



Technische Universität München

Lehrstuhl für Rohstoff- und
Energietechnologie

r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien

Informationspapier zum Forschungs- und
Entwicklungsbedarf der gleichnamigen
BMBF-Fördermaßnahme

ERSTELLT DURCH

Technische Universität München
Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie
Wissenschaftszentrum Straubing
Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich
Straubing

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

November 2010

Informationspapier zur BMBF-Fördermaßnahme

„r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“

Auftraggeber

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI)

im Rahmen des Integrations- und Transferprojekts
des BMBF-Förderschwerpunkts
„r² – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz
– Rohstoffintensive Produktionsprozesse“

FKZ 033R026

Auftragnehmer

Technische Universität München

Lehrstuhl für Rohstoff- und Energietechnologie
Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich
Petersgasse 18
94315 Straubing
Tel.: 09421 187 - 100
Fax: 09421 187 - 111
E-Mail: martin.faulstich@wzw.tum.de
Web: <http://www.rohstofftechnologie.de>

Unter Mitwirkung von

Dr. Mario Mocker
Dipl.-Ing.(FH) Stephanie Pfeifer
Dipl.-Ing.(FH) Markus Köglmeier
Dipl.-Ing.(FH) Sebastian Egner, M.Sc.

Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autoren.

November 2010

Inhalt

A	Einführung und Motivation	1
1	Absicht dieses Informationspapiers	2
2	Strategische Rohstoffe als Basis der Wirtschaft	2
2.1	Verteilungsgerechtigkeit und Wirtschaftswachstum	3
2.2	Statische Reichweite.....	4
2.3	Strukturelle Knappheiten.....	4
2.4	Steigender Bedarf durch Technologieentwicklung.....	6
3	Politische Ziele und Strategien in Deutschland und in der EU.....	8
4	Erläuterungen	10
4.1	Begriffsbestimmungen	10
4.2	Bewertung der Rohstoffknappheit im Vergleich	11
B	Fördermaßnahme „r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien“	15
1	Die Fördermaßnahme im Überblick	16
1.1	Optimierung von Wertschöpfungsketten als Ansatzpunkt	16
1.2	Übersicht der Forschungs- und Förderschwerpunkte.....	19
1.3	Systematik bei der nachfolgenden Konkretisierung.....	21
2	Vorstellung und Konkretisierung der Förderschwerpunkte	22
2.1	Nachhaltige Nutzungsstrategien für strategische Metalle und Industriemineralien.....	22
2.1.a	Recycling strategischer Metalle und Industriemineralien	22
	Stand der Technik.....	22
	F&E-Bedarf	32
	F&E-Aspekt „Recycling 1“: Identifikation Stoffströme.....	33
	F&E-Aspekt „Recycling 2“: Erfassungs- und Rückführungssysteme	34
	F&E-Aspekt „Recycling 3“: Rückführung strategischer Rohstoffe.....	35
	F&E-Aspekt „Recycling 4“: Kaskadennutzung	36
	F&E-Aspekt „Recycling 5“: Aufkonzentration	37
	F&E-Aspekt „Recycling 6“: Effiziente Nutzung dissipative Verwendung.....	38
	F&E-Aspekt „Recycling 7“: Recyclingtechnologien	39
	F&E Aspekt „Recycling 8“: Trennung komplexer Materialverbunde	40
	F&E-Aspekt „Recycling 9“: Gleichzeitige Erfassung von Wertstoffen	41
	F&E-Aspekt „Recycling 10“: Produkt-Dienstleistungskonzepte	42

2.1.b Substitution bzw. Einsparung strategischer Metalle und Industriemineralien.....	43
Stand der Technik.....	43
F&E-Bedarf	46
F&E-Aspekt „Substitution 1“: Technologische Substitution	48
F&E-Aspekt „Substitution 2“: Einsparungen Produktionsprozess	49
F&E-Aspekt „Substitution 3“: Optimierung Wertschöpfungsketten	50
F&E-Aspekt „Substitution 4“: Funktionale Substitution.....	51
F&E-Aspekt „Substitution 5“: Nachhaltigkeit bei Materialsubstitution	52
2.2 „Urban Mining“ – Rückgewinnung von Wertstoffen aus anthropogenen Lagern	53
2.2.a Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Infrastruktur	54
Stand der Technik.....	55
F&E-Bedarf	56
F&E-Aspekt „Infrastruktur 1“: Rohstoffbezogener Gebäudepass.....	57
F&E-Aspekt „Infrastruktur 2“: Ressourceneffiziente Infrastrukturen.....	59
F&E-Aspekt „Infrastruktur 3“: Exemplarischer Rückbau.....	61
2.2.b Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Altdeponien und Hüttenhalden sowie aus Verbrennungsrückständen	63
Stand der Technik.....	65
F&E-Bedarf	67
F&E-Aspekt „Ablagerung 1“: Hüttenhalden-Ressourcenkataster.....	68
F&E-Aspekt „Ablagerung 2“: Nachhaltiger Deponierückbau.....	69
F&E-Aspekt „Ablagerung 3“: Rückgewinnung Wertstoffe	70
F&E-Aspekt „Ablagerung 4“: Effiziente Wiederaufbereitungsprozesse.....	71
F&E-Aspekt „Ablagerung 5“: Abfallströme thermischer Prozesse	72
F&E-Aspekt „Ablagerung 6“: Identifikationstechnologien	74
F&E-Aspekt „Ablagerung 7“: Zwischenlagerung von Stoffströmen.....	75
F&E-Aspekt „Ablagerung 8“: Vermeidung Schadstoffanreicherung.....	76
2.3 Übergreifende Aspekte der Ressourceneffizienz – Methoden zur Bewertung der Ressourceneffizienz	78
Stand der Technik.....	78
F&E-Aspekt „Methoden 1“: Indikator Rohstoffproduktivität	80
2.4 Integration und Transfer.....	81
C Anhang.....	82
Literaturverzeichnis	83
Abbildungsverzeichnis	90
Tabellenverzeichnis	92

A Einführung und Motivation

1 Absicht dieses Informationspapiers

Die Förderrichtlinie "r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien" ist eine Konkretisierung der High-Tech-Strategie 2020 der Bundesregierung im Bedarfsfeld Klima / Energie innerhalb der Aktionslinie "Rahmenprogramm Forschung für nachhaltige Entwicklungen" – Ressourceneffizienz. Die Hightech-Strategie ist eine ressortübergreifende Initiative für eine zukunftsweisende Innovationspolitik.

Zur Erläuterung und Konkretisierung der Ausschreibungsunterlagen soll dieses Dokument weiterführende Informationen bereitstellen. Im einführenden Abschnitt A werden zunächst aktuell diskutierte Aspekte der Rohstoffversorgung benannt und daraus in Deutschland und in der EU abgeleitete politische Strategien vorgestellt. Weiterhin werden einige in der Diskussion verwendete Begriffe erklärt und vorangegangene Untersuchungen und Forschungsvorhaben zu der Thematik angeführt.

Im Abschnitt B wird spezifischer auf die aktuell ausgeschriebenen Forschungsvorhaben eingegangen. Dabei sollen sowohl die aktuellen Sachverhalte zum Stand von Forschung und Technik beschrieben werden, als auch der spezifische F&E-Bedarf durch ergänzende Beschreibungen und Beispiele untermauert werden. Potenzielle Antragsteller sollen durch dieses Dokument thematische Anregungen erhalten und ihre Projektvorschläge im Hinblick auf den Zweck und den Gegenstand der Fördermaßnahme beurteilen und abstimmen können. Die Beispiele erheben keinen verbindlichen Anspruch in Bezug auf eine mögliche Prioritätensetzung oder auf Vollständigkeit, das heißt es sind selbstverständlich auch andere Forschungsschwerpunkte denkbar.

2 Strategische Rohstoffe als Basis der Wirtschaft

Eine sichere und bezahlbare Versorgung mit Rohstoffen ist insbesondere für die Stabilität und den Wohlstand der Volkswirtschaft technologieführender Nationen wie Deutschland von großer Bedeutung. Neben den geläufigen Debatten um endliche Energieressourcen wie Erdöl und Erdgas rückt derzeit verstärkt die Frage nach der Bereitstellung von metallischen und mineralischen Rohstoffen in den Mittelpunkt der Diskussion. Die wettbewerbsfähige Produktion von Gütern in Deutschland ist insbesondere im High-Tech-Bereich vor allem vom internationalen Rohstoffhandel abhängig. Die Lage auf dem Rohstoffmarkt spitzt sich jedoch immer mehr zu, unter anderem weil wichtige Förderländer ihre nationalen Interessen in den Vordergrund stellen und die sich ihnen bietende Position zu ihren Gunsten nutzen. Vielfach werden gerade die für die Hochtechnologien benötigten Rohstoffe auch in politisch instabilen oder unsicheren Ländern gefördert. In aktuellen Pressemitteilungen wird bereits von einer nationalen Rohstoffknappheit gesprochen. Auch die deutsche Industrie warnt vor einem zukünftigen Rohstoff-Engpass. Aus diesem Grund muss neben der nachhaltigen Energieversorgung des Industriestandorts Deutschland auch die zukünftige Bereitstellung metallischer und mineralischer Rohstoffe auf Jahrzehnte hinaus sichergestellt werden. In Anlehnung daran hat die Bundesrepublik Deutschland die zukünftige Rohstoffversorgung zu einer nationalen Aufgabe erklärt. Die maßgeblichen Einflussfaktoren und Randbedingungen der Ressourcenproblematik werden nachfolgend detaillierter erläutert.

2.1 Verteilungsgerechtigkeit und Wirtschaftswachstum

Gemäß der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung („Brundtland-Kommission“) ist die „Nachhaltige Entwicklung“ eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten nachfolgender Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen (Bundesregierung 2002). Eine Steigerung der Rohstoffproduktivität und die damit einhergehende Reduktion der Nachfrage ist daher eine grundlegende Bedingung für das Erreichen der gesetzten Nachhaltigkeitsziele. Im Rahmen der fortschreitenden Globalisierung steht im Hinblick auf Ressourcen (Begriffsdefinitionen siehe S. 10f) in erster Linie der länderspezifisch meist sehr unterschiedliche Bedarf im Raum. Insbesondere der Vergleich des Pro-Kopf-Verbrauches von Energie und Ressourcen in Industrieländern mit dem Verbrauch in Entwicklungs- und Schwellenländern macht dies auffallend deutlich. Wie nachfolgende Abbildung zeigt, ist der durchschnittliche Energie- und Ressourcenverbrauch beispielsweise in den USA Pro-Kopf um ein 10- bis 20-faches höher als beispielsweise in einem Schwellenland wie Indien.

Um intergenerationelle Gerechtigkeit zu gewährleisten, ist es vorrangig notwendig, die maximalen Pro-Kopf-Verbrauchsmengen, insbesondere bei endlichen Rohstoffen, weltweit auf ein verträgliches Niveau anzugleichen. Dieser Bestrebung stehen gegenläufige Entwicklungen entgegen. Neben dem prognostizierten Wirtschaftswachstum, was Entwicklungs- und Schwellenländern nicht abgesprochen werden kann, forschen die hochentwickelten Nationen nach immer leistungsfähigeren Technologien. Diese Tendenzen werden neben der globalen Nachfrage nach Energieressourcen vor allem die Nachfrage nach Rohstoffen kontinuierlich erhöhen.

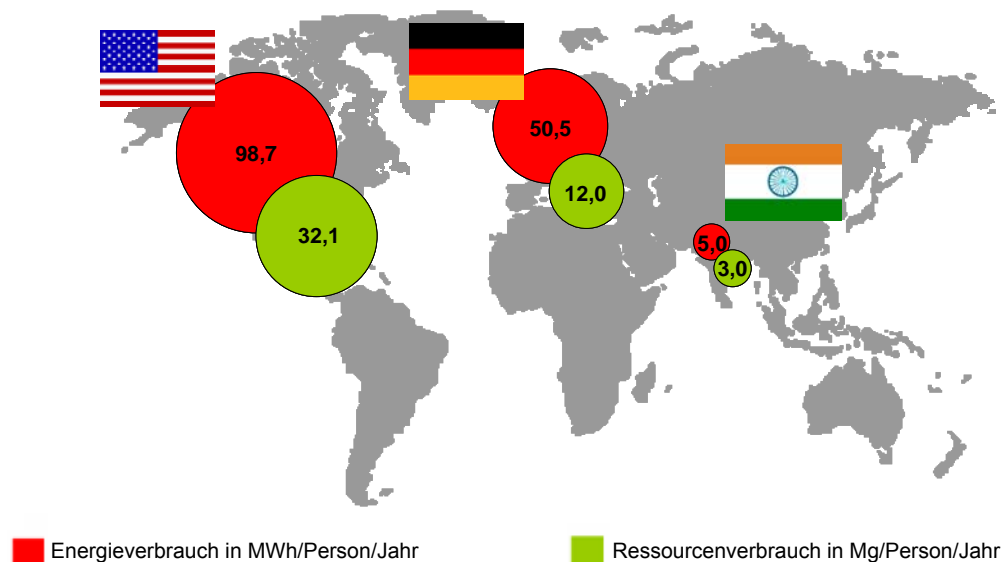


Abbildung 1: Ressourcen- und Energieverbrauch in ausgewählten Staaten (SERI 2010, EIA 2010, eigene Berechnungen)
 Der Ressourcenverbrauch pro Kopf enthält hier die im Inland entnommenen und verwendeten Metalle, mineralischen Rohstoffe, Energierohstoffe sowie Biomasse.

2.2 Statische Reichweite

Neben der bisher beleuchteten Nachfrageseite muss ebenso auch die Angebotsseite näher betrachtet werden. Hierbei beschreibt die statische Reichweite, welche in Abschnitt 4 genauer definiert ist, die Zeitspanne, in der ein Rohstoff aus bekannten, wirtschaftlich abbaubaren Vorkommen bei aktuellem Verbrauch noch zur Verfügung steht. Mit Hauptaugenmerk auf Stoffe, welche nicht ohne weiteres durch andere Materialien substituiert werden können, lässt sich festhalten, dass die Versorgungssituation einiger Stoffe wie Seltene Erden (Seltene Erden sind die Elemente Lanthan, die 14 „Lanthanoiden“, Yttrium und Scandium), Niob oder Platingruppenmetalle (PGM), durchaus als kritisch (Begriffsdefinitionen siehe S. 10f) bezeichnet werden kann. So werden beispielsweise für viele Metalle, die als Legierungsbestandteile oder in elektronischen Bauteilen Verwendung finden, derzeit statische Reichweiten von weniger als 50 Jahren angegeben (Abbildung 2). Auch wichtige mineralische Rohstoffe, wie z. B. Baryt, sind in absehbarer Zeit nur noch mit bedeutend höherem Aufwand aus natürlichen Lagerstätten zu gewinnen. Statische Reichweiten ausgewählter Metalle und Mineralien sind nachfolgend in Abbildung 2 dargestellt.

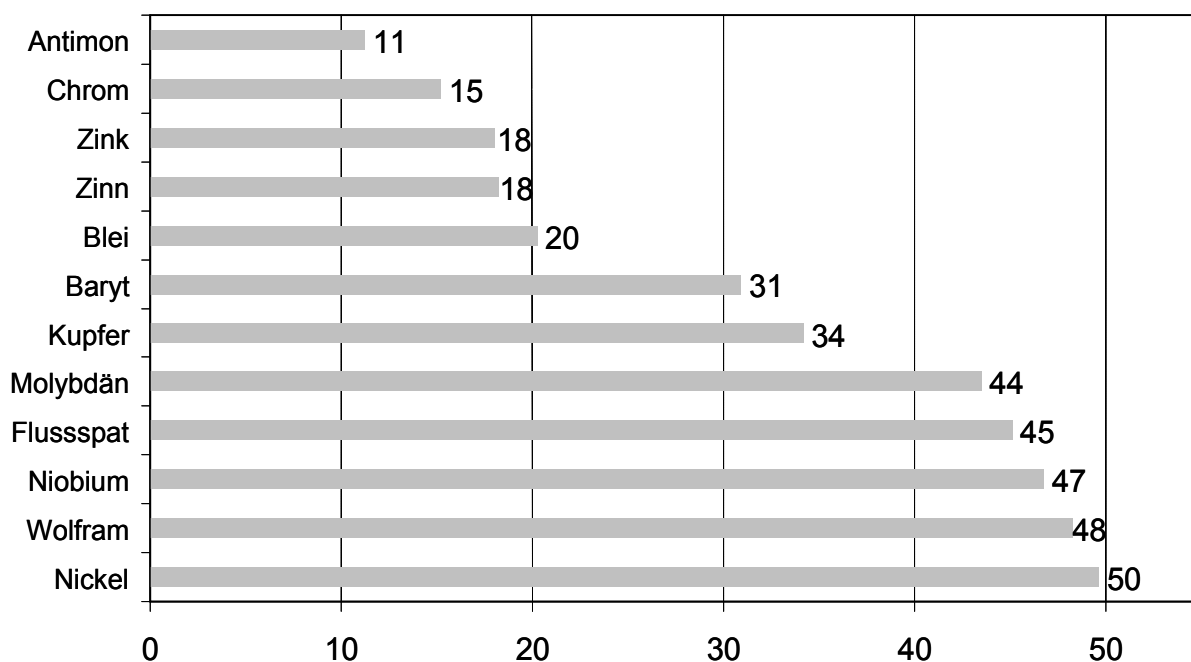


Abbildung 2: Statische Reichweite ausgewählter Metalle und Mineralien (BGR 2009; USGS 2010)

2.3 Strukturelle Knappheiten

Jenseits der geologisch bedingten Knappheiten sind des Weiteren strukturelle Knappheiten zu berücksichtigen. Die Förderung vieler „Technologiemetalle“ wie Selen, Tellur, oder Niob, ist an die Gewinnung von Hauptmetallen – beispielsweise Cu, Pt, Zn, Ni, Pb – gekoppelt, da erstere in geringeren Konzentrationen ebenso in den geschürften Erzen enthalten sind (Abbildung 3). Dieser Zusammenhang wird als Koppelproduktion bezeichnet. Abbildung 3 stellt die bei der Förderung der Hauptelemente anfallenden Nebenelemente schematisch dar. Eine gesteigerte Nachfrage nach diesen Elementen (z. B. In, Ge, Te usw.) führt zu keiner Erhöhung der Fördermenge, da dies aus wirtschaftlicher Sicht für die Minen als nicht

2.4 Steigender Bedarf durch Technologieentwicklung

Auf der Seite der Nachfrager muss weiterhin – vor allem aus der Perspektive Deutschlands – auf die Technologieentwicklung eingegangen werden. Nach (Fraunhofer ISI 2009) gelten insbesondere im Hinblick auf strategische Metalle und Mineralien folgende Wachstumsbranchen

- ▶ Fahrzeugbau, Luft- und Raumfahrt, Verkehrstechnik
- ▶ IuK-Technik, optische Technologien, Mikroelektronik
- ▶ Energietechnik, Elektrotechnik, Antriebstechnik
- ▶ Chemie-, Prozesstechnik, Fertigungs-, Umwelttechnik, Maschinenbau
- ▶ Medizintechnik
- ▶ Werkstofftechnik

als äußerst rohstoffintensiv bezüglich strategischer Metalle und Mineralien.

Innerhalb dieser Wachstumsbranchen bestimmen so genannte Zukunftstechnologien mehr und mehr den Markt. Die für die Zukunftstechnologien entscheidenden technologischen Entwicklungen basieren auf sehr spezifischen Stoffeigenschaften, welche ausschließlich seltene Edel- und Sondermetalle bzw. Mineralien aufweisen. Aus diesem Grund gelten viele dieser Stoffe auch als schlecht substituierbar, da mit dem Material auch seine ihm eigenen, spezifischen Merkmale entfernt und ersetzt werden, wodurch wiederum die Qualität des Endproduktes beeinflusst wird. Einige Stoffbeispiele und deren konkreter Einsatz in Bauteilen für Zukunftstechnologien zeigt Tabelle 1. Aus der Gruppe der Seltenen Erden eignet sich Neodym beispielsweise für Magneten, welche sich durch eine bis zu 25-mal stärkere magnetische Wirkung als übliche Ferro-Magnete auszeichnen. Dies erlaubt, neben neuartigen Sensoren und Servolenkungen ebenso Elektromotoren für Hybrid-Automobile kompakter und leistungsstärker zu entwickeln.

Tabelle 1: Verwendung knapper Rohstoffe in Zukunftstechnologien (European Commission 2010)

Rohstoff	Verwendung in Zukunftstechnologien (Auswahl)
Antimon	Mikrokondensatoren „Antimon tin-oxide“ (ATO),
Kobalt	Lithium-Ionen-Akku, Synthetische Kraftstoffe (XtL)
Gallium	Dünnschichtphotovoltaik, IC, WLED (White Light Emitting Diode)
Germanium	Lichtwellenleiter, IF-optische-Technologien
Indium	Displays, Dünnschichtphotovoltaik
Platin (PGM)	Brennstoffzellen, Katalysator
Palladium (PGM)	Katalysator, Meerwasserentsalzung
Niob	Mikrokondensatoren, Ferrolegierungen
Neodym	Permanentmagnete, Lasertechnologie
Tantal	Mikrokondensatoren, Medizintechnik

Die Nachfrage nach „Technologierohstoffen“ ist eng mit industriellem Fortschritt und der Entwicklung hin zur High-Tech Industrie verknüpft. So macht die kumulierte Nachfrage nach diesen Materialien in den letzten 30 Jahren den Großteil der Gesamtnachfrage seit dem Jahr 1900 aus (Abbildung 4). Während zu Beginn des letzten Jahrhunderts hauptsächlich Massenrohstoffe wie Eisen oder Aluminium zum Einsatz kamen, ließ insbesondere die rasch voranschreitende Elektronifizierung und Miniaturisierung den Bedarf von Re, Ga, In, Ru, Pd, Rh, Ir, Seltene Erden usw. massiv ansteigen. Auf den speziellen Eigenschaften dieser Rohstoffe beruhen viele Funktionen der technischen Errungenschaften und Luxusgüter, die aus dem heutigen Lebensstil der westlichen Welt kaum noch wegzudenken sind.

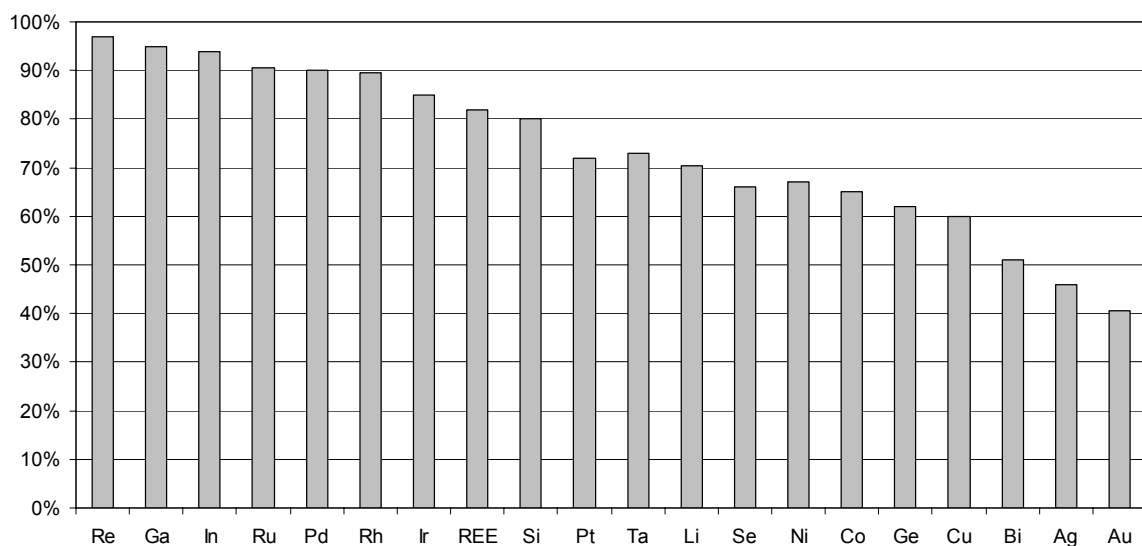


Abbildung 4: Anteil der kumulierten Nachfrage nach „Technologiemetallen“ der letzten 30 Jahre an der Gesamtnachfrage seit 1900 (Hagelüken 2010c)

Diese Entwicklung in der jüngeren Vergangenheit lässt auch in der Zukunft auf einen weiter ansteigenden Bedarf schließen. Folglich kommt künftig dem sicheren und nachhaltigen Zugang zu diesen Rohstoffen eine entscheidende Schlüsselposition zu.

3 Politische Ziele und Strategien in Deutschland und in der EU

Die Politik in Deutschland und Europa hat diese strategische Bedeutung für den Industrieraum erkannt und entwickelt Strategien und Maßnahmen, um den nachhaltigen und effizienten Umgang mit natürlichen Ressourcen zu fördern. Neben diesen volkswirtschaftlichen Ansätzen, welche auf eine höhere Wertschöpfung bei geringerem Ressourceneinsatz abzielen, gibt es auch auf der betriebswirtschaftlichen Ebene maßgebliche Gründe, die Materialeffizienz zu steigern und dadurch Kosten zu senken (Produkt oder Produktion mit geringerem Materialeinsatz).

Die Strategie der EU für einen nachhaltigen Umgang mit natürlichen Ressourcen (Europäische Kommission 2005) formuliert als Zielsetzung die Verringerung der negativen ökologischen Folgen der Ressourcennutzung bei wachsender Wirtschaft. Dies soll durch zweifache Entkopplung geschehen: eine Entkopplung der Ressourcennutzung vom Wirtschaftswachstum einerseits (*dematerialisation*), sowie eine Reduzierung der negativen Umweltfolgen der Ressourcennutzung andererseits, zum Beispiel durch Substitution von Materialien (*transmaterialisation*).

Auch im Rahmen der Europäischen Rohstoffinitiative stellt die Senkung des Primärrohstoffverbrauchs in der EU ein wesentliches Ziel dar (Europäische Kommission 2008). Um die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffimporten zu vermindern, sollen besonders Ressourceneffizienz, Recycling, Substitution und der Einsatz erneuerbarer Rohstoffe gefördert werden.

Die grundlegende Zielvorstellung der deutschen Ressourcenpolitik ist in der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie formuliert (Bundesregierung 2002), (Bundesregierung 2008). Gemäß dieser Strategie soll die Ressourcenproduktivität der deutschen Volkswirtschaft gegenüber dem Basisjahr 1994 verdoppelt werden. Langfristig soll sich die Verbesserung der Energie- und Rohstoffproduktivität an der „Faktor 4-Vision“ orientieren (Bundesregierung 2002). Die Formel „Faktor 4“ veranschaulicht dabei eine Verdopplung des verteilbaren Wohlstands bei gleichzeitiger Halbierung des Naturverbrauchs (Weizsäcker et al. 1995). In der Fortschreibung „Faktor 5“ wird eine Steigerung der Ressourcenproduktivität um 80 % insbesondere in den Sektoren mit dem höchsten Verbrauch an Energie, Wasser und Rohstoffen bzw. mit den höchsten Treibhausgasemissionen vorgestellt (Weizsäcker 2010). Das Bundesumweltministerium plädiert in seiner „Strategie Ressourceneffizienz“ von 2008 dafür, langfristig über das Ziel der Nachhaltigkeitsstrategie hinauszugehen und die Senkung des absoluten Materialeinsatzes in den Blick zu nehmen (BMU 2008).

Sowohl auf der europäischen als auch auf der nationalen Ebene existieren weitere Strategiedokumente, die den Blick stärker auf die Versorgungssicherheit lenken. Die 2007 gemeinsam mit dem BDI entwickelten „Elemente einer Rohstoffstrategie der Bundesregierung“ wurden kürzlich zur „Rohstoffstrategie der Bundesregierung“ weiterentwickelt (Bundesregierung 2007), (Bundesregierung 2010). Darin werden die folgenden Kernziele formuliert:

- ▶ Abbau von Handelshemmnissen und Wettbewerbsverzerrungen
- ▶ Unterstützung der deutschen Wirtschaft bei der Diversifizierung ihrer Rohstoffbezugsquellen
- ▶ Unterstützung der Wirtschaft bei der Erschließung von Synergien durch nachhaltiges Wirtschaften und Steigerung der Materialeffizienz
- ▶ Weiterentwicklung von Technologien und Instrumenten zur Verbesserung der Rahmenbedingungen für das Recycling
- ▶ Aufbau bilateraler Rohstoffpartnerschaften mit ausgewählten Ländern
- ▶ Eröffnung neuer Optionen durch Substitutions- und Materialforschung
- ▶ Fokussierung rohstoffbezogener Forschungsprogramme
- ▶ Herstellung von Transparenz und „Good-Governance“ bei der Rohstoffgewinnung
- ▶ Verzahnung nationaler Maßnahmen mit der europäischen Rohstoffpolitik

Die Rohstoffinitiative der Europäischen Kommission zielt ebenfalls darauf ab den Zugriff auf außereuropäische Rohstoffquellen zu sichern und Handelshemmnisse abzubauen (Europäische Kommission 2008). Hohen Stellenwert genießt die verstärkte Nutzung heimischer Rohstoffpotenziale. Die Senkung des Primärrohstoffverbrauchs in der EU, die Steigerung der Ressourceneffizienz, der Einsatz von Sekundärrohstoffen und die Erhöhung des Recyclinganteils sind ebenfalls Bausteine der Strategie, spielen aber eine weniger wichtige Rolle.

Auf Initiative des Bundes wurde bereits die Deutsche Materialeffizienzagentur (demea) auf den Weg gebracht. Diese ist beauftragt, Unternehmen über die Bedeutung der Materialeffizienz zu informieren und sie bei der Lokalisierung und Erschließung von Einsparpotenzialen zur Steigerung ihrer Rentabilität und Wettbewerbsfähigkeit zu unterstützen. Weiterhin wurde im Oktober 2010 die Deutsche Rohstoffagentur gegründet, welche bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) angegliedert ist. Schwerpunkt der Tätigkeit ist die Bewertung der globalen Verfügbarkeiten von Rohstoffen und die Abschätzung der Versorgungssicherheit Deutschlands mit strategischen Rohstoffen sowie die Ermittlung von Rohstoff- und Bergbaupotenzialen. Neben Energierohstoffen sollen dabei ebenfalls Metalle und Industriemineralien Betrachtung finden (BMW 2010).

Beispielhaft für weitere gesellschaftliche Aktivitäten kann das VDI Zentrum für Ressourceneffizienz (ZRE) angeführt werden. Diese vom VDI und vom BMU getragene Organisation hat sich zur Aufgabe gemacht, den effizienten Einsatz natürlicher begrenzter Ressourcen zu stärken und zu fördern. Wie auch die Deutsche Materialeffizienzagentur (demea) wird das ZRE vornehmlich aus Projektmitteln finanziert, weshalb der Bestand dieser Organisationen noch nicht langfristig gesichert ist.

4 Erläuterungen

4.1 Begriffsbestimmungen

⇒ *Reserven und Ressourcen*

Als *Ressource* (frz. *la ressource*, „Hilfsmittel, Hilfsquelle“, von lat. *resurgere*, „hervorquellen“) wird im allgemeinen Sprachgebrauch ein Mittel bezeichnet, das benötigt wird, um eine bestimmte Aufgabe zu lösen. Meist werden darunter Betriebsmittel, Geldmittel, Boden, Rohstoffe, Energie aber auch Personen verstanden.

In der Geologie werden *Ressourcen* im wesentlich engeren Sinne definiert und insbesondere gegen die so genannten *Reserven* abgegrenzt. Reserven bezeichnen diejenigen Mengen, die genau erfasst wurden und unter heutigen Gegebenheiten technisch und wirtschaftlich gewinnbar sind (BGR 2009). Demgegenüber sind Ressourcen entweder (noch) nicht wirtschaftlich ausbringbar oder aufgrund geologischer Indikatoren zu erwartende, aber bisher nicht durch Exploration nachgewiesene Mengen eines Rohstoffs. Ressourcen können z. B. durch verbesserte Aufbereitungstechnologien oder steigende Marktpreise in Reserven übergeführt werden. Für die Summe aus Reserven und Ressourcen wird auch der Begriff *Gesamtressourcen* verwendet.

⇒ *Reichweite*

Die engen Begriffsdefinitionen finden auch bei der Berechnung der *Reichweite* von Rohstoffen Verwendung. Da in eine dynamische Betrachtung zahlreiche Faktoren mit zum Teil erheblichen Unsicherheiten (z. B. Änderungen im Verbrauchsverhalten) einfließen, wird in der wirtschaftlichen und politischen Rohstoffdiskussion meist der Begriff *statische Reichweite* zu Grunde gelegt. Zu deren Berechnung werden die Reserven oder Ressourcen eines Rohstoffs durch den aktuellen weltweiten Jahresverbrauch dividiert.

Aufgrund der Unsicherheiten insbesondere in der Verbrauchsentwicklung handelt es sich bei der statischen Reichweite um eine hypothetische, rechnerische Kenngröße, aus der keine Prognosen über den tatsächlichen Verfügbarkeitszeitraum eines Rohstoffs abgeleitet werden können. Weiterhin legen die Bergbaukonzerne als Wirtschaftsunternehmen ihre Planungen und damit auch die genaue Reservenbewertung von Lagerstätten maximal für Jahrzehnte im Voraus fest. Erst bei absehbar steigender Nachfrage oder steigenden Preisen werden Explorationstätigkeiten intensiviert, wodurch weitere Ressourcen in Reserven übergeführt werden. Diese Verhältnisse führen dazu, dass die auf Reserven bezogenen statischen Reichweiten in der Vergangenheit über Jahre hinweg trotz steigenden Verbrauchs konstant blieben oder sogar erheblich zunahmen. Rohstoffwissenschaftler erachten daher die statische Reichweite als nicht dazu geeignet Aussagen über die künftige Entwicklung der Produktion von Rohstoffen zu treffen (BGR 2009). In Kenntnis dieser Einschränkungen kann der ermittelte Zahlenwert, insbesondere in der vergleichenden Betrachtung, bestenfalls als Indikator für eine mehr oder weniger kritische Versorgungslage herangezogen werden.

