windenergieanlage © Fraunhofer WKI, Meinschmidt

Mehrschichtverpackungen

In der Verpackungsindustrie werden häufig durch Coextrusion, Laminieren oder Kaschieren hergestellte Mehrschichtverbundsysteme eingesetzt, um gewünschte und vorteilhafte Eigenschaftskombinationen bei gleichzeitig geringem Rohstoffeinsatz zu erzielen. Kunststoff-Kunststoff-Folienverbunde, z. B. bestehend aus Polyethylen und Polyamid, erreichen eine sehr gute Barrierewirkung sowohl gegenüber Wasser als auch gegenüber Sauerstoff, während Einzelmaterialien eine deutlich größere Folienstärke für das gleiche Eigenschaftsbild notwendig machen. Papier-Kunststoffverbunde und beschichtetes Papier verlängern die Haltbarkeit der verpackten Lebensmittel gegenüber reinem Papier, bieten auf der Papierseite eine sehr gute Bedruckbarkeit und reduzieren die Verpackungskosten. Für besonders lange Haltbarkeit und attraktives Design werden häufig metallisierte Kunststofffolien und Kunststoff-Aluminiumverbunde eingesetzt. Andere Verpackungen kombinieren eine Kunststoffolie aus Polyethylen mit Aluminium und Papier (»Tetrapack«) für eine optimale Haltbarkeit und Geschmackserhalt unterschiedlichster flüssiger Lebensmittel. Zusätzlich zu den Grundstoffen Papier, Kunststoff und Aluminium enthalten die Verbundsysteme weitere Schichten in untergeordneter Menge, wie z. B. Haftvermittler oder Klebstoffe, um Stabilität und Funktionalität des Verbunds über die notwendige Lebensdauer sicherzustellen. Sowohl für flexible als auch für starre Verpackungsanwendungen kommen heute Systeme mit bis zu elf Schichten zum Einsatz.

Aufgrund der Unverträglichkeit der einzelnen Schichten stellen Verbundsysteme in aller Regel eine Herausforderung für ein werkstoffliches Recycling dar und werden daher vorwiegend der Energiegewinnung zugeführt. Für ein hochwertiges

Recycling der heutigen Systeme ist eine Trennung und Isolierung der Einzelkomponenten erforderlich. Dies kann bei einfachen Verbundsystemen z. B. durch eine Lösemittelaufbereitung für die eingesetzten Kunststoffe erfolgen, die damit in Neuwarequalität isoliert werden können. Bei reinen Kunststoffverbunden lassen sich die unzureichenden Materialeigenschaften eines Mehrkomponenten-Rezyklats am einfachsten durch Zusätze von sogenannten Kompatibilisatoren verbessern. Diese Aufbereitungs- und Aufwertungs-Methoden sind jedoch verhältnismäßig aufwändig und müssen abhängig von der Kunststoffklassen jeweils optimiert werden.

Mit Blick auf eine zukünftige Steigerung der Recyclingquoten sind jedoch grundsätzliche Veränderungen der bestehenden Verbundsysteme erforderlich: z. B. kann eine Trennung der Verbundmaterialien durch den Schichtaufbau sowie durch unter definierten Bedingungen lösbare Klebeverbindungen vereinfacht werden. Bei Kunststoff-Kunststoffverbunden könnten a priori nur Materialien eingesetzt werden, die zu einem verträglichen Kunststoffgemisch führen. Letztendlich wäre die Substitution von Verbundmaterialien durch Monomaterialien möglich, wobei durch entsprechende Additive die Werkstoffeigenschaften eingestellt und damit die Vielfalt an unterschiedlichen Kunststoffen reduziert werden könnte. Beispielsweise können durch Ormocere die Barriereigenschaften von Kunststoffen deutlich verbessert werden, ohne dass die Recyclingfähigkeit leidet. Auch durch Monomaterialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe (»Biopolymere«) lässt sich eine Kunststoffkreislaufwirtschaft realisieren. Allerdings besteht bei der Vielzahl von Verpackungsformen und verpackten Gütern noch ein umfangreicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.



