

Stoffströme in der industriellen Kreislaufwirtschaft

Martin Faulstich und Mario Mocker

1.	Modellhafte Stoffwandlungskette.....	5
1.1.	Modellbeschreibung	5
1.2.	Rohstoffinput	5
1.2.1.	Umweltökonomische Gesamtrechnungen.....	5
1.2.2.	Rohstoffwirtschaftliche Daten	7
1.3.	Interne Kreislaufströme.....	9
1.4.	Outputströme	12
1.4.1.	Systemverluste	12
1.4.2.	Dispersverluste	14
1.4.3.	Materialverbleib	14
2.	Optimierungsansätze.....	15
2.1.	Herstellerorientierte Ansätze.....	15
2.2.	Nutzerorientierte Ansätze.....	16
2.3.	Ansätze der Abfall- und Recyclingwirtschaft.....	17
2.4.	Politisch-ökonomische Ansätze	18
3.	Fazit und Ausblick	19
4.	Literatur.....	22

Die bisherige Erfolgsgeschichte der deutschen Volkswirtschaft ist zu einem erheblichen Teil auf die Leistungen im industriellen Sektor zurückzuführen. Deutschland ist eine der führenden Volkswirtschaften und die leistungsstärkste Volkswirtschaft innerhalb Europas. Obwohl seit einigen Jahren dem Standort Deutschland immer öfter die Entwicklung zu einer Dienstleistungs- und Wissensgesellschaft prognostiziert wird, stellt das Produzierende Gewerbe nach wie vor einen wichtigen Pfeiler der Volkswirtschaft dar. Auch zukünftig wird die industrielle Herstellung von Gütern einen bedeutenden Anteil zur deutschen Wirtschaftsleistung beitragen.

Für diesen hoch technologisierten Wirtschaftsbereich ist die sichere und wirtschaftliche Versorgung mit Rohstoffen von größter Bedeutung. Im Zuge der stetigen Weiterentwicklung zur High-Tech-Gesellschaft ist neben dem erhöhten Bedarf an einigen gängigen Massenrohstoffen wie Stahl und Aluminium auch die Vielfalt der eingesetzten Stoffe enorm angestiegen. Viele Innovationen unserer Zeit basieren auf spezifischen physikalischen und chemischen Eigenschaften der verwendeten Stoffe, wie Edel- oder Sondermetalle sowie

einige spezielle Mineralien. Deutschland verfügt über keine nennenswerten natürlichen Vorkommen an solchen Technologierohstoffen und ist dennoch auf eine sichere und bezahlbare Versorgung angewiesen.

Die Lage auf den globalen Rohstoffmärkten ist von einer zunehmenden Konzentration auf der Anbieterseite gekennzeichnet. Oft sind es nur einige wenige Unternehmen, die das Angebot eines Stoffes bestimmen, oder aber wichtige Förderländer stellen ihre nationalen Interessen in den Vordergrund. Die politische und wirtschaftliche Stabilität dieser Staaten ist in vielen Fällen durchaus in Frage zu stellen. In der Folge werden unkalkulierbare Preisentwicklungen und zunehmende Verfügbarkeitsrisiken im Bereich vieler für die deutsche Industrie bedeutsamer Rohstoffe beobachtet. Daher reichen die konventionellen Ansätze zur Sicherung der Rohstoffversorgung allein nicht mehr aus, um Stabilität und Wohlstand des Industriestandortes Deutschland zu erhalten. Diese sehen beispielsweise die Bildung strategischer Reserven, die Wahrung handelspolitischer Zugänge zu Rohstoffmärkten oder die außenpolitische Flankierung der Rohstoffbeschaffung vor.

Die Bundesregierung hat bereits auf diese Herausforderungen reagiert und die Rohstoffsicherung zur nationalen Aufgabe erklärt. Die zukünftige Bereitstellung metallischer und mineralischer Rohstoffe muss auf Jahrzehnte hinaus sichergestellt werden, um die technisch-ökonomische Entwicklung nicht zu gefährden. Wesentliche Elemente der 2010 verabschiedeten *Rohstoffstrategie der Bundesregierung* sind einerseits der sparsamere und effizientere Umgang mit Rohstoffen sowie andererseits die Bereitstellung dieser Rohstoffe durch Recycling [4]. Eine Steigerung der Rohstoffproduktivität im Sinne einer gezielten Kreislaufführung und die damit einhergehende Reduktion des konventionellen Rohstoffabbaus sind daher grundlegende Bedingungen zum Erhalt der Stabilität und des Wohlstandes des Industriestandortes Deutschland.

Die industrielle Kreislaufwirtschaft hat durchaus beachtliche Erfolge vorzuweisen. Verwertungs- und Recyclingquoten steigen seit Jahren kontinuierlich an. Allerdings nahm im Gegenzug die Abfallbeseitigung ab, so dass die der Entsorgung zugeführten Mengen insgesamt etwa gleich blieben und nur eine Verschiebung zur Verwertung stattfand. Die vermehrte Substitution von Primärmaterialien durch Sekundärrohstoffe ist begrüßenswert. Sofern aber eine Korrelation zwischen Abfallaufkommen und Materialeinsatz gegeben ist, deutet die nahezu konstante Entsorgungsmenge darauf hin, dass noch keine nennenswerte Verringerung des Materialbedarfs im Wirtschaftskreislauf gelang. Außerdem wird die bisher praktizierte Festlegung von Recyclingquoten für vergleichsweise wenige, kaum differenzierte Stoffgruppen dem sehr spezifischen Bedarf der Industrie an Technologie-materialien nicht mehr gerecht. Flankierende Maßnahmen zur Produktverantwortung, die in einigen Bereichen eingeführt wurden, beschränken sich auf die finanzielle Verantwortung – also auf die Verpflichtung, für eine ordnungsgemäße Entsorgung zu bezahlen – und begünstigen deshalb kostengünstige Entsorgungswege. Bis auf die erwähnten Quoten spielen bisher weder ökologische Aspekte noch die Belange der Ressourcenschonung eine adäquate Rolle.

Im vorliegenden Beitrag werden Auszüge wesentlicher Stoffströme einer industriellen Kreislaufwirtschaft anhand eines Modells der Wertschöpfungskette vorgestellt und teilweise auch quantifiziert (Kapitel 1). Prinzipielle Lösungsansätze zur Steigerung der Materialeffizienz sind teilweise seit langem bekannt. In Kapitel 2 werden einige der bedeutendsten Ansatzpunkte seitens der Produzenten, der Nutzer, der Entsorgungswirtschaft und der Politik wiedergegeben.

1. Modellhafte Stoffwandlungskette

1.1. Modellbeschreibung

Die Vision für die Zukunft muss eine möglichst vollständige Kreislaufwirtschaft sein, die eine begrenzte Materialmenge zwischen Nutzung und Aufbereitung/Rückgewinnung mit möglichst geringen Verlusten im physikalisch möglichen Maße zirkuliert. Um ein derartig ambitioniertes Ziel erreichen zu können, müssen unsere Gesellschaften und Volkswirtschaften der Verpflichtung nachkommen, mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen deutlich effizienter umzugehen. Vor diesem Hintergrund wurde eine Modellvorstellung entwickelt, welche die wesentlichen Glieder der materiellen Wertschöpfungskette betrachtet [18].

Bild 1 gibt diese produktionsbezogene Wertschöpfungskette in vereinfachter Form wieder. Einen wesentlichen Inputstrom des Modells bilden natürliche Rohstoffe, die zur Energie- und Grundstoffproduktion benötigt werden. Aus den Grundstoffen werden wiederum Güter und materielle Grundlagen für Dienstleistungen hergestellt. Das Nutzerverhalten und die Nachfrage haben dabei einen bestimmenden Einfluss auf Art und Umfang der Produktion und damit auch auf die vor- und nachgelagerten Stufen der Kette. Am Ende der Nutzungsphase steht die Abfallwirtschaft, in der nicht mehr benötigte Güter durch immer effizientere Prozesse entweder stofflich in den Wirtschaftskreislauf zurückgeführt oder zur Energiebereitstellung genutzt werden. Nicht verwertbare Anteile werden durch Ablagerung auf Deponien beseitigt. Neben diesen gewollt ausgeschleusten Reststoffströmen beinhaltet das Modell aber auch unerwünschte Outputströme, die hier unter den Bezeichnungen Dispers- und Systemverluste zusammengefasst werden und die in den weiterführenden Abschnitten noch näher erläutert werden.

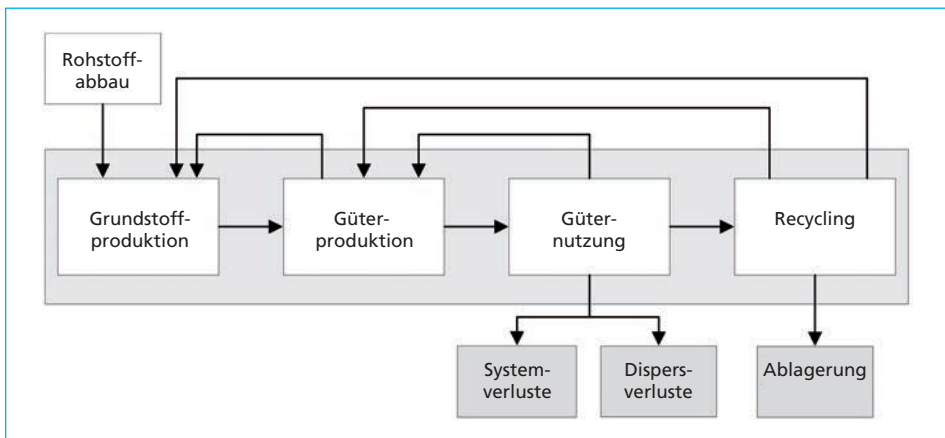


Bild 1: Vereinfachte prinzipielle Wertschöpfungskette

1.2. Rohstoffinput

1.2.1. Umweltökonomische Gesamtrechnungen

Eine wertvolle Datenbasis für Stoffströme in der industriellen Kreislaufwirtschaft stellen die Umweltökonomischen Gesamtrechnungen (UGR) dar [10]. Die darin vom Statistischen Bundesamt bereitgestellten Zahlenwerte ergänzen die in monetären Einheiten bewerteten Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR) durch eine mengenmäßige Erfassung der physischen Input- und Outputströme mittels Material- und Energieflussrechnungen

und umfassen dabei auch nicht in den traditionellen VGR enthaltene Stoffströme wie beispielsweise die Emission von Schadstoffen in die Luft. Die UGR dienen somit zur besseren Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen der wirtschaftlichen Tätigkeit im Zusammenhang mit ihrer natürlichen Umwelt und bilden die Bezugsgröße für die so genannte Rohstoffproduktivität, also das Verhältnis von Bruttoinlandsprodukt zu Materialeinsatz, als bedeutenden Leitindikator der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie [7, 8].