⇒ *Strategische und kritische Rohstoffe*

Der Ausdruck *strategische Rohstoffe* wird in unterschiedlichen Zusammenhängen verwendet. Materialien, deren Verknappung volkswirtschaftliche Auswirkungen allgemeiner Art auslösen könnten, wurden in einer nachfolgend erläuterten EU-Publikation als *kritische Rohstoffe* bezeichnet (European Commission 2010). Um deutlich zu machen, dass in dem hier beschriebenen Kontext nicht nur die von der EU als *kritisch* identifizierten 14 Rohstoffe adressiert sind, wird jedoch im vorliegenden Dokument wie auch in der erläuterten BMBF-Ausschreibung wieder auf den Ausdruck *strategische Rohstoffe* zurückgegriffen.

4.2 Bewertung der Rohstoffknappheit im Vergleich

In den letzten Jahren befassen sich mehrere Studien und Projekte mit der Rohstoffthematik, welche jedoch unterschiedliche Methoden zur qualitativen und quantitativen Bewertung der absehbaren Knappheiten zu Grunde legen. Im Folgenden werden die wichtigsten Datenquellen hierzu kurz erläutert und hinsichtlich ihrer Methodik verglichen.

⇒ *Critical raw materials for the EU (European Commission 2010)*

Seit Juni 2010 liegt der Bericht einer Ad-hoc Arbeitsgruppe der EU vor (European Commission 2010). Im Dokument „Critical raw materials for the EU“ wird eine Beurteilung von 41 Rohstoffgruppen nach folgenden Kriterien vorgenommen:

- ▶ Wirtschaftliche Bedeutung („Economic importance“)
- ▶ Versorgungsrisiko („Supply risk“)
- ▶ Ökologische Einschränkungen („Environmental country risk“)

Die wirtschaftliche Bedeutung eines Rohstoffes wird anhand der Wertschöpfung in diversen Wirtschaftssektoren, gewichtet nach dem Anteil seiner Verwendung im jeweiligen Wirtschaftssektor, bemessen. Das Versorgungsrisiko beinhaltet eine aggregierte Bewertung der Kriterien regionale Konzentration von Rohstoffvorkommen, politische und wirtschaftliche Stabilität der wichtigsten Förderländer, Substituierbarkeit und Recyclingrate. Unternehmerische Konzentrationsprozesse gingen in diese Bewertung nicht ein. Das Risiko ökologisch motivierter Zugangsbeschränkungen zu natürlichen Rohstofflagerstätten wurde anhand von Lebenszyklusanalysen quantifiziert, wobei Umweltentlastungseffekte in der Anwendung bestimmter Rohstoffe (z. B. Kfz-Katalysatoren) wegen nicht vergleichbarer Einsatzfelder keine Berücksichtigung fanden. Aus der Bewertung dieser Kategorie kann zumindest näherungsweise auf die Umweltauswirkungen des Rohstoffabbaus geschlossen werden.

Für jedes dieser drei Kriterien wurde eine normierte Kennzahl mit Werten zwischen 0 und 10 gebildet, wobei das obere Ende der Skala jeweils höchste wirtschaftliche Bedeutung, höchstes Versorgungsrisiko oder höchste Wahrscheinlichkeit ökologischer Beschränkungen markiert. Ein Rohstoff wird als kritisch eingeschätzt, wenn die wirtschaftliche Bedeutung über dem Schwellenwert 5 liegt und gleichzeitig entweder das Versorgungsrisiko über dem Schwellenwert 1 oder das Risiko ökologisch motivierter Einschränkungen über dem Schwellenwert von 1,2 liegen. Mit dieser Bewertungsmethode wird die Versorgung von insgesamt 14 Rohstoffen bzw. Stoffgruppen kritisch beurteilt (Antimon, Beryllium, Flussspat, Gallium, Germanium, Graphit, Indium, Kobalt, Magnesium, Niob, Platingruppenmetalle, Seltene Erden, Tantal, Wolfram).

In der EU-Studie wird zudem eine Kennzahl für die Substituierbarkeit verwendet, die durch Gewichtung verschiedener Anwendungsgebiete gemäß ihrer Wertschöpfung Werte zwischen 0 und 1 annimmt, wobei ein hoher Wert für nur schwer oder nicht substituierbare Rohstoffe steht. Die Einstufung der einzelnen Anwendungen ist wie folgt klassifiziert:

- ▶ Substitution leicht und ohne Mehrkosten (0)
- ▶ Substitution mit geringen Mehrkosten (0,3)
- ▶ Substitution mit erheblichen Mehrkosten und / oder Funktionseinbußen (0,7)
- ▶ Substitution nicht möglich (1,0)

Nach obiger Methodik wurden 41 Rohstoffe untersucht. Resultierend kann die Versorgungslage von 14 Rohstoffen als kritisch bezeichnet werden. Die Kombination von hoher wirtschaftlicher Bedeutung in Verbindung mit einem hohen Versorgungsrisiko ist im rechten oberen Cluster bei Abbildung 5 dargestellt.

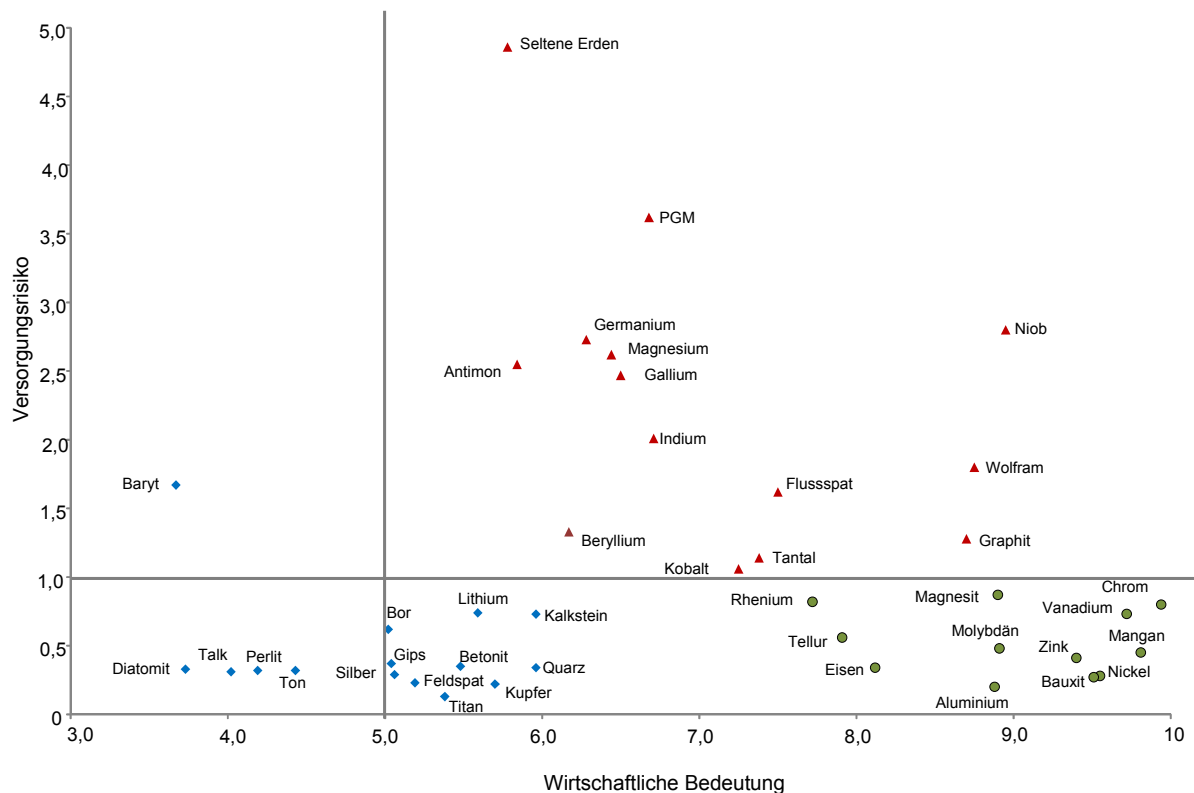


Abbildung 5: Klassifikation kritischer Rohstoffe; eigene Darstellung nach (European Commission 2010)

Die Einstufung als kritische Rohstoffe kann maßgeblich dadurch begründet werden, dass ein hoher Anteil der Weltgesamtproduktion aus China (Antimon, Fluorapat, Gallium, Germanium, Graphit, Indium, Magnesium, Seltene Erden, Wolfram), Russland (Platingruppenmetalle), der Republik Kongo (Kobalt, Tantal) und Brasilien (Niob, Tantal) resultiert (European Commission 2010).

⇒ *Rohstoffe für Zukunftstechnologien (Fraunhofer ISI 2009)*

Während die traditionellen Industriezweige wie z. B. die Automobilindustrie auch von Massenrohstoffen wie Eisen, Stahl und Kupfer abhängen, basieren so genannte Zukunftstechnologien wie z. B. die Dünnschicht-Photovoltaik, die Lasertechnik oder die Nano-Technologie zumeist auf selteneren Elementen wie Gallium, Neodym, Indium und Germanium. Eine 2009 im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) fertig gestellte Studie vom Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) und dem Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) zeigt auf, dass das Wachstum im Bereich dieser Zukunftstechnologien mit einem deutlichen Anstieg des Bedarfs an diesen Elementen verbunden sein wird (Fraunhofer ISI 2009).

Für die Studie wurden 32 Zukunftstechnologien definiert und analysiert, sowie deren Entwicklung bis zum Jahr 2030 prognostiziert. Der aus diesen Anwendungen erwachsende Bedarf an 22 ausgewählten Rohstoffen wurde für die Jahre 2006 und 2030 erarbeitet. Abschließend wurde der ermittelte Rohstoffbedarf mit der bei Abfassung der Studie bekannten jährlichen Weltproduktionsmenge der jeweiligen Rohstoffe ins Verhältnis gesetzt. Die deutlichste Veränderung ergab sich für Gallium, dessen Bedarf für Zukunftstechnologien in 2030 auf das 6,1-fache der bisherigen Produktion geschätzt wird, während 2006 nur 28 % der Produktion in innovativen Anwendungen gebraucht wurde. Die analogen Faktoren des Jahres 2030 betragen für Neodym 3,8, für Indium 3,3 und für Germanium 2,4 (Verbrauchsanteil für Zukunftstechnologien in 2006: Neodym 55 %, Indium 40 %, Germanium 31 %). Die Rohstoffnachfrage aus Verwendungssegmenten außerhalb der analysierten Zukunftstechnologien wird in der ISI / IZT-Studie nicht angegeben.

⇒ *Sichere Energie- und Rohstoffversorgung (IW 2008)*

Die Versorgungssituation mit endlichen Energierohstoffen, Metallen und Mineralien wurde ebenso in einer Studie des Instituts der deutschen Wirtschaft Köln (IW) untersucht (IW 2008). Hierbei wird im Gegensatz zu den bisher genannten Studien auch auf die aus den Reserven ermittelte statische Reichweite der Rohstoffe Bezug genommen. Daneben werden für ein „Rohstoff-Risiko-Rating“ zusätzlich Kriterien wie regionale Konzentration, unternehmerische Konzentration und Substituierbarkeit herangezogen. Für die Betrachtung der einzelnen Rohstoffe gelten folgende Schwellenwerte:

- ▶ Statische Reichweite geringer als 30 Jahre
- ▶ Regionale Konzentration:
mehr als 66 % der Vorkommen konzentrieren sich auf 3 Länder
- ▶ Unternehmerische Konzentration:
mehr als 45 % der Vorkommen konzentrieren sich auf 3 Anbieter
- ▶ Substituierbarkeit:
ein Stoff ist im Produktionsprozess nicht oder nur schwer zu ersetzen

Die Versorgungslage wird als *besonders kritisch* eingeschätzt, wenn drei dieser vier Merkmale zutreffen, bei zwei von vier zutreffenden Merkmalen gilt die Situation als *kritisch*. Sofern nur ein Punkt von vieren als bedenklich angesehen werden kann, wird die Versorgungslage des Stoffes als *weniger kritisch* eingestuft. Demnach liegen besonders kritische Verhältnisse für einige Metalle und das Mineral Zirkon vor. Gold, Silber, Zink, Blei, Titan und Zinn werden aufgrund hoher Recyclingfähigkeit als quasi unkritisch bzw. weniger

kritisch eingestuft, obwohl bei diesen Grundstoffen ein bzw. zwei Beurteilungskriterien erfüllt sind. Dies belegt die hohe Bedeutung einer auf Nachhaltigkeit ausgerichteten geschlossenen Kreislaufwirtschaft. Ein Beispiel zur Einstufung der Versorgungslage nach oben genanntem Schema stellt Tabelle 2 exemplarisch für Platin, Molybdän und Zinn dar.

Tabelle 2: Kriterien zur Risikobeurteilung und Beispiel zur Risikoeinstufung von Platin, Molybdän und Zinn; eigene Darstellung nach (IW 2008)

Rohstoff	Reichweite [a]	3 Länder [%]	3 Unternehmen [%]	Substitution	Versorgungslage
Platin	154	92	73	Nein	<i>besonders kritisch</i>
Molybdän	46	79	49	Nein	<i>besonders kritisch</i>
Zinn	20	80,6	39,5	Ja	<i>kritisch</i>

⇒ *Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential (Öko-Institut 2009)*

Der Fokus dieser Studie liegt auf Rohstoffen, welche in den Zukunftstechnologien Elektronik, Photovoltaik, Batteriespeicher und Katalysatoren eine wichtige Rolle spielen. Andere knappe Rohstoffe wie beispielsweise Titan oder Magnesium für Leichtbauanwendungen werden nicht weiter berücksichtigt. Ziel ist es, die globale Verfügbarkeit und die derzeitig erwarteten Entwicklungen bei Nachfrage und Angebot zu analysieren. Weiterhin sollen die aktuellen Recyclingtätigkeiten und mögliche Recyclingpotenziale beleuchtet werden. Die Priorisierung der Rohstoffe beruht auf den folgenden Faktoren:

- ▶ **Nachfragesteigerung**
 - Drastische Zunahme
 - Moderate Zunahme
- ▶ **Versorgungsrisiko**
 - Regionale Konzentration
 - Physikalische Knappheit
 - Temporäre Knappheit
 - Strukturelle oder technische Knappheit
- ▶ **Recyclingbeschränkungen**
 - Dissipative Verwendung
 - Physikalische / Chemische Begrenzung
 - Mangel an geeigneten Recyclingtechnologien / Infrastrukturen
 - Mangel an finanziellen Anreizen

Im Rahmen der durchgeführten Restriktionsanalyse dieser Studie lässt sich aus dem Ergebnis folgendes Fazit schließen. Innerhalb der nächsten fünf Jahre werden primär die Metalle Tellur, Indium und Gallium als höchst kritisch angesehen. Mittelfristig ist mit Engpässen bei Seltenen Erden, Lithium, Tantal, Palladium, Platin und Ruthenium zu rechnen.

**B Fördermaßnahme
„r³ – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz –
Strategische Metalle und Mineralien“**

1 Die Fördermaßnahme im Überblick

1.1 Optimierung von Wertschöpfungsketten als Ansatzpunkt

Wie in Abschnitt A bereits aufgezeigt, stehen die drei Problemfelder – Umweltbelastung, Versorgungssicherheit angesichts knapper Ressourcen, sowie Verteilungsgerechtigkeit – untereinander eng in Verbindung. Eine naheliegende Strategie zur Lösung dieser Probleme ist der sparsamere Umgang mit Ressourcen. Durch eine Reduzierung des Verbrauchs können wirtschaftliche Konflikte gemieden, Reichweiten verlängert und die Umweltbelastungen verringert werden. Um den Lebensstandard in den Industrieländern aufrechterhalten und ihn in Schwellen- und Entwicklungsländern anheben zu können, kommt deshalb der Steigerung der Effizienz im Umgang mit den natürlichen Ressourcen eine entscheidende Bedeutung zu. Ein wesentliches Ziel einer Effizienzpolitik ist eine möglichst vollständige Kreislaufwirtschaft, innerhalb der eine begrenzte Materialmenge zwischen Produktion und Aufbereitung / Rückgewinnung mit möglichst geringen Verlusten zirkuliert (Faulstich et al. 2009).

Um nun mögliche Ansatzpunkte ableiten zu können, wird zunächst der Ressourcenkreislauf analysiert. Der betriebswirtschaftliche Leistungserstellungsprozess ist die Grundlage aller Branchen und hat zum Ziel, die Bedürfnisse der Menschen zu befriedigen. Zu diesem Zweck werden aus Inputfaktoren (Rohstoffe, Arbeit, Kapital) Produkte und Dienstleistungen erzeugt. Aufgrund der vielfältigen Verzweigungen (Branchen, Industrien, Länder, usw.) von Ressourcenströmen ist deren Bewertung oft sehr aufwändig. Daher darf die Analyse der Ansatzpunkte zur Effizienzsteigerung nicht auf sektoraler Ebene durchgeführt werden, sie muss vielmehr auf der übergeordneten Ebene der Wertschöpfungskette erfolgen. Dieses branchen- und produktunabhängige Modell setzt sich aus den wesentlichen Gliedern Rohstoffgewinnung – Grundstoffproduktion – Güterproduktion – Güternutzung und Abfallwirtschaft zusammen. Die Bemühungen zur Steigerung der Effizienz konzentrierten sich bis dato fast ausschließlich auf die partielle Optimierung einzelner Wertschöpfungsstufen – meist in der Produktion. Hierbei kam die Mehrzahl der auf den Weg gebrachten Verbesserungen aus dem rein technischen Bereich. Abbildung 6 zeigt eine modellhafte Darstellung von mehreren Wertschöpfungsketten unterschiedlicher Produkte und verschiedener Branchen mit partieller Optimierung.

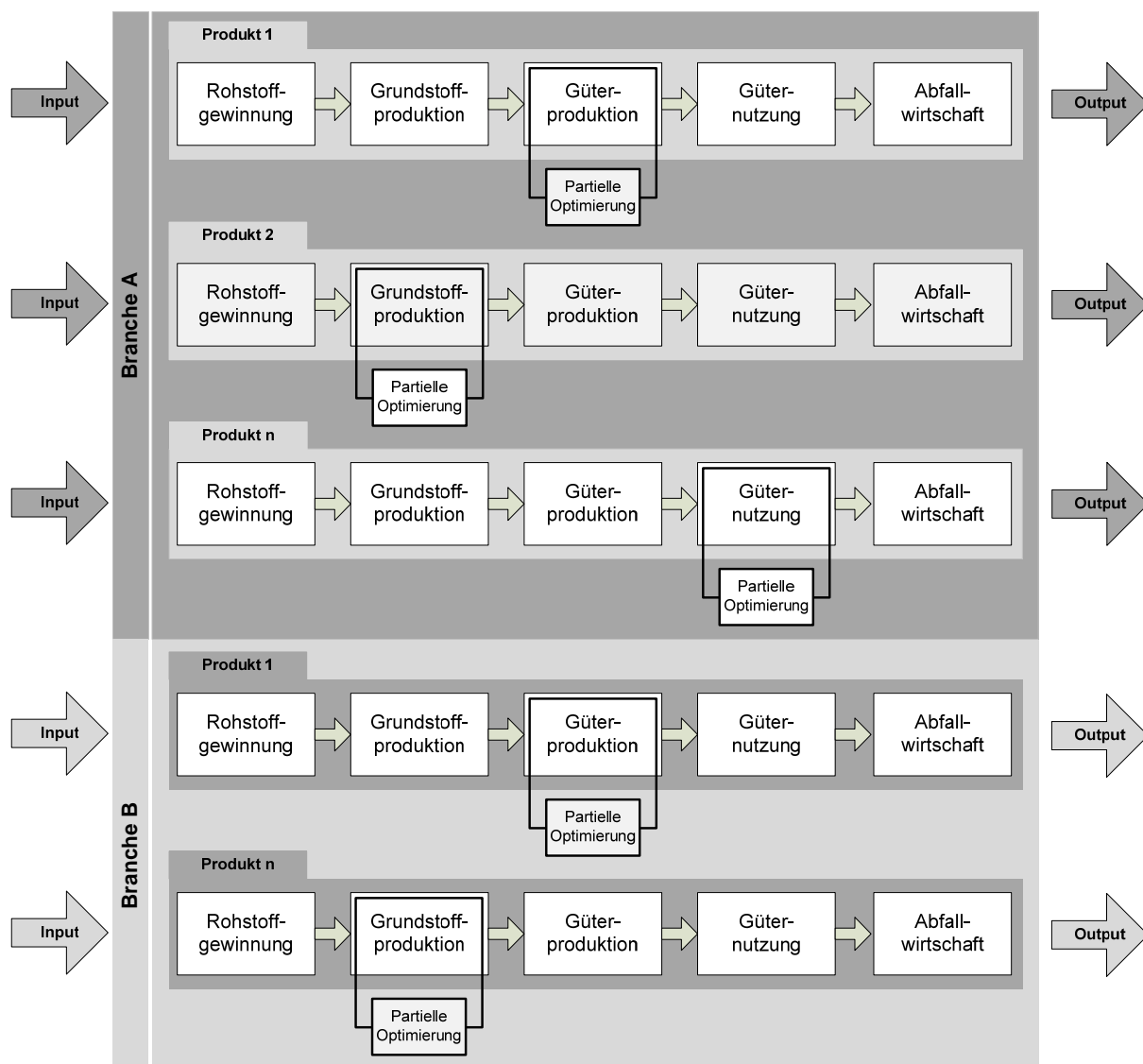


Abbildung 6: Modellvorstellung der partiellen Optimierung innerhalb von Wertschöpfungsketten

Diese partielle Optimierung in einer stark arbeitsteiligen und branchenorientierten Industriegesellschaft ist im Hinblick auf die Erhöhung der Gesamtressourceneffizienz allerdings nicht zielführend. Eine Weiterentwicklung hierzu stellt die produkt- und branchenübergreifende Integration und Vernetzung von Wertschöpfungsketten dar (Abbildung 7). Diese Verflechtung hin zu Wertschöpfungsnetzen verspricht durch die dabei nutzbaren Synergieeffekte aus Kaskaden- und Koppelnutzung ein Höchstmaß an Ressourceneffizienz (Gesamteffizienz). Einen möglichen Ansatzpunkt hierzu bildet dabei beispielsweise die verstärkte Anstrengung zur Rückgewinnung bzw. zum Recycling kritischer Metalle und Industriemineralien aus der Abfallwirtschaft. Die dabei zurück gewonnenen Wertstoffe können wiederum stofflich in der Güter- und /oder Grundstoffproduktion Verwendung finden. Eine effiziente Erschließung der Rohstoffpotenziale aus komplexen Abfallströmen setzt, insbesondere wenn diese zudem räumlich und zeitlich verteilt anfallen, allerdings die Entwicklung vernetzter Verwertungsstrukturen und mehrstufige Aufbereitungsprozesse voraus (Goldmann 2009).

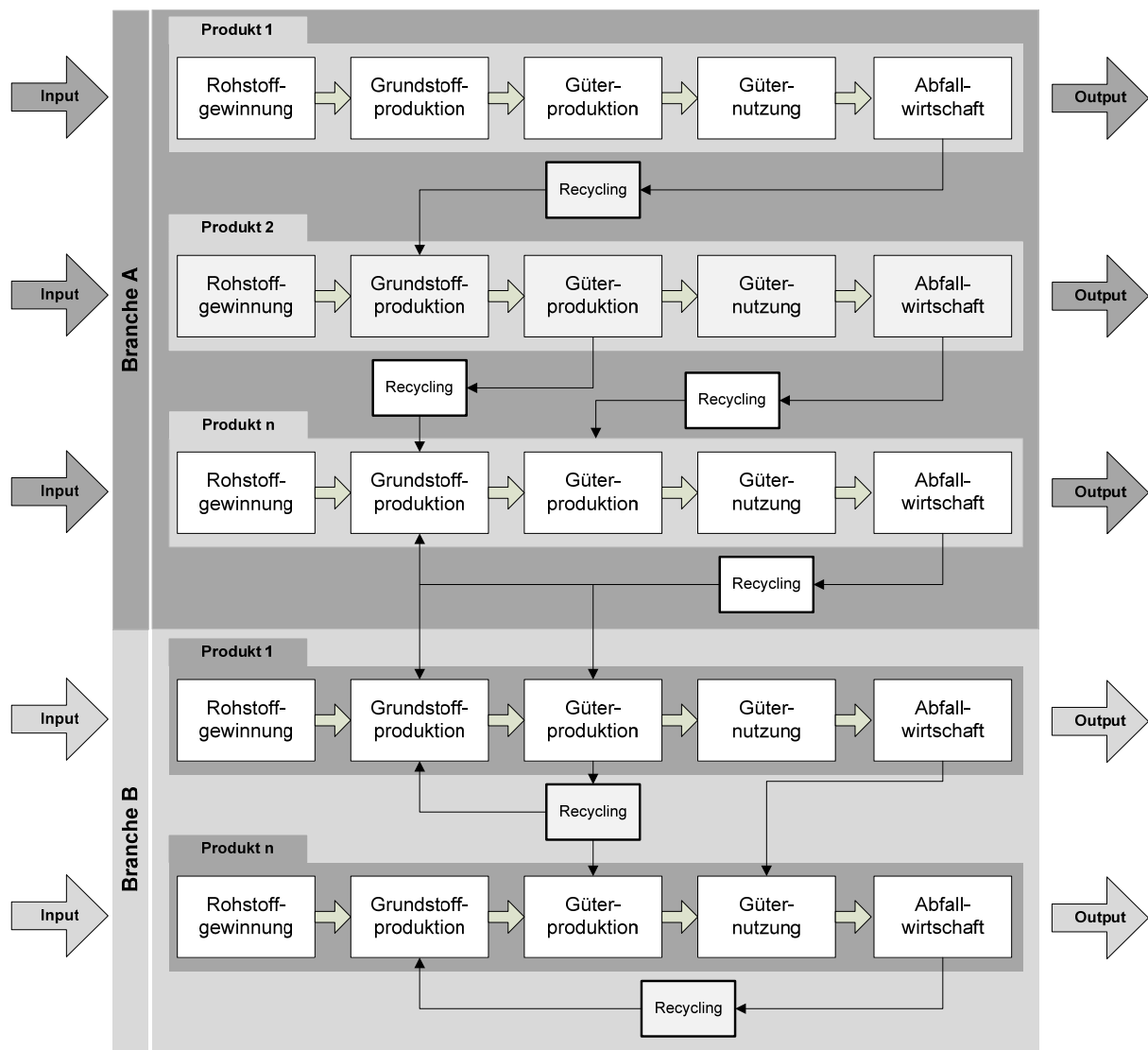


Abbildung 7: Optimierungsansätze in einem Wertschöpfungsnetz

1.2 Übersicht der Forschungs- und Förderschwerpunkte

Abbildung 8 und Abbildung 9 verdeutlichen die konkrete thematische Ausrichtung des Förderprogramms gemäß der im Anschluss erläuterten Systematisierung.

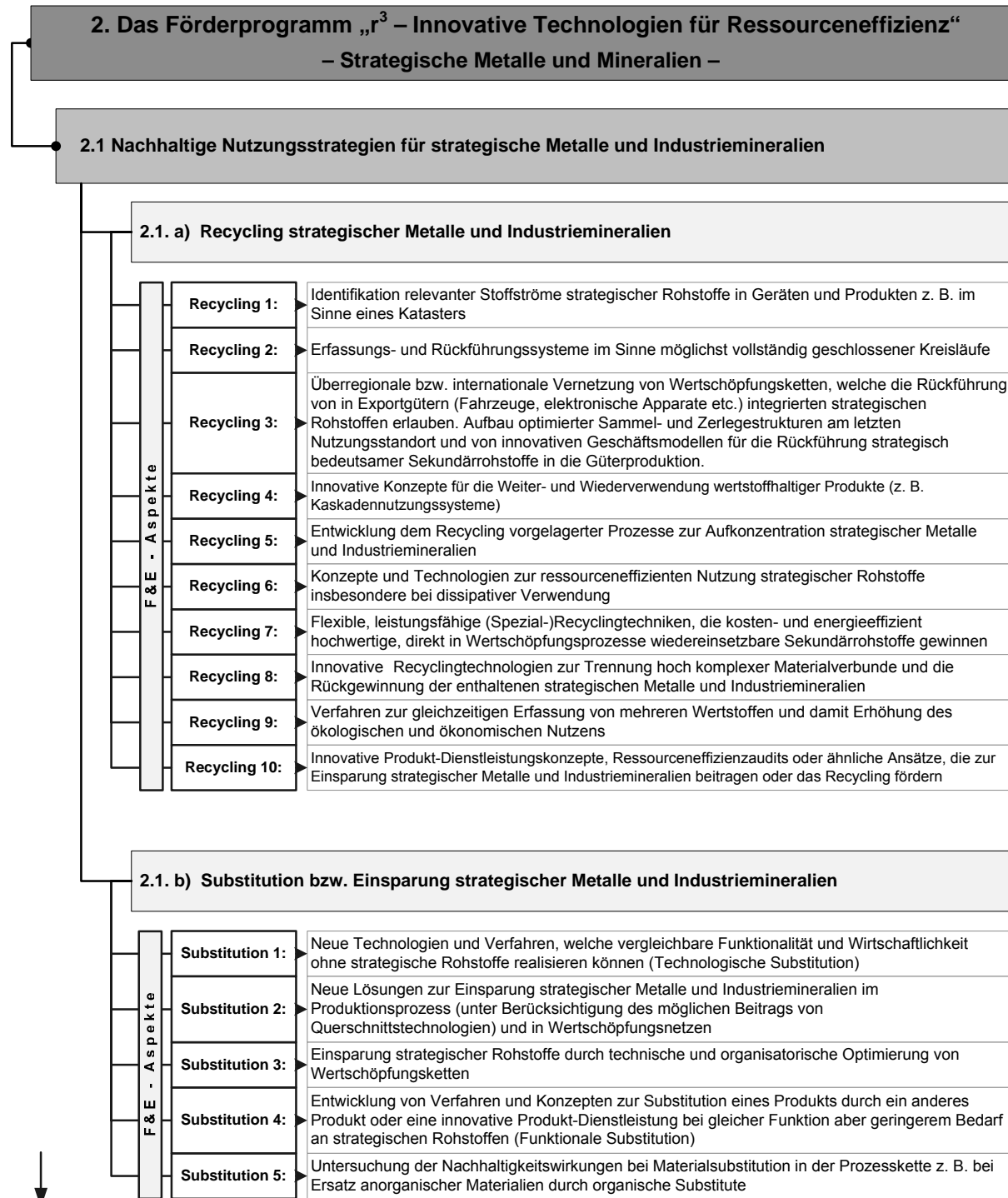


Abbildung 8: Aufteilung und Inhalte der Förderschwerpunkte I (Fortführung nächste Seite)

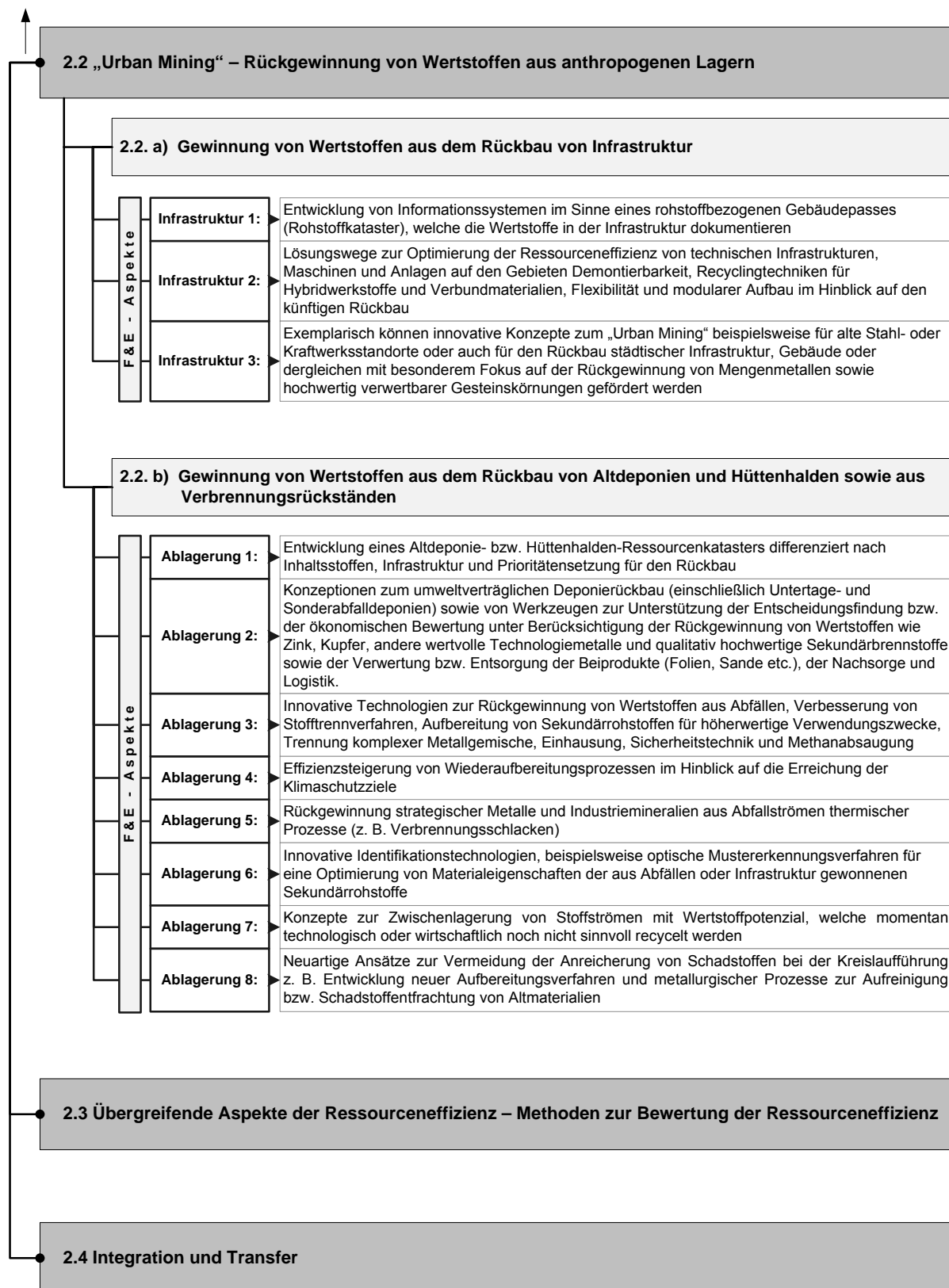


Abbildung 9: Aufteilung und Inhalte der Förderschwerpunkte II (Fortführung)

1.3 Systematik bei der nachfolgenden Konkretisierung

Die im Rahmen der Fördermaßnahme beschriebenen Themenkomplexe werden im Folgenden hinsichtlich des Standes der Technik und des Forschungs- und Entwicklungsbedarfs jeweils separat analysiert und beschrieben. Neben allgemeinen Grundsätzen soll hier ebenfalls auf quantitative Daten zurückgegriffen werden.