In der Verpackungsindustrie werden häufig Mehrschichtverbundsysteme eingesetzt. Foto: Shutterstock

Materialien in der Bauwirtschaft

Mit Blick auf die verwendeten Materialien zeichnet sich die Baubranche durch große Massenströme, eine große Materialvielfalt, verschiedenste Materialverbünde und Verbundmaterialien, lange Lebenszyklen sowie eine dezentrale Branchen-Struktur aus. Von mineralischen Baustoffen, wie Beton, Ziegel, Gips u. ä., über nachwachsende Rohstoffe wie z. B. Holz, bis hin zu Kunststoffen und Metallen werden im Bauwesen alle gängigen Werkstoffe verbaut und viele Gebäude sind individuell geplant und einzigartig.

Die Herausforderungen einer Kreislaufwirtschaft im Bauwesen liegen daher in einer dezentralen Realisierung bei gleichzeitig hohen Durchsätzen und der Notwendigkeit, flexibel auf wechselnde Materialzusammensetzungen und Materialeigenschaften reagieren zu können. Dies ist im Bauwesen bisher nicht für alle Materialklassen und insbesondere nicht für Verbundwerkstoffe möglich. Während bei Metallen bereits hohe Recyclingquoten erzielt werden, trifft dies auf andere Baustoffe aus verschiedenen Gründen nicht zu.

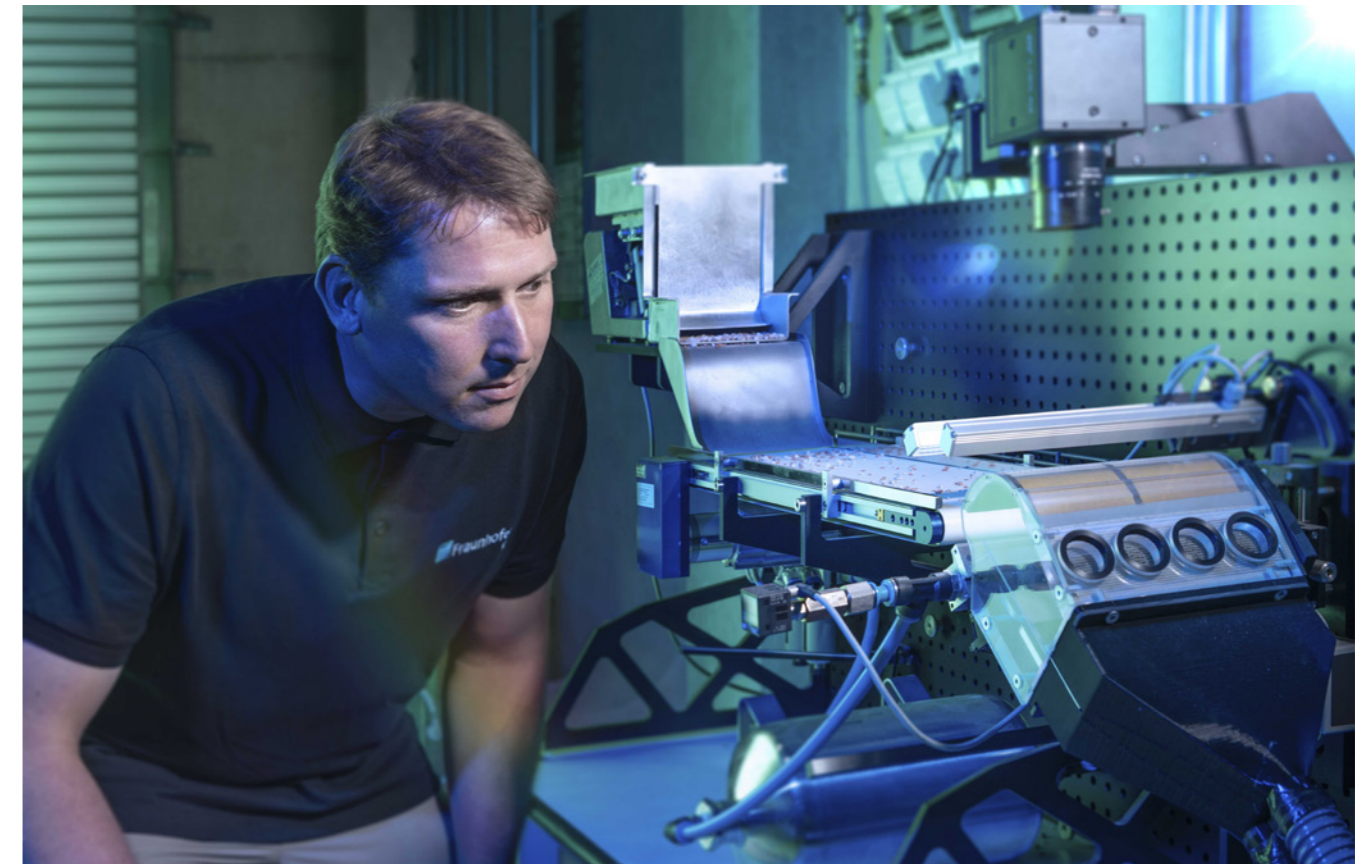
Eine der größten Herausforderungen in der Aufbereitung von Bauschutt ist die Entwicklung geeigneter Verfahren, um aus