Detailliertes Datenmaterial zu den UGR ist derzeit bis zum Jahr 2008 verfügbar [11]. Von besonderem Interesse ist dabei zum einen, dass in den UGR neben den mineralischen und metallischen Rohstoffen auch biotische Materialien (Wildtiere, Wildfische, Bäume und übrige Pflanzen) erfasst werden. Deren verwertete Menge belief sich in 2008 auf immerhin 367 Millionen Tonnen, wovon 106 Millionen Tonnen eingeführt wurden. Da es sich dabei um erneuerbare Ressourcen handelt, werden diese Anteile bei der Berechnung der Rohstoffproduktivität nicht einbezogen. Zum anderen weisen die UGR auch nicht verwertete Rohstoffentnahmen, also Abraum, Bodenaushub, Ernterückstände und dergleichen, aus. Mit rund 2.229 Millionen Tonnen bildet die nicht verwertete inländische Rohstoffentnahme den weitaus größten Teil des im Jahr 2008 in den UGR ausgewiesenen gesamten Materialeinsatzes (3.917 Millionen Tonnen ohne Wasser und Gase aus der Atmosphäre). Von der nicht verwerteten Entnahme entfielen etwa 1.791 Millionen Tonnen allein auf Abraum aus dem Braunkohlentagebau.

Im Gegensatz zu der nicht verwerteten inländischen Entnahme werden die im Zusammenhang mit Importgütern stehenden indirekten Materialströme, also die nicht zur Güterproduktion verwerteten Materialien im Ausland, in den UGR noch nicht berücksichtigt. Einen Verbesserungsansatz zur ganzheitlichen Betrachtung stellt die Umrechnung solcher Umweltbelastungen der Vorkette in Rohstoffäquivalente dar [9]. Demnach ist das in Rohstoffäquivalenten ausgedrückte Gewicht der importierten Güter etwa fünfmal so hoch wie das tatsächliche Gewicht der Importe. Unter Einbeziehung dieser Rohstoffrucksäcke würden sich die bisher registrierten Fortschritte bei der Rohstoffproduktivität deutlich vermindern. Wegen der sachgerechten Berücksichtigung von Umweltauswirkungen in den Lieferländern wird aber die dauerhafte Übernahme der modifizierten Bewertungsmethodik in Betracht gezogen [12].

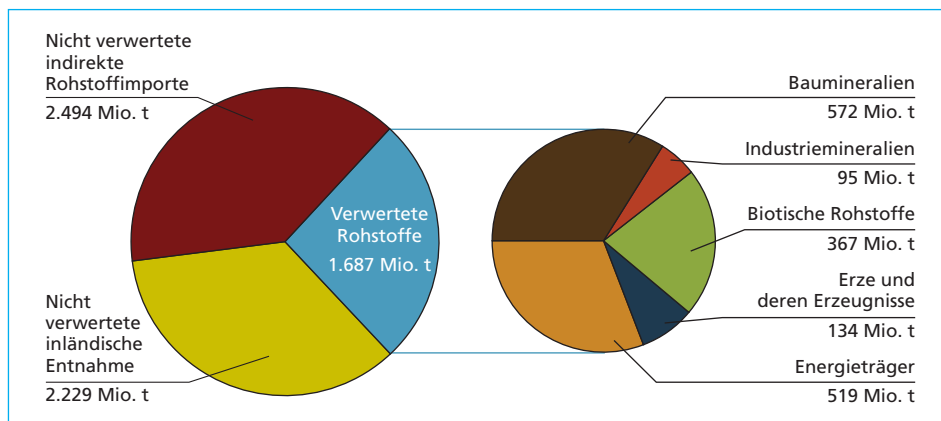


Bild 2: Gesamter Rohstoffinput der deutschen Volkswirtschaft im Jahr 2008 in Millionen Tonnen

Quellen: Statistisches Bundesamt: Umweltnutzung und Wirtschaft, Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Teil 1: Gesamtwirtschaftliche Übersichtstabellen, Wirtschaftliche Bezugszahlen. Wiesbaden, 2010

Statistisches Bundesamt: Rohstoffeffizienz: Wirtschaft entlasten, Umwelt schonen. Ergebnisse der Umweltökonomischen Gesamtrechnung 2010. Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 17. November 2010 in Berlin, Wiesbaden, 2010

In Bild 2 wurden die Rohstoffäquivalente der Importe separat ausgewiesen. Dem verwerteten Materialinput in die deutsche Volkswirtschaft (ohne Wasser und Gase) von 1.687 Millionen Tonnen (26 Prozent) stehen nicht verwertete Materialentnahmen aus der Natur im In- und Ausland von 4.723 Millionen Tonnen gegenüber. Metallерze und daraus hergestellte Güter sind aufgrund ihrer hohen wirtschaftlichen Bedeutung in Bild 3 differenziert dargestellt.

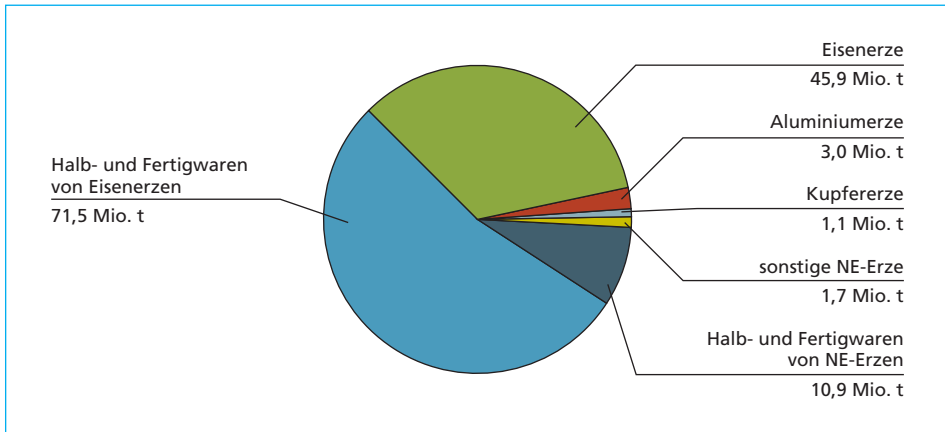


Bild 3: Metallischer Rohstoffinput der deutschen Volkswirtschaft im Jahr 2008 in Millionen Tonnen

Quelle: Statistisches Bundesamt: Umwelnutzung und Wirtschaft, Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Teil 1: Gesamtwirtschaftliche Übersichtstabellen, Wirtschaftliche Bezugszahlen. Wiesbaden, 2010

1.2.2. Rohstoffwirtschaftliche Daten

Eine detaillierte Aufstellung zur deutschen Rohstoffsituation wird regelmäßig von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) erstellt. Die aktuellste Ausgabe dieser rohstoffwirtschaftlichen Länderstudie bezieht sich auf das Jahr 2009 [2]. Die darin enthaltenen Zahlen weisen einige durch die Wirtschaftskrise begründete Verwerfungen auf, erlauben aber dennoch einen Rückschluss auf das Gesamtbild und die Mengenverhältnisse.

Wie einleitend erwähnt, sind hoch entwickelte Länder in erheblicher Weise von besonderen Technologierohstoffen abhängig. In den UGR wird aber bereits deutlich, dass auch die Stoffströme einer modernen Industriegesellschaft rein mengenmäßig von mineralischen Massenrohstoffen dominiert werden. In dieser Hinsicht ist Deutschland keineswegs ein rohstoffarmes Land. Gemäß den rohstoffwirtschaftlichen Daten der BGR für das Jahr 2009 belief sich die inländische Primärproduktion an Industriemineralien, Steinen und Erden auf gut 585 Millionen Tonnen, wobei die größten Anteile auf Bausande und -kiese (245 Millionen Tonnen), gebrochene Natursteine (217 Millionen Tonnen) sowie Kalk-, Mergel- und Dolomitstein (62 Millionen Tonnen) entfielen [2]. Von den übrigen mineralischen Rohstoffen sind vor allem Kalisalz sowie Schwefel und Gips bzw. Anhydrit (7,1 Millionen Tonnen aus der Abgasentschwefelung) erwähnenswert, da diese zu erheblichen Anteilen exportiert werden (Kalisalz zu etwa 80 Prozent) und damit nicht vollständig dem nationalen Rohstoffinput zuzurechnen sind [2].

Die industrielle Bedeutung des Rohstoffinputs lässt sich besser am wirtschaftlichen Wert als an der Menge bemessen. Bei dieser Betrachtung wird die Dominanz der Energierohstoffe deutlich. Der Gesamtwert 2009 in Deutschland produzierter sowie importierter Rohstoffe belief sich auf 101,4 Milliarden Euro, davon waren gut 71,7 Milliarden Euro (70,7 Prozent)

für Energierohstoffe aufzubringen [2]. In Mengeneinheiten ausgedrückt und normiert auf Steinkohleneinheiten (SKE) entsprach der in 2009 registrierte Primärenergieverbrauch 449 Millionen Tonnen SKE [2]. Die konjunkturelle Erholung führte für das Jahr 2010 bereits wieder zu einem Verbrauchsanstieg auf knapp 480 Millionen Tonnen SKE [1].