Im Anschluss daran werden jeweils die dazugehörigen F&E-Aspekte detaillierter ausgeführt. Zur besseren Übersichtlichkeit werden dabei die im Bekanntmachungstext genannten Aspekte den vier Themenfeldern

- ▶ Recycling
- ▶ Substitution
- ▶ Infrastruktur
- ▶ Ablagerung

zugeordnet und innerhalb der Themenfelder fortlaufend nummeriert (vgl. Abbildung 8 und Abbildung 9).

Die Ausformulierung erfolgt in allen vier oben genannten Themenfeldern stets nach dem gleichen Muster, welches nachstehend exemplarisch dargestellt ist:

2.x. x) „Themenfeld“

F&E-Aspekt „Kurztitel des Themenkomplexes“: *Kurztitel*

Kurzbeschreibung

Beschreibung

An dieser Stelle erfolgt eine kurze Erläuterung des Schwerpunktes. Neben Rahmenbedingungen wird auch auf Begriffserklärungen eingegangen.

Ansätze

Die hier aufgezeigten übergreifenden Ansätze sollen als Impulse für potenzielle Antragsteller und zur weiteren Konkretisierung dienen. Dabei werden bereits existierende und umgesetzte Beispiele genannt, die auf den Bereich der strategischen Rohstoffe hin übertragen werden können. Weiterhin werden beispielhaft derzeit offene Forschungsfragen definiert.

Wie bereits auf Seite 2 ausgeführt, erheben die genannten Beispiele keinen verbindlichen Anspruch in Bezug auf eine mögliche Prioritätensetzung oder auf Vollständigkeit, das heißt es sind selbstverständlich auch andere Forschungsschwerpunkte und Lösungsansätze denkbar.

2 Vorstellung und Konkretisierung der Förderschwerpunkte

2.1 Nachhaltige Nutzungsstrategien für strategische Metalle und Industriemineralien

Wie bereits im Abschnitt A dargestellt, kann Deutschland keine strategischen Rohstoffe in nennenswertem Umfang fördern und ist gänzlich auf Importe, zum Teil aus wirtschaftlich und politisch instabilen Regionen, angewiesen. Ein möglicher Hebel, um diese Abhängigkeiten in Bezug auf seltene Metalle und Mineralien zu vermindern, stellt sicherlich das gezielte Recycling rohstoffintensiver Produkte und Anwendungen am Ende des Produktlebenszyklus dar. Weiterhin gilt es, diese Rohstoffe effizient einzusetzen und soweit möglich, durch Materialien mit längerer Reichweite zu substituieren. Diese beiden Bereiche werden nachfolgend weiter beleuchtet.

2.1.a Recycling strategischer Metalle und Industriemineralien

Stand der Technik

⇒ *Ressourcenkreislauf und Eigenschaften der Abfallströme*

In unserem Wirtschaftskreislauf werden Rohstoffe eingesetzt, um daraus Investitions- und Konsumgüter zu produzieren, welche im letzten Schritt immer verschiedenartige Bedürfnisse der Bevölkerung befriedigen. In diesem Kreislauf fallen auf den unterschiedlichen Ebenen (sowohl bei der Förderung und Aufbereitung der Grundstoffe, der Produktion der Güter, als auch bei der Güternutzung) Abfälle und Reststoffe an. Um einen kontinuierlichen Stofffluss zu gewährleisten, müssen am Ende des Produktlebenszyklus Abfälle und Rückstände folglich aus dem Wirtschaftskreislauf ausgeschleust oder dem Kreislauf zur erneuten Nutzung wieder zugeführt werden.

Für die erneute Nutzung im Wirtschaftskreislauf ist der Begriff Recycling gebräuchlich. Gemäß der Definition in der Abfallrahmenrichtlinie handelt es sich dabei um die Aufbereitung von Abfällen zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke, wobei die Verwendungen als Brennstoff und zur Verfüllung ausdrücklich ausgeschlossen sind (Europäische Union 2008). Während der energetischen Verwertung bei Metallen und Mineralien ohnehin keine Relevanz zukommt, stellt die Verfüllung gerade bei mineralischen Massenabfällen einen bedeutenden Entsorgungsweg dar.

Die aus dem Wirtschaftskreislauf ausgeschleusten Materialien unterliegen den bekannten abfallwirtschaftlichen Regularien. Unvermeidbare Abfälle sind zu verwerten oder zu beseitigen. Die umweltverträgliche Beseitigung der hier betrachteten Stoffströme erfolgt in der Regel durch die geregelte Ablagerung auf Deponien mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen. Auch im Abfallregime steht neben den Umwelt- und Gesundheitsschutzaspekten der Gedanke des Ressourcenschutzes immer mehr im Vordergrund. Die Verwertung genießt daher bereits nach geltendem Recht Vorrang vor der Beseitigung. Die noch in nationales Recht umzusetzende Abfallrahmenrichtlinie zielt mit der neuen fünfstufigen Hierarchie „Vermeidung – Vorbereitung zur Wiederverwendung – Recycling – sonstige, das heißt auch energetische Verwertung – Beseitigung“ auf eine noch stärkere Gewichtung des Ressourcenschutzes ab (Europäische Union 2008). Vorrang soll im novellierten deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetz aber diejenige Verwertungsoption haben, die den Schutz von Mensch und Umwelt am besten gewährleistet.

Die Gewichtung von Recycling und anderweitiger Abfallentsorgung charakterisiert in gewissem Maße den Rohstoffbedarf. Abbildung 10 zeigt ein vereinfachtes Stoffstrommodell im Sinne des Wirtschaftskreislaufs.

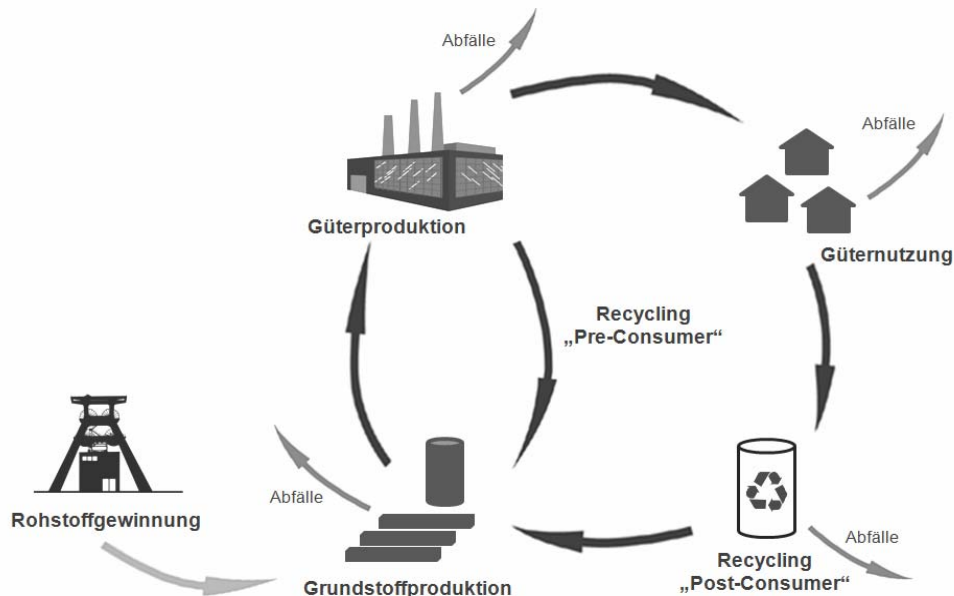


Abbildung 10: Lebenszyklus von Produkten und Kreislauf von Rohstoffen mit prinzipiellen Ansatzpunkten zur Steigerung der Ressourceneffizienz (eigene Darstellung)

Um nun das Ziel einer geschlossenen Kreislaufwirtschaft erreichen zu können, müssen alle Stoffströme möglichst sinnvoll im Kreis geführt werden. Dies stellt sich unterschiedlich schwierig dar, da die Rückstände unterschiedliche spezifische Merkmale aufweisen. Allgemein lassen sich die anthropogenen Rohstoffe in den Anteil der „Pre-Consumer“-Abfälle, „Post-Consumer“-Abfälle und Deponien / Halden einteilen. Als anthropogener Rohstoff wird alles bezeichnet, was der Mensch aus der Geosphäre entnimmt, in Produkten und Anlagen eingebunden ist, als Abfall die unmittelbare Produktions- oder Nutzungsphase verlässt, sowie alles das, was sich an Ablagerungen aus den verschiedenen Stufen des Wirtschaftskreislaufes ansammelt (Goldmann 2010b). Weitere Details zu diesen Abfallkategorien und zu den wesentlichen Merkmalen sind in Abbildung 11 dargestellt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die „Pre-Consumer“-Abfälle, welche größtenteils den unterschiedlichen Produktionsprozessen entspringen, häufig durch Sortenreinheit, keine Vermischungen, keine Alterung und einen zentralen, zeitlich kontinuierlichen Anfall auszeichnen. Daher sind das Recycling und die Rückführung dieser Abfälle technologisch weniger anspruchsvoll. Hohe Recyclingquoten sind hier möglich und auch größtenteils realisiert. Die „Post-Consumer“-Abfälle hingegen müssen erst durch aufwändige Sammelsysteme kanalisiert werden, bevor sie aufbereitet werden können. Aufgrund von Sortenvielfalt und gravierenden Rezepturänderungen bzw. Vermischungen sind die Verfahren hier deutlich aufwändiger und komplexer. Insbesondere bei der Sammlung und den Recyclingverfahren liegt noch deutliches Verbesserungspotenzial. Der Bereich der Deponien und Halden wird in Kapitel 2.2 weiter vertieft.

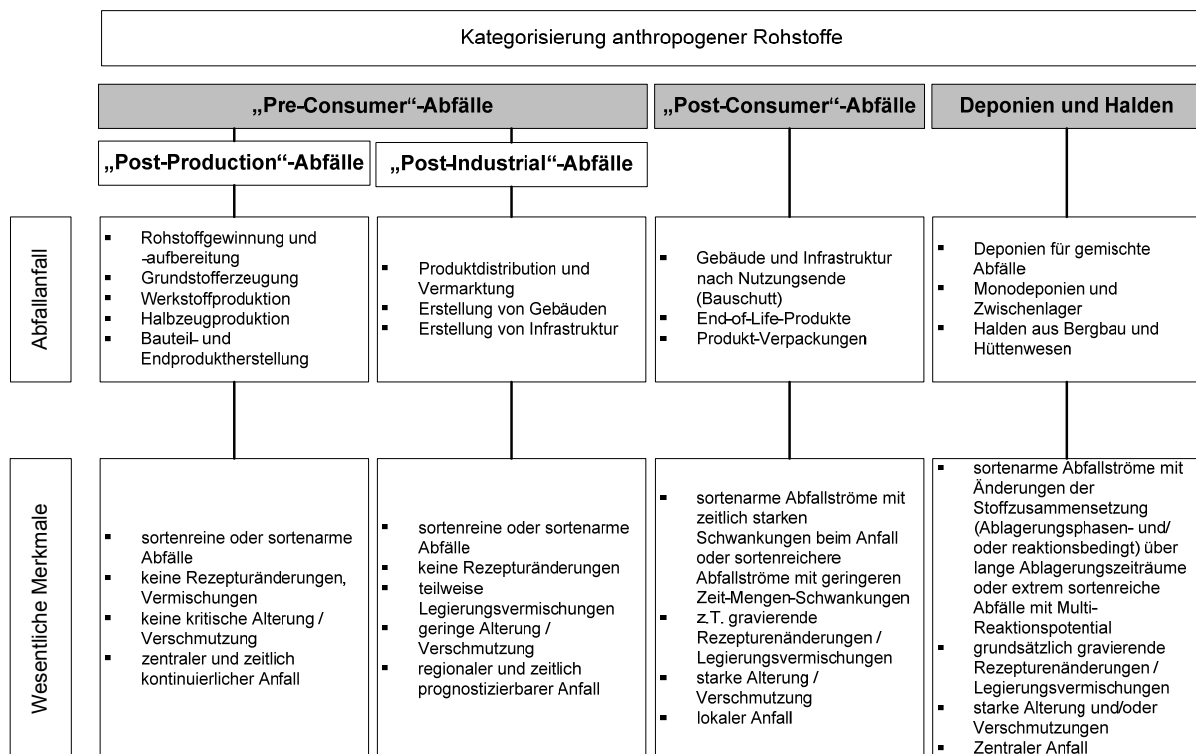


Abbildung 11: Kategorisierung und Eigenschaften anthropogener Rohstoffe, eigene Darstellung nach (Goldmann 2009)

⇒ Primär- und Sekundärproduktion im Vergleich

Durch die Rückgewinnung von Sekundärrohstoffen werden nicht nur Ressourcen geschont, sondern auch ein bedeutender Teil an Energie und damit auch CO₂-Emissionen eingespart. Die Bereitstellungskette von Primärrohstoffen von der Gewinnung über die Aufbereitung hin zur Grundstoffproduktion ist für gewöhnlich sehr energieintensiv. Die nachfolgende Abbildung zeigt die CO₂-Bilanzen der vollständigen Bereitstellungskette, jeweils für die Primär- und Sekundärproduktion ausgewählter Stoffströme (UMSICHT 2008).

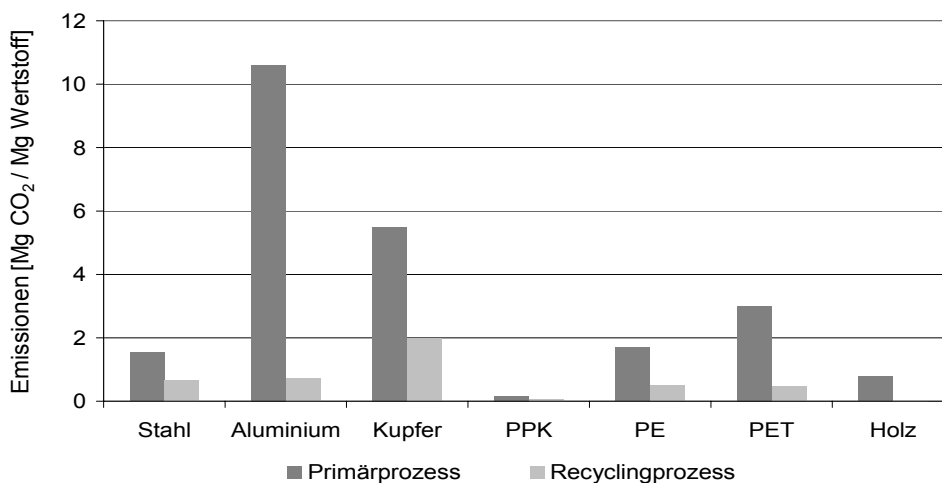


Abbildung 12: CO₂-Emissionen von Primär- und Recyclingprozessen im Vergleich (PPK: Papier, Pappe, Kartonagen; PE: Polyethylen; PET: Polyethylenterephthalat) (UMSICHT 2008)

Der deutlich geringere Energieaufwand bei der Herstellung von Sekundärrohstoffen aus recycelten Produkten ist bei Metallen hauptsächlich in der nicht mehr benötigten Reduktionsenthalpie begründet. Dagegen müssen beim Primärprozess die Metalle meist aus oxidischen oder sulfatischen Erzen in die neutrale Oxidationsstufe übergeführt werden. Darüber hinaus lässt sich beim Recycling oft eine erhöhte Rohstoffausbeute, bezogen auf die Menge an Ausgangsmaterial, erzielen. Seltene Metalle liegen in Produktionsrückständen oder Abfällen deutlich höher konzentriert vor als in geogenen Lagerstätten. Damit sind diese Rückstände wesentlich reicher an Wertmetallen und -mineralien (Kammer 2009). Verdeutlicht wird dieser Zusammenhang beispielhaft anhand des nachfolgenden Schaubilds. Während sich aus einer Tonne Erz nur ca. 5 g Gold gewinnen lassen, kann aus der gleichen Menge PC-Leiterplatten ca. 200 g Gold extrahiert werden.

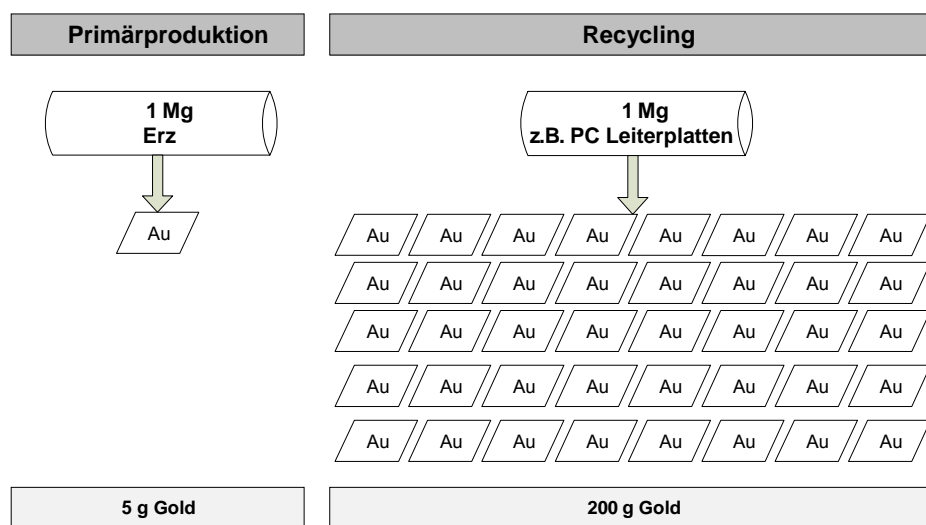


Abbildung 13: Vergleich der Goldausbeute von Primär- und Sekundärproduktion (Hagelüken 2010b)

⇒ Recyclingquoten

Um die derzeitigen weltweiten Recyclingbemühungen abzubilden, wurden in der nachfolgenden Tabelle 3 die aktuellen Recyclingquoten für knappe Metalle und Mineralien aus verschiedenen Literaturquellen zusammengetragen.

In der englischsprachigen Literatur werden die oben angeführten Begrifflichkeiten „Pre-Consumer“-Abfälle und „Post-Consumer“-Abfälle als „new scrap“ und „old scrap“ bezeichnet, im Folgenden werden jedoch weiterhin die Begriffe „Pre-Consumer“- und „Post-Consumer“-Abfälle verwendet.

Die im Report der Europäischen Kommission angegebenen Recyclingraten beziehen sich, soweit nicht anders angegeben, auf den Anteil des Recyclings aus „Post-Consumer“-Abfällen am europäischen Verbrauch (European Commission 2010). Die Recyclingquoten für die Rohstoffe sind in der Studie sowohl im Textverlauf als auch in tabellarischer Form dargestellt. Teilweise bestehen widersprüchliche Angaben in Text und Tabelle. Um die Übersichtlichkeit zu bewahren, wurden in die folgende Tabelle 3 aus der Studie der Europäischen Kommission nur die Angaben aus der tabellarischen Darstellung übernommen.

Im Bericht des U.S. Geological Survey (USGS 2010) handelt es sich meist um die Recyclingrate bezogen auf die Summe des Recyclings von „Pre-Consumer“- und „Post-Consumer“-Abfällen im Vergleich zum derzeitigen Verbrauch (2009) des Rohstoffs in den USA. Da aber auch davon abweichende Angaben gemacht werden, wird in der folgenden Tabelle 3 vermerkt, worauf sich die Recyclingquote jeweils bezieht.

Für weitere zitierte Quellen ist angegeben, für welches Land oder welche Länder die Recyclingquote gilt.

Tabelle 3: Recyclingquoten verschiedener Stoffe im Vergleich

Stoff		Recyclingquote	Quellen
Aluminium	Al	35 %	(European Commission 2010)
		35 % („Post-Consumer“)	(USGS 2010)
Antimon	Sb	11 %	(European Commission 2010)
Baryt	BaSO ₄	0 %	(European Commission 2010) USGS 2010)
Bauxit		0 % (direktes Recycling von Bauxit) (Bauxit-Feuerfestprodukte werden jedoch bis zu 50 % recycelt)	(European Commission 2010, USGS 2010)
Bentonit		0 %	(European Commission 2010)
Beryllium	Be	19 %	(European Commission 2010)
		bis zu 10 % („Pre-Consumer“ und „Post-Consumer“)	(USGS 2010)
Blei	Pb	59 % (Deutschland, 2005)	(BGR 2007)
Borate		0 %	(European Commission 2010)
Chrom	Cr	13 %	(European Commission 2010)
		61 % (basiert auf gemeldetem Eingang der Schrottmenge rostfreien Stahls)	(USGS 2010)
Eisen	Fe	22 %	(European Commission 2010)
Feldspat		0 % (direktes Recycling von Feldspat) (durch Nutzung von recyceltem Glas wird allerdings der Verbrauch an Feldspat reduziert.)	(European Commission 2010, USGS 2010)
Flussspat	CaF ₂	0 %	(European Commission 2010)
Gallium	Ga	0 % („Post-Consumer“) Abfälle aus der Produktion von GaAs werden recycelt (Quote nicht verfügbar).	(USGS 2010)
Germanium	Ge	0 %	(European Commission 2010)
		30 % (global, „Pre-Consumer“ und „Post-Consumer“)	(USGS 2010)
Graphit	C	Nicht bekannt (Recycling ist machbar, aber große Verfügbarkeit des Primärmaterials verhindert Recyclinganstrengungen)	(European Commission 2010, USGS 2010)
Gips	Ca[SO ₄] • 2H ₂ O	1 %	(European Commission 2010)
Gold	Au	In den USA wurde 2009 mehr Gold recycelt als verbraucht.	(USGS 2010)
Indium	In	0,3 %	(European Commission 2010)
Kalkstein		0 %	(European Commission 2010)
Kobalt	Co	16 %	(European Commission 2010)
		24 % („Pre-Consumer“ und „Post-Consumer“)	(USGS 2010)
		20 % (global, 2005)	(Öko-Institut 2009)
Kupfer	Cu	20 %	(European Commission 2010)
		10 % („Pre-Consumer“) 35 % („Pre-Consumer“ und „Post-Consumer“)	(USGS 2010)
		54 % (Deutschland, 2005)	(BGR 2007)

Tabelle 4: Recyclingquoten verschiedener Stoffe im Vergleich (Fortsetzung)

Stoff		Recyclingquote	Quellen
Lithium	Li	0 % (Recyclingfähigkeit ist gegeben, v. a. Batterien)	(European Commission 2010)
		Nicht signifikant, aber steigend	(USGS 2010)
Magnesit	Mg[CO ₃]	Nicht bekannt	(European Commission 2010)
Magnesium	Mg	14 %	(European Commission 2010)
Mangan	Mn	19 %	(European Commission 2010)
Molybdän	Mo	17 %	(European Commission 2010)
		bis zu 30 % („Pre-Consumer“ und „Post-Consumer“)	(USGS 2010)
Nickel	Ni	32 %	(European Commission 2010)
		42 % („Pre-Consumer“ und „Post-Consumer“)	(USGS 2010)
Niobium	Nb	11 %	(European Commission 2010)
		bis zu 20 % („Pre-Consumer“ und „Post-Consumer“)	(USGS 2010)
Phosphor	P	0 % (Calciumphosphat)	(USGS 2010)
Platingruppenmetalle	PGM	35 %	(European Commission 2010)
		45 % (Platin, global)	(UNEP 2009)
Quarzsand	SiO ₂ (Quarz)	24 %	(European Commission 2010)
Rhenium	Re	13 %	(European Commission 2010)
Seltenerdmetalle (z. B. Neodym)	(z. B. Nd)	1 %	(European Commission 2010)
Silber	Ag	16 %	(European Commission 2010)
Talk	Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂	Nicht bekannt	(European Commission 2010)
Tantal	Ta	4 %	(European Commission 2010)
		20 % (global)	(TIC 2010)
Tellur	Te	Nicht bekannt	(European Commission 2010)
		0 %	(USGS 2010)
Titan	Ti	6 % (global) Anwendungen der Titan-Mineraie sind dissipativ und nicht recycelbar. Titan-Metalle werden in hohem Maße recycelt.	(European Commission 2010)
Wolfram	W	37 % (global)	(European Commission 2010)
		37 %	(USGS 2010)
Vanadium	V	Nicht bekannt	(European Commission 2010)
		Sehr kleine Prozentzahl	(USGS 2010)
Zink	Zn	8 %	(European Commission 2010)
		54 % („Pre-Consumer“)	(USGS 2010)
Zinn	Sn	20 % („Post-Consumer“) 24 % („Pre-Consumer“ und „Post-Consumer“)	(USGS 2010)
Zirkon	ZrSiO ₄	0 % (Deutschland, 2005)	(BGR 2007)

⇒ *Recyclingtechnologien*

Die Maxime der Kreislaufwirtschaft brachte stetige Neuerungen und technologische Weiterentwicklungen von Recycling- und Aufbereitungstechnologien auf den Weg. Die derzeitigen Abfallaufbereitungsverfahren zeichnen sich bereits durch eine hohe Komplexität aus. Gerade das Recycling von Metallen und Metallverbunden erfordert für jedes einzelne Metall speziell abgestimmte Aufbereitungsverfahren (Scholz 2009). Die mengenmäßigen Anteile konventioneller Rohstoffe (z. B. Kupfer) im Vergleich zu wertvollen Spurenstoffen (z. B. Seltene Erden) sind in vielen High-Tech-Produkten deutlich höher, sodass die derzeitigen Recyclingverfahren meist auf die konventionellen Rohstoffe ausgelegt sind (Kammer 2009).

Beispiel: Beim Elektroschrott-Recycling geht Gallium verloren, da eine Galliumgewinnung in der Kupfertechnologie nicht möglich ist (Kammer 2009).

In diesem Zusammenhang können aus verfahrenstechnischen Gründen nicht alle Rohstoffe separiert werden, so dass trotz einer hohen Sekundärausbeute bei der Rückgewinnung einige wertvolle Rohstoffe – zum Teil mit der Schlacke – aus dem Kreislauf ausgeschleust und deponiert oder unspezifisch verwertet werden.

Im Zuge dessen werden ständig leistungsfähigere Prozesse auf den Weg gebracht. Repräsentativ für den derzeitigen Stand der Technik ist eine innovative Aufbereitungsanlage des Unternehmens UMICORE in Hoboken / Antwerpen (vgl. Abbildung 14) (UMICORE 2010). UMICORE ist das weltweit größte Unternehmen für das Recycling von Edelmetallen. Es ist anzumerken, dass diese Anlage hinsichtlich ihrer Flexibilität in Bezug auf verschiedenste Inputströme derzeit technologieführend ist. Die nachfolgend in Abbildung 14 dargestellte Anlage kann 17 unterschiedliche Metalle rückgewinnen und aufbereiten.

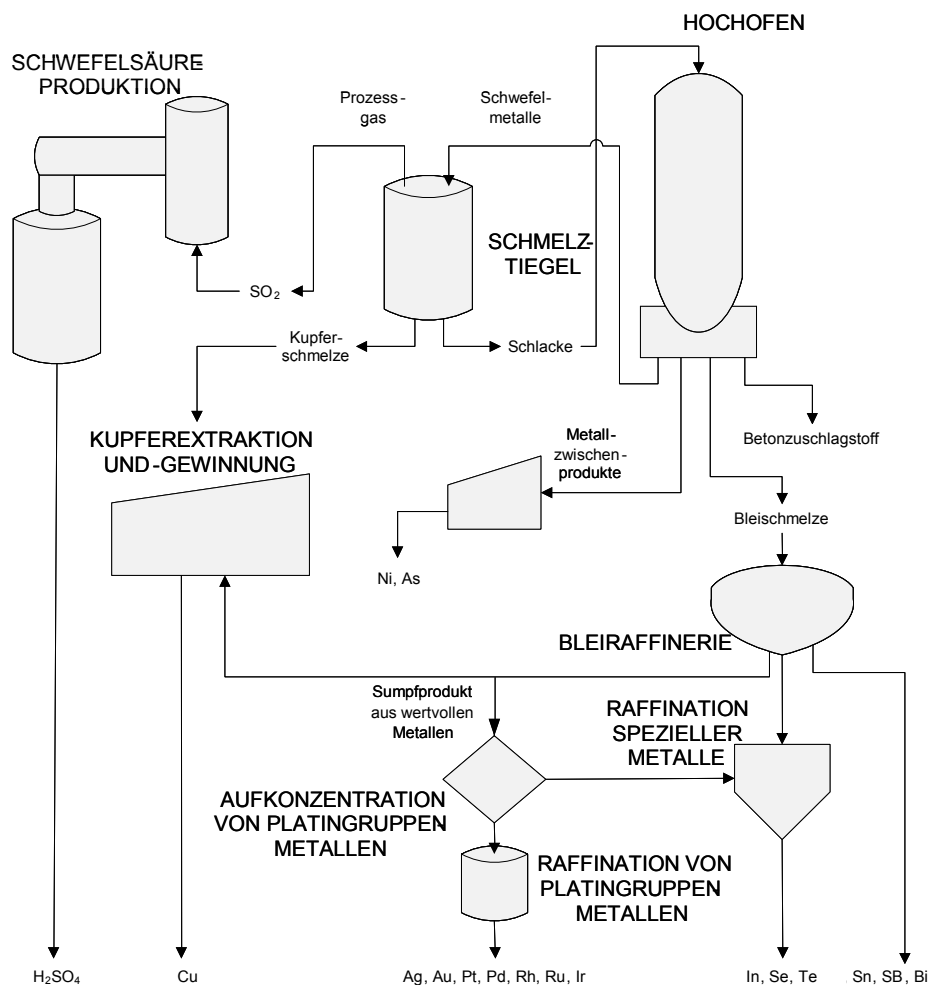


Abbildung 14: Anlagenschaltbild und Stoffflüsse der UMICORE-Anlage in Hoboken / Antwerpen; eigene Darstellung nach (UMICORE 2010)

Die Anlage weist einen Jahresdurchsatz von 350.000 Mg (Input) auf. Laut einer Studie des Öko-Instituts erreicht UMICORE die folgenden Produktionsmengen an zurückgewonnenen Metallen: Blei (125.000 Mg), Kupfer (30.000 Mg), Nickel (2.000 Mg), Zinn (1.000 Mg), Antimon (3.000 Mg). Bei den speziellen und wertvollen Metallen fallen folgende Mengen an: Silber (2.400 Mg), Gold (100 Mg), Platin (18 Mg), Palladium (24 Mg), Rhodium (5 Mg), Bismut (400 Mg), Indium (50 Mg), Tellur (150 Mg) und Selen (600 Mg) (Öko-Institut 2009).

Weltweit gibt es derzeit lediglich 5 bis 10 Anlagen, die die technologischen Voraussetzungen erfüllen, um aus unterschiedlichen Pre- und Post-Consumer-Abfällen weiterführend strategische Rohstoffe wie Indium, Tellur oder Ruthenium aufbereiten zu können (European Commission 2010). Die Standorte für derartig hochtechnologische Anlagen liegen hauptsächlich in Europa und Japan. Für die Rückgewinnung von Rohstoffen wie Tantal, Lithium, Seltene Erden, Gallium oder Germanium sind außer einigen Pilotanlagen bisher noch keine kommerziellen Anlagen in Betrieb (European Commission 2010).

Diese Anlagenbeispiele zeigen auf, dass künftig verstärkt chemische beziehungsweise metallurgische Aufbereitungsverfahren gefragt sein werden. Bisher dominierten mechanische Trennverfahren, die bereits vielfach in der Abfallaufbereitung eingesetzt werden. Um ein Höchstmaß an Sekundärrohstoffen zurückzugewinnen, sind darüber hinaus an konkrete Aufgabenstellungen angepasste Aufbereitungs- und Aufreinigungsverfahren nötig.

Neben Anlagen für flexible Stoffströme werden Recyclinganlagen deshalb vermehrt auf spezifische Stoffströme zugeschnitten. Oft wird dabei versucht, vorrangig die Ausbeute an gewinnbringenden Sekundärrohstoffen zu erhöhen. Beispielsweise befinden sich in einer 240 kg Batterie eines E-Kleinwagens rund 2 % Kobalt und Nickel, in Batterien für Laptops und andere Elektronikgeräte beträgt der Kobalt-Nickel-Anteil bereits 14 % (Recycling Magazin 2010).

Nachstehende Abbildung zeigt ein innovatives Anlagensystem von UMICORE zum gezielten Recycling von Batterien, welches voraussichtlich im ersten Halbjahr 2011 in Betrieb genommen wird.

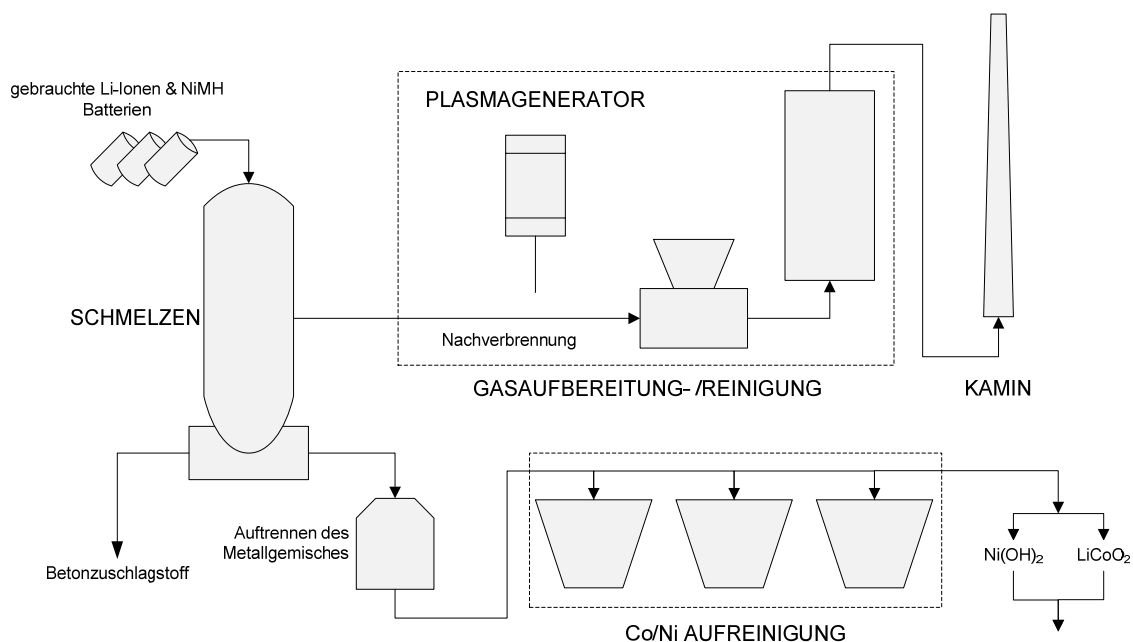


Abbildung 15: UMICORE-Verfahrenskonzept zum Batterierecycling; eigene Darstellung nach (Öko-Institut 2009)

Derzeit ermöglicht das von UMICORE patentierte Verfahren das Recycling von Kobalt, Nickel und Kupfer. Das Unternehmen arbeitet gegenwärtig an der Entwicklung eines erweiterten Verfahrens für das zusätzliche Recycling von Lithium für die erneute Verwendung.

