

TEXTE

14/2012

Ermittlung des Beitrages der Abfallwirtschaft zur Steigerung der Ressour- cenproduktivität sowie des Anteils des Recyclings an der Wertschöpfung

unter Darstellung der Verwertungs- und Beseitigungs-
pfade des ressourcenrelevanten Abfallaufkommens

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 3709 33 316
UBA-FB 001608

**Ermittlung des Beitrages der Abfallwirtschaft
zur Steigerung der Ressourcenproduktivität
sowie des Anteils des Recyclings an der
Wertschöpfung unter Darstellung der
Verwertungs- und Beseitigungspfade des
ressourcenrelevanten Abfallaufkommens**

von

Jörg Wagner, Kerstin Heidrich, Janett Baumann,
Thomas Kügler, Jan Reichenbach
INTECUS GmbH, Dresden

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

UMWELTBUNDESAMT

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.uba.de/uba-info-medien/4275.html>
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:	INTECUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management Pohlandstraße 17 01309 Dresden
Abschlussdatum:	Oktober 2011
Herausgeber:	Umweltbundesamt Wörlitzer Platz 1 06844 Dessau-Roßlau Tel.: 0340/2103-0 Telefax: 0340/2103 2285 E-Mail: info@umweltbundesamt.de Internet: http://www.umweltbundesamt.de http://fuer-mensch-und-umwelt.de/
Redaktion:	Fachgebiet III 2.2 Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie Felix Müller

Dessau-Roßlau, Mai 2012

Berichts-Kennblatt

1. Berichtsnummer UBA-FB 001608	2.	3.
4. Titel des Berichts Ermittlung des Beitrages der Abfallwirtschaft zur Steigerung der Ressourcenproduktivität sowie des Anteils des Recyclings an der Wertschöpfung unter Darstellung der Verwertungs- und Beseitigungspfade des ressourcenrelevanten Abfallaufkommens		
5. Autor(en), Name(n), Vorname(n) Wagner, Jörg; Heidrich, Kerstin; Baumann, Janett; Kügler, Thomas; Reichenbach, Jan	8. Abschlussdatum Oktober 2011	
6. Durchführende Institution (Name, Anschrift) INTECUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management Pohlandstraße 17 01309 Dresden	9. Veröffentlichungsdatum Mai 2012	
	10. UFOPLAN-Nr. 3709 33 316	
	11. Seitenzahl 174	
7. Fördernde Institution (Name, Anschrift) Umweltbundesamt, Postfach 14 06, 06813 Dessau-Roßlau	12. Literaturangaben 139	
	13. Tabellen und Diagramme 80	
	14. Abbildungen 53	
15. Zusätzliche Angaben		
16. Kurzfassung Der Grad der Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe ist im Rohstoffproduktivitätsindikator der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie nicht explizit abgebildet. Um die Effekte der Substitution von Primärrohstoffen einzubeziehen, sollen Sekundärrohstoffe als eigene Kategorie ergänzend betrachtet werden. Die vorliegende Studie entwickelt eine reproduzier- und fortschreibbare Darstellung der Materialströme verwertbarer Abfälle und beschreibt auf dieser Grundlage den Beitrag der Abfallwirtschaft zur Ressourcenproduktivität. Mit niedriger Detailtiefe wurden die Materialströme der Metall-, Kunststoff-, Bau- und Abbruchabfälle sowie der biologisch abbaubaren Abfälle auf Basis der deutschen Abfallstatistik dargestellt. Anhand vertiefender Untersuchungen wurden die Materialströme von Eisen und Stahl, Kupfer, Gold, Polyethylen (HD-/LDPE), Polyethylenterephthalat (PET) und Polyvinylchlorid (PVC) in größerer Detailtiefe dargestellt. Mittels der auf diesem Wege ermittelten Abfall- bzw. Sekundärrohstoffmengen erfolgte durch einen Vergleich mit substituierten Primärrohstoffen die Quantifizierung von rohstofflichen, energetischen und ökonomischen Einsparungen durch das Recycling. Ohne die Vorkette im Ausland wurden diese rohstofflichen und energetischen Substitutionen mit der Inanspruchnahme von Primärmaterialien der dt. Volkswirtschaft in Beziehung gesetzt und so die Kenngröße DERec (Direct Effect of Recovery) ermittelt. Der Gesamt-DERec, bestimmt über alle hier betrachteten Materialströme, beträgt 49,525 Mio. Mg, die ohne das Recycling und die energetische Verwertung zur Erzeugung der substituierten Rohstoffe und Energieträger zusätzlich aufgebracht werden müssten und zu einer erheblichen Steigerung des Materialinputs in die Volkswirtschaft führen würden. Bereits diese Teilmenge entspricht 3,7 % des DMI (Direct Material Input), der sich im Jahr 2007 auf eine Gesamtmenge von 1,35 Mrd. Mg der inländischen Entnahme und Einfuhr abiotischer Rohstoffe belaufen hat. Dies unterstreicht die Bedeutung der Sekundärrohstoffwirtschaft für die Ressourcenschonungsziele der Bundesrepublik.		
17. Schlagwörter Rohstoffproduktivität, DMI, DERec, Ressourcenproduktivität, Wertschöpfung, Recycling, Abfallwirtschaft, Materialströme, Eisen und Stahl, Kupfer, Gold, HDPE, LDPE, PET, PVC, Kreislaufwirtschaft, Abfallverwertung, Sekundärrohstoff, Primärrohstoff, Primärenergieträger, Substitution		
18. Preis	19.	20.

