



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



FONA
Ressourceneffizienz

BMBF

Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft

Forschungskonzept für eine kreislaufoptimierte Wirtschaftsweise



Inhalt

Vorwort	2
<hr/>	
Einleitung	4
<hr/>	
Die Ziele des Forschungskonzepts	6
<hr/>	
Die Forschungsschwerpunkte	12
<hr/>	
Design kreislauffähiger und ressourcenschonender Produkte	14
Digitale Technologien für die kreislauf- und ressourcenoptimierte Wirtschaft	16
Innovative Produktkreisläufe und Geschäftsmodelle	19
Optimierte Material- und Stoffkreisläufe.....	22
Kunststoffe.....	22
Wirtschaftsstrategische Rohstoffe.....	25
Mineralische Stoffe	26
Flankierende Maßnahmen.....	30
Offener Ideenwettbewerb zur Erschließung zusätzlicher Ressourceneffizienzpotentiale	30
Transnationale Kooperation im Rahmen des ERA-Net ERA-MIN 2	30
Weitere Fördermaßnahmen mit Bezug zur Kreislaufwirtschaft	31
<hr/>	
Quellen	32
<hr/>	
Impressum	33
<hr/>	

Vorwort

Um die Welt auch für unsere Kinder und Enkel in einer lebenswerten Form zu erhalten, müssen wir unsere derzeitige Lebensweise nachhaltig verändern. Dazu ist es erforderlich, sowohl unseren Ressourcenverbrauch als auch die Menge unserer Abfälle zu reduzieren. Dafür brauchen wir einen grundlegenden Wandel von der derzeit weitgehend linearen Wirtschaftsweise (Produzieren, Nutzen, Entsorgen) hin zu einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft.

Echte Wertschöpfung erreichen wir dabei nur, wenn wir die Lebens- und Nutzungsdauer von Produkten und Materialien verlängern – sie weiter- und wiederverwenden, statt sie zu entsorgen. Unternehmen und Verbraucher spielen dabei eine ausschlaggebende Rolle. Nur wenn es gelingt, allen Beteiligten sowohl die ökonomischen als auch die ökologischen langfristigen Vorteile einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft zu vermitteln, wird die erforderliche Akzeptanz einsetzen. Geeignete innovations- und investitionsfreundliche Rahmenbedingungen werden benötigt, um Impulse für die dauerhafte Etablierung der damit verbundenen neuen Geschäftsfelder zu geben.

Forschung und Entwicklung schaffen die Grundlagen für die erforderlichen Innovationen zur Umsetzung dieser großen Herausforderung. Mit dem vorliegenden Forschungskonzept „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) daher Forschungsvorhaben, die den gesamten Wirtschaftskreislauf im Blick haben: von der Produktentwicklung über die industrielle Produktion bis hin zum Handel, den Verbrauchern und dem Recycling. Wir unterstützen neue Technologien, innovative Designansätze und Geschäftsmodelle für ein nachhaltiges Wirtschaften in einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft.

Deutschland ist bereits jetzt international ein Vorreiter im Recycling. Daran wollen wir anknüpfen, um einerseits in Europa die Ziele der „Circular Economy“-Strategie zu erreichen und andererseits weltweit für ein kreislaufoptimiertes Wirtschaften zu werben.

Die Ergebnisse aus der Umsetzung des Konzeptes werden dabei einen wertvollen Beitrag leisten, auch durch Handlungsempfehlungen an die Politik und alle beteiligten Akteure einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft.

Ihr Bundesministerium für Bildung und Forschung





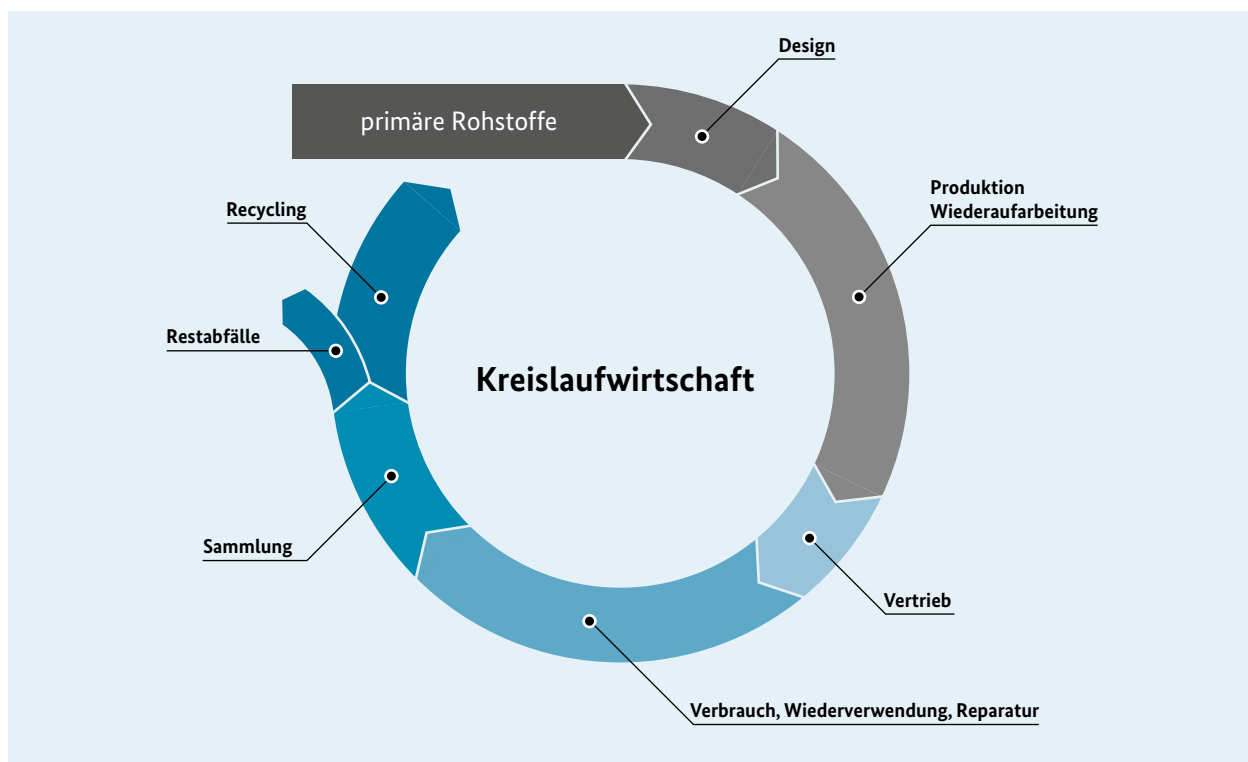
Einleitung

Die derzeitige Lebensweise der Menschen in den Industrieländern wird nicht nur die Rohstoffvorkommen der Erde überfordern, sondern auch deren Aufnahmekapazität für die damit verbundenen Abfallprodukte. Dieser Trend wird aktuell dramatisch verstärkt durch das wirtschaftliche Wachstum bisheriger Schwellen- und Entwicklungsländer mit ihrer stark wachsenden Bevölkerung. Diese Entwicklung kann nur durch eine drastische Steigerung der Ressourcenproduktivität abgefedert werden. Die dazu notwendige Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch ist nicht nur ein Gebot der ökologischen Vernunft, des Ressourcen- und Klimaschutzes, sondern aufgrund der zunehmenden Preissteigerungen relevanter Rohstoffe auch aus ökonomischen Gründen erforderlich.

Der jährliche Rohstoffkonsum in Deutschland ist mit derzeit etwa 15 Tonnen pro Kopf doppelt so hoch wie der globale Pro-Kopf-Durchschnitt. Das ist Ausdruck einer überwiegend linearen Wirtschaftsweise, gekennzeichnet durch: Rohstoffentnahme – Produzieren – Nutzen – Entsorgen.

Ein schonender und gleichzeitig effizienter Umgang mit natürlichen Ressourcen ist daher eine Schlüsselkompetenz zukunftsfähiger Gesellschaften. Die Transformation hin zu einer weitgehend geschlossenen ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft wird zur Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom Ressourcenverbrauch beitragen. Sie kann die Umweltbelastungen begrenzen, die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft stärken, neue Arbeitsplätze schaffen und nachhaltig Beschäftigung sichern.

Im Mittelpunkt der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft steht der Kreislauf von Produkten, Komponenten und Rohstoffen. Der Wert von Produkten und dafür eingesetzte Ressourcen soll möglichst lang erhalten werden, es soll möglichst wenig Abfall entstehen. Das schließt die Wiederverwendung gebrauchter Produkte und Materialien ebenso ein wie den längeren Gebrauch und die intensiviere Nutzung von Konsum- und Industriegütern.



Europa verfolgt dafür eine umfassende Strategie. Mit dem „Circular Economy“-Paket will die EU-Kommission Maßnahmen zum Umbau der europäischen Wirtschaft zu einer erweiterten Kreislaufwirtschaft auf den Weg bringen. Deutschland hat die Chance, hier mit seiner relativ guten Ausgangsbasis im Vergleich zu europäischen Nachbarn eine Vorreiterrolle zu übernehmen. Laut Daten der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) ist Deutschland Vorreiter im Recycling. Rund 65 Prozent der Siedlungsabfälle werden hierzulande wiederverwertet. In vielen anderen europäischen Nationen sowie in den USA ist dies deutlich weniger.

Die Bundesregierung gibt mit ihren Programmen und Förderaktivitäten maßgebliche Impulse für eine ressourceneffiziente Wirtschaftsweise. Das „Deutsche Ressourceneffizienzprogramm“ (ProgRess II) setzt das Ziel, die natürlichen Ressourcen zu schonen und die Gesamtrohstoffproduktivität bis 2030 gegenüber 2010 um 30 Prozent zu steigern. Ein zentrales Handlungsfeld von ProgRess II und ein wesentlicher Hebel zur Erhöhung der Gesamtrohstoffproduktivität ist der Ausbau einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft.

Forschung ist ein wesentlicher Treiber für eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft. Sie liefert die Innovationen und Lösungsansätze, die für eine erfolgreiche Umsetzung der Kreislaufwirtschaft unabdingbar sind. Im Rahmenprogramm „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ (FONA³) richtet das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) entsprechende Ansätze auf die Leitinitiative „Green Economy“ aus. Damit werden Forschung und Innovation für eine nachhaltige Wirtschaftsweise gefördert, die natürliche Ressourcen schont, negative Umweltauswirkungen minimiert und ein qualitatives Wachstum ermöglicht.