einem sehr heterogen zusammengesetzten Gemenge sekundäre Rohstoffe für eine erneute höherwertige Anwendung, im Idealfall im Bauwesen, zu gewinnen. Da viele Baustoffe aus Verbundwerkstoffen oder Kompositen wie Beton, Mauerwerk oder Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) bestehen, sind etablierte Verfahren, wie Brechen und (Wind) Sichten oft nicht ausreichend. Ergänzend braucht es zum selektiven Trennen und Sortieren vorausschauende Materialentwicklungen und Konstruktionen wie etwa wiederlösbare Verbindungen und Prozesse wie etwa sensorgestützte Sortiermethoden. So lassen sich künftig deutlich mehr Baumrestmassen einer hochwertigen Wiederverwertung zuführen. Gleichzeitig kann der Anteil der Baumrestmasse, der als Verfüllmaterial eingesetzt oder einer thermischen Verwertung zugeführt wird, verringert werden.

Daher müssen neue Aufbereitungsverfahren oder Kombinationen aus diesen entwickelt werden, um Bauschuttströme effizienter aufbereiten bzw. trennen zu können. Geeignete Trennmethode erhöhen wesentlich die Effizienz einer nachgeschalteten Sortierung.



Eine große Herausforderung bei der Aufbereitung von Bauschutt ist die heterogene Zusammensetzung. Bild von Jörg Hertle auf Pixabay



TableSort als »Miniatur-Ausgabe« einer Schüttgut-Sortieranlage: Mittels opto-pneumatischem Verfahren können Bauschuttfraktionen nach verschiedenen Kriterien sortiert werden. © Fraunhofer IBP / Rainer Spitzenberger

Auch im Bauwesen muss es Ziel der Kreislaufwirtschaft sein, den Wert der Baumaterialien zu erhalten und für weitere Anwendungen und Baumaßnahmen verfügbar zu machen. Der Einsatz von Primärmaterialien sollte reduziert und diese, wo möglich, durch Recyclingmaterialien substituiert werden.

Entsprechend den langen Lebenszyklen von Bauwerken ist für Materialrückflüsse im Bauwesen eine langfristige Perspektive anzusetzen. Die Bedeutung dessen zeigt sich an in der Vergangenheit verbauten Materialien: Diese müssen am Lebensende eines Gebäudes für die Kreislaufwirtschaft wieder erfasst werden. Viele Baumaterialien enthalten Schad- bzw. Gefahrstoffe. Diese müssen erkannt, abgetrennt und fachgerecht aufbereitet oder, wie im Falle von Asbest, deponiert werden.

Schließlich braucht es Konzepte für CO₂-neutrales Bauen (Neues Bauhaus), die nicht zuletzt für die Erfüllung des European Green Deal unerlässlich sind.

Das Bauwesen steht mit Blick auf die Kreislaufwirtschaft vor spezifischen Herausforderungen technologischer, regulatorischer, wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Natur.



Vorher, nachher: Die Betonprobe, feinsäuberlich in ihre Bestandteile aufgetrennt. Die erhaltenen Kornfraktionen werden nach der elektrodynamischen Fragmentierung getrocknet und gesiebt. © Fraunhofer IBP

Positionen und Empfehlungen

Forschungs- und Handlungsbedarfe, die im Falle erfolgreich umgesetzter Maßnahmen zugleich aber auch hervorragende Wettbewerbschancen für Deutschland und Europa liefern, sieht der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – Materials in folgenden Themenfeldern.

„Design for Circularity“ – Den Kreislauf von Anfang an mitdenken!