Report Cover Sheet

1. Report No. UBA-FB 001608	2.	3.
4. Report Title Determination of the contributions of the waste management sector to increasing resource productivity and of the share recycling takes in the value-added chain displaying the paths of recovery of relevant waste		
5. Autor(s), Family Name(s), First Name(s) Wagner, Jörg; Heidrich, Kerstin; Baumann, Janett; Kügler, Thomas; Reichenbach, Jan		8. Report Date October 2011
6. Performing Organisation (Name, Address) INTECUS GmbH Waste Management and Environment-integrating Management Pohlandstrasse 17 01309 Dresden/Germany		9. Publication Date May 2012
		10. UFOPLAN-Ref. No. 3709 33 316
		11. No. of Pages 174
7. Sponsoring Agency (Name, Address) Federal Environment Agency P.O. Box 14 06, 06813 Dessau-Roßlau/Germany		12. No. of Reference 139
		13. No. of Tables, Diagrams 80
		14. No. of Figures 53
15. Supplementary Notes		
16. Abstract The degree of substitution of primary raw materials by secondary raw materials cannot explicitly be seen in the resource productivity indicator of the national sustainability strategy. To incorporate the effects of substitution of primary raw materials, secondary raw materials should be considered in addition as a separate category. In the present study a reproducible and continuously adaptable presentation of material flows of recyclable wastes has been developed and the contributions of the waste management sector to resource productivity have been described on that basis. The material flows of metal, plastics, construction and demolition waste as well as for the biodegradable waste were mapped at a low level of detail using German waste statistics. With the help of in-depth studies the material flows of iron and steel, copper, gold, polyethylene (HD-/LDPE), polyethylene terephthalate (PET) and polyvinyl chloride (PVC) could be displayed in more detail. The amounts of waste and secondary raw materials determined in this way led to a quantification of the feedstock, energy and economic savings from recycling by means of a comparison with the primary commodities substituted. Without considering preceding steps of processing and production abroad the raw material and energetic substitution was set into relation with the consumption of primary materials by the German economy to establish the so-called DERec parameter (Direct Effect of Recovery). The total DERec, determined for all material flows considered in the study amounts to 49.525 million tons, which, in the absence of recycling and energy recovery, would additionally be necessary to generate the substituted raw materials and energy. This would mean a significant increase in material inputs to the economy. Only this amount already corresponds to 3.7% of DMI (Direct Material Input), which in 2007 made up a total of 1.35 billion tons of domestic and imported abiotic resources. This underlines the importance of secondary raw materials management for the resource conservation goals of the Federal Republic of Germany.		
17. Keywords resource productivity, Direct Material Input, DMI, Direct Effect of Recovery, DERec, value added, material flows, iron and steel, copper, gold, HDPE, LDPE, PET, PVC, recycling, raw materials, secondary products, primary commodities, primary energy sources, substitution, waste management, circular economy		
18. Price	19.	20.

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis	I
II.	Abbildungsverzeichnis	III
III.	Tabellenverzeichnis	V
IV.	Abkürzungen	IX
V.	Zusammenfassung	XI
VI.	Abstract	XXVII
1	Einleitung und Zielsetzung	1
2	Untersuchungsmethodik	2
3	Materialstrombilanzen	3
3.1	Metalle in der Abfallwirtschaft	3
3.2	Kunststoffe in der Abfallwirtschaft	7
3.3	Bau- und Abbruchabfälle in der Abfallwirtschaft	10
3.4	Biologisch abbaubare Abfälle in der Abfallwirtschaft	15
3.4.1	Küchen- und Gartenabfall in der Abfallwirtschaft	17
3.4.2	Altholz in der Abfallwirtschaft	18
3.4.3	Altpapier in der Abfallwirtschaft	21
3.4.4	Klärschlamm	23
4	Auswahl detaillierter Materialströme	25
4.1	Materialströme der Metalle	25
4.2	Materialströme der Kunststoffe	29
5	Detaillierte Materialstrombilanzen	32
5.1	Eisen und Stahl	32
5.2	Kupfer	37
5.3	Gold	59
5.4	Thermoplastische Kunststoffe am Beispiel von HD-/LDPE, PET und PVC	64
6	Effekte der Abfallverwertung	75
6.1	Methodik zur Bestimmung der Effekte des Recyclings	75
6.1.1	Verwertungswege, substituierte Rohstoffe und Substitutionsfaktoren durch die Verwertung der betrachteten Metalle und Kunststoffe	75
6.1.2	Methodik zur Bestimmung der rohstofflichen und energetischen Substitutionswirkungen	76
6.1.3	Methodik zur Bemessung der wirtschaftlichen Bedeutung des Recyclings	78
6.1.4	Methodik zur Wichtung der Effekte des Recyclings hinsichtlich der Ressourcenproduktivität	78
6.2	Rohstoffliche und energetische Substitutionswirkungen	79
6.2.1	Verwertung von Eisen und Stahl	79
6.2.2	Verwertung von Kupfer	83

6.2.3	Verwertung von Gold.....	86
6.2.4	Verwertung von thermoplastischen Kunststoffen am Beispiel von HD-/LDPE, PET und PVC	87
6.3	Wirtschaftliche Bedeutung von Recycling.....	102
6.3.1	Bruttokosteneffekte der Verwertung von Eisen und Stahl.....	102
6.3.2	Bruttokosteneffekte der Verwertung von Kupfer	104
6.3.3	Bruttokosteneffekte der Verwertung von Gold	106
6.3.4	Bruttokosteneffekte der Verwertung von thermoplastischen Kunststoffen am Beispiel von HD-/LDPE, PET und PVC.....	107
6.4	Materielle Effekte der Abfallwirtschaft hinsichtlich der Ressourcenproduktivität.....	118
6.4.1	Zusammenfassende Darstellung der Recyclingeffekte in Bezug auf die betrachteten Materialströme	118
6.4.2	Metalle	119
6.4.3	Kunststoffe	120
6.4.4	Zusammenfassende Darstellung des direkten Effekts des Recyclings (DERec) auf den DMI	126
7	Zusammenfassung	128
8	Ausblick	131
9	Defizite der Datengrundlage	133
9.1	Eisen und Stahl.....	133
9.2	Kupfer	133
9.3	Gold	134
9.4	Thermoplastische Kunststoffe HD-/LDPE, PET und PVC.....	135
	Quellenverzeichnis	137
	Anlage 1: Spezifische Gehalte der einzelnen Abfallarten an den zu betrachtenden Materialströmen	145
	Anlage 2: Spezifischer Rohstoffbedarf durch Primärenergieträger	169
	Quellenverzeichnis der Anlagen	172