Mit dem vorliegenden Forschungskonzept „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ will das BMBF im Rahmen der Leitinitiative „Green Economy“ wesentliche Impulse zum Umbau der traditionellen linearen Wirtschaftsweise hin zu einer Kreislaufwirtschaft geben. Mit Hilfe der Forschung können ressourceneffiziente Kreisläufe, branchenübergreifende Wertschöpfungsnetze oder Kaskadensysteme für Produkte, Komponenten und Materialien etabliert werden. Zu

entwickeln sind technologische Innovationen für neue Produkte und Verfahren ebenso wie soziale Innovationen und neue Geschäftsmodelle sowie die Einbindung der Verbraucher. Das BMBF wird dafür in den kommenden Jahren Forschung und Entwicklung mit insgesamt rund 150 Millionen Euro fördern.

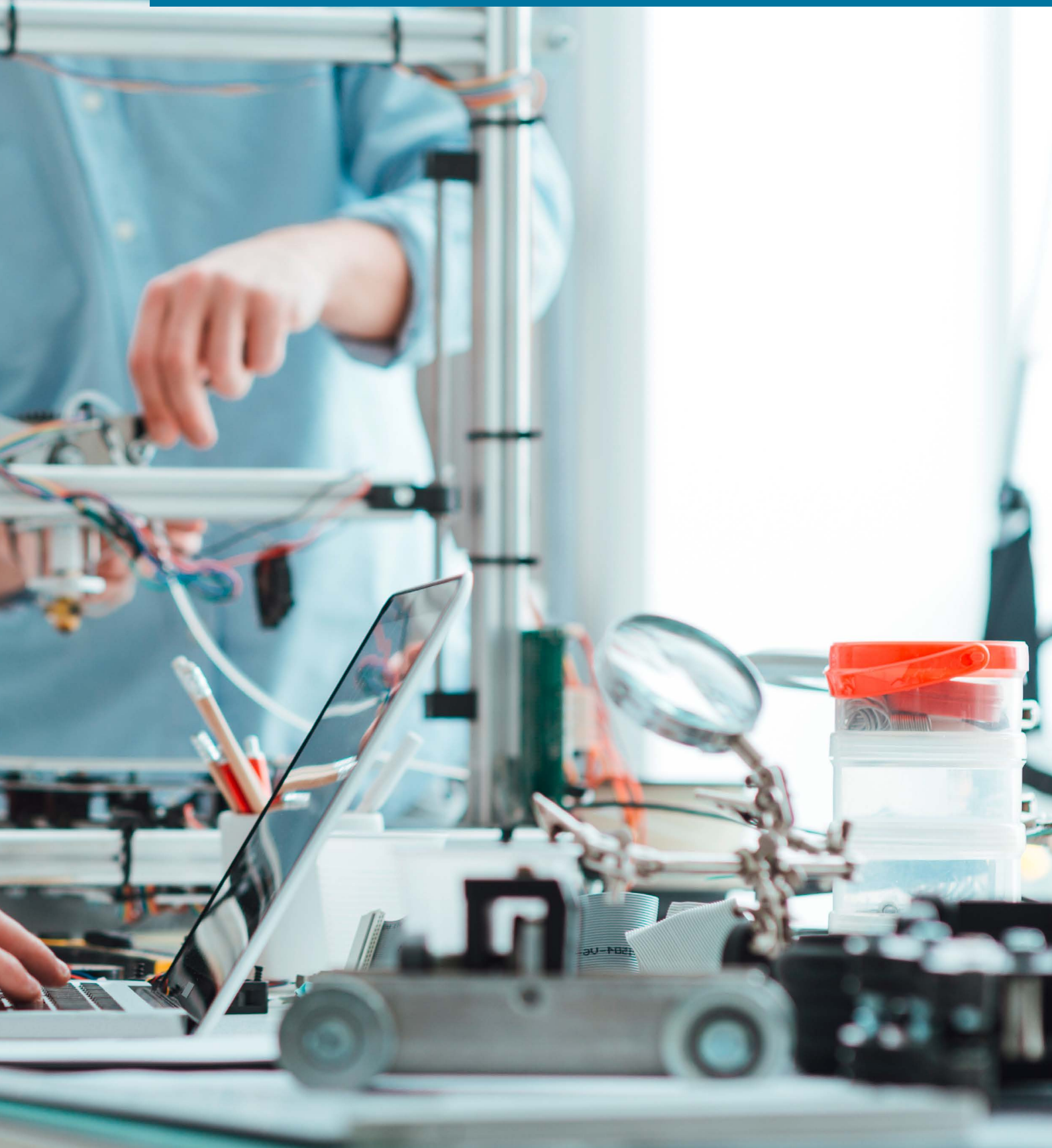
Adressiert sind alle für die Umsetzung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft relevanten Akteure wie u. a. Rohstoffproduzenten und -verarbeiter, Hersteller, Anbieter und Anwender von Produkten im industriellen, gewerblichen wie auch im privaten Bereich, die Recycling- und Entsorgungsbranche sowie Anbieter von Produkt-Dienstleistungs-Systemen. Damit sollen Veränderungen in Unternehmen als Anbieter von Produkten und Dienstleistungen für die Kreislaufwirtschaft angestoßen, aber auch die Verantwortung der privaten und öffentlichen Konsumenten gestärkt werden. Aus der Umsetzung des Konzeptes sollen auch Handlungsempfehlungen an die Politik zur Förderung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft und zur effektiven Vermittlung des generierten Wissens an die gesellschaftlichen Akteure resultieren.

In Kürze: Forschung für eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft

Im Mittelpunkt der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft steht der Kreislauf von Produkten, Komponenten und Rohstoffen. Ihr Wert bzw. ihre Funktion soll möglichst lange erhalten werden, es soll möglichst wenig Abfall erzeugt werden. Zu diesem Zweck sollen mit Hilfe von Forschung und Innovation ressourceneffiziente Kreisläufe, branchenübergreifende Wertschöpfungsnetze oder Kaskadensysteme für Produkte, Komponenten und Materialien etabliert werden.



Die Ziele des Forschungskonzepts





Das Potenzial der ressourcen- effizienten Kreislaufwirtschaft

In der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft wird einerseits der Kreislauf der Wertschöpfung von Produkten und Materialien – vom Rohstoffgewinn über Design und Nutzung, von der Wiederaufarbeitung bis hin zum Recycling – geschlossen. Dafür wird andererseits das Potenzial jedes einzelnen Teiles des Kreislaufs ausgeschöpft: Wesentlich sind dafür ein nachhaltiges Design ebenso wie eine lange Lebensdauer der Produkte und Materialien. Die Lebensdauer wird mit Hilfe von Reparaturen oder durch neue Nutzungen für wiederaufbereitete Produkte oder Komponenten verlängert. Effizient recycelte Ressourcen werden schließlich dem Kreislauf wieder zugeführt.

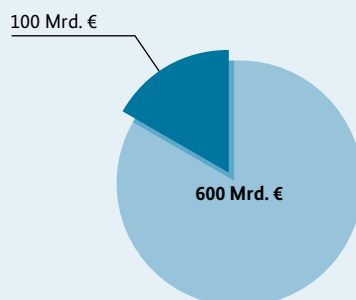
Damit wird die Umwelt entlastet – es werden Rohstoffentnahmen, Abfälle und Emissionen verringert. Das bietet Chancen zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit und Resilienz der Wirtschaft. Eine höhere Wertschöpfung durch intensiviertere Nutzung der Produkte wird geschaffen, Rohstoff- und Entsorgungskosten werden eingespart und Risiken aufgrund von Knappheiten und Preisschwankungen bei Rohstoffen reduziert. Die aktuelle Studie „Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe“ der Ellen MacArthur Foundation besagt: ein Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft-Entwicklungsszenario könnte in Europa die Ressourcenproduktivität um jährlich zwei bis drei Prozent erhöhen. Primärrohstoffe im Wert bis zu 600 Milliarden Euro könnten ab 2030 pro Jahr eingespart werden. Insgesamt werden positive gesamtwirtschaftliche Effekte in der Höhe von 1.800 Milliarden Euro pro Jahr gegenüber dem aktuellen Entwicklungspfad erwartet.



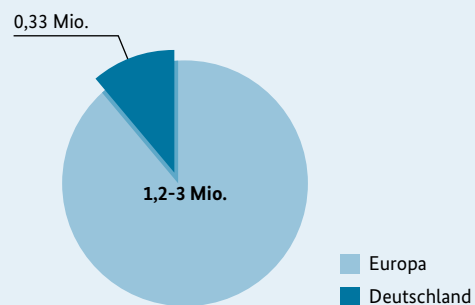
Mit einer Kreislaufwirtschaft werden darüber hinaus Arbeitsplätze geschaffen, wie die Studie „Economic Growth Potential of More Circular Economics“ des Waste Resources Action Programme belegt. Zusätzlich zu den etwa 3,4 Millionen Beschäftigten, die bereits heute in der Kreislauf- und Abfallwirtschaft in Europa tätig sind, könnten bis 2030 voraussichtlich 1,2 bis 3 Millionen zusätzliche Arbeitsplätze entstehen. Allein in Deutschland werden zusätzlich rund 330.000 zusätzliche Arbeitsplätze erwartet.

Potenzial ressourceneffizienter Kreislaufwirtschaft

 **Primärrohstoffe**
Einsparpotenzial ab 2030



 **Neue Arbeitsplätze**
zusätzlich ab 2030 (3,4 Mio in 2017)



Quelle: Ellen MacArthur Foundation 2016; McKinsey 2015

Innovationen im komplexen Umfeld

Für eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft werden Produktinnovationen, die Einbindung relevanter Akteure aus den Bereichen Design, Herstellung, Handel, Konsum und Ressourcenmanagement sowie die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle wie z. B. Produkt-Service-Kombinationen gebraucht.