Nach den Energierohstoffen stellen Metalle beziehungsweise Vorprodukte der Metallurgie mit einem für 2009 ermittelten Wert von 22,1 Milliarden Euro (21,7 Prozent) einen finanziell ebenfalls sehr bedeutenden Inputstrom der Industriegesellschaft dar [2]. Erwartungsgemäß wird diese Fraktion von rund 29 Millionen Tonnen Eisenerz dominiert, die wie auch die übrigen Rohstoffe für metallurgische Prozesse nahezu vollständig aus dem Ausland eingeführt werden. Für zahlreiche Metalle weisen die auf der Außenhandelsstatistik basierenden Angaben der BGR auch metallhaltige Abfälle sowie Schrott aus. Diese Mengen wurden bei der in Tabelle 1 wiedergegebenen Berechnung des Rohstoffinputs ausgenommen, da sie als industrielle Kreislaufströme anzusehen sind.

Tabelle 1: Rohstoffinput der deutschen Volkswirtschaft im Jahr 2009

Rohstoff	Menge	Wert*
	Mio. t	Mio. EUR
nichtmetallische mineralische Rohstoffe	569,4	6.523
• Bausande und -kiese	245,0	1.453
• gebrochene Natursteine	204,7	1.226
• Kalk-, Mergel- und Dolomitgestein	61,4	428
• sonstige nichtmetallische Rohstoffe	58,3	3.416
Energierohstoffe	477,5	71.739
• Erdöl	110,6	31.866
• Erdgas	56,2	27.131
• Braunkohle	169,9	6.455
• Steinkohle	50,3	4.944
• sonstige Energieträger	k. A.	1.342
* davon Kernbrennstoffe**	50,2	k. A.
* davon Erneuerbare Energien**	40,3	k. A.
Metalle und metallurgische Rohstoffe	38,5	22.100
• Eisenerz	29,6	k. A.
• sonstige	8,9	k. A.

* eigene Berechnung nach Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien. Heft XXXIX: Bundesrepublik Deutschland – Rohstoffsituation 2009, Hannover, 2010

** angegeben in Mio. t Steinkohleneinheiten (SKE)

Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien. Heft XXXIX: Bundesrepublik Deutschland – Rohstoffsituation 2009, Hannover, 2010

Die Zahlenangaben der BGR stimmen zumindest in der Größenordnung mit den Angaben der UGR überein, wobei im Vergleich der Jahre 2008 und 2009 ein krisenbedingter Einbruch der Importe (z.B. fast 40 Prozent bei Metallrohstoffen) zu berücksichtigen ist [2].

Ferner gilt es zu beachten, dass die von der BGR publizierten Importmengen keine Halbzeuge und Fertigwaren enthalten. Abweichungen ergeben sich auch durch statistische Unsicherheiten aufgrund der uneinheitlichen Sachlage zur Datenerhebung [2].

1.3. Interne Kreislaufströme

Die internen Kreislaufströme einer Industriegesellschaft sind bereits eng mit der Abfallwirtschaft verbunden, da die verwerteten Anteile im Abfall stetig ansteigen und seit etwa einem Jahrzehnt den Restabfall deutlich übersteigen. Die aktuellste Abfallbilanz bezieht sich auf das Jahr 2009 und weist ein gesamtes Abfallaufkommen einschließlich der Sekundärabfälle aus Abfallbehandlungsanlagen von etwa 359,4 Millionen Tonnen aus. Davon werden 258,9 Millionen Tonnen stofflich verwertet, woraus sich eine Recyclingquote von 72 Prozent errechnet [13]. Einschließlich der energetischen Verwertung ergibt sich eine gesamte Verwertungsquote von 79 Prozent. Gegenüber dem Jahr 2008 mit einem Abfallaufkommen von 382,8 Millionen Tonnen ist auch bei diesem Stoffstrom ein Einfluss der wirtschaftlichen Verwerfungen des Jahres 2009 zu vermuten.

Wie beim Rohstoffverbrauch dominieren auch beim Abfallaufkommen mineralische Fraktionen. Die größte Einzelgruppe stellen Bau- und Abbruchabfälle mit 200,5 Millionen Tonnen in 2008 und gut 195 Millionen Tonnen im Jahr 2009 dar. Weiterhin erwähnenswerte mineralische Stoffströme bilden rund 31 Millionen Tonnen feste Rückstände aus Verbrennungsanlagen, darunter knapp 24 Millionen Tonnen aus der Kohleverbrennung und etwa 6 Millionen Tonnen Aschen und Abgasreinigungsrückstände aus der Abfallverbrennung, sowie rund 16 Millionen Tonnen Schlacken aus metallurgischen Prozessen [23, 22, 32]. Letzteren Angaben liegen unterschiedliche Bezugsjahre zu Grunde. Abgesehen von dem durch die Wirtschaftskrise gekennzeichneten Jahr 2009 handelt es sich dabei aber um etwa gleichbleibende jährliche Anfallmengen. Insgesamt stehen also knapp 250 Millionen Tonnen mineralischer Stoffe für eine interne Kreislaufführung zur Verfügung.

Im Vergleich mit den eingesetzten Bau- und Industriemineralien aus primären Quellen fallen in Produktionsprozessen oder in der Abfallwirtschaft also weniger als die Hälfte an potenziellen mineralischen Sekundärrohstoffen an. Davon werden etwa 90 Prozent verwertet und rund 10 Prozent auf Deponien beseitigt [25]. Die Analyse der Verwertungswege zeigt, dass 53 Prozent der Gesamtmenge zur Verfüllung von Abgrabungen und Steinbrüchen, zur Haldenrekultivierung oder zur Verwertung im Deponiebau genutzt werden und folglich nur 37 Prozent in technischen Bauwerken Verwendung finden [25].

Von einer im Rahmen der UGR durchgeführten Abfallgesamtrechnung des Statistischen Bundesamts liegen erste detaillierte Ergebnisse für das Jahr 2006 vor [10]. Innerhalb dieser Berechnungen werden die bergbaulichen Verwendungen im Einklang mit der Europäischen Abfallrahmenrichtlinie nicht als Verwertung angesehen [16]. Stattdessen wird in den UGR ein enger Recyclingbegriff eingeführt, der nur tatsächlich in Produktionsprozesse zurückgeführte Mengen umfasst und als Netto-Recyclingquote auch die in der Aufbereitung entfernten Rest- und Störstoffe nicht zur Anrechnung bringt. Neben der Mineralik, für die in der Abfallgesamtrechnung noch keine Recyclingquoten angegeben sind, werden aus lediglich acht weiteren Stoffgruppen in nennenswertem Umfang Recyclinggüter gewonnen: Eisenschrott, NE-Metalle, Glas, Papier, Altreifen, Kunststoff, Holz und Textilien.

In Tabelle 2 sind die Aufkommensmengen sowie die tatsächlich in Produktionsprozesse zurückgeführten Sekundärrohstoffmengen dargestellt.

Tabelle 2: Sekundärrohstoffeinsatz im Jahr 2006

Sekundärrohstoff	Gesamtaufkommen	Netto-Recyclingquote			
		stoffliche Verwertung		energetische Verwertung	
	Mio. t	Mio. t	%	Mio. t	%
Abfälle insgesamt	372,91	67,12	18	26,10	
mineralische Stoffe*	249,77	k.A.	k.A.	–	–
Eisenschrott	22,37	19,47	87	–	
NE-Metalle	2,54	1,19	47	–	
Papier	14,77	13,44	91	–	
Holz	9,81	1,08	11	6,28	64
Kunststoff	4,36	1,00	23	2,62	60
Glas	2,83	2,47	87	–	–
Textilien	0,93	0,28	30	0,05	5
Altreifen	0,56	0,12	21	0,32	57

* die exakte Bestimmung der Recyclingquote mineralischer Abfälle befindet sich noch in Bearbeitung

Quelle: Statistisches Bundesamt: Umweltnutzung und Wirtschaft. Bericht zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Wiesbaden, 2010

Für das Jahr 2006 weist die Abfallgesamtrechnung eine auf die stoffliche Verwertung bezogene Netto-Recyclingquote von nur 18 Prozent aus [10]. Die Substitutionsquote – also das Verhältnis der wieder in der Produktion einsetzbaren Sekundärrohstoffe zum gesamtwirtschaftlichen Materialeinsatz – lag nach ersten Schätzungen des Statistischen Bundesamtes im Jahr 2006 bei nur 4,1 Prozent [12]. Wird die energetische Verwertung mit einbezogen, liegt der Wert bei 5,1 Prozent. Obwohl die einer anderen Quelle entnommene Annahme einer 37 prozentigen Verwertung mineralischer Abfälle in technischen Bauwerken [25] zu einer etwas höheren Recyclingquote führen würde, machen die Angaben des Statistischen Bundesamtes deutlich, dass trotz aller bisher erreichten Erfolge der Kreislaufwirtschaft die internen Recyclingströme noch erheblich gesteigert werden müssen.

Um die Recyclingaktivitäten auch im internationalen Kontext einzuordnen, wurden in der nachfolgenden Tabelle 3 Recyclingquoten für ausgewählte Metalle aus verschiedenen Literaturquellen zusammengetragen. Die im Bericht einer Ad-hoc Arbeitsgruppe der Europäischen Kommission zur Identifikation kritischer Rohstoffe tabellierten Quoten beziehen sich, soweit nicht anders angegeben, auf den Anteil des Recyclings aus *Post-Consumer*-Abfällen am europäischen Verbrauch [15]. Im Bericht des U.S. Geological Survey [31] 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 (2010) des Rohstoffs in den USA. Für zahlreiche weitere Technologiemetalle oder knappe Industriemineralien werden Recyclingquoten mit sehr geringen Prozentsätzen oder null Prozent angegeben [15, 31].