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verwertete Kunststoffabfälle (Post-Consumer- und Produktionsabfälle)	XV
Abbildung 2: Verwertungswege der Kunststoffabfälle	XVI
Abbildung 3: Materialstrom Metalle 2007 (nach [1])	4
Abbildung 4: Materialstrom Metalle 2007 ohne geogen bedingte Hintergrundgehalte (nach [1])	5
Abbildung 5: Materialstrom Kunststoffe 2007 (nach [1])	9
Abbildung 6: Materialstrom Kunststoffe in der Abfallwirtschaft 2007 (nach [5])	10
Abbildung 7: Materialstrom Bauabfälle 2006 (nach [7])	12
Abbildung 8: Materialstrom Bauabfälle 2006 ohne Bodenaushub (nach [7])	13
Abbildung 9: Materialstrom biologisch abbaubare Abfälle 2007	17
Abbildung 10: Altholz 2007 – Materialstrom-Modell – Flussdiagramm (in Mio. Mg _{lutro})	20
Abbildung 11: Mengenfließbild für Papier und Altpapier in Deutschland 2007 [10]	22
Abbildung 12: Materialstrom Klärschlamm 2008	24
Abbildung 13: Stahlverbrauch nach Branchen - 2005 [118]	32
Abbildung 14: Inlandslieferungen der Werke an Stahl nach Abnehmergruppen [119]	33
Abbildung 15: Auftragseingang ausgewählter stahlverarbeitender Branchen in Deutschland [120]	33
Abbildung 16: Rohstahlherstellung in Deutschland 2007 [116]	34
Abbildung 17: Materialstrom Eisen und Stahl für das Jahr 2007	36
Abbildung 18: Im- und Exportmengen an Kupfersekundärrohstoffen in Deutschland [3, verschiedene Jahre]	38
Abbildung 19: Im- und Export von Kupferrohstoffen und -halbzeugen 2007 [3, 22]	38
Abbildung 20: Verteilung der Exporte nach Elektrogerätearten (Gliederung nach finanziellem Warenwert - Warenanmeldung 2008) [28]	40
Abbildung 21: Aufteilung der Kupfermengen aus den Gießereien und der Halbzeugfertigung nach Branchen [3, 22]	41
Abbildung 22: Aufteilung der Abfallmengen der AVV 170411 auf die Behandlungsverfahren (Input und Output)	44
Abbildung 23: Verbleib der 2006 in Deutschland gelöschten Pkw [47] Sonstige: hauptsächlich sonstige Exporte, Diebstahl, Nutzung auf nicht öffentlichem Gelände, Exportmengen in EU-Staaten aus dem Jahr 2007	46
Abbildung 24: Stoffstrom Altfahrzeugverwertung [48]	47
Abbildung 25: Kupferbilanz über das Recycling von Elektro- und Elektronikaltgeräten [52] ..	52
Abbildung 26: Aufteilung der Abfallmengen der AVV 170401 (Kupfer/Bronze/Messing im Bauabfall) auf entsprechende Behandlungsverfahren (Input und Output)	55
Abbildung 27: Materialstrom Kupfer für das Jahr 2007	58
Abbildung 28: Rohstoffe und Materialien zur Gewinnung/Rückgewinnung der Edelmetalle [66]	61
Abbildung 29: Vereinfachte Goldbilanz der Bundesrepublik	63
Abbildung 30: Anwendungsgebiete der Kunststoffe HD-/LDPE, PVC und PET [5]	64

Abbildung 31: PE-Verpackungskunststoffe.....	65
Abbildung 32: PET-Verpackungskunststoffe.....	66
Abbildung 33: Materialstrom HDPE für das Jahr 2007.....	70
Abbildung 34: Materialstrom LDPE für das Jahr 2007	71
Abbildung 35: Materialstrom PET für das Jahr 2007.....	72
Abbildung 36: Materialstrom PVC für das Jahr 2007	73
Abbildung 37: Aufteilung der werkstofflich, rohstofflich und energetisch verwerteten Kunststoffabfälle.....	74
Abbildung 38: Verwertete Kunststoffabfälle (Post-Consumer- und Produktionsabfälle)	74
Abbildung 39: Verwertungswege der Kunststoffabfälle	75
Abbildung 40: Absolute Einsparung durch die hochwertige werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen	92
Abbildung 41: Absolute Einsparung durch die werkstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen (anteilig für einzelne Kunststoffarten)	94
Abbildung 42: Absolute Einsparung durch die rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen (anteilig für einzelne Kunststoffarten)	97
Abbildung 43: Preisentwicklung für Stahlschrott sowie Warmbreitband sowie Produktionsmengen und Stahlschrottverbrauch von 2005 bis 2010 [12, 21].....	103
Abbildung 44: Preisentwicklung Stahlschrott und Roheisen 2007.....	104
Abbildung 45: Preisentwicklung Kupfer und Kupferschrott 2005 bis 2010 [12]	105
Abbildung 46: Preisentwicklung Kupfer und Kupferschrott 2007	106
Abbildung 47: Preisentwicklung Gold 2007.....	107
Abbildung 48: Marktpreise für HDPE Primär- und Sekundärkunststoffe nach [88]	108
Abbildung 49: Marktpreise für HDPE Sekundärkunststoffe nach [89]	108
Abbildung 50: Marktpreise für PE-LD Primär- und Sekundärkunststoffe nach [88]	109
Abbildung 51: Marktpreise für LDPE-Sekundärkunststoffe nach [89].....	110
Abbildung 52: Marktpreise für PET Primär- und Sekundärkunststoffe nach [88].....	110
Abbildung 53: Marktpreise für PET Sekundärkunststoffe nach [89]	111
Abbildung 54: Marktpreise für PVC Primär- und Sekundärkunststoffe nach [88].....	111
Abbildung 55: Marktpreise für PVC Sekundärkunststoffe nach [89].....	112
Abbildung 56: Wirtschaftlicher Effekt der Kunststoffverwertung	118