- Das für eine zirkuläre Wertschöpfung erforderliche Know-how muss weiter auf- und ausgebaut und auf alle relevanten Produktbereiche in der Wirtschaft ausgerollt werden.
- Das Potenzial von Monomaterialien muss beim Materialdesign optimiert und in der Anwendung besser ausgeschöpft werden.
- Das Produktdesign muss bevorzugt langlebigere und wiederverwendbare Produkte hervorbringen. Die Materialtrennung und -füugung muss bereits im Entwicklungsprozess mitgedacht werden.
- Produkte müssen mit einer höheren Toleranz gegenüber rezyklatbedingten Effekten ausgelegt und weiterentwickelt werden.
- Pfade und Technologien für chemisches Recycling, i. B. für die Verwendung von CO₂ als Rohstoff müssen weiterentwickelt werden.

Sammeln, Trennen, Aufbereiten, Ersetzen - Neue, alte Qualität sichern!

- Konzepte zur Nutzung bzw. Kreislaufführung sortenreiner Restmaterialien in Produktionsprozessen müssen (weiter-) entwickelt werden.
- Flexible, sensitive, robuste und dezentral einsetzbare Trenn-, Sortier- und Aufbereitungsverfahren müssen auch für große Massendurchsätze entwickelt und zum Standard ausgereift werden.
- Verfahren zur Trennung von Fraktionen bei Metalllegierungen bedürfen ebenso der Optimierung und Weiterentwicklung wie Trennverfahren für Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbände.
- Die Entwicklung von Methoden zur gezielten Markierung von Materialien mit dem Ziel einer besseren Nachverfolgbarkeit und Trennbarkeit muss vorangetrieben werden.
- Die Qualität von Rezyklaten und Sekundärmaterialien muss weiter optimiert werden.
- Möglichkeiten zur Rückgewinnung und Regeneration von Funktionsmaterialien müssen genutzt werden, um aufwendige Neusynthesen einzusparen.
- Kreisläufe müssen möglichst bereits lokal / regional geschlossen werden.

Digitalisierung und Transparenz – Nachverfolgbarkeit garantieren!

- Insbesondere für materialintensive und langlebige Produkte müssen digitale Produktpässe konzipiert und für alle Lebenszyklusphasen umfassend erstellt werden (digitale Lebensdauerakte / -zyklusakte).
- Zur Prozessoptimierung und Effizienzsteigerung bei Sammlung, Sortierung und Aufbereitung müssen verstärkt digitale Techniken entwickelt und eingesetzt werden.
- Digitale Zwillinge müssen für die Prozessmodellierung, für Entwicklungs- und Produktionsprozesse bis zum Produkt aber auch für die (mehrmalige) Kreislaufführung bereitgestellt und genutzt werden.

Politische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen verbessern!

- Strategisches Ziel muss es sein, Stoffkreisläufe zu schließen und wirtschaftlich wichtige Rohstoffe und Materialien innerhalb der EU zu halten.
- Hersteller müssen dazu verpflichtet werden, bereits das Produktdesign auf eine zirkuläre Wertschöpfung hin auszurichten. Dies muss auf nationaler und auf europäischer Ebene politisch motiviert, regulatorisch verankert und durch Marktanreize forciert werden.
- Der Einsatz kreislauffähiger Materialien muss durch ein vereinfachtes Regelwerk erleichtert werden.
- Der Einsatz hochwertiger, biobasierter sowie bioabbaubarer Substitutionswerkstoffe in der Produktion muss incentiviert und bereits in der Produktentwicklung unterstützt werden.
- Vielversprechende Kreislaufkonzepte müssen gefördert und (weiter-) entwickelt werden. Insbesondere Lösungen mit besonders hohen Rückgewinnungsraten und CO₂-Einsparungspotentialen sowie geschlossenen Materialkreisläufen müssen durch regulatorische Vorgaben einerseits und Incentivierungen andererseits gefördert werden.
- Die gesellschaftliche Akzeptanz von Recyclingprodukten muss beachtet und weiter verbessert werden.

Impressum

Redaktion:

Dr. Ursula Eul (verantwortlich)
Tanja Beisel-Hallstein

Autoren und Co-Autoren:

Jörg Adler (Fraunhofer IKTS)
Dr. Dirk Berthold (Fraunhofer WKI)
Dr. Andreas Bittner (Fraunhofer ISC)
Peter Brantsch (Fraunhofer ICT)
Dr. Bernhard Durschang (Fraunhofer ISC)
Dr. Burkhardt Faßauer (Fraunhofer IKTS)
Matthias Fischer (Fraunhofer IBP)
Dr. Andrea Gassmann (Fraunhofer IWKS)
Jürgen Gassmann (Fraunhofer IWKS)
Dr. Simon Kothe (Fraunhofer IFAM)
Peter Meinschmidt (Fraunhofer WKI)
Dr. Anna Musyanovych (Fraunhofer IMM)
Prof. Rudolf Pfaendner (Fraunhofer LBF)
Christian Stier (Fraunhofer ICT)
Dr. Ferdinand Somorowsky (Fraunhofer ISC)