Table 3: Recyclingquoten verschiedener Stoffe im Vergleich

Stoff		Recyclingquote	Quellen
Aluminium	Al	35 %	European Commission, BMWi
		24 % (Post-Consumer)	USGS
Antimon	Sb	11 %	European Commission
Beryllium	Be	19 %	European Commission
		bis zu 10 % (Pre-Consumer und Post-Consumer)	USGS
Blei	Pb	59 % (Deutschland)	BMWi
Chrom	Cr	13 %	European Commission
		44 % (basiert auf gemeldetem Eingang der Schrottmenge rostfreien Stahls)	USGS 2011
Eisen	Fe	22 %	European Commission 2010
		90 % (Stahl, Deutschland)	BMWi
		87 % (Eisenschrott, netto)	Destatis
Germanium	Ge	0 %	European Commission
		30 % (global, Pre-Consumer und Post-Consumer)	USGS
Indium	In	0,3 %	European Commission
Kobalt	Co	16 %	European Commission
		24 % (Pre-Consumer und Post-Consumer)	USGS
		20 % (global, 2005)	Buchert
		20 – 25 % (Deutschland)	BMWi
Kupfer	Cu	20 %	European Commission
		35 % (Pre-Consumer und Post-Consumer)	USGS
		54 % (Deutschland)	BMWi
Magnesium	Mg	14 %	European Commission
Mangan	Mn	19 %	European Commission
Molybdän	Mo	17 %	European Commission
		bis zu 30 % (Pre-Consumer und Post-Consumer)	USGS
		10 % (Deutschland)	BMWi
Nickel	Ni	32 %	European Commission
		44 % (Pre-Consumer und Post-Consumer)	USGS
Niobium	Nb	11 %	European Commission
		bis zu 20 % (Pre-Consumer und Post-Consumer)	USGS
Platingruppenmetalle	PGM	35 %	European Commission
		45 % (Platin, global)	Buchert
Rhenium	Re	13 %	European Commission
Seltenerdmetalle (z.B. Neodym)	(z.B. Nd)	1 %	European Commission
Silber	Ag	16 %	European Commission
Tantal	Ta	4 %	European Commission

Tabelle 3: Recyclingquoten verschiedener Stoffe im Vergleich – Fortsetzung –

Stoff		Recyclingquote	Quellen
Titan	Ti	6 % (global) Anwendungen der Titan-Mineraler sind dissipativ und nicht recycelbar. Titan-Metalle werden in hohem Maße recycelt.	European Commission
Wolfram	W	37 % (global)	European Commission
		37 %	USGS
Zink	Zn	8 %	European Commission
		41 % (Pre-Consumer)	USGS
Zinn	Sn	37 % (Pre-Consumer und Post-Consumer)	USGS

Quellen:

BMWi – Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Hrsg.): Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Berlin, 2010

Buchert, M.: Recycling, Exportproblematik und Reimportchancen? – Werthaltige Komponenten am Beispiel des Katalysators. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 575-583

Destatis – Statistisches Bundesamt: Umweltnutzung und Wirtschaft. Bericht zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Wiesbaden, 2010

European Commission: Critical raw materials for the EU, Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2010

USGS – U.S. Geological Survey: Mineral commodity summaries 2011. Reston 2011

1.4. Outputströme

1.4.1. Systemverluste

Unter Systemverlusten wird die grenzüberschreitende Ausfuhr rohstoffintensiver Güter verstanden. Die UGR weist den im Jahr 2008 exportierten Erzeugnissen einen Materialeinsatz von 388 Millionen Tonnen zu [10]. Von großer Bedeutung für die nationale Rohstoffversorgung sind auch die ins Ausland verbrachten metallischen Abfälle und Schrotte. So lag die exportierte Menge an Eisen- und Stahlschrott in den Jahren 2006 bis 2008 stets über 9 Millionen Tonnen, in 2009 war eine konjunkturbedingte Abnahme auf 7,7 Millionen Tonnen zu verzeichnen. Auch unter Berücksichtigung der nicht unerheblichen Importe an Eisen- und Stahlschrott waren teilweise Netto-Exporte von mehr als 3 Millionen Tonnen zu verzeichnen [2]. Für Aluminium, Chrom, Mangan, Wolfram, Zink und Zinn werden ebenfalls negative Ausfuhrsalden angegeben, wobei neben den Elementen und Legierungen auch metallhaltige Aschen, Schlacken und Rückstände zu den Rohstoffverlusten beitragen können [2].

Neben den Neuwaren sind exportierte Gebrauchtgüter, die hierzulande aufgrund von Technologiefortschritt aus der Nutzung ausscheiden und unmittelbar durch Neuere ersetzt werden, den Systemverlusten zuzurechnen. Besonders in Schwellenländern, in denen in der Regel geringere technologische und gesetzliche Standards gelten, werden derartige Produkte verstärkt nachgefragt. Technisch überalterte Güter werden zu Großteilen nach Asien, Afrika oder nach Osteuropa überführt. Die Abgrenzung zwischen Warenverkehr und grenzüberschreitender Abfallverbringung und damit die rechtliche Einordnung richtet sich nach der Funktionstüchtigkeit der Güter. In diesem Zusammenhang ist ebenso die

Thematik der illegalen Exporte, beispielsweise von Elektronikschrott aufzugreifen. Aus der stoffstromanalytischen Perspektive betrachtet scheiden die Rohstoffe in beiden Fällen aus dem deutschen Kreislauf aus – die Unterscheidung, ob die Güter einem legalen oder illegalen Export unterliegen, ist hierfür nachrangig.

Als besonders mengenrelevant werden Altfahrzeuge angesehen. Bezüglich des Verbleibs der endgültig stillgelegten PKW in Deutschland im Jahr 2008 wird vermutet, dass in etwa die Hälfte der geschätzten 3,0 Millionen gelöschter PKW in EU-Staaten und weitere 0,24 Millionen in Nicht-EU-Staaten exportiert wurde [29]. Für 0,85 Millionen PKW konnte der weitere Verbleib nicht genau geklärt werden, da es sich hier vermutlich um gestohlene Fahrzeuge, oder nicht statistisch erfasste, teils illegal exportierte Gebrauchtwagen handelt. Die Zahl der gelöschten Personenkraftwagen, die einer geregelten Verwertung zugeführt wurden, belief sich auf lediglich 0,42 Millionen PKW. Daher dürfte die Zahl der exportierten PKW durchaus höher liegen als bisher angenommen. Unter Annahme durchschnittlicher Zusammensetzungen für einen PKW lassen sich die Systemverluste der nicht verwerteten 2,58 Millionen PKW näherungsweise quantifizieren. Die Ergebnisse dieser Abschätzung sind in Tabelle 4 dargelegt.

Tabelle 4: Theoretisches Rohstoffpotenzial der 2008 nicht verwerteten PKW

Material	Golf 4	amerikanischer Durchschnitts-PKW	Potenzial aus 2,58 Millionen PKW	
			Min.	Max.
	kg	kg	t	t
Eisen/Stahl	990	963	2.484.540	2.554.200
Aluminium	64	109	165.120	281.220
Blei	13	11	28.380	33.540
Kupfer	10,1	19	26.058	49.020
Chrom	2,4	7	6.192	18.060
Nickel	1,4	4	3.612	10.320
Magnesium	0,03	2	77	5.160
Titan	0,31	keine Angabe	800	
Zink	keine Angabe	10	25.800	
Mangan	keine Angabe	8	20.640	
Molybdän	keine Angabe	4,5	11.610	
Vanadium	keine Angabe	0,45	1.161	
PGM*	keine Angabe	0,0015 – 0,003	4	8

* PGM: Platingruppenmetalle

Quellen:

National Academics: Committee on Critical Mineral Impacts of the U.S. Economy, Committee on Earth Resources, National Research Council: Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy, Washington D.C., 2008

Schweimer, G. W.; Levin, M.: Sachbilanz des Golf A4. Volkswagen AG, Wolfsburg, 2000

eigene Berechnungen

Die aus Deutschland im Jahr 2008 exportierte Menge an neuen Elektro- und Elektronikgeräten, gebrauchten Geräten und Elektronikaltgeräten nach Afrika und Asien wird auf etwa 155.000 t geschätzt [30]. Dieser vergleichsweise geringe Teil der Systemverluste besteht aber aus sehr unterschiedlichen Gerätearten, die in sich wiederum sehr komplex zusammengesetzt sind. Neben Kunststoffen, Eisen und Kupfer finden sich Edelmetalle

wie Gold, Silber und Palladium bzw. Spezial- und Halbmetalle wie Indium, Selen, Tellur, Tantal, Bismut und Antimon in Elektrogeräten. Vielerorts findet in den Empfängerstaaten kein ordnungsgemäßes Recycling statt [20]. Die Geräte gelangen in abfallwirtschaftliche Strukturen, die weit unterhalb der europäischen Standards liegen [26]. Oft werden in den Schwellenländern die defekten oder ausgedienten Produkte nur mit unzureichenden Standards deponiert – die enthaltenen Rohstoffe stehen somit weder der nationalen Wirtschaft im Endverbleibland noch dem internationalen Kreislauf zur Verfügung. Erforderlich sind deshalb praktikable Konzepte im Sinne einer internationalen Kreislaufwirtschaft, die gezielte Sammel- und Recyclinginfrastrukturen am letzten Nutzungsstandort vorsehen und die Schnittstellen für eine Überführung strategischer Rohstoffe in geeignete großtechnische Anlagen beispielsweise in Westeuropa definieren und organisieren [6]. Gerade hier könnte die Kompetenz und Erfahrung der deutschen Entsorgungswirtschaft im Aufbau solcher Strukturen nutz- und gewinnbringend eingesetzt werden.

1.4.2. Dispersverluste

Im Allgemeinen versteht man unter Dispersverlusten den Verbrauch von Rohstoffen im Rahmen nicht wieder auszugleichender irreversibler Verwendungen bzw. Verluste. Die UGR weisen im Jahr 2008 für den dissipativen Gebrauch von Produkten 256,5 Millionen Tonnen aus, die in der Hauptsache auf organische Dünger fallen [11]. Daneben sind noch mineralische Dünger, Pflanzenschutzmittel, Saatgut und Streusalz in der Statistik aufgeführt [11].