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gesamtrohstoff- und Energieeinsparungen durch die Verwertung der thermoplastischen Kunststoffe HD-/LDPE sowie PET und PVC im Jahr 2007	XX
Tabelle 2: Gesamteinsparungen der Wirtschaft durch die Verwertung der thermoplastischen Kunststoffe HD-/LDPE sowie PET und PVC im Jahr 2007	XXII
Tabelle 3: Eingesparten Rohstoffmengen für die einzelnen Kunststoffarten (nach GEMIS [16]).....	XXIV
Tabelle 4: DERec für die Strom- und Wärmeerzeugung in MVA und EBS-Kraftwerken 2007	XXV
Tabelle 5: DERec _i der einzelnen Materialströme.....	XXV
Tabelle 6: Stahlschrottbilanz [Mio. Mg] der Wirtschaftsvereinigung Stahl 2007 [3], ergänzt durch BDSV-Stahlrecycling-Bilanz 2007 [4].....	6
Tabelle 7: Nichteisenmetall-Schrottbilanz der Wirtschaftsvereinigung Metalle 2007	7
Tabelle 8: Abweichungen der bilanziellen Ansätze	13
Tabelle 9: Prämissen der Gesamtbilanzierung der Bauabfälle.....	15
Tabelle 10: Aufteilung des Zukaufsschrotts der Hochofen- und Stahlwerke im Bundesgebiet 2007 nach Sorten (% des Gesamtvolumens) [17].....	35
Tabelle 11: Durchschnittliche Lebenserwartung kupferhaltiger Produkte [25]	37
Tabelle 12: Kupferexport 2007	39
Tabelle 13: Importmengen von Kupfer 2007 [3].....	40
Tabelle 14: Entwicklung des Bedarfs an Kupfer in ausgewählten Branchen [26]	41
Tabelle 15: Kupfergehalt in Stromkabeln [24]	43
Tabelle 16: Berechnung des Kupferlagers in Stromkabeln [24, 38]	43
Tabelle 17: Verteilung der Altkabel- und Kabelschrottinputmengen auf die Verwertungsverfahren [1]	43
Tabelle 18: Durchschnittliche Kupfergehalte nach Fahrzeugtyp [24, 44].....	45
Tabelle 19: Verteilung der Altfahrzeugmengen auf die relevanten Verwertungsverfahren [1]	46
Tabelle 20: Zusammensetzung der Shredderleichtfraktion (Vormaterial: Restkarossen) [49]	48
Tabelle 21: Kupferanteile in ausgewählten Elektro- und Elektronikgeräten bzw. Bauteilen [24, 44, 50]	49
Tabelle 22: Sammelmenge sowie Recycling- und Verwertungsquote der Elektro- und Elektronikaltgeräte des Jahres 2007 [63].....	49
Tabelle 23: Kupfermengen in ausgewählten Elektroaltgeräten der Kategorien 1, 3 und 4 [24, 44, 50, 63]	50
Tabelle 24: Verteilung der Elektro- und Elektronikaltgeräte auf die relevanten Verwertungsverfahren [1]	51
Tabelle 25: Spezifische Stoffkennwerte für Kupfer nach Gebäudetypen.....	53
Tabelle 26: Kupferlager und Kupfermengen in und aus Gebäuden [55].....	53
Tabelle 27: Inputmengen von Bau- und Abbruchabfällen in deutsche Abfallbehandlungsanlagen (2007) [1], Kupferanteile nach [56]	54

Tabelle 28: Kupfermenge in den Münzen zur Erstausrüstung bei Währungsreform in Deutschland (Kupferanteile [42])	55
Tabelle 29: Auszug anthropogenes Lager von Kupfer in Deutschland.....	56
Tabelle 30: Kupferpotenzial in den Abfallströmen sowie Recyclingmengen.....	57
Tabelle 31: Abschätzung der Goldmenge anhand ausgewählter Elektronikgeräte bzw. -teile im anthropogenen Lager	59
Tabelle 32: Stoffstrom Gold in Elektro(nik)kleingeräten [70]	62
Tabelle 33: Bilanzjahr und Quellen für die Ermittlung der Kunststoffabfälle nach Branchen ..	69
Tabelle 34: Verwertete Kunststoffabfälle (Post-Consumer- und Produktionsabfälle)	74
Tabelle 35: Faktoren zur Errechnung der Masse an genutzten Primärenergieträgern	77
Tabelle 36: Material- und Energieintensitäten zur Stahlerzeugung (nach [16])	81
Tabelle 37: Substitution von Roheisen durch den Einsatz von Schrott im Oxygenstahlprozess	81
Tabelle 38: Substitution des Oxygenstahlprozesses durch die Herstellung von Elektrostahl ..	81
Tabelle 39: Fiktive Substitution von Roheisen durch den Einsatz von Eisen- und Stahlschrott bei der durch die Elektrostahlerzeugung vermiedenen Oxygenstahlerzeugung	82
Tabelle 40: Substitutionseffekte bei Eisenerzimporten	83
Tabelle 41: Material- und Energieintensitäten zur Kupfererzeugung (nach [16])	84
Tabelle 42: Substitution von Kupfererzkonzentrat durch Kupferschrott bei der Primärkupfererzeugung	84
Tabelle 43: Substitution der Primärkupfererzeugung durch die Sekundärkupfererzeugung ..	85
Tabelle 44: Substitution von Kupfererzkonzentrat durch Kupferschrott bei der durch die Sekundärkupfererzeugung vermiedenen Primärkupfererzeugung	85
Tabelle 45: Substitutionseffekte beim Import von wasserfreiem Kupferkonzentrat.....	86
Tabelle 46: Substitutionseffekte beim Import von Gold und beim Goldrecycling	87
Tabelle 47: Kumulierter Rohstoffaufwand für Diesel und deutschen Strommix sowie spezifischer Energiebedarf für das Kunststoffrecycling.....	90
Tabelle 48: Material- und Energieintensitäten zur Primärkunststoffherzeugung.....	90
Tabelle 49: Substitution des HDPE-Primärkunststoffprozesses durch die Herstellung von Sekundärkunststoff.....	90
Tabelle 50: Substitution des LDPE-Primärkunststoffprozesses durch die Herstellung von Sekundärkunststoff.....	91
Tabelle 51: Substitution des PET-Primärkunststoffprozesses durch die Herstellung von Sekundärkunststoff.....	91
Tabelle 52: Substitution des PVC-Primärkunststoffprozesses durch die Herstellung von Sekundärkunststoff.....	91
Tabelle 53: Material- und Energieintensitäten zur Holz- und Betonprodukterzeugung	93
Tabelle 54: Substitution von Holz und Beton durch den Einsatz von werkstofflich verwerteten Mischkunststoffen.....	94
Tabelle 55: Absolute Einsparung durch werkstofflich verwertete Mischkunststoffe	94
Tabelle 56: Energiebedarf zur Aufbereitung von Nichtverpackungskunststoffen zur rohstofflichen Verwertung	95