Satz und Gestaltung

AEP Werbeküche

Bildquellen

Cover: Adobe Stock

Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS
Bartningstraße 47
64289 Darmstadt
Telefon +49 6151 705-8239
Fax +49 6151 705-214
E-Mail: info-verbund-materials@lbf.fraunhofer.de
www.materials.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten. Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

© Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS,
Darmstadt 2022

QUELLEN

- [1] Cramer, J.: Milieu. Elementaire Deeltjes: 16. Amsterdam: Amsterdam University Press B.V. (2014).
- [2] Korhonen J., Nuur C., Feldmann A. and Birkie E.: Circular economy as an essentially contested concept, J. Clean. Prod. 175, 544-552 (2020).
- [3] Ellen MacArthur Foundation: Towards a Circular Economy Business rationale for an accelerated Transition, Report (2015).
- [6] <https://bauforumstahl.de/upload/documents/nachhaltigkeit/Sachstandsbericht.pdf>
- [7] <https://www.stahl-online.de/publikationen/stahl-kreislaeufe/>
- [8] <https://steinertglobal.com/de/metall-recycling/aluminium-recycling/>
- [9] https://www.gdb-online.org/wp-content/uploads/2019/12/Factsheet_Kupfer-Recycling.pdf
- [10] <https://eu-recycling.com/Archive/13932>
- [11] <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/pandora-metal-recycling-gold-silber-1.4925793>
- [12] <https://www.brewes.de/lexikon/weee>
- [13] <https://www.planet-wissen.de/technik/werkstoffe/metallrohstoffe/pwierohstoffelektroschrott100.html>
- [14] <https://eu-recycling.com/Archive/7169>
- [15] <https://docplayer.org/58400547-Funktionswerkstoffe-und-metallrecycling-entropie-und-dissipation-in-schrotten.html>
- [16] <https://docplayer.org/64226369-Papierrecycling-eine-erfolgs-geschichte.html>
- [17] (<https://doi.org/10.3390/resources2030303>)
- [18] (<https://windeurope.org/newsroom/press-releases/cross-sector-industry-platform-outlines-best-strategies-for-the-recycling-of-wind-turbine-blades/>)
- [19] (<https://w3.windmesse.de/windenergie/pm/26751-wab-interview-recycling-abbau-neocomp>)
- [20] UBA Texte 117/2019 (<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklung-eines-konzepts-massnahmen-fuer-einen>)
- [21] (<https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-4866/328634880>)
- [22] (<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.041>)

Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – Materials

Der Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – Materials bündelt die Kompetenzen der materialwissenschaftlich orientierten Institute der Fraunhofer-Gesellschaft. Materialforschung bei Fraunhofer umfasst die gesamte Wertschöpfungskette, von der Entwicklung neuer und der Verbesserung bestehender Materialien über deren Herstellungstechnologien im industrienahen Maßstab, die Charakterisierung der Materialeigenschaften bis hin zur Bewertung des Einsatzverhaltens im Bauteil. Entsprechendes gilt für das Verhalten der aus den Materialien hergestellten Bauteile in Systemen.

Der Verbund setzt sein Know-how schwerpunktmäßig in den volkswirtschaftlich bedeutenden Handlungsfeldern Mobilität und Transport, Umwelt und Energie, Gesundheit, Sicherheit sowie Bauen und Wohnen ein. Ziel ist es, mit maßgeschneiderten und nachhaltigen Werkstoff- und Bauteilentwicklungen Systeminnovationen für diese Handlungsfelder zu realisieren. Es gehört zu den strategischen Zielen des Verbunds, die Zirkularität bekannter Stoffströme zu verbessern und neue ressourceneffiziente Stoffströme zur Steigerung der Nachhaltigkeit zu erschließen.

Kontakt

Geschäftsstelle
Dr. phil. nat. Ursula Eul
Tel. +49 6151 705-262
info-verbund-materials@lbf.fraunhofer.de

Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile
-MATERIALS
Bartningstraße 47
64289 Darmstadt
www.materials.fraunhofer.de