Die in den UGR angegeben dissipativen Verluste umfassen bislang nur den Brems- und Reifenabrieb, der mit 0,1 Millionen Tonnen veranschlagt wird [11]. Zusätzlich wäre an dieser Stelle neben der verfahrens- und anwendungsbedingten Dissipation von Rohstoffen in Form von klassischen Korrosionsvorgängen oder in Folge weiterer chemischer Prozesse die systemimmanente Dissipation durch Feinstverteilung von strategischen Rohstoffen, enthalten in zahlreichen Massen- und Wegwerfprodukten, zu beachten. Beispielsweise sind in vielen, häufig verwendeten elektronischen Bauteilen stets gewisse Konzentrationen an strategischen Metallen oder Mineralien eingebettet (z.B. Spielzeug, USB-Sticks). Trotz verstärkter Bestrebungen wird durch diese zunehmende Verteilung von relevanten Rohstoffen, gerade in miniaturisierten Produkten, ohne ausdifferenzierte Sammelsysteme vor allem in den Restabfallströmen ein steigender Gehalt an wertvollen Inhaltsstoffen deutlich, welcher unwiederbringlich in Deponaten oder in baulich verwerteten Verbrennungsschlacken verloren geht.

Solche Zusammenhänge wurden am Beispiel der Rohstoffe Kupfer, Aluminium und Silber in so genannten RFID-Tags in einem vom Umweltbundesamt geförderten Vorhaben des Instituts für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT) beleuchtet [14]. Während sich diese dissipative Verwendungsform der Elemente im Jahr 2007 noch auf wenige Tonnen beschränkte, könnte die in die Abfallwirtschaft eingetragene Menge unter bestimmten Annahmen bis 2022 auf nahezu 3.000 t ansteigen [14]. Insbesondere für Silber könnte demnach die dissipative Verwendung in RFID-Tags spürbar zur Erhöhung der Verfügbarkeitsrisiken beitragen [14].

1.4.3. Materialverbleib

Unter Einbeziehung von Luftemissionen und den zu Bilanzierungszwecken ausgewiesenen Gasen (insbesondere im Zusammenhang mit Verbrennungsprozessen) wird in den UGR die Differenz aus verwerteten inländischen Entnahmen und der Gütereinfuhr einerseits sowie den ausgeführten bzw. dissipierten Produkten andererseits als Materialverbleib innerhalb der Wirtschaft gewertet. Dies umfasst ausdrücklich auch die auf Deponien verbrachten

Abfälle. Dieser Bilanzierungsweise liegt die berechtigte Annahme zugrunde, dass die Deponate (bis auf Zersetzungsprozesse) dem wirtschaftlichen System prinzipiell erhalten bleiben und somit auch nach langen Zeiträumen wieder nutzbar gemacht werden könnten.

Gemäß diesen UGR belief sich die 2008 an Deponien abgegebene Abfallmenge auf 42 Millionen Tonnen, während der sonstige Materialverbleib (z.B. der Zubau an Gebäuden und Infrastruktur) 637 Millionen Tonnen umfasste [10]. Auch der Input auf Deponien verzeichnete im Jahr 2009 einen Rückgang auf 35,4 Millionen Tonnen [13].

2. Optimierungsansätze

2.1. Herstellerorientierte Ansätze

Bei der Produktion von Gütern kann der Material- und Ressourcenverbrauch durch optimierte Fertigungs- und Herstellungsprozesse verringert werden. Bekannte Beispiele aus diesem Bereich sind Verschnittreduktion und Verschleißreduktion beziehungsweise Standzeiterhöhung. Neben diesen *abfallärmeren* Verfahren kann ebenso eine Steigerung der betriebsinternen und betriebsexternen Verwertung der Abfälle erfolgen [3].

Darüber hinaus stellt das Produkt selbst einen wichtigen Hebel zur Verringerung des absoluten Ressourceneinsatzes dar. Von entscheidender Bedeutung ist es, bereits in den frühen Phasen der Entwicklung und Konstruktion das Produktdesign verstärkt nach ökologischen Aspekten wie Material- und Energieeinsatz auszurichten. Dabei darf der Fokus nicht einseitig auf bestimmte Bereiche – etwa die Fertigung – gelenkt werden. Vielmehr muss der komplette Lebenszyklus mit der Nutzungsphase und der anschließenden *Entsorgung* betrachtet werden. Kriterien wie Langlebigkeit, Reparaturfähigkeit oder der Einsatz erneuerbarer Materialien müssen verstärkt im Produktlastenheft verankert werden. Explizite Ansätze hierzu sind *Design for Recycling* oder der Produktionsintegrierte Umweltschutz (PIUS). Bei letzterem handelt es sich um einen integrierten Maßnahmen- und Methodenkatalog, der die übergeordneten Ziele von niedrigen Energie- und Rohstoffverbräuchen, effizienten Abläufen, aber auch die gezielte Vermeidung von Abfall, Abwasser und sonstigen Emissionen verfolgt.

Im weiteren Verlauf werden nun beispielhaft einige potenzielle Ansätze aufgegriffen. Ein möglicher Weg besteht in der verstärkten Berücksichtigung der Reparaturfähigkeit von Produkten. Dabei müssen das Produkt und dessen Lebenszyklus derart gestaltet werden, dass sich an eine möglichst lange Gebrauchsphase ein Reparaturzyklus anschließt, bei dem die Altgeräte geprüft und defekte Bauteile ersetzt werden. Nach der Funktionsprüfung entspricht das Produkt wieder dem Qualitätsstandard eines Neugerätes. Dieser Schritt kann sowohl vom ursprünglichen Hersteller als auch von spezialisierten Dienstleistungsunternehmen übernommen werden. Derartige Konzepte bedeuten für Unternehmen vor allem Herausforderungen in der Neuorganisation von Logistik und Teilehandling, so beispielsweise bei der Rücknahme oder Einsammlung von Altgeräten. Eine Weiterentwicklung des aufgezeigten Ansatzes stellt das Remanufacturing dar. Dieser Ansatz umfasst die Umkehr des Fabrikationsprozesses, bei dem das Altgerät vollständig zerlegt und aufgearbeitet wird. Anschließend ergibt sich beim erneuten Zusammenbau einerseits die Möglichkeit, sowohl den Qualitäts-, als auch den Funktionsstandard eines neuen Gerätes zu erreichen. Wird eine nochmalige Verwendung ausgeschlossen, können andererseits durch die gezielte Demontage des Altgerätes dessen Komponenten stoffstromspezifisch in den Recyclingkreislauf eingeschleust werden. Durch eine innovationsoffene Konstruktion können bestimmte Produktteile, welche nicht mehr dem Stand der Technik entsprechen,

ausgetauscht werden. Die Schnittstellen für diese Upgrades müssen aber bereits bei der ursprünglichen Konstruktion möglichst gut festgelegt werden. Insbesondere die Bereiche Steuerungstechnik/Elektronik/Software sind häufig Ausgangspunkt von technologischen Weiterentwicklungen. Ein Beispiel hierfür sind Flugzeuge, deren tragende Grundstruktur auf eine sehr lange Nutzungsphase ausgelegt ist, wobei Elektronik, Antriebstechnik, Innenausstattung und andere Funktionseinheiten jederzeit aufgerüstet werden können. Eine komplette Neuanschaffung, welche ebenfalls mit erhöhtem Ressourcenverbrauch einhergeht, kann durch diese innovationsoffene Konstruktion vermieden werden. Im Weiteren können multifunktionale Produkte einen maßgeblichen Beitrag zur Ressourceneffizienz leisten. Ein Beispiel zur Bereitstellung bestimmter Funktionen bei verringertem Ressourceneinsatz ist ein Kombinationsgerät, welches die Druck-, Fax-, Scan- und Kopierfunktion auf einer einzigen Plattform vereint. Ein weiteres multifunktionales Produkt aus dem Bereich der Telekommunikation stellen moderne Smart-Phones dar. Die Geräte bieten dem Nutzer neben der Funktion *Telefonieren* weiteren Zusatznutzen wie Internet, Spiele, Organizer, Medienwiedergabe, Film- und Fotoaufnahme sowie die Möglichkeit zur Nutzung als mobilen Datenspeicher.

Allgemein ist festzuhalten, dass zwar vielfältige herstellerorientierte Ansätze bekannt sind, diese Konzepte und Methoden zukünftig aber stärker verbreitet und umgesetzt werden müssen. Das mit obig genannten Ansätzen verbundene systemische, ganzheitliche Denken muss als Gesamtverständnis in allen Funktionsbereichen der Unternehmen, beginnend bei der Unternehmensleitung über Marketing, Entwicklungsabteilung usw. bis hin zu Produktion und Vertrieb verankert werden.

2.2. Nutzerorientierte Ansätze

Der Produktlebenszyklus vieler Güter (beispielsweise Elektrogeräte mit hohem Gehalt an strategischen Rohstoffen) wird, bedingt durch den raschen technologischen Fortschritt, immer kürzer. Konsumgüter werden in großen Stückzahlen produziert, in Umlauf gebracht und am Ende der Nutzungsphase entsorgt. In industrialisierten Ländern führt dieses Konsumverhalten zu einem stetigen Anstieg der Güterproduktion sowie des damit verbundenen Ressourcenverbrauchs.

Da der komplette Verzicht auf bestimmte Produkte in vielen Bereichen unserer Gesellschaft nur schwer umzusetzen ist, erscheint eine Nutzungsintensivierung als gangbarer Weg zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Dies soll nachfolgend kurz am Beispiel Automobil verdeutlicht werden. Die durchschnittliche PKW-Fahrzeit pro Person und Tag liegt in Deutschland bei rund 43 Minuten. Dabei werden im Mittel in drei Fahrten pro Tag zwischen 30 und 40 Kilometer zurückgelegt [17]. Die Intensität der Güternutzung PKW beträgt während der gesamten Lebensdauer lediglich rund 3 Prozent.