Mittels hydrometallurgischer Verfahren werden hierbei die einzelnen Elemente aus der Schmelzlegierung separiert (Recycling Magazin 2010). Durch gängige Verfahren wie Zonenschmelzen oder gerichtete Erstarrung können bei der anschließenden Aufreinigung Sekundärmetalle erzeugt werden, die hinsichtlich ihrer Reinheit im Vergleich zu primär erzeugten Metallen keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Üblicherweise wird die Aufreinigung sogar zusammen mit Metallen aus der Primärgewinnung durchgeführt (Kammer 2009). Trotz dieser Gegebenheiten weist der derzeitige Stand der Technik vor allem in der Rückgewinnung kritischer Metallverbunde noch ein enormes Entwicklungspotenzial auf (Kammer 2009). Kammer (2009) nennt beispielsweise die großtechnische Rückgewinnung von Cadmium und Tellur aus der Herstellung von Cadmiumtellurid-Solarzellen als eine der derzeitigen Herausforderungen.

F&E-Bedarf

Sowohl die Rückgewinnung wertvoller Rohstoffe als auch die Erhöhung der Recyclingausbeute stellen zukünftige Optimierungsziele in Bezug auf die Ressourceneffizienz dar. Grundsätzlich weisen vor allem die Gebiete

- ▶ Effizienz von Aufbereitungsanlagen (Infrarot- und Röntgentechnik)
- ▶ Vernetzung von Anlagen untereinander (Stoffstrommanagement)

auf technischer Ebene umfassende Optimierungspotenziale auf.

Des Weiteren lassen sich aus den Problemstellungen

- ▶ Dissipation rohstoffintensiver Güter durch fehlende Sammelsysteme
- ▶ Rohstoffexporte durch gewollte / ungewollte Ausfuhr von Gütern ins Ausland

weitere Ansatzpunkte im Hinblick auf organisatorische, systemische Gesichtspunkte ableiten.

Nachfolgend werden der potenzielle F&E-Bedarf im Bereich des Recyclings für nachhaltige Nutzungsstrategien in Bezug auf kritische Metalle und Industriemineralien näher aufgeschlüsselt und anhand von Beispielen Impulse für weitere thematische Forschungsansätze erläutert.

2.1.a) *Recycling strategischer Metalle und Industriemineralien*

F&E-Aspekt „Recycling 1“: Identifikation Stoffströme

Identifikation relevanter Stoffströme strategischer Rohstoffe in Geräten und Produkten z. B. im Sinne eines Katasters

Beschreibung

Produktvielfalt und ausgedehnte Sortimente dominieren den Markt. Dies bringt für die Abfall- und Recyclingwirtschaft erhebliche Herausforderungen mit sich. Komplexe Materialverbunde, hybride Bauteilstrukturen mit einer Vielzahl an verschiedenen Werkstoffen dominieren das Produktdesign und charakterisieren die mechanischen und optischen Eigenschaften. Der Recyclingprozess wird dadurch allerdings deutlich erschwert. Vor dem Hintergrund aufwändig verzweigter Verwertungs- und Beseitigungsstrukturen mit einer Vielzahl von zu lenkenden Stoffströmen gewinnt die Effizienzbewertung der verschiedenen Behandlungsverfahren zunehmend an Bedeutung (Hoffmeyer et al. 2009). Derzeit ist kaum ersichtlich, in welchen Produkten welche Wertstoffe in welchen Mengen und welchen Konzentrationen und Verbunden verarbeitet werden. Folglich gestaltet sich die Identifikation und Separierung rohstoffintensiver Stoffströme derzeit äußerst schwierig. Aus diesem Grund gilt es, mit geeigneten Ansätzen, Instrumente und Tools (z. B. „Rohstoffpass“) zu generieren, welche die Menge der strategisch wichtigen und rückgewinnbaren Stoffe lokalisieren und systematisch bewerten, um ein kumuliertes Recyclingpotenzial verschiedener Produkte und Produktkategorien ableiten zu können. Hierzu sind Aspekte wie Produktnutzungsdauer, Umlaufmenge und die in den Produkten enthaltenen Rohstoffe in Menge, Qualität und Materialverbund zu quantifizieren. Es sind diesbezüglich einfache, vor allem praktikable und allgemeingültige Konzepte zur Rohstoffidentifikation in der Abfallwirtschaft notwendig.

Ansätze

Ein Beispiel zum genannten F&E-Bedarf stellt ein Vergleich zwischen den Gebrauchsgütern Handy und Waschmaschine dar. In diesem Zusammenhang werden die spezifischen Gebrauchsmuster der beiden Referenzprodukte betrachtet. Vor allem Handys zeichnen sich durch eine hohe Umlaufmenge (etwa 80 Mio. in Deutschland 2009), eine geringe Produktnutzungsdauer (etwa 2 Jahre) aufgrund technologischer Weiterentwicklungen und einem gewissen inkorporierten Rohstoffbestand aus, vgl. (Hagelüken 2010a). Eine Waschmaschine ist hierzu aufgrund einer deutlich längeren Nutzungsdauer (im Mittel rund 10 Jahre), einer im Vergleich zum Handy um den Faktor 2 verminderten Umlaufmenge (knapp 40 Mio. in Deutschland) und einem abweichenden Ressourceneinsatz bei der Produktion sicherlich differenzierter zu bewerten. In Folge dieser Gegenüberstellung bleibt die Frage offen, welche Stoffströme nach dem Ausscheiden aus dem Nutzungspfad für das Recycling priorisiert werden sollten und welche Faktoren in Gebrauchsmustern von Produkten potenzialbeeinflussend auf die rückzugewinnenden Rohstoffe wirken. Hierzu muss ein allgemeingültiges Konzept im Sinne eines Rohstoffpasses zur Bewertung generiert werden.

2.1.a) Recycling strategischer Metalle und Industriemineralien*F&E-Aspekt „Recycling 2“: Erfassungs- und Rückführungssysteme***Ganzheitliche Erfassungs- und Rückführungssysteme im Sinne möglichst vollständig geschlossener Kreisläufe****Beschreibung**

Der Produktlebenszyklus vieler Produkte und Anwendungen (z. B. Elektrogeräte mit hohem Gehalt an strategischen Rohstoffen) wird bedingt durch den raschen technologischen Fortschritt immer kürzer. Konsumgüter werden dementsprechend in großen Stückzahlen produziert, in Umlauf gebracht und am Ende der Nutzungsphase entsorgt. Dieses Konsumverhalten führt zu einem stetigen Anstieg der Güterproduktion sowie des damit verbundenen Ressourcenverbrauchs. In einer derzeit gut eingespielten deutschen Recyclingwirtschaft gibt es vor allem für strategische Rohstoffe bisher keine geschlossene Kreislaufwirtschaft (Rat für Nachhaltige Entwicklung 2010). Diese Erkenntnis macht den dringenden Bedarf an internen Kreisläufen zur Bereitstellung und Verwertung von strategischen Metallen und Mineralien deutlich. Die Umsetzung derartiger Forderungen erfordert auf organisatorischer Ebene vor allem innovative Erfassungs- und Rückführungssysteme. Verschiedene Produktkonfigurationen beinhalten sehr unterschiedliche, spezifische Rohstoffe und Materialverbunde. Die direkte Separierung einzelner Produktkategorien bzw. die Auftrennung schon bestehender Stoffströme in sortenreinere Produktfraktionen vereinfacht die Anpassung und Optimierung von Recyclingverfahren und deren Parameter. Damit kann ein möglichst ressourceneffizientes Recyclingsystem von der Zerlegung und Fraktionierung bis hin zur Aufreinigung und erneuten internen Verwendung aufgebaut werden. Dennoch ist gerade zur Erhöhung der Kanalisierungsquote hoch rohstoffhaltiger – gegenwärtig aber oft noch restmüllgängiger – Altprodukte in geeignete Verwertungsstrukturen noch enormer Entwicklungsbedarf vorhanden (Goldmann 2010a).

Ansätze

Zur Schließung von Stoffkreisläufen sind neben den bereits existierenden Erfassungssystemen, die dem Recyclingprozess nahezu sortenreine Produktfraktionen zuführen (vgl. z. B. UMICORE Battery Recycling) ergänzend intelligente Sammelsysteme für rohstoffhaltige Abfälle und Reststoffe zu installieren. Eine der wirtschaftlichsten und ressourcenschonendsten Alternativen im Bereich von internen Rückführungssystemen sind Re-Manufacturing-Konzepte. Dabei werden defekte oder überholte Altgeräte vom Hersteller zurückgenommen, technisch aufbereitet und wieder auf den Qualitätsstandard eines Neugeräts gebracht. Derartige Konzepte stellen an die Unternehmen vor allem Herausforderungen in der Neuorganisation von Logistik und Teilehandling. So ist z. B. Bosch im Hinblick auf Re-Manufacturing-Konzepte ein führender Anbieter von wiederaufbereiteten Austauschteilen. Das Programm umfasst rund 9.000 Teile aus 27 Produktgruppen. In 2009 hat Bosch 2,5 Millionen Teile wiederaufbereitet und damit neben der Rohstoffeinsparung auch 23.000 Tonnen CO₂ eingespart (Bosch 2010).

2.1.a) *Recycling strategischer Metalle und Industriemineralien*

F&E-Aspekt „Recycling 3“: Rückführung strategischer Rohstoffe

Überregionale bzw. internationale Vernetzung von Wertschöpfungsketten, welche die Rückführung von in Exportgütern (Fahrzeuge, elektronische Apparate etc.) integrierten strategischen Rohstoffen erlauben. Aufbau optimierter Sammel- und Zerlegestrukturen am letzten Nutzungsstandort und von innovativen Geschäftsmodellen für die Rückführung strategisch bedeutsamer Sekundärrohstoffe in die Güterproduktion

Beschreibung

Führende Industrienationen entwickeln ständig neue Verfahren und Produkte, welche weltweit teilweise eine „Vorreiterposition“ innehaben. Nach dem meist wirtschaftlich bedingten Produktlebenszyklus (abhängig von Konsum oder Investitionsgut) scheiden diese in den Industrienationen aus der Nutzung aus und werden unmittelbar durch Neuere ersetzt. Vor allem Schwellenländer, welche gemeinhin durch geringere technologische und gesetzliche Standards charakterisiert sind, fragen verstärkt derartige Produkte nach. Technologisch überalterte Produkte und Produktionsstätten, welche den industriellen Standards führender Industrienationen nicht mehr gerecht werden, werden meist nach Asien, Afrika oder nach Osteuropa verlagert. Hinzu kommen illegale Exporte unrechtmäßig erworbener Produkte (Janz et al. 2009). Diese Verlagerung von z. B. Maschinen, Anlagen und Automobilen steigert zwar die Nutzungsintensität und damit die Effizienz, birgt jedoch auf nationaler Betrachtungsebene den Export von nennenswerten Mengen an knappen Rohstoffen in sich. Es fehlen in diesen Regionen oftmals Konzepte einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft, um nach Ablauf der endgültigen Gebrauchsphase eines Gutes die Rückgewinnung wertvoller Ressourcen sicherzustellen (UBA 2007).

Ansätze

Der Export technologisch überholter, ausgemusterter Produkte wie beispielsweise Altautos in Schwellenländer ist neben der Erhöhung der Nutzungsintensität dieser Produkte auch mit unerwünschten Rohstoffverlusten, wie beispielsweise den in Katalysatoren eingesetzten Platingruppenmetallen verbunden. Vielerorts findet in den Exportländern kein ordnungsgemäßes Recycling statt (Janz et al. 2009). Aktuell werden in den Schwellenländern die defekten oder ausgedienten Produkte („*End of Life Products*“ (ELP)) ohne Standards deponiert – die enthaltenen Rohstoffe scheiden somit aus dem Kreislauf aus. Des Weiteren wird beispielsweise in vielen Entwicklungsländern versucht, unter oft widrigen und gesundheitsgefährdenden Bedingungen („*Lowtech-Hinterhofrecycling*“) (IZT 2008), gewinnbringende Rohstoffe zu extrahieren (Buchert 2010). Angedacht sind deshalb praktikable Konzepte im Sinne einer internationalen Kreislaufwirtschaft, die gezielte Sammel- und Recyclinginfrastrukturen in Schwellenländern aufbauen und die Schnittstellen für eine Überführung strategischer Rohstoffe in geeignete großtechnische Anlagen beispielsweise in Europa definieren und organisieren (Buchert 2010).

2.1.a) *Recycling strategischer Metalle und Industriemineralien*

F&E-Aspekt „Recycling 4“: Kaskadennutzung

Innovative Konzepte für die Weiter- und Wiederverwendung wertstoffhaltiger Produkte (z. B. Kaskadennutzungssysteme)

Beschreibung

Im Sinne der Kreislaufwirtschaft sind jegliche Abfälle vor der Beseitigung einer weiteren stofflichen Nutzung zuzuführen. Eine möglichst umfassende Verwertung durch die mehrfache Nutzung desselben Rohstoffes im nationalen Wirtschaftssystem zielt primär auf einen geringeren Bedarf an kritischen Rohstoffen ab. Die hierbei propagierte Form der Kaskaden- und Koppelnutzung (VDI 2009) beschreibt den Idealfall, sowohl die eigentlichen Produkte und Produktkomponenten, als auch Neben- und Koppelprodukte in möglichst vielen Nutzungsphasen wiederkehrend verwenden zu können. Dadurch können neben umweltentlastenden Effekten auch ökonomische Vorteile, wie geringere Kosten oder eine gestiegene Wertschöpfung (Netzwerk Ressourceneffizienz 2010) entstehen. Die Kaskadennutzung wird bereits in einigen industriellen Bereichen branchenübergreifend praktiziert. Es fehlen vor allem Konzepte und Verfahren, in denen vordergründig die Kaskaden- und Koppelnutzung von strategischen Metallen und Mineralien intensiviert werden und möglichst in Kreisläufen mit hoher Wertschöpfung Einzug halten können.

Ansätze

Ein Drittel der in Deutschland verwendeten Kunststoffe sind Verpackungsmaterialien von denen sich bisher rund 1,5 Millionen Tonnen für das Recycling eignen. Die sogenannten „Post-Consumer“-Kunststoffe aus den Wertstofftonnen sind nicht sortenrein, sondern in der Regel durch Störstoffe in Form verschiedener Kunststoffarten verunreinigt. Die Verwendungsmöglichkeiten dieses Materials als Kunststoff-Regranulat waren bis vor kurzem stark eingeschränkt. Ein neuartiges Verfahren hierfür hat z. B. Interseroh für die Verwertung bisher schwer recyclebarer Käse- und Wurstfolien entwickelt. Aus dem Verpackungsabfall werden so genannte Stapelfasern hergestellt, die in Automobilen für Kofferraumauskleidungen, Hutablagen und Schalldämmungen eine weitere stoffliche Verwendung finden (Interseroh 2009). Beispielhaft kann neben Interseroh auch das SiCon-Verfahren von Volkswagen genannt werden. Dieses Verfahren erzeugt durch gezielte Aufbereitung und Veredelung von Altfahrzeugen Stoffströme, welche als Sekundärrohstoffe erneut eingesetzt werden können (Volkswagen 2005).

Neben der Automobilbranche nutzt auch die Textilindustrie Sekundärrohstoffe für die Produktherstellung. Ausgangsprodukte sind ausgediente Einweg-PET-Flaschen. Die Flaschen werden gereinigt, sortiert und zu so genannten PET-Flakes verarbeitet. Der so entstandene Sekundärrohstoff wird nachfolgend erhitzt und anschließend zu Polyesterfäden für die Herstellung von Bekleidungsartikeln (z. B. Fleece-Jacken) verarbeitet.

2.1.a) Recycling strategischer Metalle und Industriemineralien*F&E-Aspekt „Recycling 5“: Aufkonzentration***Entwicklung dem Recycling vorgelagerter Prozesse zur Aufkonzentration strategischer Metalle und Industriemineralien****Beschreibung**

Durch steigende Anforderungen hinsichtlich technisch-wirtschaftlicher und vermehrt ökologischer Aspekte werden moderne verfahrenstechnische Anlagenkonzepte immer komplexer. Schon bei Produktionsprozessen von Gütern, wie auch später bei oft aufwändigen Recyclingprozessen scheiden, bedingt durch den maßgebenden Grundprozess, bestimmte rohstoffhaltige Materialien beiläufig in Nebenströmen aus. Dies ist auf Grund komplexer Materialzusammensetzungen und der immer mehr Einzug haltenden Komponentenbauweise oft unvermeidbar. Es besteht daher grundsätzlich die Erwartungshaltung, dass durch technische Neuerungen oder Modifikationen von verfahrenstechnischen Prozessen rohstoffintensive Nebenprodukte sequestriert und potenziell zur stofflichen Wiederverwendung nutzbar gemacht werden können.

Ansätze

Mögliche Ansätze zur Aufkonzentrierung strategischer Rohstoffe liefert z. B. die Wiederverwendung von Stahlschrott. In Stahlwerken wird bei der Verhüttung Stahlschrott aus dem Recyclingprozess hinzugegeben. Dieser Stahlschrott enthält u. a. Zinkanteile aus der Veredelung, welche nach der Zugabe in die Schmelze in den „dampfförmigen“ Zustand übergehen. Beim Kontakt mit Sauerstoff im Rauchgas oxidieren diese Zinkelemente und lagern sich an Staubpartikeln an, welche für gewöhnlich im Rauchgas mitgeführt werden (Dreyer et al. 2009). Diese zinkhaltigen Stahlwerksstäube werden abgeschieden und weiter aufbereitet, das heißt die zinkhaltigen Stäube werden in einem metallurgischen Wälzprozess im Drehrohfen zu Wälzoxid, welches im Wesentlichen aus Zinkoxid (ZnO) besteht, verarbeitet (Fraunhofer ICT 2007). Der gewonnene Rohstoff wird als Sekundärzink wiederum in der Güterproduktion eingesetzt.

Parallelen zum obigen Ansatz liefert das Recyclingkonzept „Val´Eas“ von UMICORE. In einer speziell für das Batterierecycling zugeschnittenen Anlage in Schweden werden nachhaltig Rohstoffe aus Altbatterien zurückgewonnen. Beim „Val´Eas“-Verfahren zielen die Verfahrensschritte vorrangig auf die Rückgewinnung von Cobalt und Nickel ab. Die Elemente werden in Form von Cobaltoxid und Nickelhydroxid zurückgewonnen und wiederum für die Herstellung neuer Batterien im Sinne eines geschlossenen Kreislaufs verwendet. Bei diesem Prozess scheiden zudem neben Eisen auch Kupfer als hochwertiges Nebenprodukt aus und ist potenziell stofflich nutzbar. In der anfallenden Schlacke befindet sich Lithium, wobei hier aus verfahrenstechnischen Gründen gegenwärtig die Rückgewinnung noch nicht erschlossen ist. Die Schlacke findet in der Baustoffindustrie ihre Anwendung (Öko-Institut 2009).

2.1.a) Recycling strategischer Metalle und Industriemineralien

F&E-Aspekt „Recycling 6“: Effiziente Nutzung bei dissipativer Verwendung

Konzepte und Technologien zur ressourceneffizienten Nutzung strategischer Rohstoffe, insbesondere bei dissipativer Verwendung

Beschreibung

Im Allgemeinen versteht man unter Dissipation den Verbrauch von Rohstoffen im Rahmen nicht wieder auszugleichender irreversibler Verluste. Im weiteren Sinne bedarf diese Interpretation allerdings einer genaueren Betrachtung. Hierbei steht der verfahrensbedingten Dissipation (Dispersverluste) von Rohstoffen in Form von klassischen Korrosionsvorgängen, Abrieb oder in Folge weiterer chemischer Prozesse (z. B. 20 % Verlust des Platingehaltes im Lebenszyklus der Autoabgaskatalysatoren) die systematische Dissipation (Systemverluste) durch breitgestreute Feinstverteilung von kritischen Rohstoffen („Entropie der Rohstoffe“) eingetragen in zahlreichen Massen- und Wegwerfprodukten gegenüber (z. B. Einsatz von Indium in ca. 1 Mrd. Produkten pro Jahr weltweit (IZT 2008)). Letzteres stimmt vor allem im Zuge der stetig ansteigenden Elektronifizierung unserer Gesellschaft bedenklich. In High-Tech Elektronik sind derzeit geringste Konzentrationen an knappen strategischen Metallen oder Mineralien eingebettet (z. B. USB-Sticks). Trotz verstärkter Bestrebungen wird durch diese zunehmende Dispergierung von relevanten Rohstoffen, gerade in miniaturisierten Produkten, ohne ausdifferenzierte Sammelsysteme vor allem in den Restabfallströmen ein steigender Gehalt an wertvollen Inhaltsstoffen deutlich, welcher derzeit kaum wiederbringlich in Deponaten oder in Verbrennungsschlacken verloren geht.

Ansätze

Nach Schätzungen der Vereinten Nationen gelangen jährlich durch nicht fachgerechte Entsorgung rund 40 Millionen Tonnen Elektrogeräte weltweit in den Müll. Dieses Verbraucherverhalten trägt dazu bei, dass wertvolle Rohstoffe, welche sich in den Produkten wiederfinden, verloren gehen. Als ein Beispiel kann hier modernes Kinderspielzeug genannt werden. Kinderspielzeug in miniaturisierter Form besteht vorwiegend aus Kunststoff. Nutzergerecht sind die darin verbauten Elektronik- und Batteriebestandteile meist gut verschweißt und kaum demontierbar. Nach der Gebrauchsphase landet das Spielzeug, zum Teil auch auf Grund mangelnder Recyclingstrukturen, samt wertvollen Inhalten in aller Regel im Restmüll. Neben elektronischen Gebrauchsgütern versinnbildlichen sogenannte „Smart-Labels“ die dissipative Verschwendung wertvoller Rohstoffe. Smart-Labels im Sinne einer modernen digitalen Etikettierung auf Silberbasis, sind ultraflache Transponder, die mit Hilfe einer Folie auf Produkte aufgebracht werden und Codierungen sowie Produktinformationen enthalten. Vorwiegende Einsatzbereiche sind Produktion, Logistik, Einlasskontrolle, oder Pässe. Für gewöhnlich werden die Smart-Labels mitsamt dem Produkt oder der Produktverpackung im Restmüll entsorgt (IZT 2008). Hierzu gilt es, praktikable Lösungsansätze zu generieren, die eine Dissipation knapper Rohstoffe gering halten oder gar ganz vermeiden.

2.1.a) *Recycling strategischer Metalle und Industriemineralien*

F&E-Aspekt „Recycling 7“: Recyclingtechnologien

Flexible, leistungsfähige (Spezial-)Recyclingtechniken, die kosten- und energieeffizient hochwertige, direkt in Wertschöpfungsprozesse wiedereinsatzfähige Sekundärrohstoffe gewinnen

Beschreibung

Die deutsche Recyclingwirtschaft hat sich in den vergangenen 15 Jahren sehr dynamisch entwickelt und als äußerst fortschrittlich erwiesen. Bisher orientierten sich die gängigen Anlagen zur Sekundärrohstoffherstellung eher an dem Ziel, möglichst hohe Recyclingquoten zu erreichen, weshalb sie vielmehr auf die mengenmäßig dominierenden Fraktionen hin optimiert werden. Erweiterter Handlungsbedarf wird aktuell vor allem im Bereich strategischer Rohstoffe laut. Bestehende Recyclingtechnologien erfüllen nur in geringem Maße die Anforderungen zur optimierten Rückgewinnung von strategischen Rohstoffen, da diese in der Regel nur in geringsten Konzentrationen vorliegen und zudem für gewöhnlich in komplexe Materialverbunde implementiert sind. Innerhalb des Rückgewinnungsprozesses hat die Art der Erstbehandlungstechnologie – meist die Zerkleinerung – signifikanten Einfluss auf die Edelmetallausbeuten. Starkes Shreddern führt beispielsweise zu einer sehr heterogenen Verteilung von Spurenmetallen in Fraktionen wie Kunststoffen und Eisenschrott (Bolland et al. 2010). Edelmetalle werden dabei als Stäube im Ablufttrakt ausgetragen oder schlagen sich auf der Oberfläche magnetischer Outputfraktionen nieder und werden somit unwiederbringlich durch Magnetabscheidung mit in die Eisenmetallfraktion ausgetragen (Chancerel et al. 2009). Diese Grenzen der Rückgewinnung bei Metallen im Spurenbereich belegt Hagelüken (2010b) mit hohen Goldverlusten aus falscher und mangelnder Aufbereitung von WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment). Im Zuge dessen sind in Zukunft angepasste und abgestimmte Verfahren zu generieren, welche vorrangig kritische Rohstoffe im Spurenbereich zurückgewinnen, ohne dabei die Rückgewinnung konventioneller Materialien außer Acht zu lassen. Angestrebt werden ganzheitliche Recyclingtechniken mit erhöhten Ausbeuten, die eine „immer wiederkehrende“ Verwendung (kein „Downcycling“) kritischer Rohstoffe verfolgen.

Ansätze

Stoffstromanalysen von (Chancerel et al. 2009) zur Verwertung von Elektronik- und Elektroaltgeräten in einer modernen Aufbereitungsanlage legen klar offen, dass bezogen auf den Materialinput lediglich Ausbeuten von nur 26 % Gold, 26 % Palladium und 12 % Silber zur weiteren Rückgewinnung aus der Erstbehandlung erzielt werden konnten. Erste Ansatzpunkte sehen (Chancerel et al. 2009) in der Modifikation von Zerkleinerungs- und Sortierprozessen. Insbesondere innovative Sensortechnologien ermöglichen gezieltere Sortierverfahren, welche u. a. im Hinblick auf Sortenreinheit erhebliche Vorteile aufweisen. Primär sind Verfahren und Anlagen zu konzipieren, die neben konventionellen Sekundärrohstoffen erhöhte Ausbeuten knapper metallischer und mineralischer Rohstoffe erreichen können.

2.1.a) Recycling strategischer Metalle und Industriemineralien*F&E-Aspekt „Recycling 8“: Trennung komplexer Materialverbunde****Innovative Recyclingtechnologien zur Trennung hoch komplexer Materialverbunde und die Rückgewinnung der enthaltenen strategischen Metalle und Industriemineralien*****Beschreibung**

Im Gegensatz zum vorangegangenen F&E-Aspekt 7, bei dem die Optimierung der gesamten Kette des Recyclingprozess im Mittelpunkt stand, wird in vorliegendem Aspekt punktuell der Verfahrensschritt der Auftrennung von Stoffverbunden näher diskutiert. Verbundwerkstoffe und komplexe Werkstoffverbunde gewinnen mehr und mehr an Bedeutung – sei es, um die Leistungsfähigkeit von Bauteilen zu steigern (Milchverbundkarton, Beschichtungen), Gewicht einzusparen („tailored-blanks“), sie zu miniaturisieren (Mikroelektronik) oder spezifische Stoffeigenschaften einzustellen (Hybridpolymere). Die Trennung hoch komplexer Materialverbunde, wie sie beispielsweise in integrierten Schaltkreisen realisiert sind, und die sortenreine Rückgewinnung der enthaltenen Wertstoffe stellt höchste Anforderungen an die Recyclingtechnik, die gegenwärtig aus technischen oder wirtschaftlichen Gründen oft noch nicht erreicht werden (KIT 2010). Die Notwendigkeit liegt im Allgemeinen darin, neben einem Umdenken in der derzeitig praktizierten Produktgestaltung (Design for Recycling, DfR) in Form vermehrt auftretender stoff- und formschlüssiger Komponentenbauweise, mit innovativen Verfahrensprozessen Materialverbunde aufzutrennen und wiedereinsatzbare Sekundärrohstoffe zu gewinnen.

Ansätze

In Hinblick auf die Trennung komplexer Materialverbunde sind bereits einige Prinzipien bekannt. Durch hydrometallurgische Verfahren können metallische Komponenten der Entsorgungsprodukte mittels nasschemischer Prozesse gelöst werden. Eine weitere Auftrennung in einzelne Elemente bzw. Elementgruppen kann mit Hilfe von elektrochemischen Verfahren (z. B. Elektrolyse) oder durch Extraktion (Verteilung zwischen zwei sich nicht mischenden Flüssigkeiten) erreicht werden. Diese Verfahren sind auf Grund des erhöhten Chemikalienbedarfs relativ kostenintensiv (Nassour 2000).

Mögliche Ansätze und Parallelen zur Auftrennung von metallischen und mineralischen Werkstoffen liefern Faserverbundstrukturen. Derartige Strukturen werden mittels thermischer Vergasung aufgetrennt. Die Fasern lösen sich vom Matrixwerkstoff und können wiederverwendet werden. Beispielsweise können so großflächige Strukturbauteile z. B. Flugzeugteile aufgearbeitet und die Fasern für die erneute Produktion von Bauteilen (mit geringeren mechanischen Anforderungen) wie Tankbehälter, Kfz-Teile etc. verwendet werden.

2.1.a) Recycling strategischer Metalle und Industriemineralien*F&E-Aspekt „Recycling 9“: Gleichzeitige Erfassung von Wertstoffen***Verfahren zur gleichzeitigen Erfassung von mehreren Wertstoffen und damit Erhöhung des ökologischen und ökonomischen Nutzens****Beschreibung**

Ein stetiges Bestreben seitens der Regierung ist die Erhöhung der Abfallverwertungsquote. Zentrale Voraussetzung zum Erreichen dieses Zieles ist ein effizientes, einfaches und kostengünstiges System zur Sammlung und Sortierung der Abfälle. Unter Berücksichtigung der Vielfalt der auftretenden Abfallfraktionen bedeutet dies, möglichst viele hiervon gleichzeitig zu erfassen und im anschließenden Schritt die darin enthaltenen Wertstoffe zu separieren und den weiteren Recycling- und Verwertungslinien zuzuführen.

Ansätze

In dem derzeitigen Erfassungssystem für Siedlungsabfälle wird eine getrennte Erfassung von Leichtverpackungen (LVP) im privatwirtschaftlich organisierten Dualen System vorgenommen, während die stoffgleichen Nichtverpackungen über das kommunale Restmüllregime erfasst werden. Eine Weiterentwicklung dieses Systems wäre die Einführung einer einheitlichen Wertstofftonne. Hierbei handelt es sich um ein Sammelsystem, das der gemeinsamen Erfassung gleichartiger oder auf dem gleichen Wege zu verwertender Erzeugnisse dient.

In der Praxis wurde dieser Ansatz bereits durch die Erweiterung des Sammelsystems Gelber Sack bzw. Gelbe Tonne z. B. zur Gelben Tonne^{plus} im Rahmen von Pilotprojekten getestet. Dabei gelangen zusätzlich Nichtverpackungen aus Metall und Kunststoffen sowie Elektrokleingeräte aber auch Holz in die Gelbe Tonne^{plus} (Oetjen-Dehne 2009). Die damit ebenfalls verbundene Option der Erfassung von Elektrokleingeräten (derzeit jedoch inkompatibel mit Anforderungen des ElektroG) erforderte allerdings die Nachrüstung von Technologien in den Sortieranlagen für Leichtverpackungen. Zur Identifikation der Elektrokleingeräte wurden Metalldetektoren in Verbindung mit Zweikanal-Röntgensensoren verwendet (Langen et al. 2008).

Eingeführt wurde dieses Sammelsystem bisher flächendeckend in der Stadt Leipzig und bei einigen Wohnungsgesellschaften im Land Berlin. Da Berlin nicht flächendeckend mit dem System ausgestattet wurde und nur Geschosswohnungsbauten in die Systemumstellung einbezogen wurden, ist die Repräsentativität der Ergebnisse gegenüber der Situation in Leipzig in Frage zu stellen. Ein Vergleich der Ergebnisse vor und nach der Systemumstellung zeigt dennoch für beide Versuche eine deutliche Steigerung der Erfassungsquoten für Wertstoffe bei annähernd konstanten Restabfallmengen.

Die rechtlichen Voraussetzungen zur Einführung der Wertstofftonne werden derzeit im Rahmen der Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes vorbereitet. Der vorliegende Gesetzesentwurf enthält in § 10 Abs. (1) Nr. 3 eine entsprechende Verordnungsermächtigung.

2.1.a) *Recycling strategischer Metalle und Industriemineralien*

F&E-Aspekt „Recycling 10“: Produkt-Dienstleistungskonzepte

Innovative Produkt-Dienstleistungskonzepte, Ressourceneffizienzaudits oder ähnliche Ansätze, die zur Einsparung strategischer Metalle und Industriemineralien beitragen oder das Recycling fördern

Beschreibung

Angebote, welche Sach- und Dienstleistungen integrieren, sogenannte hybride Leistungsbündel, versprechen dem Kunden eine auf ihn zugeschnittene Lösung von „Problemen“. In der Praxis haben sich insbesondere fünf Leistungskategorien solcher Produkt-Dienstleistungskonzepte etabliert. Neben Verfügbarkeitsgarantien, garantierte Lebenszykluskosten, Verträgen über laufende Optimierungen, werden auch Konzepte wie Pay on Production oder das Chemikalienleasing angeboten (Fraunhofer ISI 2010b). Autoleasinggesellschaften bieten beispielsweise Geschäfts- und Privatkunden neben dem Fahrzeug auch noch Zusatzleistungen wie Versicherung, Steuer, Wartung und Service, Reifenservice, Tankcard und GEZ-Gebühr an (ALD 2010). Da solche „Gesamtpakete“ (Full-Service-Leasing) auf allen Märkten immer stärker an Bedeutung gewinnen, muss der Ressourcenaspekt bei diesen Modellen ebenso Berücksichtigung finden. Dabei kann der Umstand genutzt werden, dass zwischen dem Anbieter und Nachfrager beim Kauf eines Produktes meist über den Vertragsabschluss hinaus eine enge Beziehung fortbesteht. Hierbei wären z. B. Prozessoptimierungen während des Betriebes oder die Rücknahme von Ersatz- und Verbrauchsmaterial denkbar. Darüber hinaus kann am Ende der Nutzungsphase der Kontakt genutzt werden um die Produkte zurückzunehmen und zu recyceln bzw. aufzuarbeiten und dann erneut einzusetzen. Dieses Produkt Know-how kann somit über den ganzen Lebenszyklus des Produktes genutzt werden.