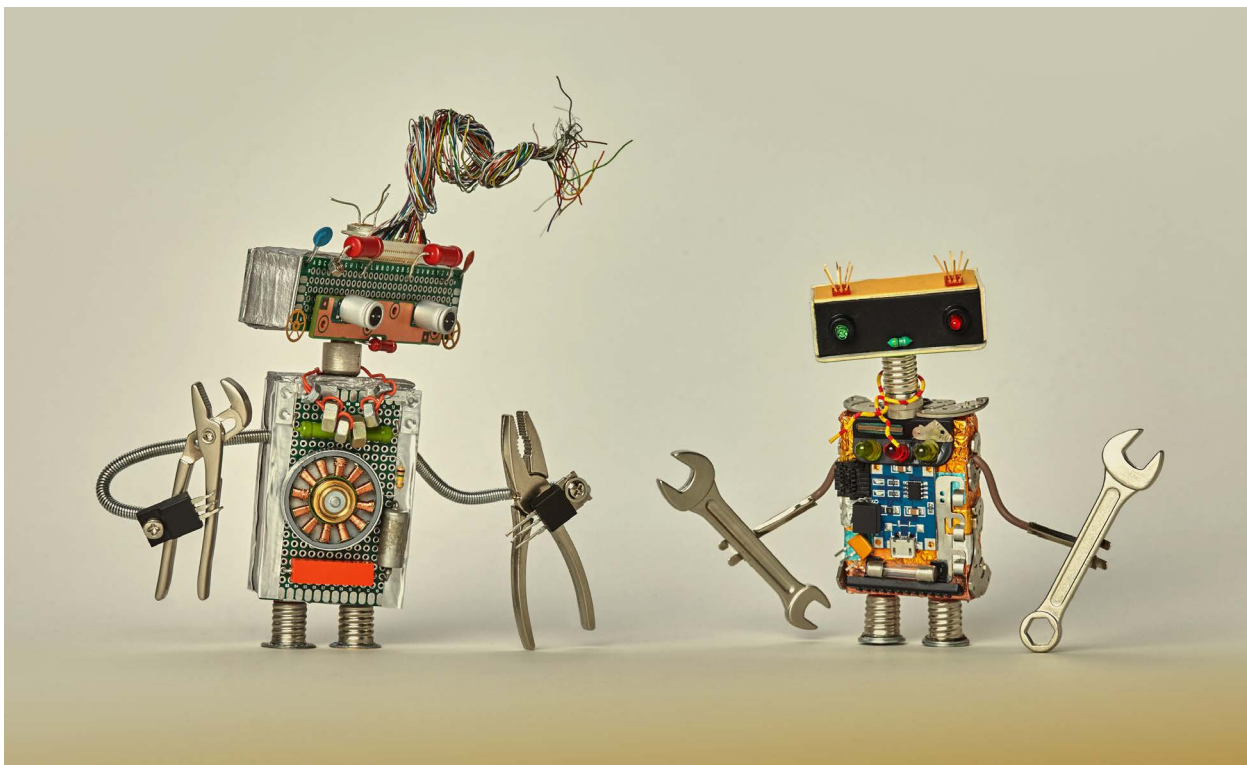
Forschung für eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft sollte dabei mögliche Rebound-Effekte beachten, die Effizienzgewinne durch zunehmende Nachfrage zunichtemachen. Die ganzheitliche Betrachtung von Produkt- und Stoffkreisläufen über ihren Lebensweg und mit ihren Abhängigkeiten zu anderen Kreisläufen hinweg ist dafür die Voraussetzung. Das schließt die Beachtung von Umweltaspekten sowie von wirtschaftlichen, technologischen und sozialen Aspekten mit ein.

Denn Kreislaufführung ist nur erstrebenswert, wenn in der Lebenszyklusperspektive effektiv Ressourcen eingespart werden können. So ist es unter dem Gesichtspunkt des Energieverbrauchs von Altgeräten nicht immer von Vorteil, die Lebensdauer zu verlängern,

wenn moderne Geräte energieeffizienter sind. Aus der ganzheitlichen Betrachtung der Stoff- und Energieflüsse inklusive der Aufwände für die Sammlung und Aufbereitung von Altprodukten und Reststoffen und deren Rückführung in den Kreislauf lassen sich Grenzen einer ökologisch und ökonomisch sinnvollen ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft ableiten. Auswirkungen auf andere natürliche Ressourcen wie zum Beispiel Wasser, Fläche und biogene Ressourcen sind dabei zu berücksichtigen.

Dabei stehen nicht nur Konsumgüter wie Elektronikprodukte oder Automobile im Fokus der Kreislaufwirtschaft. Auch die bedeutenden Mengen langfristig festgelegter Rohstoffe in Gebäuden und Infrastruktur – dieses anthropogene Rohstofflager – brauchen ein Management im Sinne einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft.

Für eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft werden die Verbraucher gebraucht: Sie treten in Zukunft zunehmend über entsprechende IT-Schnittstellen und Geschäftsmodelle als Co-Designer von Produkten auf. Durch Nutzung des 3D-Druckens beispielsweise wird



der Verbraucher selbst zum Produzent individualisierter Produkte. Indem der klassische Endverbraucher Einfluss auf die Produkteigenschaften nimmt und in den Produktionsprozess einbezogen wird, wird er immer mehr zum „Prosument“, ist also gleichzeitig Konsument und Produzent. Die zunehmende Digitalisierung hat damit erhebliche Auswirkungen auf das Verbraucherverhalten, gleichzeitig eröffnen sich durch die Digitalisierung zusätzliche Möglichkeiten zur effizienten Steuerung von Produkt- und Stoffflüssen.

Das Gesamtsystem der Produkt- und Rohstoffkreisläufe

Mit dem vorliegenden Forschungskonzept gibt das BMBF der Forschung den Rahmen, neue Lösungsansätze für den Übergang in eine kreislaufoptimierte Wirtschaftsweise zu entwickeln. Die im BMBF-Rahmenprogramm „FONA³“ in spezifischen Fördermaßnahmen entwickelten Rohstoff- und Recyclingtechnologien tragen zur Verringerung der Rohstoffnachfrage z. B. durch Effizienzsteigerungen oder Substitution knapper Rohstoffe in Hightech-Produkten bzw. zur Erhöhung des Angebots an sekundären Rohstoffen z. B. durch Entwicklung von Recyclingtechnologien bei.

Darauf aufbauend wird mit dem Forschungskonzept Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft das Gesamtsystem der Produkt- und Rohstoffkreisläufe in der Wirtschaft in den Blick genommen. Forschung und Innovation haben das prioritäre Ziel, Kreisläufe für Produkte und Komponenten zu etablieren, die zur Verlängerung der Lebens- und Nutzungsdauer beitragen. Ist eine Rückführung in den gleichen Produktkreislauf aus technischen oder ökonomischen Gründen nicht möglich, sollen Kaskadensysteme eine anderweitige möglichst hochwertige funktionale Verwendung von Komponenten ermöglichen. Damit wird die weitere Nutzung verlängert und erhält Vorrang vor einer energetischen Nutzung oder Entsorgung. Können Komponenten nicht weiter genutzt werden, sollten Material- und Stoffkreisläufe durch Recycling geschlossen werden. Damit sollen die Gesamtrohstoffproduktivität sowie Effizienz und Effektivität entlang des gesamten Produktlebensweges erhöht werden.

Damit die erforschten Ansätze in der Praxis marktfähig werden, sollen innovative Technologien und Dienstleistungen kombiniert, das Produktdesign neu ausgerichtet und angepasste Geschäftsmodelle und Logistikkonzepte entwickelt werden. Einen Schwerpunkt soll die Einbindung digitaler Technologien in der Wertschöpfungskette bilden, die ein hohes Potenzial für Innovations- und Effizienzsprünge bieten. Die aktuelle Studie „Die Digitalisierung der GreenTech-Branche“ der Roland Berger GmbH zeigt gerade im Leitmarkt Kreislaufwirtschaft ein großes Wachstumspotenzial durch Digitalisierung: Bis 2025 könnten dadurch zwei Milliarden Euro zusätzliches Marktvolumen erschlossen werden.

In Kürze: Das prioritäre Ziel des Forschungskonzepts

Mit dem Forschungskonzept „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ wird das Gesamtsystem der wirtschaftlichen Produkt- und Rohstoff-Kreisläufe betrachtet. Das prioritäre Ziel ist es, Kreisläufe für Produkte und Komponenten zu etablieren, die zur Verlängerung der Lebens- und Nutzungsdauer beitragen. Diese haben Vorrang vor energetischer Nutzung oder Entsorgung.



The background features a central point from which numerous golden light rays radiate outwards, creating a starburst effect. Interspersed among these rays are small, glowing particles and clusters, some resembling molecular structures or data points. The overall color palette is dominated by warm, golden-yellow and orange tones against a dark, almost black background.

Die Forschungsschwerpunkte



Design kreislauffähiger und ressourcenschonender Produkte

Das Potenzial des Designs für die ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft

Bereits in der Produktplanungs- und Designphase wird der größte Teil der Umweltbelastungen und Kosten über den gesamten Lebensweg eines Produktes bestimmt. Deshalb birgt diese Phase ein besonders großes Potenzial zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Der mit diesem Forschungskonzept avisierte Übergang zu einer kreislauf- und ressourcenoptimierten Wirtschaft stellt völlig neue Anforderungen an das Design der Produkte. Auf den Punkt gebracht, lauten diese: Das Design soll die Kreislauffähigkeit verbessern und insgesamt zu Produkten führen, deren Lebenszyklus weniger ressourcenintensiv ist.

Das Ziel der Forschungsförderung

Im Zentrum der Forschungsförderung steht ein breiter Eco-Design-Ansatz, der die Kreislauffähigkeit steigert. Der Wieder- und Weiterverwendung von Produkten und Komponenten wird gegenüber dem stofflichen Recycling der Vorrang gegeben. Stoffverbände sollten leicht trennbar oder recyclingkompatibel sein. Ein erhöhter Einsatz von Rezyklaten in neuen Designlösungen wird angestrebt.

Mit dem Eco-Design-Ansatz wird die Lebens- und Nutzungsdauer der Produkte verlängert, z. B. durch optimierte Zuverlässigkeit, Reparatur- und Upgrade-Fähigkeit. Der Wert der Nutzungsphase wird gesteigert und

intensiviert, z. B. durch Möglichkeiten für gleichzeitige oder mehrfache Nutzung, für Nach- und Umrüstung. Eco Design, das kreislauffähig ist, modularisiert bzw. miniaturisiert die Produkte – falls Reparatur-, Upgrade- und Recyclingfähigkeit nicht beeinträchtigt werden. Zusätzliche Funktionen und Schnittstellen zu digitalen Systemen zur Steuerung der Produkt- und Stoffkreisläufe werden integriert.

Unerwünschte Stoffe, die sich in Kreisläufen anreichern und dadurch das Recycling erschweren, sollen vermieden bzw. durch alternative Stoffe ersetzt werden. Der Designprozess berücksichtigt selbstverständlich gesetzliche Vorgaben, z. B. Stoffverbote, erweiterte Produktverantwortung und Standards.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert mit dem Konzept „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ im Sinne dieses Eco-Design-Ansatzes Forschung und Entwicklung in drei prioritären Bereichen: Neue Design-Konzepte; Weiterentwicklung des Eco-Designs in Methodik und Datengrundlagen; Integration in Unternehmensprozesse und Standardisierung.

Gefördert werden Design-Konzepte und Instrumente, die von den Entwicklern gemeinsam mit Industriepartnern und Nutzern in konkreten Anwendungen validiert werden. Zu den erforderlichen Instrumenten

zählen anwendungsorientierte Mess- und Bewertungsmethoden, insbesondere solche, die sich für kleine und mittelständische Unternehmen für ein zielgerichtetes Öko-Design und die Entwicklung von Geschäftsmodellen im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft eignen.