Im Weiteren werden vier nutzerorientierte Ansätze dargestellt, welche durch intelligente Güternutzung die Nachfrage reduzieren und somit Ressourcen einsparen. Das Sharing, also das Teilen von Produkten zur Erhöhung der Nutzungsintensität, wird heute bereits in mehreren Großstädten Europas praktiziert. So können beispielsweise an innerstädtischen Ausleihstationen gegen Gebühr Fahrräder, Motorroller oder PKW als öffentliches und gleichzeitig individuelles Transportmittel ausgeliehen werden. Das Produkt wird vom einzelnen Nutzer so nur während des spezifischen Bedarfszeitraums beansprucht. Durch eine gesteigerte Nachfrage einer Vielzahl von Nutzern verlängern sich die Nutzungsintervalle, die Verwendung der Ressourcen wird somit intensiviert. Auch Leasing Systeme werden heute bereits in vielen Bereichen wie Fahrzeuge oder Industriedrucker praktiziert. Für ein Unternehmen ergibt sich durch ein geleastes Gerät eine Verringerung des

Anlagevermögens. Der Vorteil des Leasings für die Ressourceneffizienz liegt in der veränderten Produktwahrnehmung des Herstellers, der seine Produkte so konstruiert wird, dass sie besonders langlebig bzw. bei Rücknahme einfach zu demontieren und wieder- oder weiterzuverwenden sind. Einen einfachen Ansatz, der wiederum zu einer langen Nutzung eines Produktes beiträgt, ist das Design Zeitloser Klassiker. Dadurch wird beispielsweise ein Möbelstück nicht wegen eines aufkommenden neuen Trends verworfen, obwohl seine Funktion noch vollständig besteht. Ein Beispiel ist der Barcelona Chair von Ludwig Mies van der Rohe aus dem Jahr 1929. Dieses Produkt wird nach wie vor unverändert gebaut und ist heute noch in zahlreichen Banken zu finden. Eine weitere nutzerseitige Möglichkeit bildet die Dematerialisierung (Information vs. Material) ab. Ein Beispiel stellt hier das E-Book dar, auf dem eine Vielzahl von Büchern gespeichert und gelesen werden können. Im Gegensatz zu den Druckausgaben ist der Materialverbrauch für das E-Book völlig unabhängig von Anzahl und Umfang der bereitgestellten Informationen. Eine abschließende Ökobilanzierung, ob das E-Book wirklich effektiv Ressourcen einspart, steht noch aus.

2.3. Ansätze der Abfall- und Recyclingwirtschaft

Die Verwendung recycelter Wirtschaftsgüter ist meist mit erheblich geringeren Umweltbelastungen verbunden als die Herstellung aus natürlichen Rohstoffen. Gleichzeitig wird die in Abfällen enthaltene Energie, die zu mehr als der Hälfte regenerativen Quellen entstammt, in immer effizienteren Anlagen nutzbar gemacht. Vor den Bestrebungen, entstehende Abfälle erneut in die unterschiedlichen Stufen der Wertschöpfungskette zurückzuführen (Recycling), steht gemäß der Abfallhierarchie bereits im Vorfeld die Vermeidung oder Minimierung der Abfallmengen.

Bei der Vermeidung von Rohstoffverlusten sollten die bereits angesprochenen Dispers- und vor allem Systemverluste, die vor der Stufe des Recyclings auftreten, gemindert sowie diese Rohstoffe wieder in den Kreislauf eingeschleust werden. Die Rohstoffkennzeichnung stellt eine Voraussetzung für den Ausbau und die Optimierung der Sammel- und Rückführsysteme dar. 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, Instrumenten und Tools (z.B. *Rohstoffpass*) die strategisch wichtigen und rückgewinnbaren Stoffe zu lokalisieren und systematisch zu bewerten. Im Weiteren kann daraus ein kumuliertes Recyclingpotenzial für verschiedene Produkte oder Produktgruppen abgeleitet werden. Dabei gilt es, Aspekte wie Produktnutzungsdauer, Umlaufmenge und die in den Produkten enthaltenen Rohstoffe in Menge, Qualität und Materialverbund zu quantifizieren. Hierfür sind einfache und vor allem praktikable Konzepte zur Rohstoffidentifikation in der Abfallwirtschaft notwendig. Eine Rohstoffkennzeichnung bei Produkten kann dazu beitragen, die enthaltenen Rohstoffe den jeweils effektivsten Recyclingtechnologien zuzuführen.

Eine weitere Voraussetzung für die Steigerung der Recyclingquoten ist der Aufbau effektiver, innovativer Sammel- und Rückführsysteme. Viele Produkte bestehen aber aus sehr unterschiedlichen, spezifischen Rohstoff- und Materialverbänden. Eine möglichst unmittelbare, direkte Separierung von Abfallströmen vereinfacht die anschließende Aufbereitung und erhöht die Ausbeute der Recyclingverfahren. Für besonders rohstoffsensitive Altprodukte, die gegenwärtig oft im Restmüll landen, besteht enormer Entwicklungsbedarf zur Erhöhung der Sammlung und Zuführung in geeignete Verwertungsstrukturen [19].

Beim Ansatz Rückbau von Infrastruktur und Deponien wird neben dem konventionellen Bergbau der städtische Bergbau, das sogenannte Urban Mining, ebenfalls als Rohstoffquelle

verstanden. Dabei können beispielsweise die nicht mehr genutzte Infrastruktur demontiert und die dabei anfallenden Abbruchmaterialien wiederverwendet werden. Eine umfassende Interpretation des Begriffes Urban Mining sollte darüber hinaus auch das – vielfach bereits etablierte und praktizierte – Recycling der derzeit entstehenden Abfälle im Sinne einer stetigen Nachschub liefernden Rohstoffquelle einbeziehen. In der Entsorgungswirtschaft wird außerdem der Begriff Landfill Mining herangezogen, der die Rückgewinnung von Rohstoffen auf anthropogen geschaffene Ablagerungen konkretisiert. Gemäß der obigen Definition handelt es sich dabei um einen Teilbereich des Urban Mining. Da die hier abgelagerten Rohstoffe den deutschlandweiten Bedarf nur für kurze Zeit decken könnten, kommt der Vermeidung weiterer Ablagerungen sowie der Schließung von Stoffkreisläufen durch Recycling wachsende Bedeutung zu.

Aufwändige Materialverbunde und hybride Bauteilstrukturen mit einer Vielzahl verschiedenster Werkstoffe dominieren das gegenwärtige Produktdesign und erhöhen die Komplexität, Vielfalt und Inhomogenität der nach der Nutzung resultierenden Abfallströme. Die Recyclingwirtschaft muss sich diesen Herausforderungen stellen, um einen möglichst großen Anteil von Rohstoffen im Kreislauf zu führen. Die mengenmäßigen Anteile konventioneller Rohstoffe wie beispielsweise Kupfer sind im Vergleich zu wertvollen Spurenstoffen wie Seltenen Erden in vielen High-Tech-Produkten deutlich höher, sodass die derzeitigen Recyclingverfahren noch vorwiegend auf die Rückgewinnung dieser konventionellen Rohstoffe abzielen. Beispielsweise geht beim Elektroschrott-Recycling Gallium verloren, da eine Galliumgewinnung in der Kupfertechologie derzeit noch nicht möglich ist [21]. Gerade das Recycling von Metallen und Metallverbunden erfordert für jedes einzelne Metall speziell abgestimmte Aufbereitungsverfahren [27]. Für Eisen und Stahl sind diese Verfahren seit Jahrzehnten hoch entwickelt. Bereits im klassischen Oxygenstahlverfahren werden bis zu 25 Prozent Schrott eingesetzt [2]. Daneben existiert mit dem Elektrostahlverfahren, das bis zu 100 Prozent Stahlschrott verwendet, ein etabliertes großtechnisches Recyclingverfahren für diesen Rohstoff [2]. Die hohen Exportmengen von Schrott zeigen allerdings auf, dass die Wiederverwendung zu großen Teilen außerhalb Deutschlands erfolgt.

Vor allem im Bereich von Sonder- und Edelmetallen sowie Seltenen Erden bestehen noch verfahrenstechnische Einschränkungen bei der Rückgewinnung. Richtungweisend ist hier beispielsweise das Unternehmen Umicore, das als weltweit größtes Unternehmen im Bereich des Edelmetallrecyclings durch innovative Aufbereitungsverfahren erste Erfolge im Großmaßstab erzielt. Eine neuartige Recyclinganlage des Unternehmens ermöglicht eine Rückgewinnung und Aufbereitung von 17 unterschiedlichen Metallfraktionen. Gegenwärtig ist diese Anlage hinsichtlich der Flexibilität in Bezug auf verschiedenste Inputströme technologieführend. Mit einem Jahresdurchsatz von 350.000 t Input produziert Umicore die Sekundärrohstoffe Blei, Kupfer, Nickel, Zinn, Antimon, Silber, Gold, Platin, Palladium, Rhodium, Bismut, Indium, Tellur und Selen [5]. Weltweit verfügen derzeit jedoch lediglich 5 bis 10 Anlagen – vorwiegend in Europa und Japan – über die technologischen Voraussetzungen, um aus unterschiedlichen Pre- und Post-Consumer-Abfällen derartige strategische Rohstoffe rückzugewinnen. Für die Rückgewinnung von Rohstoffen wie Tantal, Lithium, Gallium oder Germanium sind außer einigen Pilotanlagen bisher noch keine kommerziellen Anlagen bekannt [15].