Ansätze

Führende Elektronikunternehmen, welche unter anderem für Drucker-, Fax-, und Scan-Geräte bekannt sind, bieten dem Kunden neben dem eigentlichen Produkt ebenso verschiedene Wartungs- und Serviceverträge an. Daneben können leere Tonerkartuschen und sonstige Verbrauchsmaterialien auf Unternehmenskosten zurückgesandt werden. Dort folgt eine Aufbereitung. Weiterhin werden die Geräte am Ende eines Leasingvertrages geprüft, auf den erneuten Einsatz hin bewertet und evtl. hochgerüstet.

2.1.b Substitution bzw. Einsparung strategischer Metalle und Industriemineralien

Stand der Technik

Ziel ist es, den kumulativen Ressourcenaufwand während des gesamten Lebenszyklus eines Produktes zu verringern. Hier kann wiederum die modellhafte Vorstellung einer einfachen Wertschöpfungskette (Abbildung 6) hilfreich sein. Bei dieser ganzheitlichen Betrachtung wird eine Verschiebung des Ressourcenaufwandes auf andere Stufen vermieden. Neben den Einsparungen auf der Ebene der Produktion, zum Beispiel durch technologische und organisatorische Optimierung, kann der Verbrauch von Metallen und Mineralien insbesondere auf der Ebene der Güterproduktion und der Güternutzung wirksam verringert werden. Hier sind außer den auch auf anderen Wertschöpfungsstufen erzielbaren inkrementellen Verbesserungen sogar Effizienzsprünge denkbar (Faulstich et al. 2009). Nachfolgend werden einige Aspekte näher beleuchtet, welche in engem Zusammenhang zu dieser Zielsetzung berücksichtigt werden müssen.

⇒ *Substitution*

Die direkte Substitution von strategischen Rohstoffen durch Materialien mit verlängerter statischer Reichweite oder besserer Verfügbarkeit ist insbesondere bei den Technologierohstoffen nur schwer möglich. Grundsätzlich besitzen diese Rohstoffe sehr spezifische physikalische, mechanische oder chemische Eigenschaften, welche beim Einsatz in technischen Produkten gezielt genutzt werden. Damit sind die Funktionalitäten von Geräten stark von der Verwendung dieses einen Rohstoffes abhängig. Am Beispiel von elektronischen und opto-elektrischen Anwendungen werden in Abbildung 16 potenzielle Ersatzmaterialien dargestellt. In Anlehnung an diese Abbildung grenzen die derzeit eingesetzten Elemente direkt an die Anwendung. Mögliche Substitute sind grau hinterlegt und knüpfen in der folgenden Abbildung an die derzeitigen Elemente an.

Neben dem direkten Ersetzen von Werkstoffen können auch ganze Technologien bzw. Funktionen substituiert werden. Hierbei sind die Möglichkeiten deutlich umfangreicher und umfassender. Einige weitere Ansätze hierzu werden in den nachfolgenden F&E-Aspekten dargestellt.

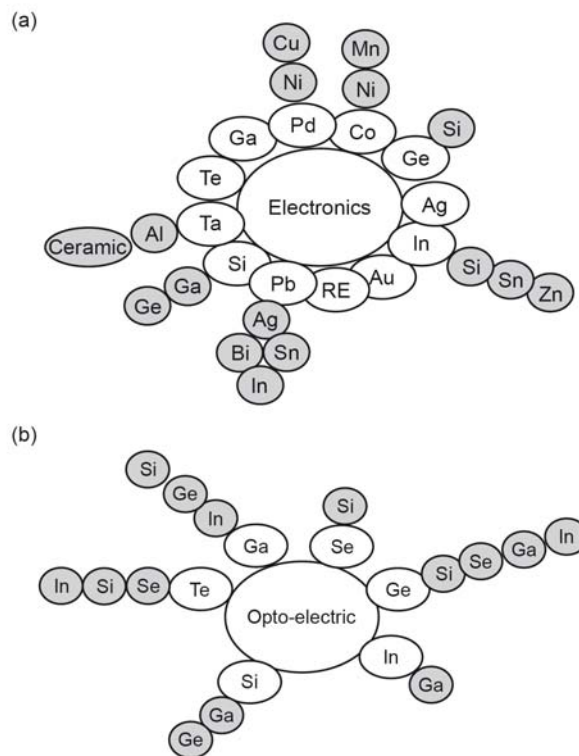


Abbildung 16: Substitution der Metalle in (a) elektronischen und (b) opto-elektrischen Anwendungen (Hagelüken, Meskers 2010) weiß: derzeit genutzte Elemente, grau: mögliche Substitute

⇒ Rebound Effekt

Unter dem Rebound-Effekt versteht man die Tatsache, dass Effizienzsteigerungen (Einsparungen) durch vermehrte Nutzung und Konsum überkompensiert werden. Auf den Bereich der Rohstoffe übertragen bedeutet dies, dass Materialeinsparungen (knappe Rohstoffe) z. B. im Bereich der Telekommunikation oder Unterhaltungselektronik zu Kostensenkungen bei den Produkten führen. Dies stimuliert wiederum die Nachfrage der Konsumenten nach diesen Gütern. Dadurch steigt der absolute Rohstoffbedarf insgesamt sogar an (keine Nettoeinsparungen).

⇒ Ressourcenorientierte Managementsysteme

Um die Wertschöpfungsketten stärker im Hinblick auf den Ressourceneinsatz zu optimieren, bedarf es angepasster Managementsysteme und Methoden, welche sowohl den Prozess als Ganzes, als auch die einzelnen Stufen berücksichtigen. Die dabei denkbaren Möglichkeiten können sich allerdings hinsichtlich Komplexität und Umfang deutlich unterscheiden. Erste Überlegungen und Konzepte hierzu wurden bereits in den neunziger Jahren entwickelt.

Ein Ansatz, welcher allerdings nur auf der „Wertschöpfungsebene“ der Produktion wirkt, ist der Produktionsintegrierte Umweltschutz (PIUS). Hierbei handelt es sich um einen Maßnahmen- und Methodenkatalog, welcher die übergeordneten Ziele von niedrigen Energie- und Rohstoffverbräuchen, effizienten Abläufen, aber auch die gezielte Vermeidung von Abfall, Abwasser und sonstigen Emissionen verfolgt. Aus praktischer Sicht ergeben sich für die Unternehmen dabei folgende Ziele (BIFA 2008).

- ▶ Erfassung und Aufbereitung von Daten zur Erfassung der Effektivität der Prozesse
- ▶ Optimierung von Prozessabläufen innerhalb der komplexen betrieblichen und organisatorischen Strukturen
- ▶ Nutzung effizienter und innovativer Verfahren
- ▶ Verbesserungen in verfahrenstechnischer Hinsicht mit hoher Rentabilität
- ▶ Effizienter Einsatz von Roh-, Betriebs- und Hilfsstoffen
- ▶ Nutzung von Energiesparpotenzialen, z. B. durch Abwärmenutzung
- ▶ Alternativen der Energiebereitstellung (z. B. firmenübergreifender Zusammenschluss)
- ▶ Substitution umweltbelastender Hilfs- und Betriebsstoffe
- ▶ Betriebsinterne Kreislaufführung von Einsatzstoffen
- ▶ Hochwertige Verwertung unvermeidbarer Rückstände
- ▶ Überprüfung der Prozesse auf bestimmungsgemäßen Betrieb

In einem bayerischen Pilotprojekt wurden beispielsweise ein bis zu 60 % reduzierter Chemikalieneinsatz, eine bis zu 70 % reduzierte Sonderabfallmenge und eine zwischen 3 % und 60 % reduzierte Wasser- bzw. Abwassermenge erreicht. Die damit verbundenen Kosteneinsparungen bei den Unternehmen bewegten sich im Bereich von 5.000 € bis zu 600.000 € (BIFA 2008).

Einen weiteren, viel weit reichenderen Ansatzpunkt stellt das Konzept der Integrierten Produktpolitik (IPP) dar. Übergeordnetes Ziel ist es hier, während des gesamten Produktlebenszyklus schädliche Umweltauswirkungen von Produkten soweit wie möglich zu verringern und Ressourcen zu schonen. Die grundlegenden Handlungsprinzipien von IPP sind Integration, Kooperation und Kommunikation. Integriert meint dabei die Berücksichtigung aller Lebensphasen, vom Abbau der Rohstoffe über die Grundstoffproduktion, Produktherstellung, den Vertrieb, Verwendung und Nutzung bis hin zur Verwertung. Weiterhin muss auch das Produktumfeld mit einbezogen werden. Dieses systemische Denken ist nur durch eine vertrauensvolle Kooperation und Kommunikation aller Akteure (z. B. vor- bzw. nachgelagerter Stufen) möglich. Von entscheidender Wichtigkeit ist es, bereits die frühen Phasen der Entwicklung und Konstruktion nach ökologischen Aspekten wie Ressourceneffizienz, Abfallreduzierung und Abbau von Schadstoffbelastungen auszurichten. Die Hersteller könnten so verstärkt ihre Produkte hinsichtlich Langlebigkeit, Reparaturfähigkeit oder dem Einsatz erneuerbarer Materialien hin optimieren und diese Kriterien während der Entwicklung als festen Bestandteil im Produktlastenheft verankern (z. B. Design for Recycling). Ein Beispiel für die systemische Betrachtungsweise beim Automobil ist in Abbildung 17 dargestellt.

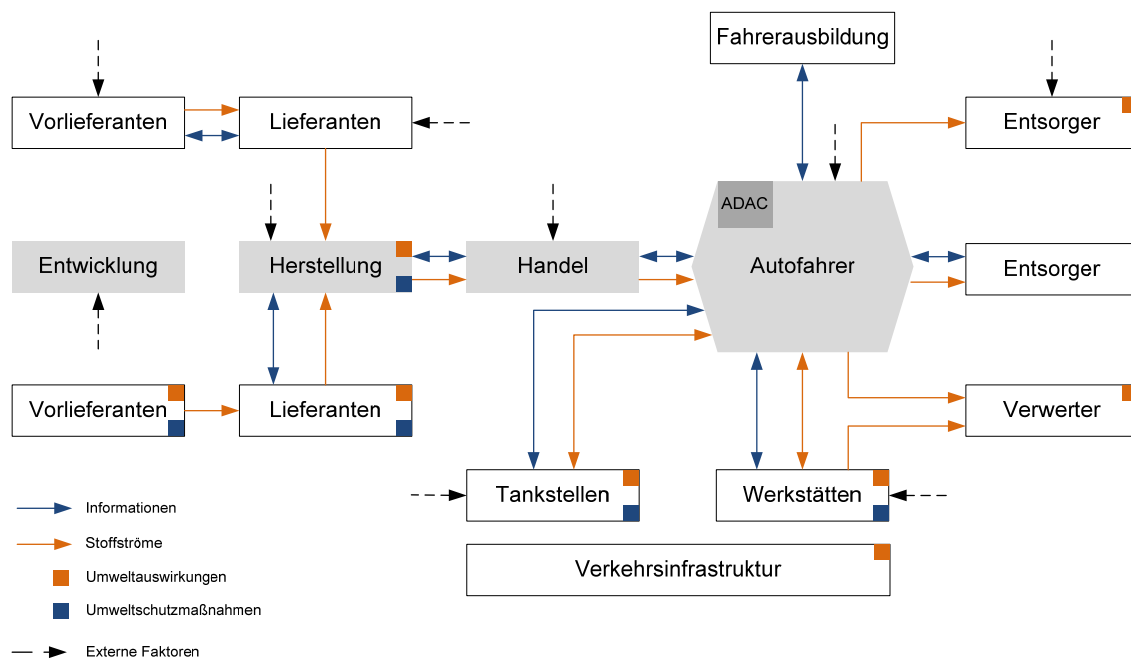


Abbildung 17: Aspekte des Produktionssystems Automobil (IPP 2001)

Allerdings finden solche übergreifenden Methoden nur sehr schleppend Verbreitung. Ein Grund für die mangelnde Umsetzung ist sicherlich darin begründet, dass zum Zeitpunkt der Entwicklung, Auslegung und dem Design von Produkten Anforderungen hinsichtlich Ressourceneffizienz häufig immer noch von untergeordneter Bedeutung sind. Gleichwohl wird zu diesem Zeitpunkt bereits in ganz erheblichem Maße über Art und Umfang des Ressourcenverbrauches sowohl für das eigentliche Produkt, als auch der Produktion und der Nutzung entschieden.

⇒ *Produktverantwortung / Produzentenverantwortung*

Hierunter wird die Verantwortlichkeit eines Produzenten / Herstellers oder Vertreibers für den Lebenszyklus eines Produktes, angefangen von der Entwicklung bis hin zur Entsorgung, verstanden. In Deutschland gehen die ersten Ansätze auf die Verpackungsverordnung Anfang der Neunziger Jahre zurück. Weiterhin wurde im Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (1994) die Produzentenverantwortung für alle Konsum- und Gebrauchsgüter definiert, welche als Grundvoraussetzung der Kreislaufwirtschaft gilt. Der Hersteller ist seither ebenfalls für die Vermeidung, Verwertung und Beseitigung der durch sein Produkt entstehenden Abfälle verantwortlich.

F&E-Bedarf

Allgemein ist festzustellen, dass zwar vielfältige Ansätze vorhanden sind, unsere Wirtschaftskreisläufe im Hinblick auf Nachhaltigkeit (ökologische Dimension) zu optimieren. Allerdings müssen diese erarbeiteten Konzepte und Methoden stärker verbreitet und umgesetzt werden. Insbesondere das mit diesen Ansätzen verbundene systemische Denken darf nicht als Last und Kostenfaktor gesehen werden, sondern muss als Gesamtverständnis in allen Funktionsbereichen der Unternehmen, vom Marketing, über die Entwicklungsabteilung, bis hin zu Produktion und Vertrieb, verankert werden.

Im Hinblick auf den weiteren Forschungsbedarf lässt sich erkennen, dass die bestehenden Ansätze mehr Augenmerk auf den Material- und Ressourcenverbrauch richten sollten. Weiterhin wird bisher beim Rohstoffverbrauch nur ungenügend zwischen Massenrohstoffen und strategischen Rohstoffen unterschieden. Neben Einsparungen beim Produktionsprozess stellt ressourcenschonende technologische und funktionale Substitution ebenfalls eine Möglichkeit dar. Die Verbesserungen können sowohl aus dem Produktumfeld als auch aus Dienstleistungen (insbesondere hybride Leistungsbündel) stammen. Weiterhin liegt ein Schlüssel in der wertschöpfungskettenübergreifenden Optimierung. Im Bereich dieser Wertschöpfungsnetze gilt es, sowohl technische, als auch organisatorische Verbesserungen zu initiieren.

2.1.b) Substitution bzw. Einsparung strategischer Metalle und Industriemineralien*F&E-Aspekt „Substitution 1“: Technologische Substitution***Neue Technologien und Verfahren, welche vergleichbare Funktionalität und Wirtschaftlichkeit ohne bzw. mit geringerem Bedarf an strategischen Rohstoffe realisieren können (Technologische Substitution)****Beschreibung**

Das Ersetzen alter durch neue Technologien ist eine Routine im Technologiewandel. Ein Ziel dieser Technischen bzw. Technologischen Substitution sollte es sein, den Verbrauch an strategischen Rohstoffen durch die Entwicklung neuer Vorgehensweisen zu minimieren. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Qualität des substituierten Produktes oder Prozesses sich nicht verschlechtern darf, da sonst die Gefahr der mangelnden Akzeptanz in der Bevölkerung besteht. Ein Beispiel für die Technische Substitution stellt die Entwicklung von der Gaslampe zur Gasentladungslampe dar, welche mit einer enormen Einsparung von Primärenergie einhergeht. Ein weiteres Beispiel aus dem Bereich der Technologischen Substitution stellt die individuelle Wiedergabe von Musik dar. Den Anfang bildete der Plattenspieler, welcher von dem Kassettenrecorder, dem CD Spieler und schließlich dem MP3 Player abgelöst wurde. Die Grundfunktionalität ist dabei unverändert geblieben. Ziel dieses Punktes ist die Kombination eines solchen Technologiesprunges mit der damit einhergehenden Verringerung des Einsatzes von knappen Rohstoffen. Dieser Substitutionsschritt vereinfacht weiterhin die Anforderungen an den Recyclingprozess hinsichtlich Rückgewinnung und Aufkonzentration.

Ansätze

Etwa 71 % der Gesamtförderung von Antimon wird als Flammschutzadditiv verwendet, es weist jedoch nur noch eine sehr begrenzte statische Reichweite auf. Für diese Anwendung gilt Antimon durchaus als substituierbar (USGS 2010), (Fraunhofer ISI 2009), (European Commission 2010).

Ein anderes Beispiel zur Substitution von kritischen Metallen ist der Einsatz von Aluminium anstelle von Kupfer. Ein Großteil des Kupfers wird im Bereich der elektrischen Energietechnik und bei Elektromotoren verwendet (Fraunhofer ISI 2010a). Aluminium, welches sich ebenfalls als guter Leiter bei ähnlichen mechanischen Eigenschaften auszeichnet, ist daher grundsätzlich als Substitut geeignet. Beispielsweise wird versucht, Teile von Elektromotoren durch Aluminium zu ersetzen. Eine angepasste Konstruktion bzw. Design ist dabei jedoch notwendig. Niobium wird wegen seiner spezifischen Eigenschaften in vielen Bereichen genutzt und ist mengenmäßig bei der Stahlhärtung dominierend. Niobium kann zwar in den verschiedenen Anwendungen substituiert werden, allerdings ist dies zum Teil mit hohen Kosten und / oder Leistungseinbußen verbunden. Potenzielle Alternativen sind beispielsweise Molybdän und Vanadium bei Stählen.

2.1.b) Substitution bzw. Einsparung strategischer Metalle und Industriemineralien*F&E-Aspekt „Substitution 2“: Einsparungen Produktionsprozess***Neue Lösungen zur Einsparung strategischer Metalle und Industriemineralien im Produktionsprozess (unter Berücksichtigung des möglichen Beitrags von Querschnittstechnologien) und in Wertschöpfungsnetzen****Beschreibung**

Einsparungen im Bereich der Produktion können sowohl direkt durch abfallarme Verfahren realisiert werden als auch durch Steigerungen der betriebsinternen oder betriebsexternen Verwertung der Abfälle (Bilitewski et al. 2000).

Während bei der Planung neuer Fertigungs- und Produktionsanlagen auch grundlegend geänderte, neuartige Prozesse eine Möglichkeit darstellen, sind die Maßnahmen während des laufenden Betriebes deutlich begrenzter. Potenzielle Hebel stellen hier beispielsweise Parameter-, Verfahrens- oder Verschnittoptimierungen dar (DEMEA 2010).

Neben der unmittelbaren Produktionsanlage muss auch das Produktionsumfeld berücksichtigt werden. Flankierende Bereiche und Tätigkeiten wie Instandhaltung, Disposition, Lagerhaltung, Verpackung und Versand, Transport und Reinigung, müssen ebenso Beachtung finden (DEMEA 2010).

Ansätze

Die Effizienzfabrik, ein Zusammenschluss der Verbundprojekte des BMBF-Schwerpunkts „Ressourceneffizienz in der Produktion“, fördert in den Themenfeldern *Neue Technologien, Produktionsanlagen, Funktionale Oberflächen, Simulation & Bewertung* und *Fertigungsbedingte Produkteigenschaften* insgesamt 31 Verbundprojekte, bei denen in Summe ca. 200 Industrieunternehmen zusammenarbeiten (Rainfurth et al. 2010).

Ein viel beachtetes Thema sind innovative Beschichtungen, welche eine deutliche Steigerung bei der Standzeit von verschleißbeanspruchten Oberflächen bewirken. Neben dem Werkstoff an sich, ist hierunter ebenfalls die Beschichtungstechnologie (z. B. Galvanik) Ziel von Forschungsaktivitäten. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass es sich hierbei in der Regel um einen festen Materialverbund zwischen Basiskörper und der Beschichtung handelt, welcher beim Recycling nur schwer zu trennen ist.

2.1.b) Substitution bzw. Einsparung strategischer Metalle und Industriemineralien*F&E-Aspekt „Substitution 3“: Optimierung Wertschöpfungsketten***Einsparung strategischer Rohstoffe durch technische und organisatorische Optimierung von Wertschöpfungsketten****Beschreibung**

Nachdem bei den vorangegangenen F&E-Punkten eher Optimierungen auf einzelnen Stufen der Wertschöpfungskette (Produktionsprozess, Produkt- bzw. Verfahrensentwicklung) das Ziel waren, sollen hier nun gesamte Wertschöpfungsketten betrachtet werden. Dabei können sowohl die Strukturen einzelner Produktketten verbessert werden, als auch die Ketten unterschiedlicher Produkte möglichst sinnvoll untereinander kombiniert, parallelisiert und ineinander integriert werden. Dieser Ansatz kann auch branchenübergreifend verfolgt werden. Ein wesentliches Kriterium und Optimierungsziel der dabei möglichen technischen und organisatorischen Maßnahmen stellt die Einsparung strategischer Rohstoffe dar (Erhöhung der Rohstoffexergie). Weiterhin können durch diese Verbesserungen Synergieeffekte und Skaleneffekte gehoben werden, was auch aus rein wirtschaftlicher Sicht attraktiv erscheint.

Ansätze

Rohstoffeinsparungen durch Optimierung von Wertschöpfungsketten wurden beispielsweise von Bosch realisiert. Dort wird seit einiger Zeit ein umfangreiches Austauschteileprogramm mit rund 9000 Teilen aus 27 Produktgruppen angeboten (Bosch 2010). Beim Defekt von etwa Starter, Lichtmaschine, Generator, Klimakompressor usw. können Kunden auf ein wieder aufbereitetes Teil zu deutlich geringeren Kosten (40 % und mehr im Vergleich zum Neuteil) bei zweijähriger Garantie zurückgreifen. Die demontierten, schadhaften Bauteile gehen über ein intelligentes Rücknahmesystem zurück in die Fabrik, wo diese komplett demontiert, gereinigt, instand gesetzt, geprüft und verpackt werden. Bei diesem „Re-Manufacturing“ können nahezu alle Komponenten wieder verwendet werden, was den Materialverbrauch erheblich reduziert. Neben der Organisation und dem Aufbau eines Logistikkonzeptes sind hier auch technische Entwicklungen wie beispielsweise Fertigungslinien zur Demontage, Reinigung, Inspektion und anschließender Montage erforderlich (Steinhilper 1998).

Ein weiteres Beispiel einer organisatorischen und technischen Effizienzsteigerung stellt das Unternehmen „Artmann Consult Geomatik“ dar. Bei der Neuverkleidung von Fassaden wurden die Teile bisher vom Baugerüst aus vermessen und anschließend auf der Baustelle zugeschnitten. Dies bedeutete hohen Ausschuss und lange Bauzeiten (Liedtke et al. 2005). Ein neues Vorgehen, welches mittels einer Kamera dreidimensional digital die Fassade erfasst, den computergesteuerten Zuschnitt in die zentrale Werkstatt verlagert und anschließend die vorkonfektionierten Bauteile an den jeweiligen Positionen montiert, konnte die Bau- und Gerüstzeiten deutlich verkürzen, den Verschnitt senken, den Materialbedarf und die Entsorgungskosten verringern.

2.1.b) *Substitution bzw. Einsparung strategischer Metalle und Industriemineralien*

F&E-Aspekt „Substitution 4“: Funktionale Substitution

Verfahren und Konzepte zur Substitution eines Produkts durch ein anderes Produkt oder eine innovative Produkt-Dienstleistung bei gleicher Funktion aber geringerem Bedarf an strategischen Rohstoffen (Funktionale Substitution)

Beschreibung

Insbesondere Nachfrager von Investitionsgütern wie Maschinen und Anlagen sind meist nur an der quantifizierbaren, messbaren Funktion (Durchsatz, Verbrauch, Qualität usw.) der Produkte interessiert. Beispielsweise beschäftigt sich ein Logistikunternehmen hauptsächlich mit dem Umschlag und dem Transport von Gütern von einem Punkt A an einen anderen Punkt B. Das dabei eingesetzte Transportmittel wie LKW, Bahn, Schiff und die spezifische Ausprägung (z. B. Antriebssystem) ist dabei von nachrangiger Bedeutung, solange es für das Unternehmen gleichermaßen lukrativ erscheint. Das Unternehmen ist daher nur an der Funktion „Transport“ interessiert. Ziel muss es nun sein, diese gleiche Funktion – das heißt die gleiche Menge an Gütern in vergleichbarer Zeit und zu vergleichbaren Kosten zu transportieren – mit geringerem Einsatz von strategisch relevanten Rohstoffen bereitzustellen.

Ansätze

Einen Ansatz stellen hier beispielsweise Leasing- und Mietkonzepte dar, welche im Grunde auf eine Steigerung der Nutzungsintensität der Güter abzielen. Durch die hohe Auslastung von Maschinen und Anlagen wird die gleiche Output-Menge mit deutlich geringerem Ressourceninput bereitgestellt. Stahel (2004) zeigt hierzu eine Vielzahl an Good-Practice-Beispielen auf. Der Anreiz für einen Leasinggeber, diese Dienstleistung anzubieten, besteht sowohl aus der Senkung der Fixkosten durch hohe Laufzeiten, als auch durch die damit verbundenen Lerneffekte (produktspezifisch). Ähnliche Konzepte müssen aber noch eine größere Marktdurchdringung erreichen und insbesondere auf strategische Rohstoffe und knappe Mineralien übertragen werden.

Ein Beispiel zur Bereitstellung bestimmter Funktionen bei verringertem Ressourceneinsatz stellen multifunktionale Geräte dar. Ein Kombinationsgerät vereint die Druck-, Fax- und Kopierfunktion auf einer einzigen Plattform. Ein anderes Beispiel aus dem Bereich der Telekommunikation stellt ein modernes Foto-Handy dar. Neueste Modelle bieten dem Nutzer neben der Basisfunktion „Telefonieren“ ebenso diverse weitere Funktionen, wie Internet, Spiele, Organizer, Medienwiedergabe, Film- und Fotoaufnahme sowie die Möglichkeit zur Nutzung als mobilen Datenspeicher.

Weiterhin sind unter diesem Punkt diverse Leasing-Konzepte zu nennen (UBA 2010). Beim Chemikalienleasing beispielsweise werden vom Leasingnehmer nunmehr die „Funktionen der Chemikalien“, wie z. B. chemische Reinigungsaufgaben oder die Katalyse in Prozessen nachgefragt. Der Leasingnehmer wird von Aufgaben entlastet, was seine Wirtschaftlichkeit und ebenfalls die Ressourceneffizienz erhöht.

2.1.b) Substitution bzw. Einsparung strategischer Metalle und Industriemineralien*F&E-Aspekt „Substitution 5“: Nachhaltigkeit bei Materialsubstitution***Untersuchung der Nachhaltigkeitswirkungen bei Materialsubstitution in der Prozesskette z. B. bei Ersatz anorganischer Materialien durch organische Substitute****Beschreibung**

Gelingt es nun, kritische Metalle und Mineralien durch Rohstoffe mit ähnlichen Eigenschaften, aber längerer Reichweite oder besserer Verfügbarkeit zu ersetzen, so sind Aussagen über die Auswirkungen im Hinblick auf den Komplex der Nachhaltigkeit nicht immer leicht abzuleiten. Neben allen Wirkungen auf die Umwelt während der Nutzungsphase müssen insbesondere die gesamte Vorkette sowie die nachgelagerten Stufen berücksichtigt werden („Rucksack“). Dies erfordert eine genaue Kenntnis des gesamten Lebenszyklus (Life-Cycle). Die dabei relevanten Kriterien, welche gewissermaßen als vergleichender Maßstab dienen, müssen festgelegt und entwickelt werden, bevor diese in ein einheitliches Bewertungssystem eingebettet werden.

Ansätze

Der Ersatz von anorganischen Materialien durch organische Substitute macht dies sehr deutlich. So muss beispielsweise beim Ersatz von Kunststoffverpackungen oder Kunststofftragetaschen durch molke- oder stärkebasierte Modelle bei der Vorkette der Anbau der Pflanzen (z. B. Kartoffel) oder die Milcherzeugung (inklusive Viehfutter für Kühe), als auch der eigentliche Herstellungsprozess mit einbezogen werden. Diese Nachhaltigkeitsauswirkungen sind dann mit denen bei der Gewinnung von Rohöl, der Produktion von Kunststoffgranulat und der Herstellung des Produktes Kunststofftüte zu vergleichen. Am Ende des Lebenszyklus rufen beide wiederum unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt hervor (z. B. CO₂-Emissionen bei der Verbrennung). Während das Kunststoffmodell entweder recycelt oder thermisch verwertet wird, kann das biologische Substitut beispielsweise kompostiert werden.

Bei der Automobilproduktion setzt man schon seit einiger Zeit auf den Einsatz von Flachs-, Hanf-, Sisal-, Ramie- oder Kokosfasern, welche klassische chemische Werkstoffe im Innenraum ersetzen (Kurz et al. 2004).

Die weiße Biotechnologie verspricht das Potenzial, industrielle chemische Produktionsverfahren deutlich günstiger (verringerte Anzahl von Prozessstufen, weniger Materialeinsatz und Energieeinsatz) und ökologischer gestalten zu können (Fraunhofer 2004).

2.2 „Urban Mining“ – Rückgewinnung von Wertstoffen aus anthropogenen Lagern

Urban Mining bedeutet wörtlich aus dem Englischen übersetzt „städtischer Bergbau“. Urban Mining umfasst im weitesten Sinne anthropogen geschaffene Lagerstätten materieller Ressourcen und ist somit nicht nur auf städtische Regionen beschränkt. Vor dem Hintergrund knapper und teurer werdender Ressourcen kommt diesen anthropogen geschaffenen Lagerstätten eine wachsende Bedeutung für die Ressourcenbereitstellung zu. Beispielsweise wird darin mittlerweile mehr Kupfer eingelagert vermutet als noch in natürlichen Lagerstätten vorhanden ist (Brunner 2005). Urban Mining kann somit die Abhängigkeit von steigenden Rohstoffpreisen und Importen verringern.

Eine allgemein gültige Kategorisierung des Urban Mining existiert bisher nicht. Mögliche Ansätze bieten z. B. Abgrenzungen nach Art der Lagerstätte oder nach spezifischen Wirtschaftssektoren (Mocker et al. 2009). Eine Klassifizierung nach der Art der Ressource ist nicht bzw. nur für eine beschränkte Stoffpalette möglich. Sie erfolgt vielmehr nach Kenngrößen, die für die Logistik und Aufbereitungsprozesse wesentlich sind, wie spezifische Mengen und Konzentrationen, Zusammensetzung der Stoffgemische, Homogenität der Verteilung im Lager, Sortenreinheit, Zugänglichkeit des Lagers, Art und Intensität der Inkorporation in diverse Matrices etc. Im folgenden Kontext wird eine zweckmäßige Klassifikation in zwei Handlungsfelder vorgenommen:

- ▶ Infrastruktur
- ▶ Ablagerungen

Das erste Handlungsfeld umfasst den existierenden, aber irgendwann abzureißenden und zu ersetzende Gebäude- und Infrastrukturbestand. Darunter fallen neben den konventionellen Massenbaustoffen auch Leitungen, Kabel, Leuchtmittel, elektrotechnische Installationen, elektronische Einrichtungen usw., in denen auch seltene und kritische Rohstoffe in unterschiedlichen Konzentrationen enthalten sein können. Aus Ressourcensicht sind die Grenzen zu Stoffströmen der Abfallwirtschaft (z. B. Bauschutt, Elektroschrott) fließend. Gerade für dieses Rohstoffpotenzial ist der noch relativ junge Begriff „Urban Mining“ aber besonders treffend (Goldmann 2009).

Unter dem Handlungsfeld Ablagerungen wird die Rohstoffgewinnung aus Deponien, Altdeponierungen, Bergbau- und Hüttenhalden und dergleichen zusammengefasst. Im Englischen ist dafür der Begriff „Landfill Mining“ gebräuchlich, der demzufolge einen Teilbereich des Urban Mining beschreibt. Folgt man einer Kategorisierung nach Wirtschaftssektoren, wäre dieses Handlungsfeld übergreifend bei Bergbau und Verhüttung bzw. Abfallwirtschaft anzusiedeln.

Dem Regime der Abfallwirtschaft sind neben den in der Vergangenheit abgelagerten Abfällen und den beim Rückbau von Infrastruktur entstehenden Restmassen auch derzeit anfallende Mengenströme, wie Post-Production- oder Post-Consumer-Abfälle, zuzurechnen. Im Gegensatz zur Gewinnung von Wertstoffen aus Altdeponien kann die Nutzung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Gebäuden und Industrieanlagen teilweise bereits heute wirtschaftlich sein und wird entsprechend praktiziert. Damit verbundene Forschungs- und Entwicklungsansätze fallen unter die im Kapitel 2.1 erläuterten F&E-Aspekte „Recycling“.

Vor dem Hintergrund zunehmender Knappheiten und demzufolge steigender Rohstoffpreise ist es das Anliegen der Förderung bei den hier vorgestellten Handlungsfeldern des Urban Mining, die Zeitspanne bis zur Wirtschaftlichkeit zu nutzen bzw. zu verkürzen, indem die dafür erforderlichen technischen und logistischen Maßnahmen entwickelt werden. Beispielsweise kann durch konsequentere Verwertung der anthropogenen Kupferlager die Primärproduktion und die damit verbundene Umweltbelastung erheblich reduziert werden. Die daraus abgeleiteten Forschungs- und Entwicklungsaspekte werden im Folgenden erläutert und konkretisiert.