Der Fokus liegt dabei auf Produktgruppen, die ein hohes Potenzial zur zusätzlichen Wertschöpfung in der Nutzungsphase besitzen. Das sind z. B. langlebige Investitionsgüter und Maschinen und Anlagen. Auch Produktgruppen, die ein hohes Potenzial zur Steigerung der Gesamtrohstoffproduktivität aufgrund der enthaltenen Mengen und Art der Rohstoffe besitzen, stehen im Fokus. Das sind z. B. IKT/Elektronik, Automobile und Ersatzteile/Austauschteile. Kurzlebige Massenkonsumgüter und vielfältig eingesetzte Standard-Komponenten, wie z. B. Pumpen, sollen aufgrund ihrer Mengenrelevanz ebenfalls adressiert werden.

Stark wachsende neue Technologiebereiche wie z. B. Elektromobilität bieten die Chance, bereits heute beim Design neuer Produkte anzusetzen, um damit große Potenziale für zukünftige Kreislaufsysteme zu heben. Durch innovative Eco-Design-Ansätze bieten sich auch wirtschaftliche Chancen für neue Akteure, insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen, als Zulieferer oder spezialisierter Anbieter ressourcenschonender kreislauffähiger Produkte.



Prioritäre Forschungsthemen

Neue Design-Konzepte und Instrumente

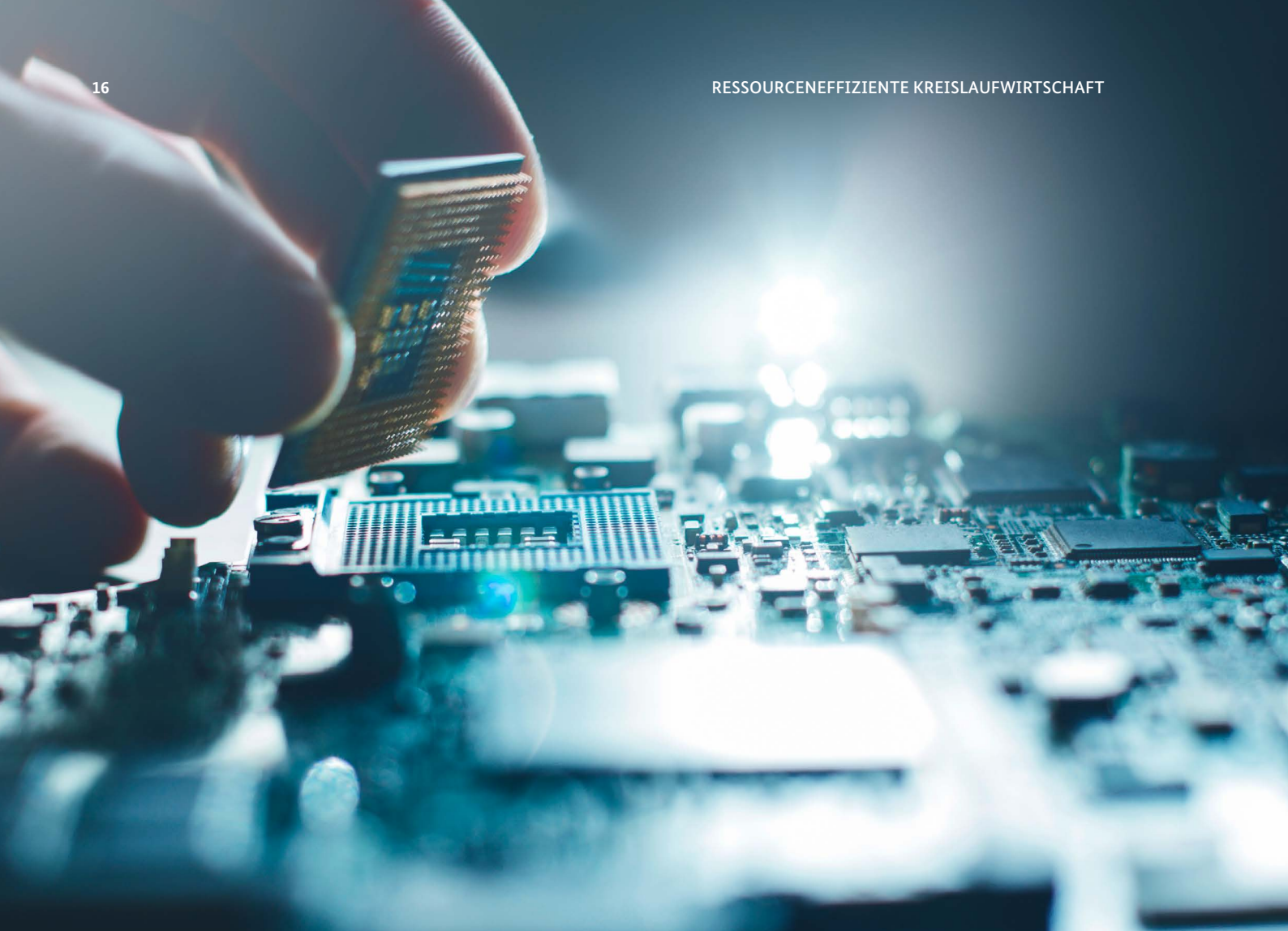
Mit diesen Konzepten und Instrumenten werden bereits in der Designphase ganzheitlich die Kreislauffähigkeit und Nachhaltigkeit von Produkten, Gebäuden, Infrastrukturen und die Integration der Nutzer und verschiedenen Akteure entlang des Lebenswegs betrachtet. Mit ihnen werden neue Ansätze zur Zusammenarbeit, z. B. verteilte Zusammenarbeit wie Crowdfunding oder Peer-Produktion oder Offenlegung des Designs als Open Source berücksichtigt.

Weiterentwicklung der Eco-Design-Methodik und ihrer Datengrundlagen

Der Fokus liegt auf Methoden und Werkzeugen zur belastbaren Bewertung des Umweltprofils und der Ressourceneffizienz von Produkten während ihres gesamten Lebensweges bereits während des Produktentstehungsprozesses. Wesentlich sind ebenso der Vergleich von verschiedenen Design-Optionen im Sinne wirtschaftlicher Geschäftsmodelle zur Kreislaufführung und die Eco-Design-Integration über die Nutzungs- bis in die Nachnutzungsphase.

Integration in Unternehmensprozesse, Normierung und Standardisierung

Umweltaspekte werden bei Normen und Standards für die Produktentstehung berücksichtigt. Eco-Design soll in Unternehmens-Zielsysteme integriert werden. Systeme zur Produkt-/Bauteilkennzeichnung für Nutzer und Wiederaufbereiter sollen entwickelt werden, ebenso wie die Einbindung von Logistik und (Re-)Distribution, das Datenmanagement zwischen Designer, Hersteller und allen nachfolgenden Wertschöpfungsstufen inklusive der Rückführung von Produkten oder Komponenten im Kreislauf. Technische Maßnahmen überwinden Barrieren, die einer Kreislaufführung entgegenstehen, z. B. zuverlässige Datenlöschung bei Gebrauchtgeräten, Softwarekompatibilität, Zustandsüberwachung.



Digitale Technologien für die kreislauf- und ressourcenoptimierte Wirtschaft

Das Potenzial digitaler Technologien für die Kreislaufwirtschaft

Die Digitalisierung ist eine große Chance, Nachhaltigkeit über den Innovationsprozess in neuen Prozessen und Produkten zu verankern und somit ökologische und ökonomische Vorteile zu generieren. Beispielsweise wird die Digitalisierung in Verbindung mit dem 3D-Druck den Reparaturbereich in den nächsten Jahren voraussichtlich revolutionieren und eine umfangreiche Lagerhaltung für mechanische Ersatzteile weitgehend überflüssig machen.

Einer der innovativsten Bereiche für die Möglichkeiten der Digitalisierung verspricht die ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft zu werden. Mit einer digitalisierten Wertschöpfungskette kann ein umfassendes Ressourcenmanagement entscheidend unterstützt werden – in Ergänzung zu innovativen Technologien und Geschäftsmodellen.

Das Ziel der Forschungsförderung

Die Verknüpfung der Haupttreiber der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft, wie Verlängerung des Lebenszyklus, Intensivierung der Produktnutzung und ihrer Kreislauflführung, mit den Vorteilen intelligenter Anlagen und Produkte („Internet der Dinge“) erschließt große Wertschöpfungspotenziale. Das umfangreiche Datenmaterial, welches bereits heute durch den Einsatz intelligenter Anlagen und Produkte zur Verfügung steht, kann als Feedback für das zukünftige Produkt- bzw. Anlagendesign genutzt werden. Das ermöglicht eine Optimierung hinsichtlich Wartung, Lebensdauerprognose und Lebenszyklusverlängerung sowie Ressourcen-effizienz im Lebensweg und Kreislauflführung. Weitere Potenziale können dann erschlossen werden, wenn Technologien zur Zustandserkennung weiterentwickelt und für die Steuerung von Kreisläufen eingesetzt werden.

Das BMBF fördert bereits umfangreiche Aktivitäten zu Industrie 4.0, die geplanten Maßnahmen im Rahmen dieses Forschungskonzepts sind dazu komplementär ausgerichtet. Mit dem Forschungskonzept „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ werden bisher ungenutzte Nachhaltigkeitspotenziale erschlossen, indem die bisher weitgehend parallel verlaufenden Entwicklungslinien der Digitalisierung/Industrie 4.0 und der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft zusammengeführt und damit neue Anwendungsbereiche für die Digitalisierung zugänglich werden.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert mit dem Konzept „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ Forschung und Entwicklung zum Einsatz digitaler Technologien in neuen Anwendungsbereichen – von der intelligenten Vernetzung, über das Datenmanagement bis hin zu IT-gestützten Werkzeugen und Lösungsansätzen und digitalisierten Recycling-Prozessen.

Da die zunehmende Digitalisierung mit einer wachsenden Nachfrage nach speziellen Rohstoffen, z. B.

Elektronikmetalle, Seltene Erden verbunden ist, sollen eventuelle Problemverschiebungen wie z. B. Rebound-Effekte mitbetrachtet werden. Ferner ist die Thematik Datenschutz und Datensicherheit, als eine wesentliche Hürde bei der Einführung digitaler Technologien entsprechend zu berücksichtigen.

In Kombination mit dem Forschungsthema „Design kreislauffähiger Produkte“ sind die im Zuge der Digitalisierung eingeführten Elektronikprodukte selbst als Produktsysteme für die ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft zu optimieren.

Prioritäre Forschungsthemen

Intelligente Vernetzung

Innovationen zur intelligenten Vernetzung umfassen die Vernetzung von Maschinen, Geräten und Menschen zur Erhöhung der Ressourceneffizienz – als Internet der Dinge, Maschine-zu-Maschine-Kommunikation oder hybride oder autonome Robotersysteme z. B. zur Identifikation und Sortierung.