Tabelle 57: Material- und Energieintensitäten für Schweröl und Mischkunststoffe zur rohstofflichen Verwertung, anteilig HDPE	95
Tabelle 58: Material- und Energieintensitäten für Schweröl und Mischkunststoffe zur rohstofflichen Verwertung, anteilig LDPE	96
Tabelle 59: Material- und Energieintensitäten für Schweröl und Mischkunststoffe zur rohstofflichen Verwertung, anteilig PET	96
Tabelle 60: Material- und Energieintensitäten für Schweröl und Mischkunststoffe zur rohstofflichen Verwertung, anteilig PVC	96
Tabelle 61: Durch Verbrennung in der MVA erzielbare spezifische Energiemengen einzelner Kunststoffe	98
Tabelle 62: Absolute Energieerzeugung im Jahr 2007 durch die in MVA verbrannten Kunststoffe	98
Tabelle 63: Material- und Energieintensitäten des Energie- und Fernwärmemixes Deutschland	98
Tabelle 64: Rohstoff- und Energieeinsparungen durch die energetische Kunststoffverwertung in der MVA	98
Tabelle 65: Durch Verbrennung in EBS-Kraftwerken erzielbare spezifische Energiemengen einzelner Kunststoffe	99
Tabelle 66: Absolute Energieerzeugung im Jahr 2007 durch in EBS-Kraftwerken verbrannte Kunststoffe	99
Tabelle 67: Material- und Energieeinsparungen durch die energetische Kunststoffverwertung in EBS-Kraftwerken	99
Tabelle 68: Substitution von Steinkohle durch den Einsatz von energetisch verwertetem HDPE im Zementkraftwerk	100
Tabelle 69: Substitution von Steinkohle durch den Einsatz von energetisch verwertetem LDPE im Zementkraftwerk.....	100
Tabelle 70: Substitution von Steinkohle durch den Einsatz von energetisch verwertetem PET im Zementkraftwerk.....	101
Tabelle 71: Substitution von Steinkohle durch den Einsatz von energetisch verwertetem PVC im Zementkraftwerk.....	101
Tabelle 72: Gesamtrohstoff- und Energieeinsparungen durch die Verwertung der thermoplastischen Kunststoffe HD-/LDPE sowie PET und PVC im Jahr 2007	102
Tabelle 73: Monetärer Effekt durch den Einsatz von hochwertig verwerteten Sekundärkunststoffen zur Primärkunststoffsubstitution.....	113
Tabelle 74: Absolute monetäre Einsparung durch werkstofflich verwertete Mischkunststoffe	114
Tabelle 75: Absolute monetäre Einsparung durch rohstofflich verwertete Mischkunststoffe.....	115
Tabelle 76: Absolute monetäre Einsparung durch die energetische Mischkunststoffverwertung in der MVA.....	115
Tabelle 77: Absolute monetäre Einsparung durch die energetische Mischkunststoffverwertung in EBS-Kraftwerken	116
Tabelle 78: Absolute monetäre Einsparung durch die energetische Mischkunststoffverwertung in Zementwerken	117
Tabelle 79: Gesamteinsparungen der Wirtschaft durch die Verwertung der thermoplastischen Kunststoffe HD-/LDPE sowie PET und PVC im Jahr 2007	117

Tabelle 80: Berechnung der eingesparten Rohstoffmengen für die einzelnen Kunststoffarten (nach GEMIS [16]).....	121
Tabelle 81: Berechnung des $DERec_{EVM-SMVA}$ für die Stromerzeugung in MVA.....	123
Tabelle 82: Berechnung des $DERec_{EVM-SEBS}$ für die Stromerzeugung in EBS-Kraftwerken..	124
Tabelle 83: Berechnung des $DERec_{EVM-WMVA}$ für die Wärmeerzeugung in MVA.....	125
Tabelle 84: Berechnung des $DERec_{EVM-WEBS}$ für die Wärmeerzeugung in EBS-Kraftwerken	125
Tabelle 85: $DERec_i$ der einzelnen Materialströme.....	127