2.2.a Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Infrastruktur

Die geschätzten Sekundärrohstoffmengen des derzeitigen Wohnungsbestandes in Deutschland belaufen sich auf ca. 10,5 Mrd. Mg mineralische Baustoffe (Ziegel, Beton, usw.), ca. 220 Mio. Mg Holz sowie ca. 100 Mio. Mg Metalle. Weiterführende Schätzungen gehen davon aus, dass sich diese Mengen innerhalb der nächsten 15 Jahre um bis zu 20 % erhöhen werden (Gabriel 2007). Dabei ist zu beachten, dass sich diese Angaben lediglich auf den Bereich des Wohnungsbaus beziehen. Sekundärrohstoffmengen, die in Form von Infrastruktur, Industriegebäuden u. a. gebunden sind, bleiben bei den genannten Mengenangaben unberücksichtigt.

Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass in Deutschland bis zum Jahre 2050 ein Bevölkerungsrückgang auf ca. 70 Mio. Einwohner zu erwarten ist (Keßler 2007). Diese Entwicklung hätte zur Folge, dass weitere Teile des baulichen Bestandes zusätzlich zu den derzeit schon brachliegenden Wohn- und Industrieflächen ungenutzt blieben. Somit würden auch zusätzliche Sekundärrohstofflager für Rückgewinnungsmaßnahmen zur Verfügung stehen.

Betrachtet man neben dem Wohnungsbau auch infrastrukturelle Aspekte, so zeigen sich ebenfalls erhebliche Potenziale. Mit einer Gesamtlänge von ca. 231.000 km stellt das deutsche Fernstraßennetz (Kreis-, Landes-, Bundesstraßen sowie Bundesautobahnen) eines der dichtesten überörtlichen Verkehrswegenetze Europas dar (BMVBS 2007). Um dem stetig wachsenden Verkehrsaufkommen gerecht zu werden, wird dieses Netz kontinuierlich erweitert, wobei sowohl der Ausbau bestehender Verkehrswege aber auch deren Neubau gleichermaßen von Bedeutung ist. Die Länge des kommunalen Verkehrswegenetzes (Gemeindestraßen inner- und außerorts) beläuft sich auf ca. 413.000 km, das Schienennetz umfasst ca. 38.000 km, wobei etwas mehr als die Hälfte davon elektrifiziert ist (BMVBS 2007). Auch wenn im Vorfeld von Rückbau- und Ausbaumaßnahmen im Straßennetz die abzureißenden Massen durch Bestandserfassung recht genau ermittelt werden können, stellt sich die Situation im Hinblick auf das Gesamtstraßennetz anders dar. So existieren derzeit keine belastbaren Daten hinsichtlich der im deutschen Verkehrswegenetz verbauten Materialien. Dies ist möglicherweise der Tatsache geschuldet, dass der Aus- oder Neubau von Straßen meist abschnittsweise und je nach Finanzlage des Bauherrn gegebenenfalls auch mit erheblichem zeitlichem Abstand erfolgt. Für die einzelnen Bauabschnitte existieren zwar jeweils Angaben hinsichtlich der Regelquerschnitte, Bauweisen sowie Menge und Art der verwendeten Baumaterialien, diese werden jedoch in den meisten Fällen nicht mit den Daten vorangegangener Bauabschnitte oder -maßnahmen vereint. Die zuvor beschriebene Längen- und Flächenausdehnung des Verkehrswegenetzes

lassen jedoch das Sekundärrohstoffpotenzial erahnen, welches im deutschen Straßen- und Verkehrsnetz eingebunden ist.

Stand der Technik

In Deutschland fallen jährlich etwa 240 Mio. Mg mineralische Abfälle an. Die dominierenden Fraktionen bilden ca. 140 Mio. Mg Boden und Steine sowie ca. 73 Mio. Mg Bauabfall und Straßenaufbruch. Der größte Anteil des Bodenmaterials wird im Rahmen von Baumaßnahmen umgelagert und verwendet, oder bei Verfüllungsmaßnahmen eingesetzt. Gut zwei Drittel des Bauabfalls und Straßenaufbruchs werden dabei wieder als Recyclingbaustoff eingesetzt (Wagner 2008). Wie sich diese Zahlen zukünftig entwickeln werden, hängt sicherlich auch in starkem Maße von der Neugestaltung der im Entwurfsstadium befindlichen Ersatzbaustoffverordnung ab.

Betrachtet man Rückbaumaßnahmen von Gebäuden ganz allgemein, so wird, zumindest bei größeren Objekten, dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit große Bedeutung beigemessen. Wirtschaftlichkeit impliziert in diesem Kontext je nach Randbedingungen in erster Linie oftmals Schnelligkeit. Termindruck, die schnelle Wiederfreigabe von Verkehrsflächen oder Platzmangel im innerstädtischen Bereich können bewirken, dass schnell große Mengen an Bauabfällen erzeugt werden. Eine sorgfältige Vorsortierung oder kontrollierte selektive Rückbaumaßnahmen finden dabei nicht immer Beachtung, was dazu führen kann, dass wertvolle Sekundärrohstoffressourcen ungenutzt bleiben. Die Themen Nachhaltigkeit, Recycling und Ressourceneffizienz gewinnen zwar zusehends an Bedeutung, fallen aber bisweilen wirtschaftlichen Einflussfaktoren zum Opfer. Die teilweise mangelnde Etablierung dieser Aspekte sowie Vorbehalte von Auftraggebern gegenüber der Verwendung von Materialien aus Recyclingprozessen können dazu führen, dass diesen so genannten RC-Baustoffen (Recycling-Baustoffen) während der Projektplanung eine untergeordnete Bedeutung beigemessen wird.

Im Bereich des Verkehrswegebbaus lassen sich Art und Umfang der verbauten Sekundärrohstoffe im Vorfeld von Rückbaumaßnahmen relativ gut quantifizieren und identifizieren. Aus diesem Grund ergeben sich hier auch die oben genannten Recyclingquoten. Für Gebäude, Industriestandorte oder unterirdische Versorgungssysteme gestaltet sich dies jedoch deutlich schwieriger. Dies ist zum einen der größeren Materialvielfalt geschuldet, die in diesen Bereichen eingesetzt wird, zum anderen mangelt es aber auch an der Möglichkeit der Datenerfassung. Ist im Vorfeld einer Rückbaumaßnahme aufgrund mangelnder Datenlage nicht bekannt, welche Wertstoffe sich in welchen Mengen im Abrissobjekt befinden, gestaltet sich eine zielgerichtete Ressourcenrückgewinnung schwierig. Dieses Informationsdefizit gilt insbesondere auch für den Bereich der unterirdischen Versorgungsleitungen, da stillgelegte Leitungen teilweise im Boden verbleiben, regelmäßig neue Leitungen unterschiedlicher Versorger hinzukommen und die Datenlage darüber, was an Leitungen unterirdisch verbaut wurde, nicht immer vollständig ist. Dementsprechend besteht auf dem Weg hin zu einer optimalen Ressourcenrückgewinnung noch Nachholbedarf.

F&E-Bedarf

Im Sinne einer optimalen Ressourcennutzung aus dem Baubestand heraus sind zwei Aspekte von besonderer Bedeutung. Den ersten Schritt stellt dabei die Bestandserfassung dar. Wie bereits dargelegt wurde, ist es von entscheidender Bedeutung, die im Bestand gebundenen Sekundärrohstoffe zu sondieren, zu identifizieren und zu quantifizieren. Erst wenn bekannt ist welche Materialien verbaut sind und deren Größenordnung abgeschätzt werden kann, kann sich der zweite Schritt anschließen. Basierend auf einer ausreichenden Datenlage können dann geeignete Recyclingmaßnahmen ergriffen werden, die auf die vorhandenen Sekundärrohstoffe / Bauelemente abgestimmt sind. In Bezug auf beide Aspekte gibt es noch Handlungsbedarf, der in den nachfolgenden F&E-Aspekten konkretisiert wird.

2.2.a) Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Infrastruktur*F&E-Aspekt „Infrastruktur 1“: Rohstoffbezogener Gebäudepass****Entwicklung von Informationssystemen im Sinne eines rohstoffbezogenen Gebäudepasses (Rohstoffkataster), welche die Wertstoffe in der Infrastruktur dokumentieren*****Beschreibung**

Unter Berücksichtigung der oben genannten Aspekte stellt sich die grundsätzliche Frage, wie Art und Umfang bauwerksgebundener Sekundärrohstoffmengen zielsicher erfasst und verwaltet werden können. Wie bereits eingangs dieses Kapitels beschrieben, muss dabei der Blick sowohl in die Vergangenheit (Bestandsbauwerke) als auch in die Zukunft (Neubauten) gerichtet werden, da sicherlich unterschiedliche Instrumentarien notwendig sein werden, um das jeweilige Wertstoffpotenzial ermitteln und abbilden zu können. Grundsätzlich sollte sowohl das Potenzial einzelner Bauwerke, insbesondere aber auch Wertstoffmengen, die in Gebäuden, Infrastruktur, Industriestandorten usw. gebunden sind und sich für ein Stadtgebiet oder eine Region aufsummieren lassen, betrachtet werden.

Im Hinblick auf den Baubestand gibt es erste Lösungsansätze, die sich mit dem Thema der Erfassung der stofflichen Bestandserfassung beschäftigen. Diese gilt es jedoch weiter auszubauen, sodass sich daraus belast- und verwertbare Daten ableiten lassen. Zusätzlich sollten diese Instrumentarien und Konzepte auch die sich über die Jahrzehnte verändernden Randbedingungen (andere Baustoffe, andere Bautechniken, technischer Fortschritt) erfassen und abbilden können. Die Erarbeitung und kontinuierliche Aktualisierung von projektbezogenen bzw. kommunalen Sekundärrohstoffkatastern würde eine Möglichkeit bieten, ein entsprechendes Wertstoffpotenzial abzubilden. Diese Variante der Sekundärrohstofffassung ist sicherlich sehr aufwändig, im Sinne einer optimalen Ressourcennutzung, zumindest für bestimmte kritische Rohstoffe, perspektivisch jedoch wohl unumgänglich.

Um das Erfassen von verbauten Wertstoffen zukünftig einfacher zu gestalten, sollten Instrumentarien (weiter-)entwickelt werden, mit Hilfe derer bereits in der Planungsphase eines Bauwerkes Wertstoffmassen ermittelt und die gewonnenen Kenndaten für die Erstellung eines wertstoffbezogenen Gebäudepasses herangezogen werden können. Dabei ist zu beachten, dass während der Nutzungsdauer anfallende Umbaumaßnahmen mit Hilfe dieser Instrumentarien erfasst und bauliche Veränderungen in diesem Gebäudepass abgebildet werden müssen.

Ansätze

Wie bereits in der Beschreibung erwähnt, sollte das Sekundärrohstoffpotenzial nicht nur für einzelne Gebäude sondern auch flächendeckend im kommunalen Bereich kumulativ angegeben werden können. Für Neubauten gestaltet sich dies vergleichsweise unkompliziert, da sich mit Hilfe von Architektur- und Planungssoftware Baustoffmengen und deren materialtechnologische Kennwerte bereits während der Planungsphase von Bauwerken gewerkübergreifend erfassen lassen. Entwicklungsbedarf besteht jedoch im Hinblick darauf, wie sich die Wertstoffmengen des Bestandes erfassen bzw. möglichst genau abschätzen lassen und wie diese Daten zusammen mit den aus dem Neubau resultierenden

Mengen unter dem „Dach“ eines kommunalen Wertstoffkatasters verknüpft und vor allem auch genutzt werden können. Dementsprechend ist es nicht nur von entscheidender Bedeutung, Sekundärrohstoffe möglichst genau quantifizieren zu können. Mindestens ebenso große Bedeutung muss der Frage beigemessen werden, wie die Potenziale optimal genutzt werden können.

Eine Möglichkeit, Sekundärrohstoffaufkommen zu identifizieren und effektiv einzusetzen, kann die Schaffung von vernetzten Recyclingbörsen sein. Diese könnten als Plattform dienen, auf der Angebot und Nachfrage in Bezug auf RC-Materialien abgeglichen und Kontakte vermittelt werden können. Dieses Konzept existiert bereits in sehr kleinem Umfang, jedoch wäre die Entwicklung eines übergeordneten logistischen Konzepts zur zielgerichteten Steuerung von Sekundärrohstoffströmen wünschenswert (vgl. F&E-Aspekt „Infrastruktur 3“: ICE – Demolition Protocol). Damit könnte vermieden werden, dass anfallende RC-Materialien ungenutzt bleiben, während an anderer Stelle Primärbaustoffe zum Einsatz kommen, die grundsätzlich durch RC-Material ersetzbar wären.

2.2.a) Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Infrastruktur

F&E-Aspekt „Infrastruktur 2“: Ressourceneffiziente Infrastrukturen

Lösungswege zur Optimierung der Ressourceneffizienz von technischen Infrastrukturen, Maschinen und Anlagen auf den Gebieten Demontierbarkeit, Recyclingtechniken für Hybridwerkstoffe und Verbundmaterialien, Flexibilität und modularer Aufbau im Hinblick auf den künftigen Rückbau

Beschreibung

In der Vergangenheit wurde bei der Projektierung von Bauwerken das größte Augenmerk auf deren spätere Nutzung und weniger auf deren Nachhaltigkeit gerichtet. Mit dieser Tatsache werden oftmals Fachfirmen konfrontiert, die im Zuge von Rückbaumaßnahmen keine optimalen Bedingungen hinsichtlich der Recyclingfähigkeit der eingesetzten Baustoffe und Bauweisen, im ungünstigsten Fall sogar massive Schadstoffbelastungen, vorfinden. Die Trennung und Aufbereitung bestimmter Werkstoffe oder gekoppelter Bauelemente ist nur mit großem Aufwand möglich und wird somit als unwirtschaftlich erachtet. Dies führt dazu, dass Recyclingpotenziale nicht voll ausgeschöpft werden können und Sekundärrohstoffe verloren gehen. Ein Trend zu multifunktionalen Bau- und Werkstoffen ist insbesondere im Bereich des Innenausbaus deutlich erkennbar. Hierbei steht oftmals die Verarbeitungsfreundlichkeit (Beispiel: Laminat mit integrierter Trittschalldämmung) im Vordergrund. Bisweilen verhalten sich Nutzen von Bauprodukten und deren Recyclingfreundlichkeit diametral. So wird bei Häusern durch komplexe Wärmedämmverbund-Systeme (WDV) die Energieeffizienz erhöht. Gleichzeitig handelt es sich bei diesen WDV-Systemen aber notwendigerweise um Mehrschichtsysteme unterschiedlichster Materialien, welche im ungünstigen Fall miteinander verklebt und somit kaum recyclingfähig sind.

Ansätze

Auch hier müssen die unterschiedlichen Anforderungen, die der Rückbau von Bestandsmasse und der Bereich des Neubaus mit sich bringen, Beachtung finden. Für beide Bereiche sollte die Zielsetzung auf eine Erhöhung der Ausbeute an recyclingfähigen Materialien oder Elementen ausgerichtet sein. Dies kann durch Verfahren erfolgen, die eine bessere Abgrenzungsmöglichkeit der einzelnen Bauteilklassen (erhöhte Sortenreinheit) oder die Vereinfachung von Demontagevorgängen ermöglichen. Mit einem Konzept für den Rückbau von Plattenbauten und die Wiederverwendung der Fertigteile wurde durch die BTU Cottbus bereits ein Schritt in diese Richtung unternommen (BTU Cottbus 2004). Dies kann in Anbetracht des Umfangs der im Baubestand gebundenen Sekundärrohstoffe jedoch erst einen Anfang darstellen.

Im Bereich des Neubaus erscheint es sinnvoll, zukünftig dem Aspekt der Recyclingorientierung bereits während der Planungsphase eine größere Aufmerksamkeit zu widmen. Die Konzeptionierung recyclingorientierter Baustoffe bzw. Bauweisen (Stichwort: Baukastenprinzip, modularer Aufbau, gut lösbare Verbindungssysteme), welche es ermöglichen, im Zuge eines Umbaus möglichst viele Bauteile / Elemente weiter zu nutzen bzw. im Falle eines Rückbaus Sekundärrohstoffe effektiver und wirtschaftlicher zurück zu gewinnen, ist ebenfalls von entscheidender Bedeutung.

So hat das Unternehmen ARCQU-DESIGN ein Baukastensystem entwickelt, welches sich beliebig anordnen, erweitern oder auch wieder verkleinern lässt. Kernstück des Konzeptes ist das Eckverbindungselement ARCQU, welches in Kombination mit vorgefertigten Boden- und Fassadenelementen, die in Stahlgefüge integriert werden, eine einfache, schnelle und ökonomische Möglichkeit der Raumgestaltung bietet. Dies gilt insbesondere für sich wiederholende Baugruppen (z. B. bei Wohnheimen). Dieses Baukastensystem gewährleistet zusätzlich zu seiner Funktionalität einen schnellen und wirtschaftlichen Rückbau der einzelnen Elemente. Ähnliche Wege beschreiben Fertighausfirmen, in deren Produktportfolio sich immer häufiger auch modulare Bauweisen finden lassen. Bisher beschränkt sich das Konzept des modularen Bauens hauptsächlich auf den Bereich des Messebaus, des Innenausbaus bzw. auf den Wohnungsbau. Von Interesse sollte es aber perspektivisch auch sein, modulare, flexible und recyclingfreundliche Bauweisen ebenfalls in größerem Maßstab in die Realität umzusetzen (ARCQU 2010).

2.2.a) Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Infrastruktur

F&E-Aspekt „Infrastruktur 3“: Exemplarischer Rückbau

Exemplarisch können innovative Konzepte zum „Urban Mining“ beispielsweise für alte Stahl- oder Kraftwerksstandorte oder auch für den Rückbau städtischer Infrastruktur, Gebäude oder dergleichen mit besonderem Fokus auf der Rückgewinnung von Mengenmetallen sowie hochwertig verwertbarer Gesteinskörnungen gefördert werden

Beschreibung

In der Vergangenheit wurden deutschlandweit zahlreiche Standorte der Großindustrie, Produktionsbetriebe und Kraftwerksanlagen stillgelegt. Nur einigen wenigen dieser Standorte wird nach ihrer Abwicklung größere Aufmerksamkeit im Sinne einer dauerhaften Umnutzung gewidmet. Standorte wie die Völklinger Hütte, die seit 1994 den Titel eines UNESCO - Weltkulturerbes trägt oder die „Stadt aus Eisen – FERROPOLIS“, ein ehemaliger Kohletagebau, der sich als Event-Location etabliert hat, bilden sicherlich die Minderheit.

Die in Industrieobjekten und städtischer oder regionaler Infrastruktur gebundenen Wertstoffmengen sind sowohl im Hinblick auf die reine Masse, aber auch hinsichtlich ihrer Vielfältigkeit erheblich. Das unten genannte Beispiel der Westfalahütte verdeutlicht das Potenzial eines solchen Großindustriestandorts als Sekundärrohstoffquelle. Dabei stellt die hier dargestellte Komplettlösung (Wiederaufbau an einem anderen Standort) bezüglich der Ausnutzung von Wertstoffressourcen sicherlich die Ideallösung dar, wird aber in der Realität nur selten Umsetzung finden. Dementsprechend wäre zu quantifizieren, welches Potenzial stillgelegte große Industriestandorte besitzen und wie diese effektiv und zielgerichtet als Sekundärrohstoffquelle herangezogen werden können.

Ansätze

Wie „Urban Mining“ in Bezug auf Industriestandorte, Infrastruktur oder Großprojekte realisiert werden kann, wird im Folgenden anhand einiger Beispiele unterschiedlicher Branchen dargestellt. Hierbei handelt es sich lediglich um Einzelfallbetrachtungen. Das hier dargestellte Prinzip des ICE – Demolition Protocol (siehe Beispiel 1) macht einen ersten Schritt, indem es ein Instrumentarium bietet, das auch auf beliebige andere Projekte übertragbar ist. Voraussetzung für dessen Anwendung ist jedoch, dass die betreffenden Parteien von der Existenz des Instrumentariums wissen und bei allen Beteiligten in gleichem Maße die Bereitschaft vorhanden ist, das Vorhaben umzusetzen. Zielgedanke sollte es sein, Konzepte zu entwickeln, die es ermöglichen, in brachliegenden Industriestandorten gebundene, oder im Zuge von Rückbaumaßnahmen freigesetzte Sekundärrohstoffe zu quantifizieren und diese dem Rohstoffmarkt zielgerichtet und effizient zurückzuführen.

Beispiel 1: „ICE – Demolition Protocol“

Einen guten Ansatz für die Erfassung und optimale Nutzung von Wertstoffen stellt das ICE – Demolition Protocol dar, welches partiell auch beim Umbau des Wembley-Stadiums Access Corridor angewendet wurde (WRAP 2007).

Dieses ICE (Institution of Civil Engineers) – Demolition Protocol umfasst ein Konzept zur optimierten und zielgerichteten Verwendung von RC-Baustoffen im Zuge von (Um-) Baumaßnahmen. Grundsätzlich werden dabei die Aspekte Abriss und Neubau zunächst separat bewertet und dann im Sinne von Angebot und Nachfrage in Korrelation gestellt. Ein wichtiger Aspekt bei der Umsetzung des Demolition Protocol ist, dass der Gesichtspunkt der Nutzung von RC-Material schon sehr früh in der Planungsphase zum Tragen kommt. Hierbei wird schon vor Beginn der Abrissarbeiten ein Audit anberaumt, im Zuge dessen anfallende Materialmengen erfasst werden und erwogen wird, in welchem Umfang die anfallenden Materialmengen recyclingfähig sind. Hieraus wird eine Art Recycling-Index abgeleitet. Parallel dazu wird während der Planung eines Neubaus ermittelt, in welchem Umfang RC-Materialien zum Einsatz kommen können. Als Quelle für RC-Material werden dabei gegebenenfalls auch Baustellen in der näheren Umgebung herangezogen. Im Falle des Wembley-Stadiums wurden teilweise auch RC-Baustoffe verwendet, die beim Abriss des nahegelegenen Riverside House angefallen waren.

Beispiel 2: Umzug der Westfalenhütte

Der „Umzug“ der Dortmunder Westfalenhütte in das chinesische Zhangjiang stellt einen der größten Umzüge der Industriegeschichte dar.

Nach Schließung der Stahlproduktion im April 2001 verkaufte die Thyssen-Krupp Stahl AG Ende 2001 die Sinteranlage, zwei Hochöfen, das Warmbandwalzwerk und das Phoenix-Stahlwerk an die chinesische Shagang-Gruppe. In 2002 begann die systematische Zerlegung der Hütte in Einzelteile, wobei die gesamte Masse aller Einzelteile ca. 250.000 Mg betrug. Zeitgleich wurden in China die entsprechenden Maßnahmen zum Wiederaufbau des Werkes ergriffen. Der Transport der Einzelteile erfolgte vorwiegend per Container oder Stückgutfrachter auf dem Seeweg, nicht zerlegbare Großteile wurden mit Hilfe von Schwerlasttransportern verfrachtet. Nachdem der Transport der Einzelteile im Jahr 2003 abgeschlossen war, erfolgte vor dem Wiederaufbau eine gründliche Überholung aller Komponenten. Seit Mitte 2005 läuft die Produktion (HITEC 2008).

Beispiel 3: Palast der Republik liefert Stahl für VW Golf

Im Februar 2006 begannen die Abrissarbeiten am Palast der Republik, dem früheren Parlamentsgebäude der ehemaligen DDR in Berlin. Während der bis Dezember 2008 dauernden Abrissarbeiten wurden ca. 500 Mg Glas, ca. 56.000 Mg Beton und ca. 20.000 Mg Stahl freigelegt. Das ehemalige Stahlgerippe wurde an Ort und Stelle in transportierbare Elemente zerkleinert und zunächst zu einer Schrottfirma nach Roßlau (Sachsen-Anhalt) verfrachtet, wo sie mit Hilfe einer der größten Schrottscheren Europas weiter zerkleinert wurden. Die Einschmelzung des Stahls erfolgte in Leipzig, wo aus dem Stahl des Palastes der Republik unter anderem Motorblöcke gefertigt wurden, die in Fahrzeugen des Modells VW Golf VI eingebaut wurden. Ein weiterer Teil des Stahls wurde beim Bau des Burj Chalifa in Dubai verwendet.

2.2.b Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Altdeponien und Hüttenhalden sowie aus Verbrennungsrückständen

Die Geschichte der Abfallbeseitigung zeigt, dass es bis zum Inkrafttreten des deutschen Abfallbeseitigungsgesetzes im Jahr 1972 kaum einheitliche Regelungen gab. Nahezu jeglicher Abfall wurde auf kleinen Müllkippen beseitigt und nur ein geringer Teil auf geordneten Deponien abgelagert (Bilitewski 2000), (Faulstich 2009), (Wendenburg et al. 2009). Neben Hausmüll waren dies auch Kesselaschen, Schlämme und Abfälle aus der Industrie. Erst mit dem Abfallgesetz von 1986 erfolgte in der Bundesrepublik der flächendeckende Einstieg in die Verwertung von Abfällen (Glas, Papier, Metalle). Ab 1994 trat die Vermeidung in den Vordergrund und über das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz wurde ein ressourcenschonendes Produzieren Pflicht. Seit 2005 dürfen keine Abfälle mehr ohne Vorbehandlung deponiert werden. Inzwischen ist die Verwertungsquote in Deutschland auf über 70 % angestiegen und nimmt einen Spitzenplatz in Europa ein (SRU 2008).

Aufgrund dieses geschichtlichen Hintergrundes eignen sich vor allem Altdeponien als mögliche Rohstoffquelle. In Deutschland gibt es nach Angaben des Umweltbundesamtes ca. 106.000 Altdeponien, wovon die meisten bereits vor 1975 geschlossen wurden. Seitdem nahm die Anzahl der betriebenen Deponien kontinuierlich ab. Nach einer ersten Abschätzung auf Grundlage von Literaturdaten wurden seit 1975 etwa 2,5 Mrd. Mg an Siedlungsabfällen, Bauschutt und gewerblichen Abfällen abgelagert (Mocker et al. 2009). Für eine überschlägige Mengenermittlung deponierter Stoffgruppen wurden Abfallanalysen verschiedener Epochen herangezogen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 dargestellt. Aufgrund der vor 1975 nicht erfassten Abfälle könnten die tatsächlich vorhandenen Mengen noch deutlich höher ausfallen.

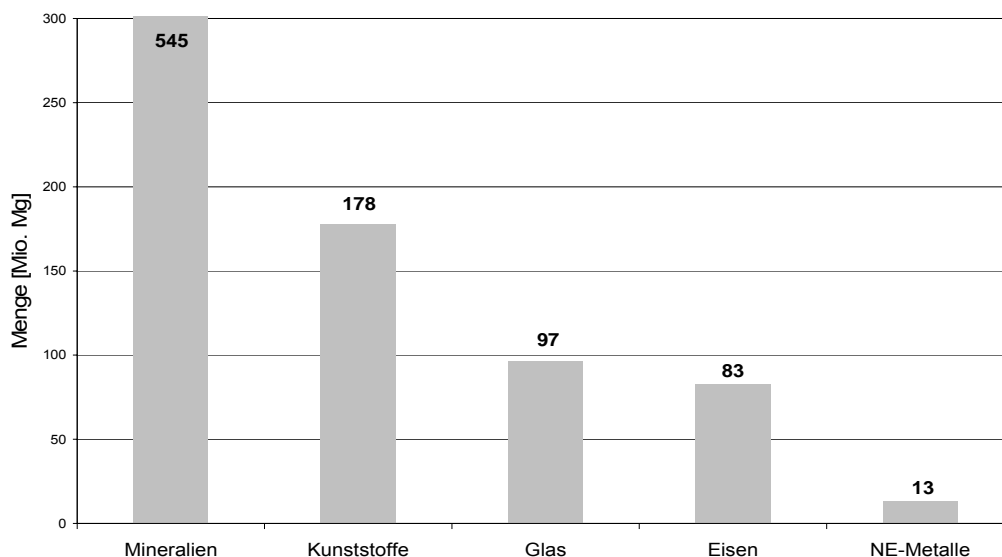


Abbildung 18: Mengenabschätzung einzelner Stoffgruppen auf Abfalldeponien in Deutschland (Mocker et al. 2009)

Ähnliche Berechnungen berücksichtigten nur die Fraktionen Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle sowie Klärschlamm und ergaben eine Gesamtmenge von 750 Mio. Mg mit gut 8 Mio. TJ Heizwert (Rettenberger 2009). Demnach wurden 26 Mio. Mg Eisenschrott, 850.000 Mg Kupferschrott, 500.000 Mg Aluminiumschrott und 650.000 Mg Phosphat

abgelagert. Diese Mengen entsprechen rein rechnerisch folgendem Jahresverbrauch in Deutschland: 58 % der Primärenergie, 124 % des Eisen-, 142 % des Kupfer- und 54 % des Aluminiumschrotts (Rettenberger 2009). Die Abweichungen zur vorgenannten Schätzung erklären sich durch den nicht berücksichtigten Bauschutt, der früher aufgrund unzureichender Trennung noch erhebliche Mengen an Metallen enthielt.

Außer der Wertstoffgewinnung sprechen weitere stichhaltige Gründe für einen Deponierückbau:

- ▶ Reduktion der Umweltbelastung
- ▶ Gewinnung von zusätzlichem Deponievolumen
- ▶ Erlöse durch Flächenrecycling
- ▶ Kosteneinsparungen bei Stilllegung und Nachsorge

Bei den bisher knapp 80 weltweit dokumentierten Deponierückbauprojekten stellten diese Gründe die hauptsächliche Motivation dar. Vor allen Dingen stand der Grundwasserschutz (33 %) im Vordergrund. Wesentliche weitere Gründe waren u. a. Volumengewinn (20 %), interne Deponiebaumaßnahmen (13 %), Gewinnung von Siedlungsflächen (12 %) sowie Reduktion der Nachsorgekosten (8 %). Die Wertstoffgewinnung wurde in 13 % der Fälle als Motivation angeführt (Mocker et al. 2009).

Neben den Siedlungsabfällen existieren weitere Ablagerungen mit interessanten Potenzialen zur Wertstoffrückgewinnung. Bei der Herstellung von Eisen, Stahl und Nichteisenmetallen verbleibt ein Teil der Metalle in Form von metallischen Einschlüssen, Agglomeraten diverser Legierungen oder in oxydischer Form in der mineralischen Schlacke. In Deutschland fielen 2008 7,92 Mio. Mg Hochofenschlacke bzw. Hüttensande, 3,45 Mio. Mg LD-Schlacke (aus dem Linz–Donawitz–Verfahren), 1,89 Mio. Mg Elektroofenschlacke und 0,96 Mio. Mg Stahlwerksschlacke aus Sonderverfahren an, wobei sich bereits ein gravierender Produktionseinbruch bemerkbar machte (Merkel 2009). Die Daten für 2009 liegen noch wesentlich niedriger, sind aber wegen der wirtschaftlichen Turbulenzen vermutlich nicht repräsentativ (Merkel 2010). Hinzu kommen jährlich etwa 0,6 Mio. Mg Edelstahlschlacke und gut 1,4 Mio. Mg Schlacke aus der NE-Metallerzeugung, so dass sich eine gesamte Schlackenmenge von etwa 16 Mio. Mg errechnet. Die Hochofenschlacken und der Hüttensand werden mittlerweile zu mehr als 100 % verwertet, das heißt auch Altbestände werden wieder aufgearbeitet. Von den Stahlwerksschlacken wird ein geringer Anteil deponiert (Merkel 2010). Es kann davon ausgegangen werden, dass die deponierten Anteile in früheren Jahrzehnten höher lagen und auch noch zusätzliche Reststoffe aus der Metallurgie beinhalteten. Somit bieten die alten Hüttenhalden ein interessantes Wertstoffpotenzial. In Tabelle 5 sind typische Zusammensetzungen ausgewählter Nebenprodukte und Abfälle des Hüttenwesens dargestellt (Arlt 2005), (Heindl et al. 2005), (Faulstich et al. 2004).

Tabelle 5: Analyse verschiedener Nebenprodukte und Abfälle der Metallurgie (Arlt 2005), (Heindl et al. 2005), (Faulstich et al. 2004)

Schlacke	CaO	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Fe	Mn	V	S
	%									
Hüttensand	31,8	k.A.	10,4	0,4	k.A.	0,8	0,5	0,15	k.A.	k.A.
OBM-Schlacke	38,3	1,5	1,6	k.A.	1,2	k.A.	18,2	2,0	0,4	0,24
HO-Schlacke	40,3	k.A.	7,8	0,5	k.A.	0,6	0,3	0,3	k.A.	1,2
Gichtgasstaub	4,1	0,2	1,1	0,1	k.A.	0,8	31,3	0,2	k.A.	0,4
Konverterstaub	5,4	0,1	0,2	0,0	k.A.	0,0	64,9	0,3	k.A.	k.A.
HO-Gichtgasschlamm	1,9	0,1	0,7	0,1	k.A.	0,5	28,3	0,15	k.A.	1,1
LD-Schlacke	45,3	1,4	2,6	0,5	k.A.	< 0,1	20,0	2,9	k.A.	k.A.
E-Ofenschlacke	34,3	k.A.	3,4	k.A.	2,2	k.A.	28,4	2,7	k.A.	0,2
Pfannenschlacke	56,8	< 0,1	4,5	k.A.	2,2	k.A.	0,8	0,3	k.A.	1,1

Beispielhaft für das Wertstoffpotenzial in Abfällen und Nebenprodukten aus metallurgischen Prozessen wurde der bis zu 55 m hohe Schlackenbergr der ehemaligen Neuen Maxhütte Stahlwerke GmbH (NMH) in Sulzbach-Rosenberg untersucht. Nachstehende Tabelle zeigt die mengenmäßigen Anteile ausgewählter Wertstoffe in dieser Ablagerung (Mocker et al. 2009).

Tabelle 6: Gehalte ausgewählter Wertstoffe im Schlackenbergr Sulzbach-Rosenberg (Mocker et al. 2009)

Inhaltsstoff	CaO	P ₂ O ₅	MgO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Fe	Mn	V	S
	1.000 Mg									
Menge	2.054	19	520	20	15	38	251	33	5	6

Neben nennenswerten Phosphatgehalten sind insbesondere in den Stahlwerksschlacken (OBM-, LD- und E-Ofenschlacke) noch weitere interessante Legierungselemente wie Chrom und Mangan enthalten. Außerdem findet die Verwertung der Abfälle aus metallurgischen Prozessen zu großen Teilen in der Baustoffindustrie statt, wo keine gezielte Rückgewinnung von metallischen Wertstoffen erfolgt.