Erfassung, Management und Analyse produkt-/anlagenbezogener Daten

Das Datenmanagement umfasst den gesamten Lebenszyklus. Es werden die Zustandsüberwachung von Anlagen für die Prozessoptimierung und eine vorbeugende Instandhaltung einschließlich Restlebensdauerabschätzung ermöglicht. Das betrifft digitale Modelle von Infrastrukturen, Gebäuden oder Verkehrsmitteln für das Urban Mining, die Rohstoffgewinnung aus anthropogenen Lagern wie Infrastrukturen, Gebäuden, Deponien. Im Recyclingbereich sind intelligente Anlagen und Produkte wie marker- oder sensorgestützte Sortier- und Recyclingtechnologien adressiert sowie eine intelligente Steuerung der Trennmechanik und verbesserte Aufschlussverfahren der immer komplexeren Materialverbunde/Produkte.

IT-gestützte Werkzeuge für das Closed Loop Supply Chain Management

Mit IT-gestützten Werkzeugen können Rohstoffströme geplant und gesteuert und die Ressourceneffizienz in Betrieben oder über ganze Wertschöpfungsketten hinweg gesteigert werden, inklusive der Rückflüsse von Gütern (Reverse Logistik-Ketten). Mit Marker-Techniken können Komponenten wiedererkannt werden. Durch Lean Management lassen sich Geschäftsprozesse und Verfahrensweisen im Recyclingbereich effizient gestalten. IT-gestützte Werkzeuge dienen der Stoffstromverfolgung am Produkt-Lebensende, der Schaffung von Transparenz und der Verifizierung des Einsatzes hochwertiger Reparatur- und Recyclingverfahren sowie der Vermeidung illegaler Exporte.

IT-basierte Lösungen für die Umsetzung von Geschäftsmodellen

IT-basierte Lösungen für die Kreislaufwirtschaft ermöglichen z. B. folgende Geschäftsmodelle: „Product as a Service-Modelle“, Leasing, Wartungskonzepte, vorausschauende Instandhaltung, branchenübergreifende Kooperationen, Sharing-Konzepte, Kollaborationsplattformen.

Intelligente Steuerung systemintegrierter Materialproduktion und des Rohstoffmanagements

Dazu gehören die dynamische Modellierung zur Prozessoptimierung und -kontrolle, der Einsatz künstlicher Intelligenzsysteme zur Steuerung von Prozessen, etwa in der Aufbereitung und Sortierung, der Metallurgie, der Simulation der Ressourceneffizienzeffekte von Herstellungs- und Recyclingprozessen. Dazu gehören weiterhin das simulationsbasierte Design for Recycling von Produkten und Prozessen, die detaillierte Analyse der Lösungsschemie von Hochtemperaturschmelzen und wässrigen Lösungen und Verwendung der erhaltenen thermodynamischen Daten zur Verbesserung der Ökobilanz-Methodik und Simulation.

Digitalisierung der Recyclingprozesse

Dabei handelt es sich vor allem um die Entwicklung informations- und kommunikationstechnischer Steuerungssysteme für komplexe vielstufige und deshalb bislang kaum vernünftig steuerbare Recyclingprozesse. Das kann u. a. eine inputangepasste Steuerung der Verbrennung bei Müllverbrennungsanlagen zur Beeinflussung der Reststoffe oder die Ausschleusung von schadstoffbelasteten oder niederqualitativen Stoffströmen aus den Recyclingprozessen sein, mit denen die Qualität der Kreislaufmaterialien gewährleistet und standardisierte Rezyklate bereitgestellt werden.



Innovative Produktkreisläufe und Geschäftsmodelle

Das Potenzial für die Kreislaufwirtschaft

Durch Produktkreisläufe sowie Netzwerke oder Kaskadensysteme werden vorhandene Produktfunktionen erhalten bzw. verbessert. Der Produktnutzen steigt, der Rohstoffbedarf sinkt. Dies geschieht beispielsweise durch Wiederverwendung, Reparatur, Wiederaufarbeitung auf verschiedenen Ebenen – der Produkte, Komponenten. Innovative Produktkreisläufe können zwischen einzelnen Phasen des Lebenszyklus etabliert werden.

Neuartige Geschäftsmodelle, Dienstleistungen und Kooperationsformen können die wirtschaftlichen Anreize für Unternehmen erzeugen, Produkte mit langer Nutzungsdauer und kaskadierender Nutzung zu entwickeln und herzustellen.

Geschäftsmodelle sind eine entscheidende Voraussetzung, wirtschaftliches Interesse für die erweiterte Kreislaufwirtschaft zu wecken. Sie helfen mit ihrem auf Wirtschaftlichkeit zielenden Aspekt die Nutzungs- und Lebensdauer von Produkten und Komponenten auf hoher Wertschöpfungsstufe zu verlängern. Sie schaffen

zudem die Voraussetzungen für ein qualitativ hochwertiges Recycling, wenn am Ende der Nutzung wirtschaftlich keine weitere Kreislaufführung möglich ist.

Das Ziel der Forschungsförderung

Hochwertige Kreisläufe auf Produkt- und Komponentenebene sind bisher – vom Automobilbereich und einigen Nischenmärkten im Bereich der privaten Endkunden abgesehen – wenig etabliert. Während z. B. der Automobilmarkt für Gebrauchtwagen gut funktioniert und einige Elektrogeräte und Computer teilweise gebraucht verkauft werden, fehlt für aufgearbeitete Waschmaschinen und andere Geräte oftmals die Nachfrage. Hemmnisse in Bezug auf das Kaufverhalten, Akzeptanzfragen und Markttransparenz müssen durch Entwicklung geeigneter Maßnahmen überwunden werden. Relevante Akteure wie Einkäufer der öffentlichen und privaten Hand sowie der Handel sind zu adressieren, um zur Erhöhung der Sichtbarkeit und Nachfrage nach Gebrauchtgeräten bzw. refabrizierten Geräten beizutragen.

Eingebunden werden sollen auch die Bereiche „Second-Life“, Refabrikation und die an diesen Stellen dann anfallenden Sekundärabfälle. Gerade im Bereich moderner Technologien wie der Elektromobilität wird es immer wichtiger werden, z. B. Li-Ionen-Traktionsbatterien nach Nutzungsende im mobilen Bereich einer Zweitnutzung im stationären Bereich zuzuführen. Hier sind bereits einige Initiativen auf dem Weg. Vergleichbare Ansätze ließen sich aber auch auf andere Komponenten ausdehnen. Ein solcher Ansatz führt dann allerdings zu Abfällen, die auf der nächsten, der stofflichen Stufe, verwertet werden müssen. Dafür müssen geeignete Kreislaufsysteme gleich mitgedacht werden. Ähnliches gilt für Überlegungen, bestimmte Komponenten verstärkt aufzuarbeiten (erweiterte Austauschteileproduktion) und auch dort müssen Sekundärabfälle erfasst, in Gesamtverwertungssysteme optimal eingeführt und recycelt werden. Zukunftstrends wie z. B. 3D-Druck und deren Auswirkungen auf die Kreislaufwirtschaft und Geschäftsmodelle sollen mit berücksichtigt werden.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung fördert mit dem Konzept „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ Forschung und Entwicklung innovativer Produktkreisläufe und Geschäftsmodelle – von neuartigen Geschäftsmodellen über unternehmensübergreifende Kooperationen bis hin zu praxistauglichen Bewertungswerkzeugen. Fokussiert wird auf Projekte, die darauf zielen, die Lebensdauer von Produkten – die mit hohem Material- und Energieaufwand hergestellt wurden – zu verlängern und die Intensität ihrer Nutzung zu steigern. Die Forschung erprobt beispielhaft unternehmensübergreifende Kreisläufe und Kaskadensysteme für relevante Produkte, bezieht neue Designlösungen mit verbesserter Kreislauffähigkeit ein und sorgt mit innovativen Geschäftsmodellen für wirtschaftliche Anreize zur Umsetzung der Innovationen. Die großen Potenziale der Digitalisierung für die Kreislaufwirtschaft sollen genutzt werden. Engpässe für die Umsetzung von neuen Kreislaufösungen, wie juristische Aspekte bei Gewährleistungsfragen oder mangelnde Verbraucherakzeptanz bei Gebrauchsgütern, werden ebenfalls adressiert.

Prioritäre Forschungsthemen

Neuartige Prozesse, Verfahren und Dienstleistungen zur Kreislaufschließung von Produkten bzw. Komponenten und zum Ressourcenerhalt

Forschungsbedarf besteht zum Beispiel an systemischen Ansätzen, die Lücken im Kreislauf schließen und vorhandene Teillösungen und Technologien berücksichtigen. Bei der Verlängerung der Nutzungsphase spielt auch die Messung und Absicherung der Zuverlässigkeit eine wichtige Rolle. Vorteile von regionalen Lösungen und Kooperationen sollten geprüft werden. Zu berücksichtigen ist auch die Einsteuerung in leistungsfähige Recyclingverfahren, nachdem die Nutzungsphase ausgeschöpft ist.

Innovative Refabrikationstechnologien und -prozesse

Diese umfassen z. B. Vor-Ort-Entscheidungsunterstützung zum Handling von Altprodukten in Echtzeit oder Produkt-Informationssysteme für eine Optimierung von Demontageprozessen. Gemeint ist ebenfalls eine Digitalisierung der Produkte zum Steuern der Zuordnung zu Anlagen oder Ausschleusung aus dem Kreislauf.

Reverse Logistiksysteme

Neuartige Konzepte zur vernetzten und unternehmensübergreifenden Gestaltung der Rückführungslogistik bzw. „Closed Loop Supply Chains“ sind für die Planung und Steuerung von Produkt- und Komponentenkreisläufen von erheblicher Bedeutung. Logistisch begründete Rebound-Effekte sind dabei zu vermeiden.

Unternehmensübergreifende Kooperationen

Dazu zählen beispielsweise Akteurskooperationen und Geschäftsmodelle, in denen Produkte und Stoffe sowie Abfälle oder Abgase eines Unternehmens als Input-Material für ein anderes Unternehmen genutzt werden. Entwicklungsbedarf besteht u. a. für Tools, die kleine und mittelständische Unternehmen dabei unterstützen, Komponenten und Materialien optimal zu verwerten.

Neue Geschäftsmodelle oder Kooperationsformen

Gefragt sind Geschäftsmodelle als eigenständiger Forschungsgegenstand oder als integrativer Bestandteil von Forschungen zu innovativen Produktkreisläufen. Beispielhaft seien hier hybride Wertschöpfung mit gekoppelten Dienstleistungen, gemeinsame Nutzung von Produkten oder Infrastrukturen sowie die Nutzung von digitalen Plattformen genannt. Auch innovative „Bottom up“-Ansätze analog zu den bekannten Repair Cafés und deren Integration in die vorhandene Infrastruktur, betriebswirtschaftliche Forschung zur Bewertung von neuen Geschäftsmodellen und Unternehmen gehören dazu.