IV. Abkürzungen

a. n. g	anderweitig nicht genannt
Au	Gold
AzB	Abfälle zur Beseitigung
AzV	Abfälle zur Verwertung
BGK	Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
Cu	Kupfer
DERec	Direct Effect of Recovery
Destatis	Statistisches Bundesamt
DMI	Direct Material Input
EAR	Elektro-Altgeräte-Register
EBS	Ersatzbrennstoff
EuWid	Europäischer Wirtschaftsdienst
e.V.	eingetragener Verein
Fe	Eisen
FKZ	Förderkennzeichen
GEMIS	Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme
GJ	Gigajoule (10^9 J)
HDPE	High Density Polyethylen
i. d. R.	in der Regel
Ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung
KEA	kumulierter Energieaufwand
KRA	kumulierter Rohstoffaufwand
KSA	kumulierter Stoffaufwand
kWh	Kilowattstunde
LDPE	Low Density Polyethylen
Lt.	laut
LVP	Leichtverpackung
Mg	Megagramm
Mio.	Millionen
MJ	Megajoule (10^6 J)
Mrd.	Milliarde
MVA	Müllverbrennungsanlage
MWh	Megawattstunde

PET	Polyethylenterephthalat
PJ	Petajoule (10^{15} J)
PVC	Polyvinylchlorid
SLF	Shredderleichtfraktion
SSF	Shredderschwerfraktion
u. a.	unter anderem
UBA	Umweltbundesamt
UGR	Umweltökonomische Gesamtrechnung
z. B.	zum Beispiel

V. Zusammenfassung

Der Grad der Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe ist im Rohstoffproduktivitätsindikator der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie nicht explizit abgebildet. Um die Effekte der Substitution von Primärrohstoffen einzubeziehen, sollen Sekundärrohstoffe als eigene Kategorie ergänzend betrachtet werden. Die vorliegende Studie entwickelt eine reproduzier- und fortschreibbare Darstellung der Materialströme verwertbarer Abfälle und beschreibt auf dieser Grundlage den Beitrag der Abfallwirtschaft zur Ressourcenproduktivität.

Eine effektive und hochwertige Bewirtschaftung von Abfällen durch werkstoffliche, rohstoffliche und energetische Verwertung leistet einen erheblichen Beitrag zum Ressourcenschutz sowohl im Hinblick auf Primärrohstoffe als auch auf Energiequellen. Den Beitrag zum Ressourcenschutz anhand von Energie- und Rohstoffeinsparungen zu quantifizieren, gestaltet sich jedoch bislang als schwierig. Probleme bereiten beispielsweise Lücken in der Abfallstatistik. Die Abfallstatistik der Bundesrepublik Deutschland liefert zwar Angaben über das Abfallaufkommen, doch gibt sie nicht wieder, auf welche Art und Weise die Verwertung von Abfällen letztendlich tatsächlich erfolgt. Die auf dem Europäischen Abfallartenkatalog basierende Statistik macht aufgrund ihrer herkunftsbezogenen Gliederung die Ableitung von Stoffströmen schwierig. Dem kommt hinzu, dass sich der Beitrag der Abfallwirtschaft zur Ressourcenproduktivität derzeit nicht systematisch ermitteln lässt. Die Rohstoffproduktivität gibt an, welcher wirtschaftliche Output (in Euro) aus einer Tonne abiotischem Materialeinsatz erwirtschaftet wird. Im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens „Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung – Weiterentwicklung des direkten Materialinputindikators“ [136] wurden Rohstoffäquivalente entwickelt, die anstatt des tatsächlichen Gewichts für alle Güter das Gewicht der zu ihrer Produktion notwendigen Rohstoffe in die Berechnung einbeziehen. Im Ergebnis des Projektes wurde die Empfehlung abgeleitet, Sekundärrohstoffe als eigene Kategorie ergänzend zu betrachten und darzustellen, um die Effekte der Substitution von Primärrohstoffen einzubeziehen.

Zu diesem Zweck wird in der vorliegenden Studie der Versuch unternommen, eine einheitliche, reproduzierbare und fortschreibbare Darstellung der Stoffströme verwertbarer Abfälle zu entwickeln. Die Erhebung des aktuellen Beitrags der Abfallwirtschaft zur Ressourcenproduktivität wird über den Sekundärrohstoffeinsatz aus den Einsatzmengen aufbereiteter Sekundärrohstoffe bei der Produktion neuer Güter abgeleitet und mit dem Einsatz von Primärrohstoffen in Vergleich gesetzt. Bei den verwendeten Daten wurde sich auf das **Basisjahr 2007** bezogen. So wird der Versuch unternommen, ein Maß für den Grad der Wertschöpfung durch das Recycling zu entwickeln, um eine Verbindung zum Bruttoinlandsprodukt herzustellen, das als Zähler in den Indikator Rohstoffproduktivität einfließt. Darauf aufbauend können Wissenslücken aufgezeigt und Maßnahmen zur weiteren Steigerung der Ressourcenproduktivität abgeleitet werden.

Materialstrombilanzen

In einem ersten Schritt wurden Materialströme von Abfällen, beginnend bei der Abfallentstehung bis zur abgeschlossenen Verwertung, ermittelt. Mit niedriger Detailtiefe wurden diese für Metall-, Kunststoff-, Bau- und Abbruchabfälle sowie biologisch abbaubare Abfälle auf Basis der deutschen Abfallstatistik dargestellt.

Die grundlegende Datenbasis für die Materialstrombetrachtungen stellte die öffentliche Statistik des Statistischen Bundesamtes dar. Zur Verifizierung einzelner Teilströme wurden Daten von Verbänden und Organisationen, wie beispielsweise der Wirtschaftsvereinigung Stahl (WV Stahl), der Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV), der Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVM), der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK), der Beteiligungs- und Kunststoffverwertungsgesellschaft mbH (BKV), PlasticsEurope und des Verbandes Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP),

herangezogen. Um die Konsistenz der Daten sicherzustellen, war das Statistische Bundesamt im Begleitkreis dieses Projektes eingebunden.