Stand der Technik

Der Rückbau von Deponien mit der Prämisse einer möglichst umfassenden Rückführung des Deponiegutes in den Stoffkreislauf ist grundsätzlich machbar. Geeignete und bewährte Schritte beim Rückbau von deponierten Siedlungsabfällen sind aus den bisherigen Vorhaben bekannt und beispielsweise in einem ATV-DVWK/VKS-Arbeitsbericht zusammengefasst (ATV-DVWK 2002). Die einzelnen Prozessstufen werden in Abbildung 19 veranschaulicht. Weiterführend zeigt Abbildung 20 beispielhaft die bei einem konkreten Rückbauprojekt gewonnenen verwertbaren Fraktionen.

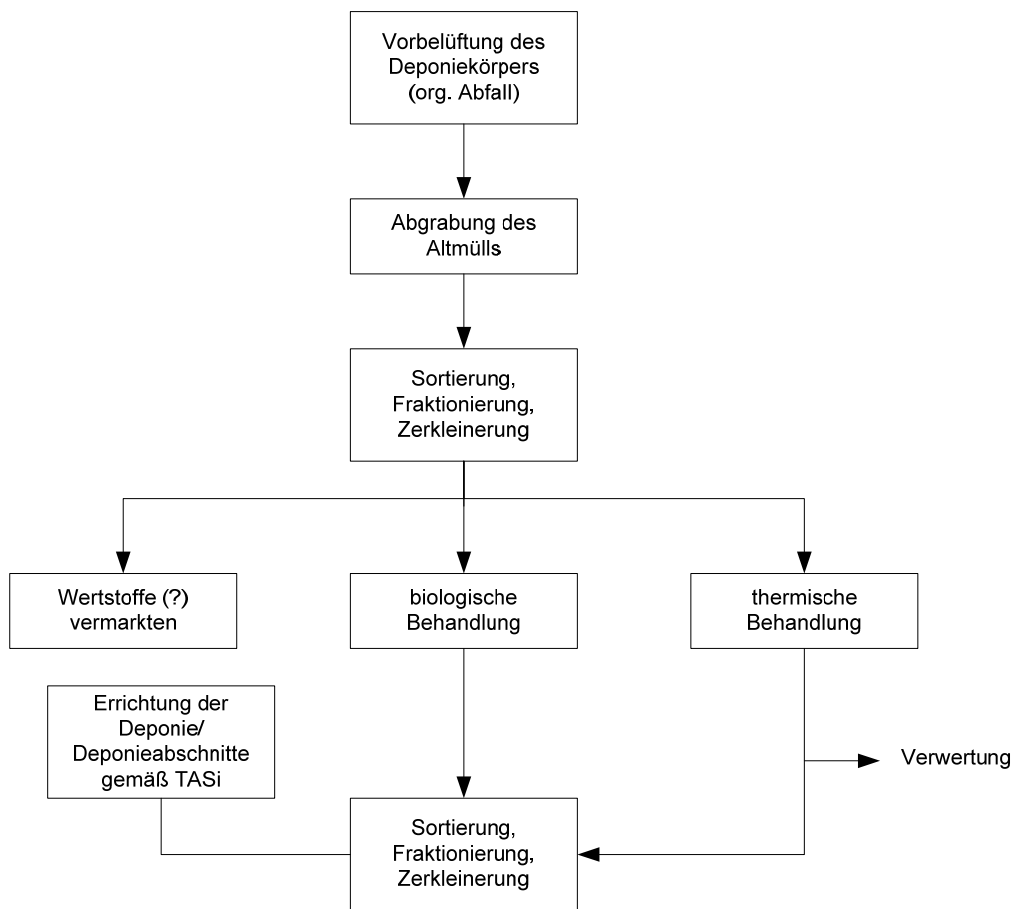


Abbildung 19: Verfahrensschritte beim Deponierückbau (ATV-DVWK 2002)

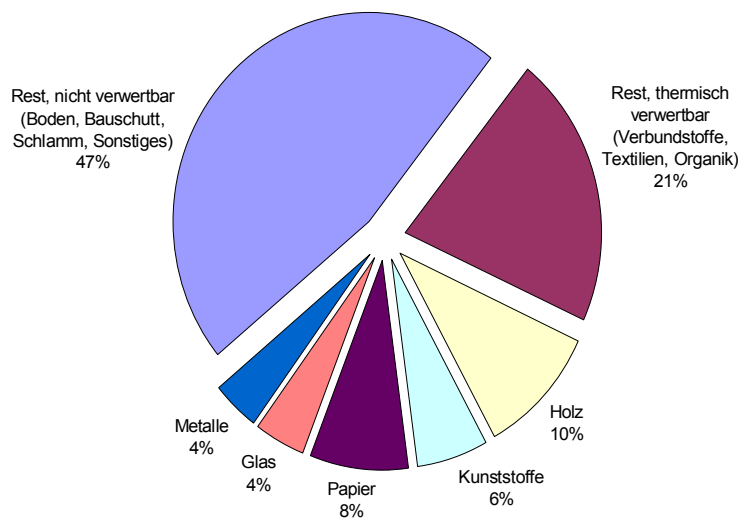


Abbildung 20: Verwertbare Fraktionen aus einem Deponierückbau (Bachmann und Cordes 2007)

F&E-Bedarf

Die prinzipielle Machbarkeit eines Deponierückbaus steht nicht in Frage, allerdings fehlen spezifische und detaillierte Erkenntnisse über Zusammensetzung und Qualität des Deponats und daraus resultierende technische Anforderungen und Umweltbelastungen beim Rückbau. Diesbezügliche Daten sind nur für Einzelfälle bekannt und publiziert (vgl. Abbildung 20). Siehe hierzu auch (Bachmann und Cordes 2007), (Wiemer et al. 2009), (Lerch et al. 2010), (Stephan 2010). Die Klassifizierung der Inhaltsstoffe nach den gezeigten Stoffgruppen und nicht nach Elementen bzw. Verbindungen erschwert die Abschätzung von Wertstofflösen. Beispielsweise sollte bei Metallen nach Eisen, Kupfer, Aluminium, sonstigen Schwermetallen und Edelmetallen differenziert werden. Weitere Kenntnislücken bestehen unter anderem bei der Bindungsform von Metallen. Oft geht aus Abfallanalysen nicht eindeutig hervor, ob z. B. der Kupfergehalt auch elementar vorhandene Anteile (Kabel, Elektromotoren, usw.) mit einschließt oder nur der Schwermetallgehalt in den übrigen Abfallfraktionen bestimmt wurde. Aluminium, das in den Deponaten ebenfalls in größerer Menge enthalten sein dürfte, wird nicht als Schadstoff angesehen und deshalb bei der Analyse oft gar nicht bestimmt.

Ähnliche Datenlücken bestehen für Investitions- und Betriebskosten, die ebenfalls nur vereinzelt und vereinfacht angegeben werden (Rettenberger 2009). In der Folge mangelt es an ganzheitlichen Betrachtungen, die das Wertstoffpotenzial mit ökologischen und ökonomischen Randbedingungen verknüpfen.

Neben dem beschriebenen F&E-Bedarf zum Wertstoffinventar sowie den ökonomischen Randbedingungen sind weiterhin Erkenntnisse zu den gesamtökologischen Auswirkungen eines Deponierückbaus unter Einbeziehung der angewendeten Technologien und Verfahren erforderlich.

Für Deponiebetreiber und politische Entscheidungsträger werden Bewertungshilfen zur Beurteilung der ökologischen, ökonomischen, und technologischen Aspekte eines Deponierückbaus benötigt.

2.2.b) Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Altdeponien und Hüttenhalden sowie aus Verbrennungsrückständen

F&E-Aspekt „Ablagerung 1“: Hüttenhalden-Ressourcenkataster

Entwicklung eines Altdeponie- bzw. Hüttenhalden-Ressourcenkatasters differenziert nach Inhaltsstoffen, Infrastruktur und Prioritätensetzung für den Rückbau

Beschreibung

Die Informationen über vorhandene Deponien und Altablagerungen verteilen sich über verschiedene Zuständigkeiten. In der Regel werden entsprechende Daten von Umweltbehörden der Bundesländer verwaltet, die Fokussierung war bisher aber meist auf die Abwehr von akuten Umweltgefährdungen ausgerichtet. Mögliche, daraus resultierende Datenlücken über das Wertstoffpotenzial wurden bereits im vorherigen Abschnitt beim F&E-Bedarf aufgezeigt.

Rückstände aus Bergbau und Hüttenwesen, die nicht zwingend der Abfallwirtschaft unterliegen (z. B. firmeneigene Deponien, Ablagerungen, frühere Verfüllungen) lassen eine noch unübersichtlichere Datenlage erwarten. Vor diesem Hintergrund ist die Erstellung einheitlicher Kataster mit vereinheitlichtem und vergleichbarem Informationsgehalt umso bedeutender. Dem Wertstoffpotenzial und dem mit dessen Nutzung verbundenen Aufwand sollten bei der Prioritätensetzung hohe Bedeutung beigemessen werden, ohne die potenziellen Umweltbeeinträchtigungen außer Acht zu lassen.

Ansätze

Zum Wertstoffpotenzial abgelagerter Siedlungsabfälle liegen erste bundesweite Abschätzungen vor (Mocker et al. 2009), (Rettenberger 2009). Auf ähnlicher Basis wurde eine quantitative Abschätzung ausgewählter, in Bayern und Österreich abgelagerter Wertstoffgruppen vorgenommen (Faulstich et al. 2010). Hierbei handelt es sich um Hochrechnungen, die naturgemäß mit gewissen Unsicherheiten behaftet sind. Vergleichsweise detaillierte Berechnungen wurden für ausgewählte Deponien in Hessen vorgenommen, die eine gute Beurteilung der elf untersuchten Standorte erlauben (Wiemer et al. 2009).

2.2.b) Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Altdeponien und Hüttenhalden sowie aus Verbrennungsrückständen

F&E-Aspekt „Ablagerung 2“: Nachhaltiger Deponierückbau

Konzeptionen zum nachhaltigen Deponierückbau (einschließlich Untertage- und Sonderabfalldeponien) sowie von Werkzeugen zur Unterstützung der Entscheidungsfindung bzw. der ökonomischen Bewertung unter Berücksichtigung der Rückgewinnung von Wertstoffen wie Zink, Kupfer, anderen wertvollen Technologiemetallen und qualitativ hochwertigen Sekundärbrennstoffen sowie der Verwertung bzw. Entsorgung der Beiprodukte (Folien, Sande etc.), der Nachsorge und Logistik

Beschreibung

Ziel des Urban Mining muss sein, dass die Wertstoffgewinnung aus Deponien im Vergleich mit dem Abbau und der Aufbereitung von Primärrohstoffen aus natürlichen Lagerstätten zur Minderung von Umweltbeeinträchtigungen, sowie zur Schonung von Ressourcen beiträgt. Entsprechend bestehen neben hohen Anforderungen an die Effizienz auch Maßgaben was die ökologische Verträglichkeit der verwendeten Verfahren und Technologien betrifft. Ökologische und ökonomische Vorteile des Urban Mining dürfen nicht durch unzureichende Behandlungsverfahren der Beiprodukte, geringe Emissions- und Effizienzstandards bei der Nutzung von Sekundärbrennstoffen oder fragwürdige Folgenutzungen der frei werdenden Flächen zunichte gemacht werden.

Ansätze

Eine umweltverträgliche und nachhaltige Konzeption liegt mit großer Wahrscheinlichkeit vor, wenn die für Rückgewinnungsprozesse benötigte Energie aus erneuerbaren Quellen bereitgestellt wird. Weiterhin können lokale Stoff- und Energiekreisläufe vorgesehen werden, beispielsweise wenn dezentrale thermische Entsorgungslösungen für nicht stofflich verwertbare Fraktionen standortnah unter Erzielung einer möglichst effizienter Ausnutzung von Strom und Wärme integriert sind. Die vorgeschlagenen Konzepte können einer umfassenden Beurteilung mit Abwägung der Vor- und Nachteile, beispielsweise nach einer an die Ökobilanzierung angelehnten Bewertungsmethodik unterworfen werden. Einen wichtigen Einfluss kann auch die Folgenutzung der beim Rückbau frei werdenden Flächen, z. B. für Aufforstungsprogramme, ausüben.

Projekte, die diesen F&E-Aspekt beinhalten, könnten in eine umfassende Nachhaltigkeitsbewertung münden und Empfehlungen sowie Entscheidungshilfen für Deponiebetreiber und politische Entscheidungsträger bereitstellen.

2.2.b) Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Altdeponien und Hüttenhalden sowie aus Verbrennungsrückständen

F&E-Aspekt „Ablagerung 3“: Rückgewinnung Wertstoffe

Innovative Technologien zur Rückgewinnung von Wertstoffen aus Abfällen, Verbesserung von Stofftrennverfahren, Aufbereitung von Sekundärrohstoffen für höherwertige Verwendungszwecke, Trennung komplexer Metallgemische, Einhausung, Sicherheitstechnik und Methanabsaugung

Beschreibung

Die bisherigen Techniken zur Aufarbeitung von Deponien entstammten eher der Bauschutttaufbereitung und nutzten zur Hauptsache mechanische und elektromagnetische Trennverfahren. In der Folge entstanden relativ große Anteile einer mineralischen Feinfraktion (vgl. Abbildung 20), für die kaum Verwertungsmöglichkeiten bestehen und die bei vielen Rückbau- bzw. Sanierungsprojekten an Ort und Stelle wieder eingebaut wurde. Auch bei den Fraktionen Glas, Papier und Holz bestehen Bedenken, dass die Qualitätsanforderungen moderner Recyclingverfahren nicht eingehalten werden können. Ähnliches gilt für die separierten Metalle, die aufgrund von Anhaftungen und Verschmutzungen als schwer verwertbar angesehen werden. Bei Kunststoffen existiert noch die Einschränkung, dass manche der abgelagerten Sorten heute nicht mehr gebräuchlich sind oder aufgrund von Alterungsprozessen oder UV-Einflüssen eine stoffliche Veränderung stattfinden konnte.

Bei den bisherigen Deponierückbauprojekten wurden unterschiedliche Sicherheitskonzepte verwirklicht. Zum Gas- und Geruchsmanagement bzw. zur Deaktivierung vor einer Abgrabung existieren marktverfügbare Verfahren (z. B. BIOPUSTER[®]) (Biopuster 2010). Bei entsprechendem Gefährdungspotenzial können die Rückbauprojekte auch unter Kompletteinhausung vorgenommen werden. Bekannte Praxisbeispiele sind die Deponie Trihalde und die Sondermülldeponien Kölliken (CH) und Bonfol (CH) (Bauer 2009).

Ansätze

Aufgrund der hohen Mengenrelevanz mineralischer Anteile sollten Verfahrensverbesserungen zur Schad- und Störstoffabtrennung auch hier ansetzen, so dass eventuell sogar höherwertige baustoffliche Verwertungswege in Frage kommen.

Anforderungen des Umwelt- und Arbeitsschutzes sind vielfach in Gesetzen, Verordnungen und sonstigen Regelwerken bestimmt, so dass bei der Optimierung eher die Kosten- und Aufwandsreduzierung im Vordergrund stehen dürfte.

Die sonstigen in diesem F&E-Aspekt behandelten Themen werden in den nachfolgenden Abschnitten teilweise weiter spezifiziert, wobei diesbezüglich geeignete Lösungsansätze auch dort angeführt sind.

2.2.b) Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Altdeponien und Hüttenhalden sowie aus Verbrennungsrückständen

F&E-Aspekt „Ablagerung 4“: Effiziente Wiederaufbereitungsprozesse

Effizienzsteigerung von Wiederaufbereitungsprozessen im Hinblick auf die Erreichung der Klimaschutzziele

Beschreibung

Analog zu F&E-Aspekt „Ablagerung 2“ besteht die Anforderung an Wiederaufarbeitungsprozesse, einen ökologischen Nutzen gegenüber der Wertstoffgewinnung aus Primärprozessen sicherzustellen. Im Hinblick auf die Klimaschutzziele sind daher ganzheitliche Energiebilanzen aufzustellen und treibhausgasrelevante Emissionen zu beziffern, um mögliche Optimierungspotenziale aufzuzeigen. Dabei ist auch der Energiebedarf für die Aufbereitungs- und Transportvorgänge zu berücksichtigen. Sofern Teilströme aus dem Deponierückbau thermisch verwertet werden, hat die Konfiguration der Verbrennungsanlage und ihre energetische Anbindung (z. B. an Fernwärmenetze) großen Einfluss auf die Gesamtbilanz klimarelevanter Emissionen.

Ansätze

Wie bereits in Abbildung 12 dargestellt, weisen die meisten Recyclingprozesse in Bezug auf klimarelevante Emissionen deutliche Vorteile gegenüber Primärprozessen auf (UMSICHT 2008). Durch die Verwendung erneuerbarer Energien in den Rückgewinnungsprozessen ließe sich dieser Benefit vermutlich noch weiter steigern.

Gemäß einer vereinfachten Abschätzung für vorgegebene Rahmenbedingungen der Kraftwerksinfrastruktur ist aus energetischer Sicht eine Trennung des Deponats in Mineralik, thermisch verwertbare Leichtfraktion, Reifen und Metalle ausreichend (Hölzle 2010). Auch die Betrachtung einer Hausmülldeponie mit 500.000 Mg abgelagerten Abfällen kam zu dem Schluss, dass die Energiebilanz eines Deponierückbaus mit Wertstoffnutzung deutlich positiv ausfällt (Rettenberger 2009).

Durch eine höhere Energieausnutzung in Verbrennungsanlagen (z. B. durch Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung) lässt sich die Gesamtbilanz verbessern. Großes Optimierungspotenzial könnte aber auch ein vermehrtes stoffliches Recycling von Kunststoffen im Zuge einer aufwändigeren Sortiertechnik bieten.

2.2.b) Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Altdeponien und Hüttenhalden sowie aus Verbrennungsrückständen

F&E-Aspekt „Ablagerung 5“: Abfallströme thermischer Prozesse

Rückgewinnung strategischer Metalle und Industriemineralien aus Abfallströmen thermischer Prozesse (z. B. Verbrennungsschlacken)

Beschreibung

Metallurgische Schlacken und Verbrennungsreste werden bereits jetzt zum Großteil verwertet. Die Wiedernutzung erfolgt aber oftmals nur als Bau- oder Füllstoff, wobei der Gehalt an bestimmten Elementen allenfalls toleriert wird, ohne gezielt Wertstoffe zurück zu gewinnen. Normalerweise erfolgt vor der Verwertung von Verbrennungsaschen auch eine Abtrennung von unverbrannten Grobteilen und Fe-Metallschrott. Eine Rückgewinnung von NE-Metallen, wobei Kupfer und Aluminium den bedeutendsten Anteil stellen, fand zumindest früher noch nicht flächendeckend statt. Dies galt insbesondere, wenn die Rückstände ohnehin deponiert wurden und von daher geringere Anforderungen an stoffliche und mechanische Eigenschaften als beispielsweise bei baustofflicher Verwertung gestellt wurden. Vor dem Hintergrund aufwändiger Gewinnungsverfahren aus immer knapper werdenden natürlichen Rohstoffen ist eine effiziente Ausnutzung dieser Sekundärrohstoffpotenziale einschließlich der früher abgelagerten Mengen dringend geboten. Jedoch liegen die NE-Metalle oft in oxydischer oder fein verteilter Form in der mineralischen Matrix vor, weshalb die Ausbringungsraten mit einfachen mechanischen Trennverfahren begrenzt sind.

Die stärker mit Schadstoffen belasteten Filterstäube werden in Deutschland hauptsächlich im so genannten Bergversatz entsorgt. Wertvolle Inhaltsstoffe, z. B. seltene Metalle, werden durch diese Verwertungspraxis kaum wiederbringlich eingelagert und stehen somit nur unter hohem technischem Aufwand für ein Recycling zur Verfügung.

Ansätze

Die Rückgewinnung „gediegener“ Metalle (also in Reinform) aus Aschen und Schlacken über marktverfügbare Trennverfahren gilt als Stand der Technik, birgt aber insbesondere bei NE-Metallen noch Verbesserungspotenzial. Verfahren zur Trockenentäschung in Müllverbrennungsanlagen lassen höhere Ausbringungsgrade erwarten, da die Metalle nicht wie bei der üblichen Nassentäschung mit dem Wasser reagieren können und weniger mit mineralischen Bestandteilen verbacken (Martin 2009). Ein unter der Bezeichnung RoTAC® in der Markteinführung befindlicher Rotationsstromzerkleinerer bewirkt über besondere mechanische Krafteinwirkungen ebenfalls eine verbesserte Trennung zwischen metallischen und mineralischen Komponenten und erlaubt die Separation von NE-Metallpartikeln mit deutlich kleineren Massen als nach dem bisherigen Stand der Technik (GET 2010). Restmetallanteile in Schlacken aus der Metallerzeugung, die in Form von metallischen Einschlüssen vorliegen, können dem Stoffkreislauf ebenfalls wieder zugeführt werden. So lassen sich durch Handklauben, diverse Zerkleinerungs- und Klassierungsverfahren, Schwach- und Starkmagnetscheider sowie über Trocken- und Nassaufbereitung (hier vor

allem bei Feinfraktionen) mehr als 90 % des Metallanteils aussortieren (Weitkämper und Wotruba 2008).

Für oxidierte Metalle bieten sich schmelzmetallurgische Reduktionsverfahren an. Aus Schlacken der Edeltahlerzeugung wurden über die Schmelzebehandlung im Lichtbogenofen mehr als 97 % des in der Schlacke enthaltenen Chroms wieder gewonnen (Adamczyk 2008). Dieser Prozess beruht auf dem RedMelt-Verfahren, das zur Behandlung von MVA-Rückständen entwickelt wurde, und könnte demzufolge ebenfalls für die Wertstoffrückgewinnung aus Verbrennungsrückständen herangezogen werden (Faulstich et al. 1992). Mit dem so genannten Eisenbadreaktor wurde ein Reduktionsverfahren entwickelt und erprobt, das sich durch eine besonders effiziente Energieausnutzung auszeichnet und sich neben der Gewinnung wertvoller Metalle auch zur Rückgewinnung von Phosphor eignet (Mocker und Faulstich 2005).

2.2.b) Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Altdeponien und Hüttenhalden sowie aus Verbrennungsrückständen

F&E-Aspekt „Ablagerung 6“: Identifikationstechnologien

Innovative Identifikationstechnologien, beispielsweise optische Mustererkennungsverfahren für eine Optimierung von Materialeigenschaften der aus Abfällen oder Infrastruktur gewonnenen Sekundärrohstoffe

Beschreibung

Wie bereits beim F&E-Aspekt „Ablagerung 3“ ausgeführt, lassen sich mit konventioneller Sortiertechnik beim Deponierückbau nicht immer sortenreine Abfallfraktionen gewinnen, welche die Qualitätsanforderungen an stoffliche Recyclingverfahren erfüllen. Prinzipiell bestehen für Glas, Papier, Metalle und die heute gebräuchlichen Kunststoffe gute Möglichkeiten der stofflichen Verwertung. Andererseits existieren aber bestimmte Anforderungen z. B. an die Produktreinheit, deren Einhaltung vom Deponiegut nicht unbedingt zu erwarten ist.

Ansätze

Eine Möglichkeit verbesserter Stofftrennverfahren stellt die Verwendung moderner Sortierstrecken dar, die zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen oder zur Trennung von Leichtverpackungsgemischen konzipiert wurden. Gegebenenfalls können die Verfahrensparameter zur Positivauslese interessierender Fraktionen optimiert werden. Optimierungsansätze bei der sensorgestützten Aufbereitungstechnik liegen z. B. in der Erhöhung der Taktraten, einer feineren spektralen Auflösung oder einem erweiterten Spektralbereich. Verbesserungspotenzial bietet auch die Erfassung elektromagnetischer Eigenschaften von Metallen oder die Verwendung von Emittlern und Detektoren im akustischen Spektrum und im Mikrowellenbereich (Pretz et al. 2009).

2.2.b) Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Altdeponien und Hüttenhalden sowie aus Verbrennungsrückständen

F&E-Aspekt „Ablagerung 7“: Zwischenlagerung von Stoffströmen

Konzepte zur Zwischenlagerung von Stoffströmen mit Wertstoffpotenzial, welche momentan technologisch oder wirtschaftlich noch nicht sinnvoll recycelt werden

Beschreibung

Die bisher konkretisierten Ansätze weisen auf den noch umfangreich vorhandenen Forschungs- und Entwicklungsbedarf der Wertstoffrückgewinnung hin. Die dabei im Fokus stehenden anthropogenen Stoffströme fallen aber regelmäßig und in signifikanten Mengen an, ohne dass dieses Ressourcenpotenzial bislang ausgenutzt werden kann. Vor diesem Hintergrund sind die momentan beschrittenen Entsorgungswege einer kritischen Prüfung zu unterziehen. Insbesondere kaum rückholbare (z. B. Bergversatz) oder dissipative (z. B. baustoffliche Anwendungen) Verwendungsarten sollten beim Vorhandensein bestimmter Inhaltsstoffe vermieden werden.

Ansätze

Die genannte Problematik wird bei den Aschen aus der Klärschlammmonoverbrennung besonders deutlich. Die derzeitige Anfallmenge in Deutschland wird auf 243.000 Mg/a mit steigender Tendenz geschätzt (Reichenberger et al. 2008). Die darin enthaltene Phosphorkonzentration liegt im Bereich natürlicher Phosphaterze. Dieses attraktive Potenzial löste zahlreiche Entwicklungen zur Phosphorrückgewinnung aus, die sich aber noch nicht großtechnisch etablieren konnten. Während früher bergbauliche und baustoffliche Entsorgungsschienen dominierten, scheint inzwischen die Verbringung auf Deponien überwiegende Bedeutung zu erlangen (Reichenberger et al. 2008), (Adam et al. 2008). Um dieses anthropogen geschaffene Potenzial später mit wirtschaftlichen Phosphorrückgewinnungsverfahren erschließen zu können, ist eine genaue Dokumentation von Einbaulage und -menge der Klärschlammaschen unabdingbar. Idealerweise sollten eigene, später wieder leicht zugängliche Deponieabschnitte für diese Substanzen ausgewiesen werden.

2.2.b) Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Altdeponien und Hüttenhalden sowie aus Verbrennungsrückständen

F&E-Aspekt „Ablagerung 8“: Vermeidung Schadstoffanreicherung

Neuartiger Ansätze zur Vermeidung der Anreicherung von Schadstoffen bei der Kreislaufführung z. B. Entwicklung neuer Aufbereitungsverfahren und metallurgischer Prozesse zur Aufreinigung bzw. Schadstoffentfrachtung von Altmaterialien

Beschreibung

Vielfach wird ein Wertstoffrecycling dadurch erschwert bzw. verhindert, dass die Güterströme im Laufe der Produktion, Verwendung oder Entsorgung mit Schadstoffen kontaminiert werden. Augenfällig wird dies bei der Kreislaufführung von Phosphor, der sich beim Abwasserreinigungsprozess im Klärschlamm anreichert. Klärschlamm stellt aber auch die Senke für anorganische und organische Schadstoffe dar und sollte deshalb nicht direkt landwirtschaftlich verwertet werden. Ein thermischer Behandlungsschritt bewirkt die weitgehende Zerstörung organischer Stoffe, führt aber zur Anreicherung von Schwermetallen in den Rückständen. Die phosphorhaltigen Klärschlammaschen sind damit ebenfalls nicht uneingeschränkt als Düngemittel verwendbar. Einschlägige Regelwerke, wie die Klärschlamm- und Düngemittelverordnung, sehen eine Grenzwertsetzung für einzelne Schadstoffe vor.

Elektroschrott steht für einen weiteren Wertstoffstrom, der bereits bei der Güterproduktion mit Schadstoffen kontaminiert wurde, beispielsweise durch bleihaltige Lote oder bromierte Flammschutzmittel. Aufgrund der Umsetzung der RoHS-Richtlinie (Europäische Union 2003) dürfen bestimmte gefährliche Substanzen in Elektro- und Elektronikgeräten zwar mittlerweile nicht mehr verwendet werden, in den Abfallströmen sind diese aber zumindest für eine gewisse Übergangszeit noch enthalten. Die verwendeten Recyclingverfahren müssen deshalb immer auch effiziente Stoffstromweichen zur Abtrennung dieser Schadstoffe beinhalten.

Ansätze

Mit der Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm oder Klärschlammaschen beschäftigt sich eine Vielzahl von Verfahrensentwicklungen, die unter anderem auch im Rahmen einer von den Bundesministerien für Bildung und Forschung sowie Umwelt-, Naturschutz und Reaktorsicherheit gemeinsam getragenen Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe, insbesondere Phosphor“ unterstützt wurden. Häufig werden dabei Phosphorverbindungen aus entsprechenden Stoffströmen gelöst und mehr oder weniger selektiv als definierte Verbindung (z. B. Magnesium-Ammoniumphosphat MAP) wieder ausgefällt (Huber 2008). Beim so genannten SUSAN-Verfahren werden Schwermetalle durch Zusatz von Chlorverbindungen während einer thermochemischen Nachbehandlung von Klärschlammaschen selektiv in die Gasphase übergeführt und damit der Ausgangsstoff von Schadstoffen entfrachtet (Adam et al. 2009).

Auch die unter F&E-Aspekt „Ablagerung 5“ bereits angeführten reduzierenden Schmelzverfahren enthalten in der Regel element- bzw. stoffspezifische Trennschritte, beispielsweise indem flüchtige Schwermetalle gezielt im Prozesstaub angereichert werden, während sich andere Inhaltsstoffe im flüssigen Metallbad bzw. in der mineralischen Schlacke wiederfinden (Mocker und Faulstich 2005).

2.3 Übergreifende Aspekte der Ressourceneffizienz – Methoden zur Bewertung der Ressourceneffizienz

Stand der Technik

Bei vielen Unternehmen in Deutschland, insbesondere beim verarbeitenden Gewerbe, nehmen die Material- und Energiekosten einen hohen Anteil an den Gesamtkosten ein (Liedtke et al. 2005). In der Vergangenheit fokussierte man sich jedoch sehr einseitig auf die Senkung der Personalkosten bzw. im Umkehrschluss, auf die Steigerung der Personalproduktivität. Demzufolge sind in den Bereichen Energie- und insbesondere Materialeffizienz noch enorme Potenziale zu heben. Konkrete politische und unternehmerische Maßnahmen, welche auf die Steigerung der Ressourceneffizienz abzielen, haben mit einem gewichtigen Vergleichs- und Messbarkeitsproblem zu kämpfen, welche aus der Multidimensionalität des Begriffes herrühren.

Allgemein ist unter dem Begriff Ressourceneffizienz der Quotient aus dem Nutzen und dem Aufwand (Ressourceneinsatz) zu verstehen.

Beim Aufwand müssen je nach Blickwinkel sowohl ökologische, ökonomische (Volatilität, Knappheit), als auch soziale Randbedingungen (z. B. Arbeitsbedingungen beim Rohstoffabbau) berücksichtigt werden. Jede dieser Randbedingungen wiederum birgt ein Messbarkeits- und Vergleichbarkeitsproblem in sich. Einen möglichen Ansatz stellt die Methodik der Ökobilanzierung dar. Bei einer solchen ökologischen Bewertung werden im Rahmen der Sachbilanz alle wesentlichen Input- und Outputflüsse eines Produktsystems ermittelt. Anschließend werden die potenziellen Umweltwirkungen quantifiziert und in so genannte Wirkungskategorien (z. B. Treibhauseffekt, Eutrophierungspotenzial, etc.) eingeteilt. Auch hier ergibt sich jedoch das Problem, wie verschiedene Wirkungskategorien bewertet und aggregiert werden sollen.

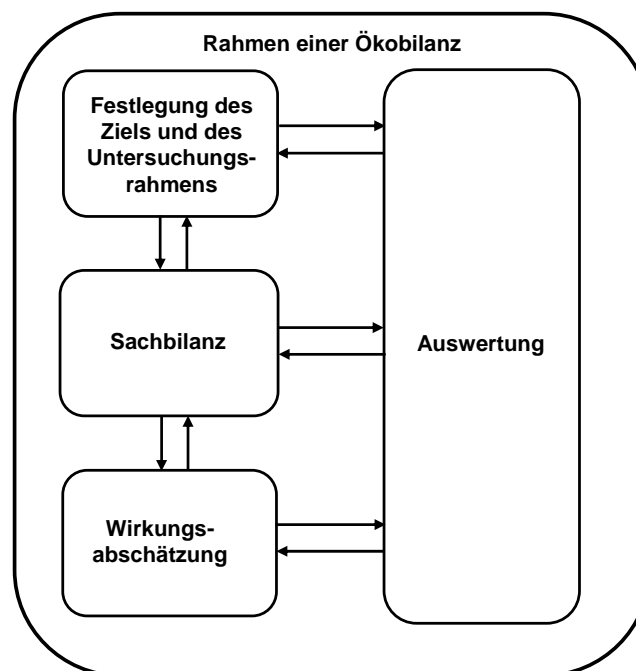


Abbildung 21: Untersuchungsrahmen einer Ökobilanz (DIN EN ISO 14040 2006)

Diese ökologische Bewertung ist im Folgenden mit der absoluten Knappheit und evtl. dem Versorgungsrisiko (z. B. für Deutschland) und ggf. auch mit sozialen Aspekten zu kombinieren. So macht es zwar beispielsweise ökologisch Sinn, wenn ein seltenes Material A mit einem bestimmten ökologischen Gefährdungspotenzial durch ein umweltschonendes Material B ersetzt wird. Wenn dieses Material B aber noch schlechter verfügbar ist oder nur an wenigen Orten auf der Welt gefördert werden kann, rücken andere Probleme in den Vordergrund. Ebenso ist die Messung des Produktnutzens nicht immer möglich, da Merkmale wie Design oder Funktion nicht quantifizierbar sind und vom individuellen Betrachter abhängen.

Im Gegensatz dazu enthält die Energieeffizienz weniger Definitionsschwierigkeiten, da die Energieeffizienz gewissermaßen nur ein klar abgegrenzter Ausschnitt innerhalb der Ressourceneffizienz ist. So kann der Energieverbrauch von Geräten (z. B. Strom für Kühlschrank) und Gebäuden (Strom und Wärme) mittels Messgeräten genau quantifiziert und verglichen werden. Die Physik definiert hier die Messskala für die Energie (Joule bzw. Kilowattstunden). Maßnahmen zur Effizienzsteigerung wirken sich direkt auf den Energieverbrauch aus und aus der eingesparten Energiemenge lassen sich Rückschlüsse auf die Güte der Maßnahme ableiten. Ein Beispiel hierzu wäre das Programm „Energieeffizient Bauen“ der KfW-Förderbank, welches Mindeststandards beim Primärenergieverbrauch und Transmissionswärmeverlust vorschreibt (z. B. „KfW 55 Haus“).