Identifizieren und Beheben von Engpässen für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft und von Geschäftsmodellen

Dieser Schwerpunkt umfasst Lösungsansätze zur verbesserten Bereitstellung von Produktinformationen durch Hersteller an unabhängige Dienstleister bzw. von Dienstleistern oder anderen Akteuren untereinander, die beispielsweise für Reparaturdienstleistungen durch Dritte erforderlich sind.

Darüber müssen juristische Aspekte und Gewährleistungsfragen berücksichtigt werden; die Markttransparenz zum Zustand von Gebrauchsgütern muss verbessert werden; ggf. Entwicklung entsprechender Testverfahren sowie von Governanceansätzen und Anregungen für die Weiterentwicklung des Rechtssystems.

Erforschung sozial-psychologischer Barrieren – Akzeptanzforschung

Was hält Menschen davon ab, gebrauchte Geräte statt neuer Geräte zu erwerben? Forschungsprojekte können z. B. Aktionen sein, die Handlungsmaxime „Reparatur statt wegwerfen und neu kaufen“ bei Jugendlichen populär zu machen.

Praxistaugliche Bewertungswerkzeuge für erwartete Umweltverbesserungen

Wie lassen sich neue Geschäftsmodelle bewerten? Auch die Einbindung in Reportingmechanismen ist Forschungsthema, ebenso Handlungsempfehlungen für ökonomische Steuerungsinstrumente und Anreizsysteme.





Optimierte Material- und Stoffkreisläufe

Das Potenzial für die ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft

Optimierte Material- und Stoffkreisläufe setzen an den Abfallprodukten einer Kreislaufwirtschaft an. Zwar ist es vorrangiges Ziel der Kreislaufwirtschaft, Produkte und deren Komponenten möglichst lange im Wirtschaftskreislauf zu halten. Doch fallen auch während der Produktion und Wiederaufarbeitung der Produkte und an ihrem Lebensende weitere Material- und Stoffströme an. Diese können nicht endlos wieder in den Kreislauf der Produktion geführt werden. Für sie braucht es eine neue Art der Wertschöpfung durch Recycling. Auch für diese Stoffströme sollen ökologisch und ökonomisch tragfähige Lösungen entwickelt werden.

Dabei soll die Forschung verschiedene Verwertungsstrategien ganzheitlich bewerten und dabei die Rohstoff- und Energiepreise, Technologieentwicklungen, Mengen und Qualitäten bzw. Spezifikationen der anschließenden stofflichen und energetischen Verwertungsverfahren und ihre Chancen am Markt betrachten. Zu berücksichtigen sind die Auswirkungen von Zukunftstrends wie beispielsweise der 3D-Druck oder zunehmende Verwendung von Faserverbundwerkstoffen auf das Abfallmanagement. Erforderlich sein wird oftmals die Entwicklung neuer Tools für die Entscheidungsunterstützung für eine optimale Verwertungsstrategie und zur Förderung der Akteurseinbindung und Vernetzung innerhalb der Entsorgungskette.

Das Ziel der Forschungsförderung

Vor allem für ausgewählte Stoffströme mit hoher Umweltrelevanz oder wirtschaftsstrategischer Bedeutung, für die ein hochwertiges Recycling bislang noch nicht im erstrebenswerten Umfang stattfindet, sollen Lösungsansätze entwickelt werden. Ein erhöhtes Angebot an Sekundärrohstoffen kann nicht nur Versorgungslücken und Preisschwankungen bei Rohstoffen abmildern. Es soll gleichzeitig zur Schonung von Ressourcen beitragen. Prioritäre Stoffströme der Forschungsförderung sind: Kunststoffe, wirtschaftsstrategische Rohstoffe sowie mineralische Reststoffe.

Kunststoffe

Kunststoffe werden für vielfältige Anwendungen eingesetzt und prägen unser modernes Leben wie kaum ein anderes Material. Eine Verdopplung der weltweiten Kunststoffproduktion von derzeit jährlich 311 Millionen Tonnen wird innerhalb der nächsten 20 Jahre erwartet, eine Vervierfachung bis 2050. Verpackungskunststoffe nehmen den größten Anteil ein, gefolgt von Kunststoffen in Gebäuden sowie im Elektronik- und Automobilbereich.

Weltweit können nur fünf Prozent des Materialwertes von Verpackungskunststoffen durch bestehende

Recyclingsysteme erhalten werden. Die Wiederverwendung von Kunststoffzyklaten aus Elektroaltgeräten, die etwa 30 Prozent hochwertige technische Kunststoffe enthalten, in neuen elektronischen Geräten, liegt derzeit bei nur einem Prozent.

Das Recycling von Kunststoffen steht – im Vergleich zu vielen anderen Materialien – vor besonderen Herausforderungen, die zur gegenwärtig unbefriedigenden Entsorgungssituation mit einem geringen Recyclinganteil führen. Zum einen gibt es sehr komplexe Erfassungssysteme für verschiedene Siedlungsabfälle, bei denen Kunststoffe nur einen kleineren Anteil darstellen. Eine weitere Herausforderung sind mögliche Degradation und Qualitätsverlust der Kunststoffe im Recyclingprozess. Damit ist ein Ersatz von Primärmaterial durch Rezyklat nur begrenzt möglich bzw. nur in geringwertigen Anwendungen, für die kein Massenmarkt existiert.

Eine werkstoffliche Kunststoffverwertung, bei der Kunststoffe als Material erhalten bleiben, weist aus Umweltsicht Vorzüge gegenüber rohstofflichen Ansätzen auf, die das Material in Grundstoffe zerlegt. Beim werkstofflichen Recycling bleibt die zur Herstellung des Kunststoffs aufgewendete Prozessenergie erhalten. Das gilt jedoch nur, wenn dabei eine hohe Qualität der Sekundärrohstoffe sichergestellt werden kann.

Prioritäre Forschungsthemen

1. Werkstoffliche Verfahren

Optimierung von werkstofflichen Verfahren

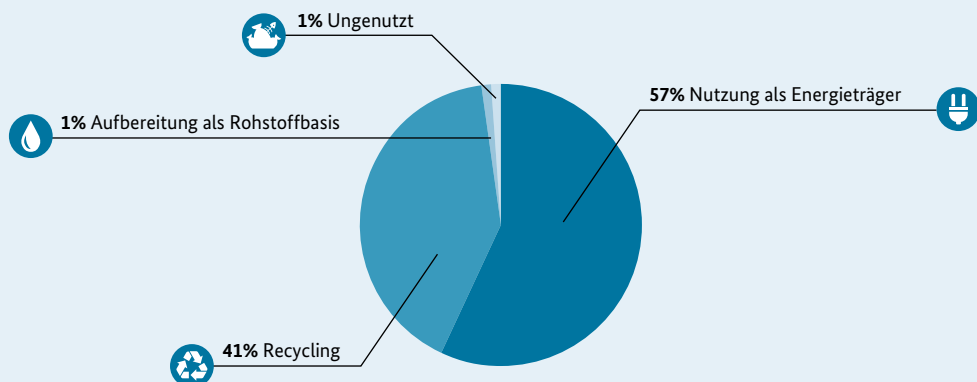
Werkstoffliche Verfahren sind zu evaluieren und zu optimieren. Leistungsfähigere Reinigungsverfahren für hochreine Rezyklate sind zu entwickeln. Neben Post-Consumer-Abfällen sind Kunststoffabfälle aus der industriellen Produktion zu berücksichtigen, da diese ein großes Potenzial für ein hochwertiges werkstoffliches Recycling bergen. Stoffströme sollen gebündelt werden, damit kritische Mengen erreicht bzw. die Wirtschaftlichkeit erhöht wird. Bei der Sammlung und Erfassung von Post-Consumer-Abfällen ist zu u. a. zu klären, welche Kunststoffe getrennt erfasst werden können oder wie mit der Bedruckung von Folien oder der Beklebung von Kunststoffen mit Etiketten umgegangen werden soll.

Konzepte, Technologien und industrielle Demonstration für das gemeinsame Recycling von Kunststoffen und werthaltigen anorganischen Additiven

Beim Kunststoffrecycling sind die Rückgewinnung und Vermarktung wertvoller Additive wie z. B. Antimon ebenso einzubeziehen wie die energetische Verwertung nicht geeigneter Restfraktionen.

Recycling-Potenzial von Kunststoffabfällen in Deutschland

Jährlich fallen in Deutschland ca. 5,7 Mio. Tonnen Kunststoffabfälle an.



Hochwertiges Recycling komplexer Verbund- und Hybridwerkstoffe

Lösungsansätze müssen vor allem für carbonfaser-verstärkte Kunststoffe (CFK) oder Stahl-Kunststoff-sandwiches gefunden werden, die selbst als Neuschrotte derzeit nicht effektiv recycelt werden können. Forschungsbedarf besteht z. B. im Bereich des „Debonding on demand“ für Materialkombinationen. In Ergänzung zur sensorgestützten Identifizierung und Trennung von Kunststoffen ist die chemisch-physikalische Markierung von Kunststoffen weiter zu entwickeln.

Neue Ansätze zur Förderung der Nachfrage nach bzw. des Einsatzes von Post-Consumer-Kunststoffrezyklaten

Dazu gehören die Entwicklung eines Klassifizierungssystems für die Qualität und Einsatzeignung von Post-Consumer-Kunststoffrezyklaten sowie innovative Anwendungen für Rezyklate.

2. Rohstoffliche Verfahren

Weiterentwicklung innovativer marktfähiger Verfahren zum rohstofflichen Recycling

Diese Verfahren zielen auf die Bereitstellung von Ausgangsstoffen für die chemische Industrie. Die

Potenziale dezentraler Ansätze mit kleinen Anlagen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit bzw. von Kombinationseffekten, wie der gleichzeitigen Rückgewinnung von Antimon oder anderen Additiven, sind zu prüfen.

3. Design zukunftsfähiger Kunststoffe

Forschung zu einem sogenannten „Superpolymer“

Dieses soll die Funktion heutiger Kunststoffe erfüllen und gleichzeitig über eine deutlich bessere Recyclingfähigkeit verfügen – unter Beachtung der Anschlussfähigkeit zu bestehenden Entsorgungsverfahren und Infrastrukturen.

Reduktion der Komplexität von Kunststoffabfällen

Standardisierung von Kunststoffkomponenten bzw. Entwicklung eines modularen Baukastens von Monomeren für die Synthese leicht zu zerlegender Kunststoffe.

Substitution von recycling-problematischen Zusatzstoffen

Es sind kreislauffähige Additive z. B. für den Einsatz als Flammenschutzmittel zu entwickeln, die ihre Funktionalität über mehrere Verwendungs- und Recyclingkreisläufe erhalten sowie Spezial-Additive zur Stabilisierung von Kunststoffrezyklaten.