Die Daten für die Materialströme der Metalle und Kunststoffe wurden über die Kombination der abfallstatistischen Daten mit spezifischen Stoffgehalten ermittelt. Neben den im Inland anfallenden Abfällen wurden importierte Abfälle, welche in deutschen Abfallbehandlungsanlagen behandelt wurden, ebenfalls in die Betrachtungen einbezogen, genauso wurden exportierte Mengen berücksichtigt.

Metalle in der Abfallwirtschaft

Beim Materialstrom „Metalle“ wurde in Fe- und NE-Metalle unterschieden. Bei einer ersten Darstellung des Materialstroms der Metalle hat sich gezeigt, dass hier auch Abfallströme zur Abbildung kommen, deren Fe- und NE-Gehalte nicht auf die Entsorgung metallhaltiger Abfälle zurückzuführen sind, sondern auf Hintergrundgehalten (in eingesetzten Brennstoffen bzw. Baumaterialien) beruhen. Von diesen geogenen Hintergrundgehalten wurden 88 % (Fe-Metalle) bzw. 66 % (NE-Metalle) deponiert. Die spezifischen Gehalte einzelner Metalle in diesen Abfällen sind zu gering, um generell ein wirtschaftliches Recycling zu rechtfertigen. Die Mengenrelevanz im Materialstrom resultiert insbesondere aus dem hohen Aufkommen an diesen Abfällen.

Die Materialstrombetrachtung der Metalle ohne die Einbeziehung der geogen bedingten Hintergrundgehalte zeigt ein Abfallaufkommen von 11,56 Mio. Mg Fe-Metallen und 3,89 Mio. Mg NE-Metallen. Die Verwertung erfolgt bei Metallen ausschließlich auf stofflichem Wege. Über die Abfallstatistik als „stofflich verwertet“ ausgewiesen wurden 2007 9,2 Mio. Mg Fe-Metalle und 1,08 Mio. Mg NE-Metalle.

Zur Verifizierung dieser Materialstromdaten wurden Statistiken der Wirtschaftsvereinigung Stahl sowie der Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVM) herangezogen. Dabei hat sich gezeigt, dass die Abfallstatistik wesentlich geringere Eisen- und Stahlschrottmengen ausweist. Vergleicht man die stofflich verwerteten 9,2 Mio. Mg an Eisen- und Stahlschrott aus der Abfallstatistik mit den durch die Wirtschaftsvereinigung Stahl veröffentlichten 21,7 Mio. Mg an verwendetem Stahlschrott ergibt sich eine Differenz von 12,5 Mio. Mg. Unter der Annahme, dass auch die 1,5 Mio. Mg an Eisen- und Stahlschrott, welche in der Abfallstatistik unter „Sonstiger Verwertung“ ausgewiesen werden, ebenfalls in der Eisen- und Stahlerzeugung eingesetzt werden, verringert sich diese Differenz auf 11,0 Mio. Mg. Es kann vermutet werden, dass sich außerhalb des Abfallregimes ein Eisen- und Stahlschrotthandel in erheblichem Umfang etabliert hat.

Gemäß der Statistik der WV Metalle ergibt sich allein an Aluminium, Kupfer, Blei und Zink eine verwertete Menge von 1,54 Mio. Mg. In Auswertung der abfallwirtschaftlichen Statistik werden in Summe 1,08 Mio. Mg NE-Metalle direkt stofflich verwertet. Hier kann davon ausgegangen werden, dass auch NE-Metalle aus der sonstigen Verwertung als NE-Metalle (3,33 Mio. Mg) wiederverwertet werden, so dass die Differenz von 0,46 Mio. Mg über diesen Weg durchaus ausgeglichen sein kann. Zudem ist zu berücksichtigen, dass beispielsweise Kupferschrotte auch direkt, ohne vorherige Raffination, als Sekundärrohstoff eingesetzt werden und so in der abfallwirtschaftlichen Statistik nicht erfasst werden.

Kunststoffe in der Abfallwirtschaft

Kunststoffe finden als Werkstoff vielfältige Verwendung und finden sich dementsprechend auch verteilt in zahlreichen Abfallarten wieder. Die Verwertung der Kunststoffe kann sowohl stofflich als auch energetisch erfolgen. Die energetische Verwertung erfolgt mit dem Ziel der Energiegewinnung in der Regel durch die Verbrennung heizwertreicher Abfälle. Aufgrund des hohen Heizwertes der Kunststoffe wird die thermische Behandlung in Müllverbrennungsanlagen hier ebenfalls als energetische Verwertung betrachtet. Die stoffliche Verwertung erfolgt in der Kunststoffindustrie.

Der Materialstrom der Kunststoffabfälle ist umfassend in der von BVK und Plastics-Europe in Auftrag gegebenen Studie „Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in

Deutschland 2007“ (Consultic-Studie) [5] für einzelne Kunststoffarten abgebildet. Diese Daten und der auf Basis der Fachserie 19 Reihe 1 von Destatis erstellte Materialstrom wurden jeweils in Sankey-Diagrammen dargestellt. Die Daten zeigen in der Gesamtheit eine relativ gute Übereinstimmung, beispielsweise wurden über die Abfallstatistik stofflich verwertete Mengen von 2,3 Mio. Mg ermittelt, die Consultic-Studie weist 2,2 Mio. Mg aus. Unterschiede werden vorrangig durch eine unterschiedliche Berücksichtigung von Kunststoffanteilen in Abfallgemischen, insbesondere den nicht separat ausgewiesenen Siedlungsabfällen, hervorgerufen. Für einige Abfallgemische konnten lediglich Annahmen auf Basis vorliegender Erfahrungswerte getroffen werden, da keine Literaturwerte vorliegen. Der Bereich der Produktionsabfälle (speziell aus der Verarbeitung) wird durch die Auswertung der statistischen Daten im Vergleich zur Consultic-Studie mengenmäßig geringer bewertet.