Da bisher keine neutrale, gewichtete Bewertungsgröße für die Ressourceneffizienz existiert, welche alle Randbedingungen (ökologisch, ökonomisch, sozial) in sich vereint, ist es sehr schwierig, unternehmerische Ziele und Prozesse, welche sich am Maß der Einsparung orientieren, zu definieren und zu bewerten. Hier ist sicherlich noch Bedarf für methodische Forschung gegeben.

Dennoch gibt es bereits diverse Zertifizierungsprogramme, Qualitätsmanagementsysteme und Standards (ISO 14001, EFQM Methoden), welche einzelne Aspekte aufgreifen und bewerten. Eine Übersicht einiger Tools liefert (Wuppertal Institut 2008). Die Aktivitäten des VDI Zentrum Ressourceneffizienz zielen unter anderem darauf ab, das Thema des Ressourcenverbrauchs bei der Erstellung und Modifikation von VDI-Richtlinien angemessen zu berücksichtigen. Als Kenngröße wird dabei ein dem Kumulierten Energieaufwand (KEA) vergleichbarer Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) verwendet.

2.3 *Übergreifende Aspekte der Ressourceneffizienz – Methoden zur Bewertung der Ressourceneffizienz*

F&E-Aspekt „Methoden 1“: Indikator Rohstoffproduktivität

Weiterentwicklung des Indikators Rohstoffproduktivität als einfache, praktikable Entscheidungshilfe für KMU, Kreditgeber und andere Anwender zur Bewertung der Ressourceneffizienz unter Einbeziehung ökologischer Kriterien (Materialrucksack, Umweltbedingungen bei Rohstoffabbau und Grundstoffproduktion, Toxizität), ökonomischer Kriterien (Volatilität, Knappheit, strategische Relevanz) und sozialer Kriterien (Arbeitsbedingungen beim Rohstoffabbau). Dieser Aspekt kann auch mit den Aufgaben des übergreifenden Integrations- und Transferprojekts kombiniert werden

Beschreibung

Wie bereits in der vorangegangenen Erläuterung zur Multidimensionalität des Begriffes Ressourceneffizienz erläutert, müssen neben den quantitativen Mengenströmen diverse, schwer messbare Kriterien berücksichtigt werden. Insbesondere hier sind kleine und mittlere Unternehmen (KMU) angesichts der knappen internen Ressourcen und der operativen Ausrichtung ihrer Strukturen häufig überfordert. Ziel soll es nun sein, einfache und praktikable, leicht auf unterschiedliche Unternehmen und Produkte anzupassende Instrumente zu entwickeln. Auf eine Systematik zur Erfassung des direkten Materialinputs (Materialinputindikator DMI), welche nur einen Aspekt darstellt, kann zurückgegriffen werden (DESTATIS 2009).

Ansätze

Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsschwerpunkts *Risiko und Nachhaltige Technikentwicklung (ZIRN)* am Internationalen Zentrum für Kultur- und Technikfolgenforschung (IZKT) an der Universität Stuttgart erarbeiten mehrere Partner derzeit Nachhaltigkeitskriterien für die Bereitstellung von Wärmeenergie unter ökologischen, ökonomischen und sozialen Gesichtspunkten (ZIRN 2010). In diesem vom BMBF geförderten Projekt wurden verschiedene Nachhaltigkeitsindikatoren erarbeitet, deren ausführliche Beschreibung Ende 2010 veröffentlicht werden soll. Wertvolle Impulse zur Übertragbarkeit auf die Anforderungen der Ressourceneffizienz sind zu erwarten.

Methodisch wird unter anderem die multikriterielle Entscheidungsanalyse (MCDA – multi criteria decision analysis) als eine Möglichkeit zur Berücksichtigung sehr unterschiedlicher Kriterien verwendet. Diese Vorgehensweise wurde von 2003 bis 2006 bereits erfolgreich bei der Bewertung von Szenarien der Energieversorgung auf nationaler und lokaler Ebene unter Einbeziehung der betroffenen Akteure angewandt (ARTEMIS 2010).

2.4 Integration und Transfer

Es wird darüber hinaus ein übergreifendes Integrations- und Transferprojekt gefördert, das die Innovationskraft der umsetzungsorientierten Verbundprojekte durch eine gezielte Vernetzung der Verbände untereinander, sowie mit ihrem Umfeld stärken und die Fördermaßnahme mit dem ERA-Net EcoInnova, sowie mit geeigneten europäischen Technologieplattformen verknüpfen soll. Des Weiteren soll das Projekt durch professionelle Transferunterstützung, die Bearbeitung branchen- und technologieübergreifender Querschnittsfragen und die Bereitstellung zusätzlicher Forschungs- und Schulungsleistungen den Beitrag der Fördermaßnahme erhöhen. Wesentliche Beiträge im Rahmen eines Integrations- und Transferprojektes sind u. a.

- ▶ Aufbereitung der Ergebnisse
- ▶ Themenübergreifende Koordination und Vernetzung von Verbundprojekten
- ▶ Vorbereitung und Durchführung übergeordneter Veranstaltungen
- ▶ Erarbeitung und Bereitstellung von Informationsmaterialien zum Förderschwerpunkt
- ▶ Identifizierung von und Kontaktpflege zu Schnittstellen vergleichbarer Forschungsaktivitäten
- ▶ Aufbereitung der Projektergebnisse für unterschiedliche Zielgruppen

Die Umsetzung des Förderschwerpunktes erfolgt als "lernendes Programm". Das BMBF behält sich vor, weitere Maßnahmen zur Weiterentwicklung der Fördermaßnahme wie auch zur internationalen Zusammenarbeit zu implementieren.

C Anhang

Literaturverzeichnis

- Adam, C., Peplinski, B., Michaelis, M., Kley, G., Simon, F.-G. (2009): Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery. *Waste Management* 29 (2009), S. 1122-1128
- Adam, C., Brenneis, R., Simon, F.-G. (2008): Ascheentsorgung - Acker oder Deponie. Faulstich, M., Quicker, P. (Hrsg.) *Verfahren & Werkstoffe für die Energietechnik, Band 4: Biomasse und Abfall - Regionale Brennstoffe richtig nutzen*, Dorner PrintConcept, Sulzbach-Rosenberg, S. 227-242
- ALD (2010): Full Service Leasing - Unsere Dienstleistung ist Ihre Freiheit. Online: http://www.ald-leasefinanz.de/deutsch/home_ald_lf/start.html, abgerufen am: 14.10.2010
- ARCQU (2010). ARCQU-DESIGN, Architecture Systems, Modulbauweise. Online: <http://www.arcqu.de>, abgerufen am 20.10.2010
- Arlt, K.-J. (2005): Aufkommen mineralischer Stoffe in der Stahlindustrie am Beispiel der AG der Dillinger Hüttenwerke. Fachtagung "Abfallverwertung bei der Rekultivierung von Deponien, Altlasten und Bergbaufolgelandschaften", Hamburg, 31. März - 1. April 2005
- ARTEMIS (2010): Evaluierung von Technologien zur Nutzung erneuerbarer Energien auf lokaler und nationaler Ebene - ein partizipativer Multikriterien-Ansatz. Online: http://www.project-artemis.net/Deutsche%20Version/g_index.html; abgerufen am 23.11.2010
- ATV-DVWK (2002): Bothmann, P. et al.: Umlagerung und Rückbau von deponierten Abfällen. ATV-DVWK/VKS-Fachausschuss 3.6 "Deponien" (Hrsg.) ATV-DVWK/VKS-Arbeitsbericht, 43 Seiten
- Bachmann, M., Cordes, M. (2007): Das Rohstoffpotential von Altdeponien aus wirtschaftlicher Sicht. Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.) *Bio- und Sekundärrohstoffverwertung II*, Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Witzenhausen, S. 857-869
- Bauer, W.P. (2009): Deponien - Totalsanierung und Aufarbeitung. Faulstich, M., Mocker, M. (Hrsg.) *Verfahren & Werkstoffe für die Energietechnik, Band 5: Biomasse & Abfall - Emissionen mindern und Rückstände nutzen*, Dorner PrintConcept, Sulzbach-Rosenberg, S. 169-179
- BGR (2009): Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeiten von Energierohstoffen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.) *Kurzstudie 2009*, Hannover
- BIFA (2008): Produktionsintegrierter Umweltschutz in Bayern. Ergebnisse des Pilotprojekts. Bayerisches Institut für Angewandte Umweltforschung und -technik GmbH, Augsburg (bifa)
- Bilitewski, B.; Härdtle, G. und Marek, K. (2000): *Abfallwirtschaft - Handbuch für Praxis und Lehre*. Springer Verlag, Berlin, 729 Seiten
- Biopuster (2010): Das Original Biopuster Verfahren. Online:<http://www.biopuster.at/> abgerufen am 21.10.2010
- BMU (2008): *Strategie Ressourceneffizienz, Impulse für den ökologischen und ökonomischen Umbau der Industriegesellschaft*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Berlin

- BMVBS (2007): Länge der öffentlichen Straßen. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Verkehr in Zahlen 2007/2008, Berlin, S.101
- BMWi (2010): Pressemitteilung - Brüderle gibt Startschuss für Deutsche Rohstoffagentur. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Online: <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Presse/tagesnachrichten,did=362004.html>, abgerufen am: 10.10.2010
- Bolland, T.; Chancerel, P. und Rotter, V. S. (2010): Stand der Erstbehandlung für Elektro- und Elektronikaltgeräte in Deutschland und Auswirkung auf die Rückgewinnung von Edelmetallen. Karl Thomé Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.) Recycling und Rohstoffe, Band 3. TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky, Neuruppin, S. 625-639
- Bosch (2010): Bosch ist führender Anbieter von wiederaufbereiteten Fahrzeugteilen. Austauscherteile in Erstausrüsterqualität. Online: <http://www.bosch-presse.de/TBWebDB/de-DE/PressText.cfm?id=4677>, abgerufen am: 14.10.2010
- Brunner, P. H. (2005): Ressourcenstrategie - Orientierung durch ein heuristisches Konzept für eine stoffbezogene Umweltpolitik, Vortrag am 24. November 2005, Sachverständigenrat für Umweltfragen, Berlin. Online: http://www.iwa.tuwien.ac.at/AWS_2264.htm/Aktuelle%20Vortraege/2005/AS%20Ressourcen%20Brunner.pdf abgerufen am: 10.10.2007
- BTU Cottbus (2004): Unruh, H-P., Glathe, M., Walinda, R., Nagora, A., Hänßel, P., Peickert, U.: Bericht zum Forschungsvorhaben (Projektphase I): Schaffung eines Entsorgungssystems zum komplexen Rückbau von Plattenbauten mit nachfolgender Wiederverwendung bzw. Wiederverwertung der Stahlbetonfertigteile sowie der Bau- und Abbruchabfälle. BTU Cottbus, 78 Seiten
- Buchert, M. (2010): Recycling, Exportproblematik und Reimportchancen? - Werthaltige Komponenten am Beispiel des Katalysators. Karl Thomé Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.) Recycling und Rohstoffe, Band 3. TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky, Neuruppin, S. 575-583
- Bundesregierung (2002): Perspektiven für Deutschland - Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Presse- und Informationsdienst der Bundesregierung, Berlin
- Bundesregierung (2007): Elemente einer Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Bundesregierung, Berlin.
- Bundesregierung (2008): Fortschrittsbericht 2008 zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie für ein nachhaltiges Deutschland. Presse- und Informationsamt der Bundesregierung, Berlin
- Bundesregierung (2010): Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Berlin
- Chancerel, P. und Rotter, V. S. (2009): Edelmetallrückgewinnung aus Elektro- und Elektronikaltgeräten durch Aufbereitung. Müll und Abfall, Ausgabe 02/09, S. 78-82
- DEMEA (2010): Impulsprogramm Materialeffizienz: Die betriebs- und volkswirtschaftliche Bedeutung von Materialeffizienz. Deutsche Materialeffizienzagentur, Berlin
- DESTATIS (2009): Buyny, S., Klink, S., Lauber, U.: Weiterentwicklung des direkten Materialinputindikators - Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung. Umweltbundesamt (UBA) und Statistisches Bundesamt (Hrsg.), Dessau und Wiesbaden
- DIN EN ISO 14040 (2006): Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, Beuth Verlag, Berlin
- Dreyer, R. und Manthey, J. (2009): Recycling von zinkhaltigen Abfällen. Karl Thomé Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.) Recycling und Rohstoffe, Band 2. TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky, Neuruppin, S. 619-626

- EIA 2010: US Energy Information Administration. Online: <http://tonto.eia.doe.gov>, abgerufen am 02.07.2010
- Elsner, H., Melcher, F., Schwarz-Schampera, U., Buchholz, P. (2010): Elektronikmetalle - zukünftig steigender Bedarf bei unzureichender Versorgungslage? Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Commodity Top News Nr. 33, Hannover
- Europäische Kommission (2005): Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, Thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen. Brüssel. KOM (670), Brüssel
- Europäische Kommission (2008): Die Rohstoffinitiative - Sicherung der Versorgung Europas mit den für Wachstum und Beschäftigung notwendigen Gütern. KOM (288) 699, Brüssel
- European Commission (2010): Critical raw materials for the EU - Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. European Commission (EC)
- Europäische Union (2003): Richtlinie 2002/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. Januar 2003 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten. Amtsblatt der Europäischen Union vom 13. Februar 2003, L 37/19 - L 37/23
- Europäische Union (2008): Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. Amtsblatt der Europäischen Union vom 19. November 2008, L 312/3 - L 312/29
- Faulstich, M., Freudenberg, A., Köcher, P., Kley, G. (1992): RedMelt-Verfahren zur Wertstoffgewinnung aus Rückständen der Abfallverbrennung. Thomé-Kozmiensky, K.J. (Hrsg.) Rückstände aus der Müllverbrennung, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin, S. 653-670
- Faulstich, M., Günther, C., Halsch, E., Mocker, M., Nikitin, I., Schmid, A., van Tran, C. (2004): E84 - Entwicklung eines innovativen Verfahrens zur nachhaltigen Verwertung kohlenstoffreicher Abfallfraktionen. Studie zu Möglichkeiten der nachhaltigen Abfallverwertung mit dem Verfahren des Eisenbadreaktors, Bericht zum Forschungsvorhaben E84. StMUGV, ATZ Entwicklungszentrum
- Faulstich, M. (2009): 40 Jahre Abfallwirtschaft - 40 Jahre "Müll und Abfall". Müll und Abfall 04/09, S. 156-162
- Faulstich et al. (2009): Faulstich, M., Leipprand, A., Mocker, M., Lauber, U., Brüggemann, A., Wied, T.: Perspektive Zukunftsfähigkeit - Steigerung der Rohstoff- und Materialeffizienz. KfW Bankengruppe, Frankfurt am Main
- Faulstich, M., Franke, M., Löh, I., Mocker, M. (2010): Urban Mining - Wertstoffgewinnung aus Abfalldeponien. Tagungsunterlagen Bayerische Abfall- und Deponietage, Augsburg, 17.-18. März 2010
- Fraunhofer (2004): Fischer, R., Hirth, T.: Vom Biokatalysator zum Produkt - Auszug aus dem Jahresbericht. Industrielle Biotechnologie in der Fraunhofer-Gesellschaft.
- Fraunhofer ICT (2007): Nachhaltige rohstoffnahe Produktion. Eyerer, P., Hirth, T., Woidasky, J. (Hrsg.), Fraunhofer IRB-Verlag, Pfinztal, 464 Seiten
- Fraunhofer ISI (2009): Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider-Weidemann, F., Scharpet, M., al.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien - Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 401 Seiten

- Fraunhofer ISI (2010a): Angerer, G., Mohring, A., Marscheider-Weidemann, F., Wietschel, M.: Kupfer für Zukunftstechnologien - Nachfrage und Angebot unter besonderer Berücksichtigung der Elektromobilität. Fraunhofer ISI, Karlsruhe
- Fraunhofer ISI (2010b): Schröter, M., Buschak, D. Jäger, D.: Nutzen statt Produkte kaufen - Verbreitung und Effekte neuer Produkt- Dienstleistungskonzepte im deutschen Verarbeitenden Gewerbe. Fraunhofer Institut für System und Innovationsforschung, Karlsruhe
- Gabriel, S. (2007): Die Bedeutung der Kommunalwirtschaft für eine hochwertige Entsorgung. Rede beim 2. Bundeskongress VKS und VKU und Mitgliederversammlung, Potsdam, 13.09.2007
- GET (2010): Schlackeaufbereitung mit höchster Verwertungstiefe, Firmeninformation GET Hamburg
- Goldmann, D. (2009): Erschließung neuer Rohstoffpotenziale aus Abfallströmen durch Entwicklung vernetzter Verwertungsstrukturen und mehrstufiger Aufbereitungsprozesse. Karl Thomé Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.) Recycling und Rohstoffe, Band 2. TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky, Neuruppin, S. 251-268
- Goldmann, D. (2010a): Perspektiven des Recyclings. Karl Thomé Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.) Recycling und Rohstoffe, Band 3. TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky, Neuruppin, S. 3-20
- Goldmann, D. (2010b): Strategische und strukturelle Überlegungen zur effizienten Nutzung anthropogener Rohstoffpotenziale in Zeiten der Globalisierung. Müll und Abfall 10/10, S. 476-481
- Hagelüken, C. (2010a): Recycling sichert Rohstoffversorgung - Altprodukte sind wertvolle Quellen für Technologiemetalle. CHEManager, GIT Verlag, Darmstadt
- Hagelüken, C. (2010b): Wir brauchen eine globale Recyclingwirtschaft mit völlig neuen Ansätzen. Wie sicher ist die Rohstoffversorgung für die Energietechnologien der Zukunft? Österreichische Gesellschaft für Umwelt und Technik (ÖGUT), Wien
- Hagelüken, C. (2010c): Schlüssel für Zukunftstechnologien - kritische Metalle und ihre Recyclingpotenzial, Tagungsbeitrag IFAT 2010, München
- Hagelüken, C. und Meskers, C. (2010): Complex life cycles of precious and special metals. MIT Press
- Heindl, A., Lenz, N., Müller, F.-M., Heuss-Aßbichler, S., Westermann, H. (2005): EU9 "Entwicklung von nachhaltigen Entscheidungskriterien zur sicheren Ablagerung und Verwertung von Eisenhüttenschlacken". Schlussbericht des Forschungs- und Entwicklungszentrums für Sondertechnologien, Rednitzhembach
- HITEC (2008): Alteisen in neuem Glanz. Wissen aktuell: Goldgrube Müll-Online: <http://www.3sat.de/page/?source=hitec/magazin/128999/index.html>, abgerufen am 08.12.2010
- Hoffmeyer, P.; Wittmaier, M.; Wolff, S.; Wöltje, M.; Albers, H. und Schmidt, A. (2009): Der Beitrag des Stoffstrommanagements für die Ressourceneffizienz. Müll und Abfall, 09/09, S. 8-12
- Hölzle, I. (2010): Energieeffizienz von Deponierückbauten. Müll und Abfall 10/10, S.488-492
- Huber, I.: Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten beim Phosphor-Recycling. Wasser und Abfall 2008, Nr. 1-2, S. 11-13
- Interseroh (2009): Von der Wurstfolie zur Hutablage. Online: <http://www.recyclingportal.eu/artikel/21704.shtml>, abgerufen am: 21.10.2010
- IPP (2001): Integrierte Produktpolitik - Instrumente aus der Praxis am Beispiel Automobil. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen

- IW (2008): Bardt, H.: Sichere Energie- und Rohstoffversorgung: Herausforderung für Politik und Wirtschaft? Institut der deutschen Wirtschaft Köln, IW-Positionen 36
- IZT (2008): Handke, V.: Materialeffizienz und Ressourcenschonung am Beispiel von strategischen Metallen. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung, Berlin
- Janz, A.; Prella, R.; Müller, F. und Bilitewski, B. (2009): Grenzüberschreitende Ströme von Elektroaltgeräten. Müll und Abfall 03/09, S. 126-132
- Kammer, U. (2009): Recycling von seltenen Metallen und deren Verbindungen. Karl Thomé Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.) Recycling und Rohstoffe, Band 2. TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky, Neuruppin, S. 647-655
- Keßler, H. (2007): Demographischer Wandel - Eine Herausforderung für die Abfallwirtschaft? Zusammenfassung Workshop des Umweltbundesamtes vom 14.11.2007, Dessau
- KIT (2010): Foresight für die Umwelttechnik von Morgen - Technikfolgeabschätzung. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse, Karlsruhe
- Kurz et al. (2004): Kurz, U., Hintzen, H., Laufenberg, H.: Konstruieren, Gestalten, Entwerfen. Verlag Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 368 Seiten
- Langen et al. (2008): Langen, M., Weber, H., Sabrowski, R., Oetjen-Dehne, R.: Erfahrungen mit dem System Gelbe Tonne in der Stadt Leipzig und dem Land Berlin. Müll und Abfall 05/08, S.236-240
- Lerch, U., Roysl, M., Zobel, R. (2010): Kommunale Altdeponie Marquartstein - Erfahrungen mit Rückbau und stofflicher Trennung. Tagungsunterlagen Bayerische Abfall- und Deponietage, Augsburg, 17.-18. März 2010
- Liedtke, C. und Busch, T. (2005): Materialeffizienz - Potenziale bewerten, Innovationen fördern, Beschäftigung sichern. oekom verlag, München
- Liedtke, M. und Elsner, H. (2009): Seltene Erden. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Commodity Top News Nr. 31, Hannover
- Martin, J.J.E., Langhein, E-C., Eickhoff, N. (2009): Verwertung von trocken ausgetragenen Aschen / Schlacken aus der Abfallverbrennung. Karl Thomé Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.) Recycling und Rohstoffe, Band 2. TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky, Neuruppin, S. 717-727
- Merkel, T. (2009): Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken im Jahr 2008. Report des FEhS-Instituts 16, Nr.1, S. 8
- Merkel, T. (2010): Das Wirtschaftsjahr 2009 - Produktion und Einsatz von Hochofen- und Stahlwerksschlacken. Report des FEhS-Instituts 17, Nr.1, S.14
- Mocker, M., Fricke, K., Löh, I., Franke, M., Bahr, T., Münnich, K., Faulstich, M. (2009): Urban Mining - Rohstoffe der Zukunft. Müll und Abfall 10/09, S.492-501
- Mocker, M., Faulstich, M. (2005): P-Dünger aus Klärschlamm, Schlammmaschen und Tiermehl durch Behandlung im Eisenbad. Verein zur Förderung des Instituts WAR - Wasserversorgung und Grundwasserschutz, Abwassertechnik, Abfalltechnik, industrielle Stoffkreisläufe, Umwelt- und Raumplanung der TU Darmstadt e.V. - WAR (Hrsg.) Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser und Klärschlamm - Konzepte, Verfahren, Entwicklungen. Schriftenreihe WAR 167, 75. Darmstädter Seminar Abwassertechnik, 12.-13. Dezember 2005, S. 249-264
- Nassour, A. (2000): Abfallwirtschaft - Technologie und Recycling. Universität Rostock, Institut für Landschaftsbau und Abwasserwirtschaft, Rostock
- Netzwerk Ressourceneffizienz (2010): Kaskadennutzung. Online: http://www.netzwerk-ressourceneffizienz.de/to_go/informationen_amp_tipps/wertschoepfungsketten/kaskadennutzung/index.html, abgerufen am: 14.10.2010

- Oetjen-Dehne (2009): Kasseler Modell - mehr als Abfallensorgung. Prof. Dr.-Ing. Urban (Hrsg.) Schriftenreihe des Fachgebietes Abfalltechnik, Band 9, Kassel
- Öko-Institut (2009): Buchert, M., Schüler, D., Bleher, D., Neurohr, N., et al.: Critical Metals for Future Sustainable Technologies and their Recycling Potential. Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies. United Nations Environment Programm (UNEP)
- Pretz, T., Killmann, D., Schockert, Y., Huang, J. (2009): Sensorgestützte Aufbereitungstechnik. Karl Thomé Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.) Recycling und Rohstoffe, Band 2. TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky, Neuruppin, S. 425-434
- Rainfurth, C. und Petzold, M. (2010): Effiziente Produktionstechnologien in der Effizienzfabrik. wt-Werkstattstechnik online: Jahrgang 100 Heft 5, Düsseldorf.
- Rat für Nachhaltige Entwicklung (2010): Arbeitsprogramm 2010 bis 2013. Online: <http://www.nachhaltigkeitsrat.de/de/der-rat/arbeitsprogramm/?size=ovxidzcfup>, abgerufen am: 14.10.2010
- Recycling Magazin (2010): Kuhn, M.: Neue Dimensionen - Mit dem Boom der Elektrofahrzeuge werden Hunderttausende Batterien auf die Recycler zukommen. Umicore bringt sich schon einmal in Stellung, Recycling-magazin 08/2010
- Reichenberger, H-P., Quicker, P., Geis, M., Mocker, M., Faulstich, M. (2008): Feste Rückstände aus Verbrennungsanlagen, Teil I. und Abfall 08/08, S. 386-393
- Rettenberger, G. (2009): Zukünftige Nutzung der Deponie als Ressourcenquelle. Flamme, Gallenkemper, Gellenbeck, Bidlingmaier, Kranert, Nelles, Stegmann (Hrsg.) Tagungsband der 11. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Münster, 10.-11. Februar 2009, S. 101.109
- Scholz, R. (2009): Thermische Verfahren für das Recycling von Metallen. Karl Thomé Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.) Recycling und Rohstoffe, Band 2. TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky, Neuruppin, S. 291-308
- SERI (2010): Sustainable Europe Research Institute. <http://www.materialflows.net/mfa/> abgerufen am 02.07.2010
- Spiegel Online (2010): China kappt Exporte von Hightech-Metallen. Online: <http://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/0,1518,723854,00.html>, abgerufen am: 05.11.2010
- SRU 2008: SRU - Sachverständigenrat für Umweltfragen: Umweltgutachten 2008. Umweltschutz im Zeichen des Klimawandels. Erich Schmidt Verlag, Berlin. 600 Seiten
- Stahel, W., R. (2004): Ressourcenproduktivität durch Nutzungsintensivierung und Lebensdauererlängerung - 10 Jahre Good-Practice Beispiele. Institut für Produktdauer-Forschung, Genf
- Steinhilper, R. (1998): Remanufacturing - The Ultimate Form of Recycling. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
- Stephan, F. (2010): Rückbau der Altdeponie Marquartstein aus Sicht der Gemeinde. Tagungsunterlagen Bayerische Abfall- und Deponietage, Augsburg, 17.-18.. März 2010
- UBA (2007): Buchert, M., Hermann, A., Jenseit, W., Stahl, H. et al.: Verbesserung der Edelmetallkreisläufe - Analyse der Exportströme von Gebrauchtkfz und Elektronikgeräten am Hamburger Hafen. Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes - Förderkennzeichen 363 01 133. Umweltbundesamt, Dessau

- UBA (2010): Chemikalienleasing als Modell zur nachhaltigen Entwicklung mit Prüfprozeduren und Qualitätskriterien anhand von Pilotprojekten in Deutschland. Beratungsgesellschaft für integrierte Problemlösungen (BiPRO). Umweltbundesamt, Dessau
- UMICORE (2010): Broschüre "Exploring Umicore Precious Metal Refining". Umicore
- UMSICHT (2008): Recycling für den Klimaschutz. Ergebnisse der Studie von Fraunhofer UMSICHT und INTERSEROH zur CO₂ Einsparung durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen. Fraunhofer Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik: Köln
- USGS (2010): Mineral commodity summaries. U.S. Geological Survey: Washington
- VDI (2009): Ploetz C., Reuscher, G. Zweck, A. Mehr Wissen - weniger Ressourcen - Potenziale für eine ressourceneffiziente Wirtschaft. Zukünftige Technologien Consulting der VDI Technologiezentrum GmbH. Zukünftige Technologien Nr. 83, Düsseldorf
- Volkswagen (2005): Kurzfassung - Ökobilanz Altfahrzeug-Recycling. Vergleich des VW-SiCon Verfahrens und der Demontage von Kunststoff-Bauteilen mit nachfolgender werkstofflicher Verwertung
- Wagner (2008): 11. Baustoff-Recycling Tag, BMU, Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen und an Verfüllungen
- Wendenburg, H., Berger, J., Bergs, C., van Dillen, A., Ernst, M., Jaron, A., Karavezyris, V., Kopp, A., Petersen, F., Radde, A., Wagner, K. (2009): Von der Müllkippe zu Ressourcenpolitik - 40 Jahre Abfallpolitik in Deutschland. Müll und Abfall 04/09, S.163-171
- Weitkämper, L., Wotruba, H. (2008): Rückgewinnung von Metallen aus metallurgischen Schlacken. Karl Thomé Kozmiensky, Daniel Goldmann (Hrsg.) Recycling und Rohstoffe, Band 1. TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky, Neuruppin, S. 133-141
- Weizsäcker, E. U. v. (2010): Faktor Fünf - Die Formel für nachhaltiges Wachstum. Droemer, München
- Weizsäcker, E. U. v.; Lovins, A. B. und Lovins, L. H. (1995): Faktor vier, Doppelter Wohlstand - halbiertes Naturverbrauch. Droemer Knauer, München
- Wiemer, K., Bartsch, B., Schmeisky, H. (2009): Deponien als Rohstofflagerstätten von morgen - Ergebnisse einer hessenweiten Untersuchung. Wiemer, K., Kern, M. (Hrsg.) Bio- und Sekundärrohstoffverwertung IV, Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH, Witzenhausen, S. 586-716
- WRAP (2007): ICE Demolition Protocol Case Study - Wembley Stadium Access Corridor Online:http://www.wrap.org.uk/downloads/WRAP_Case_Study_SAC_formatted_050307.c904adf1.4649.pdf, abgerufen am 18.11.2010
- Wuppertal Institut (2008): Instrumentenwegweiser zur Steigerung der Ressourceneffizienz - Praxishandbuch des Umwelt- und Nachhaltigkeitscontrollings für KMU. Mathias Onischka; Michael Ritthoff; Christa Liedtke (Hrsg.) Wuppertal Institut für Klima Umwelt Energie, Wuppertal, 56 Seiten
- ZIRN (2010): Energie nachhaltig konsumieren – nachhaltige Energie konsumieren. Online: <http://www.uni-stuttgart.de/nachhaltigerkonsum/de/index.html> abgerufen am 23.11.2010

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ressourcen- und Energieverbrauch in ausgewählten Staaten (SERI 2010, EIA 2010, eigene Berechnungen) Der Ressourcenverbrauch pro Kopf enthält hier die im Inland entnommenen und verwendeten Metalle, mineralischen Rohstoffe, Energierohstoffe sowie Biomasse.	3
Abbildung 2: Statische Reichweite ausgewählter Metalle und Mineralien (BGR 2009; USGS 2010).....	4
Abbildung 3: Gekoppelte Förderung bei Metallen: Die Nebenprodukte sind von der Förderung der Hauptmetalle abhängig (Hagelüken et al. 2010).....	5
Abbildung 4: Anteil der kumulierten Nachfrage nach „Technologiemetallen“ der letzten 30 Jahre an der Gesamtnachfrage seit 1900 (Hagelüken 2010c)	7
Abbildung 5: Klassifikation kritischer Rohstoffe; eigene Darstellung nach (European Commission 2010)	12
Abbildung 6: Modellvorstellung der partiellen Optimierung innerhalb von Wertschöpfungsketten	17
Abbildung 7: Optimierungsansätze in einem Wertschöpfungsnetz.....	18
Abbildung 8: Aufteilung und Inhalte der Förderschwerpunkte I (Fortführung nächste Seite).....	19
Abbildung 9: Aufteilung und Inhalte der Förderschwerpunkte II (Fortführung)	20
Abbildung 10: Lebenszyklus von Produkten und Kreislauf von Rohstoffen mit prinzipiellen Ansatzpunkten zur Steigerung der Ressourceneffizienz (eigene Darstellung).....	23
Abbildung 11: Kategorisierung und Eigenschaften anthropogener Rohstoffe, eigene Darstellung nach (Goldmann 2009)	24
Abbildung 12: CO ₂ -Emissionen von Primär- und Recyclingprozessen im Vergleich (PPK: Papier, Pappe, Kartonagen; PE: Polyethylen; PET: Polyethylenterephthalat) (UMSICHT 2008).....	24
Abbildung 13: Vergleich der Goldausbeute von Primär- und Sekundärproduktion (Hagelüken 2010b).....	25
Abbildung 14: Anlagenschaltbild und Stoffflüsse der UMICORE-Anlage in Hoboken / Antwerpen; eigene Darstellung nach (UMICORE 2010)	30
Abbildung 15: UMICORE-Verfahrenskonzept zum Batterierecycling; eigene Darstellung nach (Öko-Institut 2009).....	31
Abbildung 16: Substitution der Metalle in (a) elektronischen und (b) opto-elektrischen Anwendungen (Hagelüken, Meskers 2010) weiß: derzeit genutzte Elemente, grau: mögliche Substitute	44
Abbildung 17: Aspekte des Produktionssystems Automobil (IPP 2001)	46
Abbildung 18: Mengenabschätzung einzelner Stoffgruppen auf Abfalldeponien in Deutschland (Mocker et al. 2009)	63

Abbildung 19: Verfahrensschritte beim Deponierückbau (ATV-DVWK 2002).....	66
Abbildung 20: Verwertbare Fraktionen aus einem Deponierückbau (Bachmann und Cordes 2007)	66
Abbildung 21: Untersuchungsrahmen einer Ökobilanz (DIN EN ISO 14040 2006).....	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Verwendung knapper Rohstoffe in Zukunftstechnologien (European Commission 2010)	6
Tabelle 2:	Kriterien zur Risikobeurteilung und Beispiel zur Risikoeinstufung von Platin, Molybdän und Zinn; eigene Darstellung nach (IW 2008)	14
Tabelle 3:	Recyclingquoten verschiedener Stoffe im Vergleich	27
Tabelle 4:	Recyclingquoten verschiedener Stoffe im Vergleich (Fortsetzung)	28
Tabelle 5:	Analyse verschiedener Nebenprodukte und Abfälle der Metallurgie (Arlt 2005), (Heindl et al. 2005), (Faulstich et al. 2004)	65
Tabelle 6:	Gehalte ausgewählter Wertstoffe im Schlackenberg Sulzbach-Rosenberg (Mocker et al. 2009)	65