Wirtschaftsstrategische Rohstoffe

Der steigende Bedarf an wirtschaftsstrategischen Rohstoffen stellt die Wirtschaft vor große Herausforderungen. Die Recyclingwirtschaft für diese Rohstoffe steht deshalb im Fokus des vorliegenden Forschungskonzepts. Zwar wird für Elektronikmetalle wie Gallium, Germanium oder Indium auch langfristig Abbau im Bergwerk erforderlich sein, um den steigenden Bedarf der Industrie in diesen Wachstumsbranchen und Hightech-Anwendungen abzudecken. Das Recycling von wirtschaftsstrategischen Rohstoffen kann aber mögliche Versorgungsengpässe und Preisschwankungen deutlich abmildern.

Der Schwerindustrie mit der Produktion von Spezialstählen, Aluminiumverhüttung sowie Bunt-, Sonder- und Edelmetallaufbereitung kommt an einem hochentwickelten Industriestandort wie Deutschland eine zentrale Bedeutung für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft zu. Sie ist der Schlüssel, um Sekundärrohstoffe in ausreichender Qualität und Menge effizient zu verwerten und damit den Primärrohstoffeinsatz zu reduzieren. Wertstoffe, die nur in geringer Konzentration enthalten sind, gehen bisher häufig durch Sortierung und Aufbereitung verloren oder finden sich in Nebenprodukten oder Abfällen der Aufbereitung wieder. Nur in wenigen Fällen werden sie bereits im Kreislauf geführt, beispielsweise der Anodenschlamm aus der Kupferraffination. Neben den wirtschaftsstrategischen Rohstoffen selbst kann auch die Verfügbarkeit der notwendigen Infrastruktur für deren Verarbeitung und Recycling kritisch sein. So gibt es in Deutschland derzeit z. B. nur noch eine Entzinkungsanlage.

Prioritäre Forschungsthemen

Derzeitige und zukünftige Stoffströme

Forschungsbedarf besteht bei der Identifizierung und Quantifizierung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe im bestehenden Wirtschaftskreislauf sowie bei der Prognose der zu erwartenden Änderungen von Mengen und Inhaltsstoffen. Es ist zu klären, welche Qualitätsanforderungen an Post Consumer Metalle bestehen. Es sollen ungenutzte und neue potenzielle Stoffströme erkannt werden. Technologien und Maßnahmen gegen dissipative Verluste gilt es zu entwickeln.

Weiterentwicklung metallurgischer Aufbereitungsverfahren

Dies betrifft insbesondere Seltene Erden und andere Metalle, die in kleinen Rohstoffanteilen in komplexen Produkten verbaut werden und für die es bislang aufgrund ihrer thermodynamischen Eigenschaften nur beschränkt Recyclingverfahren gibt. Forschungsbedarf besteht ebenso für innovative Kombinationen mechanischer, pyro- und hydrometallurgischer Aufbereitungsverfahren.

Kreislaufschließung bei Legierungen und Superlegierungen

Verluste an wertvollen wirtschaftsstrategischen Rohstoffen entstehen, wenn sich Legierungselemente in Konverter- oder Elektroofenschlacke anreichern und anschließend keine gezielte Verwendung mehr erfolgt. Die Lithium- bzw. Scandium-Dotierung aus

Leichtbauanwendungen der Luftfahrtindustrie verursacht Probleme bei der Weiterverarbeitung des recycelten Aluminiums. Um die Kreislaufschließung zu verbessern, müssen legierungsspezifische Trennungen unter industriellen Bedingungen in Deutschland durchführbar sein, um Verbundmetalle und Hybride mit definierten Eigenschaften zu erhalten. Hierzu sind beispielsweise innovative Sortier- und Analysetechniken, verbunden mit neuen Ansätzen in der Metallurgie erforderlich.

Gesamtmaximierung der Wertschöpfung

Die Wettbewerbssituation in bestehenden Recyclingprozessen muss durch intelligente Prozesse und Recyclingkaskaden überwunden werden. Es braucht organisatorische Innovationen zur Weitervermarktung aller werthaltigen Fraktionen aus dem Recycling.

Schließen bestehender Datenlücken

Forschungsprojekte im Bereich der Metallurgie sollen darüber hinaus auch Beiträge liefern, um bestehende Datenlücken, z. B. auf dem Gebiet der Lösungsschemie, Thermodynamik und Verteilungskoeffizienten bei Spurenelementen zu schließen und so die Aussagekraft und Genauigkeit von Simulationen zur Ressourceneffizienz von Recyclingverfahren oder von Veränderungen im Produktdesign zu verbessern.

Mineralische Stoffe

Eine der größten Herausforderungen der ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft – die Menge betreffend – ist das Recycling bzw. die Verwertung mineralischer Abfallstoffe. Diese stammen insbesondere aus dem Baubereich, aus metallurgischen Anlagen und aus der Verbrennung von Abfällen und Ersatzbrennstoffen. Auch bei der Aufbereitung von Altfahrzeugen oder Elektroaltgeräten entstehen mineralische Restfraktionen, die es hochwertig zu verwerten gilt. Viele der genannten Stoffströme führen immer noch erhebliche Restmengen an Metallen. In Flugstäuben von Müllverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken werden sich zukünftig verstärkt versorgungskritische Metalle wie Silber und Zinn anreichern, die aus komplexen Kleingeräten, RFID-Tags oder Nanopartikel-impregnierten Textilien stammen.

Erste Verfahrensansätze zur Metallrückgewinnung aus der Feinkornfraktion von Rostaschen sind erfolgversprechend. Ohne wirtschaftliche und ökologisch tragfähige Verwertungsoptionen für die verbleibende fein- bis feinstkörnige mineralische Restfraktion ist eine Metallrückgewinnung oft nicht umsetzbar.





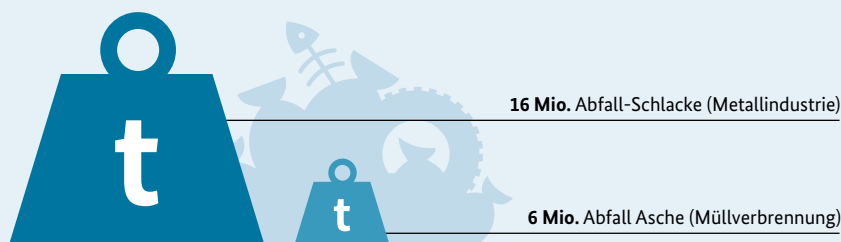
Die vom Bundeskabinett beschlossene aktuelle Mantel- bzw. Ersatzbaustoffverordnung und darin festgelegte neue Grenzwerte für die Verwertung von Recyclingbaustoffen werden sich auf zukünftige Einsatzmöglichkeiten von mineralischen Reststoffen deutlich auswirken, z. B. im Straßen- und Landschaftsbau. Die energetische Sanierung des Wohngebäudebestandes nach Energieeinsparverordnung (EnEV) wird künftig ebenfalls zusätzliche Stoffströme generieren, die schadlos und ordnungsgemäß zu verwerten sind. Wenn keine sinnvollen Verwertungsoptionen für mineralische Reststoffe erschlossen werden können, wird sich dies auf die Deponiekapazitäten in Deutschland auswirken.

Eine verbesserte Kreislaufwirtschaft, die mineralische Abfälle als Sekundärrohstoffe nutzt, ist daher von erheblicher ökologischer und wirtschaftlicher

Bedeutung. Zementwerke können ideale Absatzkanäle für mineralische Reststoffe sein, die Primärrohstoffe im Rohmehlbereich ersetzen. Dafür sollen im Umgang mit enthaltenen zementkritischen Störstoffen Lösungen entwickelt werden. Erste Erfahrungen mit hochwertigen Verwertungsansätzen, z. B. über den Einsatz von Recyclingbeton liegen zwar vor. Es fehlen hier u. a. aber noch weitergehende Erkenntnisse für die unterschiedlichen Einsatzfelder. Das gilt insbesondere für den Hochbau, betrifft aber auch die notwendige flächendeckende Akzeptanz insgesamt und die Integration in entsprechende Regelwerke. Die Vielzahl der verantwortlichen Akteure bei Bau- und Rückbaumaßnahmen mit unterschiedlichem Aufgabenumfang und -tiefe hat darüber hinaus eine bislang unzureichende Berücksichtigung des Recyclinggedankens bei der Planung von Gebäuden zur Folge.

Recycling-Potenzial mineralischer Stoffe

Jährlich werden rund 460 Mio. Tonnen abgebaut. Dabei entstehen ca. ...



Prioritäre Forschungsthemen

1. Baustoffbereich

Systematische Ansätze sowie Strategien für Materiallager in Gebäuden und Infrastruktureinrichtungen

Es braucht Strategien, die vorhandene Wertstoffe beim Rückbau nutzen und eine Separierung der nicht konformen Materialströme zielgerichtet umsetzen. Dazu gehören auch die Identifizierung und Quantifizierung der mineralischen Sekundärrohstoffe im bestehenden Wirtschaftskreislauf; die Prognose der zu erwartenden Änderungen von Mengen und Inhaltsstoffen; das Erkennen ungenutzter und neuer mineralischer Stoffströme.

Zukunftsorientierte Aufbereitungsverfahren für multifunktionale Bau- und Werkstoffe

Durch die zunehmende Verwendung multifunktionaler Bauteile und Werkstoffe in modernen Gebäuden werden Materialkombinationen erzeugt, die nicht mit den herkömmlichen Verfahren zum Baustoff-Recycling verwertet werden können. Für ein hochwertiges Recycling der mineralischen Stoffströme und der neu eingebauten Funktionsmaterialien sollen angepasste Verfahren entwickelt werden.

2. Schlacken, Aschen und Stäube

Untersuchungen zur Steuerung von Hochtemperaturprozessen

Ziel ist, das Ausbringen bestimmter Komponenten in Schlacke-, Asche- und Staubphasen in metallurgischen Anlagen, Zementwerken, Verbrennungsanlagen und anderen Baustoff-Herstellungsprozessen zu steuern. Dies soll durch Beeinflussung von Ofenatmosphären, Zuschlagstoffen im thermischen Prozess und Prozessführung geschehen.

Beeinflussung von Schlackensystemen in metallurgischen Prozessen in der Schmelze

Ziel ist die Konzentration später abzutrennender synthetischer Mineralphasen, die eine zusätzliche Metallrückgewinnung und eine Abreinigung der Mineralstoffe für den Einsatz in hochwertigen

bautechnischen Anwendungen ermöglichen. Eine Kombination mit nachgeschalteten Aufbereitungs- und Verwertungsprozessen wird angestrebt.