2.4. Politisch-ökonomische Ansätze

Ergänzend zu den oben beschriebenen Ansätzen wird derzeit vermehrt über den Nutzen verschiedener politisch-ökonomischer Lenkungsinstrumente diskutiert. Fraglich ist, ob die Mechanismen des freien Marktes allein ein nachhaltiges Wirtschaften mit natürlichen

Ressourcen in ausreichender Weise sicherstellen können. Ein denkbares wirtschaftspolitisches Instrument stellt die Besteuerung von Rohstoffen dar. Dadurch würde der Materialeinsatz oder der Konsum ressourcenintensiver Produkte verteuert, was insgesamt einen sparsameren und effizienteren Einsatz von Rohstoffen zur Folge hätte. Auch innerhalb der Europäischen Kommission wird bereits über eine Steuer auf abiotische, nicht-energetische Rohstoffe diskutiert. Um ein wirkungsvolles Instrument zu schaffen, ist allerdings eine Differenzierung der Rohstoffe nach verschiedenen Kriterien wie beispielsweise der jährlichen Fördermenge, den Nutzungsmengen, der Kritikalität und den Umweltauswirkungen von Abbau und Verbrauch unbedingt notwendig. Mögliche Einnahmen könnten dann in Effizienzfonds fließen und in eine effiziente Nutzung von Rohstoffen, wie der Entwicklung und Finanzierung von Recyclinganlagen oder zur Sensibilisierung von Verbrauchern und Herstellern, investiert werden. Darüber hinaus könnte auch die Zertifizierung von Rohstoffen ein sinnvolles Mittel zum nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen darstellen. Ein Zertifizierungssystem bietet die Möglichkeit, sowohl die Gewinnung des Rohstoffs, als auch den nachfolgenden Einsatz über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg zu beurteilen und zu kennzeichnen. Darüber hinaus kann mit Hilfe von Zertifikaten ein Hinweis auf die ökologischen und sozialen Standards sowie die Arbeitsbedingungen in den Abbauländern gegeben werden. Ähnlich der Rohstoffbesteuerung muss die Zertifizierung für verschiedene Rohstoffe differenziert erfolgen. Auch die Festschreibung von Produktionsstandards für bestimmte Güter kann den Einsatz von Rohstoffen einschränken und optimieren. Hierunter wird die Verantwortlichkeit eines Produzenten, Herstellers oder Vertreibers für den Lebenszyklus eines Produktes, angefangen von der Entwicklung bis zur Entsorgung, verstanden. In Deutschland gehen die ersten Ansätze auf die Verpackungsverordnung Anfang der Neunziger Jahre zurück.

Derzeit werden viele der politisch-ökonomischen Ansätze aus dem Bereich der Rohstoffpolitik vorrangig im Lichte von Umweltschutz und Ressourcenschonung diskutiert. Um diesen Zwecken nachhaltig dienen zu können, sind in jedem Falle Regelungen, die für möglichst große Wirtschaftsräume – über nationale Grenzen hinweg – Gültigkeit besitzen, erstrebenswert.

3. Fazit und Ausblick

Unsere hoch industrialisierte Volkswirtschaft ist derzeit noch auf den Input natürlicher Rohstoffe in erheblichen Mengen angewiesen. Die pro Jahr verwerteten Rohstoffe summieren sich auf fast 1,7 Milliarden Tonnen, wobei die Mineralien mit gut 600 Millionen Tonnen und die Energieträger mit gut 500 Millionen Tonnen dominieren [10, 11]. Die benötigten Metallerze, die nahezu vollständig importiert werden, belaufen sich auf rund 50 Millionen Tonnen [11]. In monetären Einheiten gemessen stehen die Metallerze mit über einem Viertel der Importausgaben für nicht verarbeitete Rohstoffe gleich nach den Energieträgern, auf die rund 70 Prozent der Ausgaben entfallen, an zweiter Stelle [2]. Dies belegt die hohe wirtschaftliche Bedeutung von Metallen, wobei zusätzlich noch über 80 Millionen Tonnen an metallischen Halb- und Fertigwaren eingeführt werden [11].

Aus ökologischer Sicht ist bedeutend, dass den verwerteten Rohstoffentnahmen noch über 2,2 Milliarden Tonnen an nicht verwerteten Rohstoffentnahmen in Inland gegenüberstehen [10]. Darüber hinaus ist der Rohstoffimport mit weiteren, in den Statistiken bisher nicht erfassten, Materialbewegungen im Ausland in der Größenordnung von 2,5 Milliarden Tonnen verbunden [12]. Unter Berücksichtigung dieser Gegebenheiten in Form so

genannter Rohstoffäquivalente würde sich die bisherige Steigerung der Rohstoffproduktivität deutlich relativieren, weshalb eine Neubewertung dieses Effizienzindicators diskutiert wird [12].

Die Mengen industrieller Kreislaufströme werden ebenfalls von mineralischen Fraktionen dominiert. Deren Quantifizierung ist eng mit den Verwertungs- und Recyclingdefinitionen verknüpft. Strenge Maßstäbe bringen hier bergbauliche Verwertungen, Verfüllungen und dergleichen nicht zur Anrechnung. Die Gesamtmenge an Bau- und Abbruchabfällen, Bergematerial aus dem Bergbau, Verbrennungsrückständen und metallurgischen Schlacken dürfte zwischen 200 und 250 Millionen Tonnen liegen [25, 23, 13]. Bislang werden 37 Prozent der mineralischen Abfälle hochwertigen Verwendungen in technischen Bauwerken zugeführt [25].

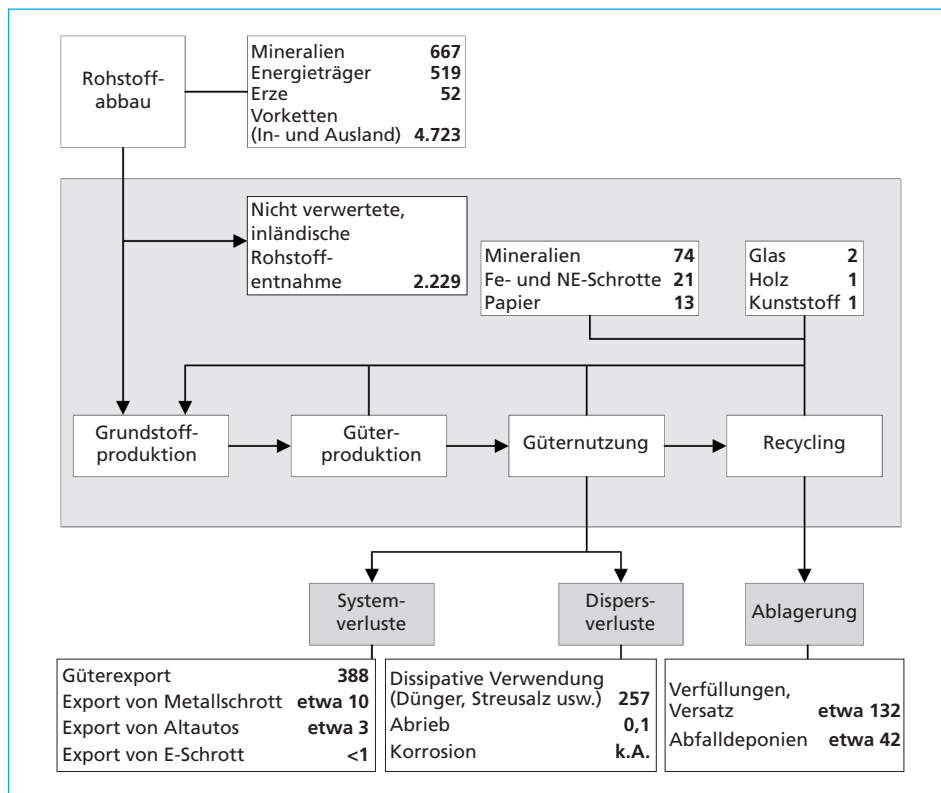


Bild 4: Ausgewählte Stoffströme in der derzeitigen Wertschöpfungskette in Millionen Tonnen pro Jahr (Bilanzausgleich v.a. durch Systemverbleib und Verbrennungsabgase)

Quellen:

Prognos AG: BMVBS-Forschungsvorhaben Berücksichtigung der Geringfügigkeitsschwellenwerte bei der Rechtssetzung und ihre Auswirkungen auf das Bauwesen. Endbericht, Ecowin GmbH, Berlin, 2010

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien. Heft XXXIX: Bundesrepublik Deutschland – Rohstoffsituation 2009, Hannover, 2010

Statistisches Bundesamt: Umweltnutzung und Wirtschaft. Bericht zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Wiesbaden, 2010

Statistisches Bundesamt: Umweltnutzung und Wirtschaft, Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Teil 1: Gesamtwirtschaftliche Übersichtstabellen, Wirtschaftliche Bezugswerte. Wiesbaden, 2010

Statistisches Bundesamt: Rohstoffeffizienz: Wirtschaft entlasten, Umwelt schonen. Ergebnisse der Umweltökonomischen Gesamtrechnung 2010. Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 17. November 2010 in Berlin, Wiesbaden, 2010

eigene Berechnungen

Die strengen Recyclingmaßstäbe berücksichtigen auch bei nicht mineralischen Sekundärrohstoffen nur die tatsächlich in die industrielle Produktion zurückgeführten Mengen, bringen also aussortierte Rest- und Störstoffe nicht zur Anrechnung. Die maßgebliche Fraktion bilden darunter knapp 20 Millionen Tonnen Eisen- und Stahlschrott [10]. Neben Fe-Schrotten und einigen NE-Metallen gelangen derzeit mit Glas, Papier, Altreifen, Kunststoff, Holz und Textilien nur sechs weitere Abfallgruppen in merkbarem Maße ins Recycling. Bezogen auf den gesamtwirtschaftlichen Materialeinsatz wird die stoffliche Recyclingquote, also ohne Berücksichtigung der energetischen Verwertung, mit nur 4,1 Prozent angegeben [12]. Vor allem bei den Technologiemetallen sind noch erhebliche Anstrengungen nötig, um Kennzeichnungs- und Erfassungssysteme sowie stoffspezifische Verwertungstechnologien zu etablieren.

Den Output der industriellen Wertschöpfungskette bilden die ins Ausland verbrachten Güter oder die nicht rückholbar an die Umwelt abgegebenen Materialien. Aus stofflicher Sicht können die Transporte ins Ausland als Systemverluste bezeichnet werden, wobei in einer exportorientierten Volkswirtschaft in erster Linie natürlich administrativ ungewollte Verbringungen als Verluste zu werten sind. Bemerkenswerte Rohstoffeinbußen sind in erster Linie mit dem Export von Altmetallen, Altfahrzeugen und Elektrogeräten verbunden. Die Abgaben an die Umwelt beinhalten in erster Linie die dissipative Verwendung von Gütern wie Düngemittel und Streusalz, schließen aber nicht gewollte Dissipationsverluste durch Korrosion, Abrieb oder ähnliches ebenso ein. In dieser Hinsicht sind auch komplex zusammengesetzte Produkte, welche das Recycling erschweren, oder bestimmte Kennzeichnungssysteme wie RFID-Tags nachteilig.