Entwicklung von kombinierten Prozessen zur Aufbereitung und Konfektionierung mineralischer Stoffströme aus Abfällen

Diese mineralischen Stoffströme sollen anschließend im Rohmehlbereich von Zementwerken eingesetzt werden; die hierbei entstehenden Bypass-Stäube zur Ausschleusen zementkritischer Inhaltsstoffe sollen aufbereitet werden.

Entwicklung von Verfahren und Produkten zur Erzeugung von hochwertigen Baustoffen bzw. Baustoffkomponenten aus entsprechend aufbereiteten mineralischen Abfallfraktionen

Die Produkte erfüllen die Anwenderspezifikationen, reduzieren die Mengen an zu beseitigenden Abfallströmen signifikant und vermeiden eine Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf. Mögliche Auswirkungen zukünftig erwarteter Veränderungen in der Zusammensetzung von Flugstäuben sind abzuschätzen.

Entwicklung von Konzepten für die Rückgewinnung ungenutzten Gipses aus Abfällen

Um zukünftige Versorgungslücken mit Gipsen aus Rauchgas-Entschwefelungs-Anlagen, REA-Gipsen, zu kompensieren, die aus dem Rückgang im Bereich der Kohlekraftwerke resultieren, sollen tragfähige Konzepte für das Recycling von Gips entwickelt werden.





Flankierende Maßnahmen

Offener Ideenwettbewerb zur Erschließung zusätzlicher Ressourceneffizienzpotentiale

Aufgrund der dynamischen Entwicklung des Themas ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft im weitesten Sinne und seiner Treiber eröffnen sich neue Optionen für disruptive Innovationen abseits der heute absehbaren Technologiepfade.

Vor diesem Hintergrund sollen über die in diesem Forschungskonzept genannten vier Forschungsschwerpunkte hinaus hochinnovative, risikobehaftete und forschungsintensive Projektideen in einem Ideenwettbewerb ausgewählt werden.

Mit dem Ideenwettbewerb sollen Projekte realisiert werden, die

- hochgradig innovativ sind und für disruptive Innovationen stehen. Die Projektideen sollen völlig neue Technologiepfade, gegebenenfalls in Verbindung mit einem Paradigmenwechsel und sozialen Innovationen erschließen

- besonders risikobehaftet und forschungsintensiv sind
- auch aus dem bisher nicht kommerziell etablierten Umfeld heraus entwickelt werden, z. B. von Kleinunternehmen, Gründern, Nachwuchsforschergruppen oder Vereinen. Diese können Lösungen generieren, die von Großunternehmen und anderen etablierten Akteuren nicht in Angriff genommen werden.
- besonders hohe Beiträge zur Kreislaufwirtschaft, zu Reuse- und Recyclingquoten, zur Steigerung der Gesamtrohstoffproduktivität sowie ggf. zu weiteren Nachhaltigkeitsindikatoren erwarten lassen

Transnationale Kooperation im Rahmen des ERA-Net ERA-MIN 2

Transnationale Projekte unter Mitwirkung von Partnerinstitutionen aus europäischen und außereuropäischen Ländern sollen als Teil des Konzeptes „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“ im Rahmen der gemeinsamen Förderbekanntmachung des ERA-Nets Cofund on Raw Materials (ERA-MIN 2) unterstützt werden. Im

Rahmen von ERA-MIN 2 werden Forschungsthemen unter dem Dach der Kreislaufwirtschaft adressiert. Themen sind die nachhaltige Versorgung mit Primärrohstoffen, kreislaufwirtschaftsgerechtes Produktdesign, ressourceneffiziente Produktion sowie das Recycling von Produkten und Komponenten.

Weitere Fördermaßnahmen mit Bezug zur Kreislaufwirtschaft

Auch in thematisch breiteren laufenden Fördermaßnahmen – insbesondere „KMU-innovativ: Ressourceneffizienz und Klimaschutz“ und „r+Impuls“ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Impulse für industrielle Ressourceneffizienz“ – sollen Themen der ressourcen-effizienten Kreislaufwirtschaft aufgegriffen werden.

Mit der Förderrichtlinie KMU-innovativ verfolgt das BMBF das Ziel, das Innovationspotenzial von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) im Bereich der Spitzenforschung zu stärken. Im Themenschwerpunkt Rohstoffeffizienz können neben Rohstofftechnologien und Recyclingverfahren zur Steigerung der Ressourceneffizienz auch weitere Themen wie die ressourcen-effiziente Gestaltung des Produktdesigns gefördert werden. KMU sollen in jedem Fall zentraler Treiber der Entwicklung und Nutzer der Ergebnisse sein.

Ziel der Förderrichtlinie „r+Impuls“ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Impulse für industrielle Ressourceneffizienz“ ist die Überwindung bestehender Hemmnisse bei der industriellen Umsetzung und Verbreitung von Effizienztechnologien durch gezielte FuE-Impulse. Förderfähig sind FuE-Aktivitäten im Rahmen industrieller Entwicklungs- und Innovationsprojekte, um risikobehaftete technologische und nicht-technologische Fragestellungen im Zusammenhang mit der Maßstabsvergrößerung, Optimierung und Auslegung von Komponenten und Anlagen, erforderlichen Prüf- und Zulassungsverfahren, Entwicklung von neuen Geschäftsmodellen und branchenübergreifenden Anwendungsmöglichkeiten zu untersuchen. Neben Rohstofftechnologien, Recycling oder die stoffliche Nutzung von CO₂ sind auch Themen zur Umsetzung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft, wie die Kreislaufführung von Altprodukten und deren Komponenten Gegenstand der Förderung.

Ansprechpartner für das Forschungskonzept „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft“:

Bundesministerium für Bildung und Forschung
Referat Ressourcen und Nachhaltigkeit
53170 Bonn

Dr. Helmut Löwe
Tel.: 0228/9957-2110
E-Mail: helmut.loewe@bmbf.bund.de

Projekträgerschaft Ressourcen und Nachhaltigkeit
Projekträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH
Zimmerstraße 26-27
10969 Berlin

Dr. Andreas Jacobi
Tel.: 030/20199-485
E-Mail: a.jacobi@fz-juelich.de

Anja Degenhardt
Tel.: 030/20199-406
E-Mail: a.degenhardt@fz-juelich.de

Quellen

Literatur

Bundesministerium für Bildung und Forschung: r²
Innovative Technologien für Ressourceneffizienz –
Rohstoffintensive Produktionsprozesse (2010)

Bundesministerium für Bildung und Forschung: r³
Innovative Technologien für Ressourceneffizienz –
Strategische Metalle und Mineralien (2013)

Bundesministerium für Bildung und Forschung: r⁴
Innovative Technologien für Ressourceneffizienz –
Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer
Rohstoffe (2016)

Bundesministerium für Bildung und Forschung:
KMU-innovativ: Rohstoffeffizienz (2007ff.)

Bundesministerium für Bildung und Forschung:
Rahmenprogramm Forschung für nachhaltige
Entwicklung FONA³ (2014)

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau
und Reaktorsicherheit: Deutsches Ressourcen-
effizienzprogramm ProgRess II (2016)

Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (Hrsg):
Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der
Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland (2013)

Briese, D. et al, TK-Verlag Neuruppin (Hrsg): Recycling
und Rohstoffe, Band 5, Der Markt für MVA-Schlacken
(2012)

Consultic Marketing & Industrieberatung: Post-Consumer
Plastic Waste Management in European Countries
2014 – EU 28 + 2 Countries, Final Report, Alzenau (2015)

Consultic Marketing & Industrieberatung: Produktion,
Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in
Deutschland 2013, Alzenau (2014)

Dehoust, G. et al.: Aufkommen, Qualität und Verbleib
mineralischer Abfälle (2008)

Ellen MacArthur Foundation (EMAF): Growth within:
A circular economy vision for a competitive Europe-
Waste & Resources Action Programme (WRAP):
Economic Growth Potential of More Circular
Economies (2015)

EU KOM (Hrsg): Den Kreislauf schließen – Ein Aktions-
plan der EU für die Kreislaufwirtschaft (2015)

European Environment Agency (EEA) (Hrsg): Circular
Economy in Europe (2016)

Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company:
The New Plastics Economy: Rethinking the future of
plastics report by the World Economic Forum (2016)

OECD (Hrsg): Municipal Waste, OECD Environment
Statistics (2015)

PlasticsEurope (Hrsg): Plastics – the Facts 2014/2015:
An analysis of European plastics production, demand
and waste data (2015)

Roland Berger GmbH (Hrsg.): Die Digitalisierung der
GreenTech-Branche: Handlungsbedarfe für Unter-
nehmen der Umwelttechnik und Ressourceneffizienz
in Deutschland (2016)

Verband der Chemischen Industrie (Hrsg): Abfall-
management in der Chemischen Industrie (2015)

Links

Forschungskonzept Ressourceneffiziente Kreislaufwirt-
schaft: https://www.fona.de/ressourceneffiziente_kreislaufwirtschaft-22596.html

Fördermaßnahme ERAMIN 2: https://www.fona.de/ERA-MIN_2-21839.html

Fördermaßnahme KMU-innovativ: <https://www.fona.de/de/kmu-innovativ-rohstoffeffizienz-14221.html>

Fördermaßnahme r+Impuls: www.fona.de/de/r-impuls-18039.html

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Ressourcen und Nachhaltigkeit
53170 Bonn

Bestellungen

schriftlich an
Publikationsversand der Bundesregierung
Postfach 48 10 09
18132 Rostock
E-Mail: publikationen@bundesregierung.de
Internet: <http://www.bmbf.de>
oder per
Tel.: 030 18 272 272 1
Fax: 030 18 10 272 272 1

Stand

Juni 2018

Text

BMBF/PtJ

Gestaltung

Projekträger Jülich (PtJ),
Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck

Druck- und Verlagshaus Zarbock
GmbH & Co. KG

Bildnachweise

Titel: shansekala/iStock/thinkstock
S. 2/3: ©Friedberg – stock.adobe.com
S. 6/7: ©StockPhotoPro – stock.adobe.com
S. 8/9: Getty Images/Westend61
S. 10: Besjunior/iStock/thinkstock
S. 12/13: OlgaSalt/iStock/thinkstock
S. 14: ©Gorodenkoff Productions OU – stock.adobe.com
S. 15: kadmy/istock/thinkstock
S. 16: ©golubovy – stock.adobe.com
S. 17: ©pressmaster – stock.adobe.com
S. 19: ©Maik – stock.adobe.com
S. 21: ©REDPIXEL – stock.adobe.com
S. 22: ESE.COM
S. 24: Getty Images/Echo
S. 25: TSR Recycling GmbH & Co. KG
S. 26: ©industrieblick – stock.adobe.com
S. 27: Harald Schmidt/iStock/thinkstock
S. 29: N-sky/iStock/thinkstock
S. 30: ©BestForYou – stock.adobe.com

Diese Publikation wird als Fachinformation des Bundesministeriums für Bildung und Forschung kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