In Bild 4 werden einige wesentliche Stoffströme innerhalb des industriellen Gesamtsystems quantifiziert, wobei sich die Mengenangaben auf unterschiedliche Jahre beziehen und deshalb nur als Anhaltswerte zu verstehen sind.

Die Transformation in eine nachhaltige Industriegesellschaft erfordert also neben der vielzitierten Energiewende ein Umdenken auch für die Metall- und Mineralströme. Die zukünftigen Wertschöpfungsketten könnte man sich idealisiert als geschlossene Kreisläufe vorstellen, die Stoffströme im Rahmen des physikalisch möglichen zirkulieren (Bild 5). Dieses Modell beruht auf verschiedenen Maßnahmen innerhalb der einzelnen Stufen der Wertschöpfungsketten. Ziel ist es, den kumulativen Ressourcenaufwand während des gesamten Lebenszyklus eines Produktes zu erhalten und erneut nutzbar zu machen.

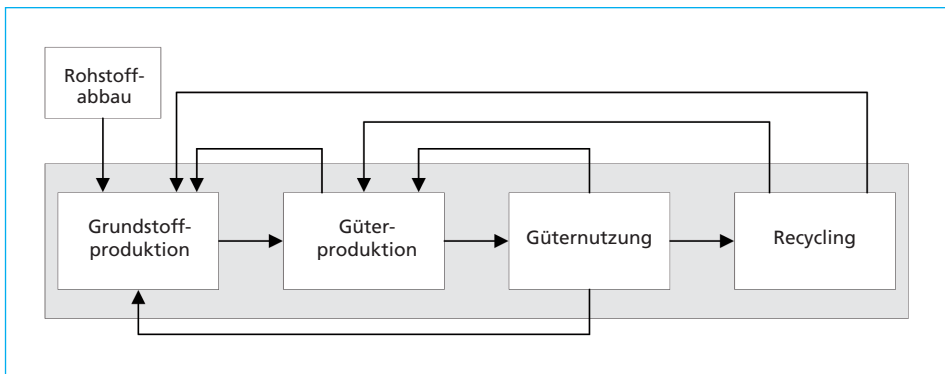


Bild 5: Ressourceneffiziente Wertschöpfungskette für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft

Dabei kann eine Steigerung der Rohstoff- und Materialeffizienz prinzipiell auf allen Stufen der Wertschöpfungskette erfolgen. Da die konventionellen Maßnahmen zur Begegnung von Rohstoffknappheiten bisher zu kurz gegriffen haben, müssen über eine ganzheitliche Betrachtung von Wertschöpfungsketten Ansätze sowohl bei Herstellung und Design eines Produktes, als auch in der Nutzungsphase und der anschließenden Verwertung greifen, um Verluste in den einzelnen Stufen zu vermeiden. Urban Mining kann im Sinne eines Rückbaus von Infrastruktur zur Kreislaufführung von Stoffen beitragen, wenn Materialien nicht nur dem Downcycling unterworfen werden. Landfill Mining ist letztendlich nur als Übergangslösung zu sehen, da diese Art der Rohstoffquelle ebenso erschöpflich ist wie der konventionelle Bergbau. Recycling – als insgesamt am weitesten ausgebauter Ansatz – weist immer noch Defizite auf. Als letzte Stufe von Wertschöpfungsketten muss die Abfallwirtschaft zu einer modernen Stoffstromwirtschaft umgestaltet werden. Wirtschaftspolitische Maßnahmen können diese Prozesse anstoßen, begleiten und fördern.

4. Literatur

- [1] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V.: Pressedienst AG Energiebilanzen Nr. 01/2001. Berlin/Köln, 2011
- [2] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien. Heft XXXIX: Bundesrepublik Deutschland – Rohstoffsituation 2009, Hannover, 2010
- [3] Bilitewski, B.; Härdtle, G.; Marek, K.: Abfallwirtschaft – Handbuch für Praxis und Lehre. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag, 2000
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) (Hrsg.): Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Berlin, 2010
- [5] Buchert, M.; Schüler, D.; Bleher, D.: Critical metals for future sustainable technologies and their recycling potential. Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies, Öko-Institut e.V. im Auftrag des United Nations Environment Programme (UNEP), Paris, 2009
- [6] Buchert, M.: Recycling, Exportproblematik und Reimportchancen? – Werthaltige Komponenten am Beispiel des Katalysators. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 575-583
- [7] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: Perspektiven für Deutschland, Unsere Strategie für eine nachhaltige Entwicklung. Berlin, 2002
- [8] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung: Fortschrittsbericht 2008 zur nationalen Nachhaltigkeitsstrategie, Für ein nachhaltiges Deutschland. Berlin, 2008
- [9] Buyny, S.; Lauber, U.: Berechnung der Importe und Exporte in Rohstoffäquivalenten – Weiterentwicklung des Indikators Rohstoffproduktivität der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie. In: Wirtschaft und Statistik (2009), Nr. 11, S. 1133-1145
- [10] Statistisches Bundesamt: Umweltnutzung und Wirtschaft. Bericht zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Wiesbaden, 2010
- [11] Statistisches Bundesamt: Umweltnutzung und Wirtschaft, Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Teil 1: Gesamtwirtschaftliche Übersichtstabellen, Wirtschaftliche Bezugswerte. Wiesbaden, 2010
- [12] Statistisches Bundesamt: Rohstoffeffizienz: Wirtschaft entlasten, Umwelt schonen. Ergebnisse der Umweltökonomischen Gesamtrechnung 2010. Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 17. November 2010 in Berlin, Wiesbaden, 2010

- [13] Statistisches Bundesamt: Umwelt, Abfallbilanz 2009. Wiesbaden, 2011
- [14] Erdmann, L.; Hilty, L.: Einfluss von RFID-Tags auf die Abfallentsorgung, Prognose möglicher Auswirkungen eines massenhaften Einsatzes von RFID-Tags im Konsumgüterbereich auf die Umwelt und die Abfallentsorgung. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2009
- [15] European Commission: Critical raw materials for the EU, Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2010
- [16] Europäische Union: 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
- [17] European Statistical Data Support: Mobilität im Personenverkehr in Europa – Die Europäer verbringen die meiste Fahrzeit im Auto. Statistik kurz gefasst – Verkehr – 87/2007, http://www.eds-destatis.de/de/downloads/sif/sf_07_087.pdf
- [18] Faulstich, M.; Leipprand, A.; Mocker, M.: Strategieelemente zur Steigerung der Ressourceneffizienz. In: KfW Bankengruppe (Hrsg.): Perspektive Zukunftsfähigkeit – Steigerung der Rohstoff- und Materialeffizienz. Frankfurt am Main, 2009, S. 9-32
- [19] Goldmann, D.: Perspektiven des Recyclings. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 3. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2010, S. 3-20
- [20] Janz, A.; Prelle, R.; Müller, F.; Bilitewski, B.: Grenzüberschreitende Ströme von Elektroaltgeräten. In: Müll und Abfall (2009), Nr. 03, S. 126-132
- [21] Kammer, U.: Recycling von seltenen Metallen und deren Verbindungen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 2. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2009, S. 647-655
- [22] Merkel, T.: Nutzung von Eisenhüttenschlacken. In: Thomé-Kozmiensky, K., Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band. 4. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011, S. 355-368
- [23] Mocker, M.; Stenzel, F.: Wertstoffrückgewinnung aus Schlacken und Aschen. In: Wasser und Abfall (2010), Nr. 04, S. 15-19
- [24] National Academics: Committee on Critical Mineral Impacts of the U.S. Economy, Committee on Earth Resources, National Research Council: Minerals, Critical Minerals, and the U.S. Economy, Washington D.C., 2008
- [25] Prognos AG: BMVBS-Forschungsvorhaben Berücksichtigung der Geringfügigkeitsschwellenwerte bei der Rechtssetzung und ihre Auswirkungen auf das Bauwesen. Endbericht, Ecowin GmbH, Berlin, 2010
- [26] Sander, K.; Schilling, S.: Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten/Elektroschrott. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2010
- [27] Scholz, R.: Thermische Verfahren für das Recycling von Metallen. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 2, TK-Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin 2009, S. 291-308
- [28] Schweimer, G. W.; Levin, M.: Sachbilanz des Golf A4. Volkswagen AG, Wolfsburg, 2000
- [29] Umweltbundesamt: Altfahrzeug-Verwertungsquoten in Deutschland im Jahre 2008 gemäß Art. 7 Abs. 2 der Altfahrzeug-Richtlinie 2000/53/EG. Dessau-Roßlau, 2010
- [30] Umweltbundesamt: Export von Elektroaltgeräten – Fakten und Maßnahmen. Dessau-Roßlau, 2010
- [31] U.S. Geological Survey: Mineral commodity summaries 2011. Reston 2011
- [32] VGB Power Tech e. V.: Erzeugung und Verwendung von Nebenprodukten aus kohlebefeuerter Kraftwerken in Deutschland im Jahr 2008, <http://www.vgb.org/NAV.html>, Zugriff am 26. August 2011

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Schlacken aus der Metallurgie – Rohstoffpotential und Recycling –

Karl J. Thomé-Kozmiensky, Andrea Versteyl.

– Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011

ISBN 978-3-935317-71-9

ISBN 978-3-935317-71-9 TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky

Copyright: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky

Alle Rechte vorbehalten

Verlag: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky • Neuruppin 2011

Redaktion und Lektorat: Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h. c. Karl J. Thomé-Kozmiensky

Erfassung und Layout: Nicole Bäker, Janin Burbott, Petra Dittmann, Sandra Peters

Druck: Mediengruppe Universal Grafische Betriebe München GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.