Auswahl detaillierter Materialströme

Eine Betrachtung von Materialströmen in größerer Detailtiefe erfolgte für die Metalle Eisen und Stahl, Kupfer sowie Gold und für die Kunststoffe Polyethylen (HD-/LDPE), Polyethylenterephthalat (PET) und Polyvinylchlorid (PVC). Die Auswahl dieser detaillierten Materialströme erfolgte hinsichtlich der Relevanz für die Ressourcenproduktivität, im Speziellen für die Rohstoffproduktivität. Dafür wurden Kriterien wie Mengenrelevanz, Import/Export, Importrisiko, Marktpreise, Statische Ressourcenreichweite, Verwendung, Kumulierter Energieaufwand, Rohstoff- / Materialaufwand und Recycelbarkeit betrachtet.

Eisen und Stahl

Eisen, bzw. der daraus gewonnene Stahl, ist weltweit der am meisten eingesetzte metallische Werkstoff. Im Jahr 2007 wurden in Deutschland 48,6 Mio. Mg Rohstahl erzeugt [114] und ca. 41 Mio. Mg Stahl verbraucht [116]. Die deutsche Stahlindustrie bietet mehr als 2.000 Stahlsorten an [117]. Der Stahlverbrauch findet überwiegend durch die Bauindustrie, den Maschinenbau, die Automobilindustrie, das Transportwesen sowie die Öl- und Gasindustrie statt. In der Bauindustrie ist der Stahleinsatz in den Einsatzbereichen Stahlbau, Wohnungsbauwesen und Verkehrsbau (speziell Brückenbau) von besonderer Bedeutung.

Über die Abfallstatistik wurde ermittelt, dass 9,2 Mio. Mg Stahlschrott aus der Abfallbehandlung einer Verwertung zukamen. Weitere Stahlschrottmengen wurden aus anderen Quellen zugekauft, importiert oder stammen aus dem Eigenentfall der Stahlwerke, so dass 2007 das Stahlschrottaufkommen bei 30,2 Mio. Mg lag. Davon wurden 8,5 Mio. Mg exportiert, der Rest kam dem Stahlschrottrecycling zu, welches überwiegend im Elektrolichtbogenofen erfolgt. In wesentlich geringeren Mengen wird Stahlschrott auch für die Herstellung von Oxygenstahl zur Kühlung des exothermen Prozesses genutzt. Nach Stahl-Zentrum [116] wurden in Deutschland 2007 die 48,6 Mio. Mg Rohstahl zu ~69 % im Oxygenstahl-ofen und ~31 % im Elektrolichtbogenofen hergestellt. Aufgrund von Qualitätsanforderungen an bestimmte Stahlprodukte kann der Einsatz von Stahlschrott den Roheiseneinsatz nicht vollständig substituieren. So lassen sich bestimmte Stahlsorten nur aus Roheisen herstellen.

Im Jahr 2007 wurden für die Produktion von 48,6 Mio. Mg Rohstahl neben Eisenerz auch 21,7 Mio. Mg Stahlschrott eingesetzt. Damit wurden 44,7 % der produzierten Stahlmenge aus Stahlschrott hergestellt. Aus den 21,7 Mio. Mg Stahlschrott wurden 15,6 Mio. Mg Elektrostahl und 6,1 Mio. Mg Oxygenstahl gewonnen. Bei der überwiegenden Menge des in der Rohstahlproduktion eingesetzten Stahlschrotts handelt es sich um schweren Altstahlschrott.

Kupfer

Der Kupferverbrauch in Deutschland liegt mit einer Produktion von Halbzeugen in Höhe von 1,857 Mio. Mg sowie 93 Tsd. Mg Kupferguss weit über der Produktion von Raffinadekupfer. Die Differenz wird über Importe, den Einsatz von Kupferschrott und sekundären Vorstoffen ausgeglichen. Für das Jahr 2007 wurde eine aus inländischen Quellen stammende Sekundärkupfermenge von 530.000 Mg angesetzt, welche sich aus dem Einsatz von Kupferschrott und sekundären Vorstoffen ergibt. Im Jahr 2007 betrug der Anteil sekundärer Vorstoffe wie

Schlacken und Krätzen bei der Kupferraffination 55 %. Von insgesamt 666.000 Mg raffiniertem Kupfer wurden 364.000 Mg aus sekundären Vorstoffen erzeugt. Ein hoher Sekundärrohstoffanteil ist für importabhängige Verbrauchsländer, wie Deutschland, in Hinblick auf die Versorgungssicherheit von großer Bedeutung.

Neben dem Export von raffiniertem Kupfer sowie entsprechenden Halbzeugen ist der Export von Kupfer als Bestandteil verschiedener Geräte und Maschinen von großer Bedeutung, lässt sich aber nicht getrennt ausweisen. Nach Deutschland importiert wird Kupfer in den verschiedensten Verarbeitungsstufen. Mit 1,3 Mio. Mg bilden Kupfererze und –konzentrate die größten Importmengen. Auch die Mengen an Kupfer, welche mit fertigen Waren importiert werden, lassen sich nicht explizit ausweisen.

Im Rahmen der Materialstrombetrachtung wurde für Kupfer ein Abfallaufkommen von 0,27 Mio. Mg ermittelt. Davon kam ein Großteil über Behandlungsanlagen einer Verwertung zu. Etwa 0,15 Mio. Mg des in der Abfallbehandlung eingesetzten Abfalls mit Kupferanteil wurde unter der Prämisse der Kupferrückgewinnung verwertet. Mit zusätzlicher Berücksichtigung von Importmengen, dem Zukauf aus anderen Quellen und dem Altschrottaufkommen ergibt sich 2007 ein Kupferschrottaufkommen von 1,18 Mio. Mg. Davon wurden 0,89 Mio. Mg in Deutschland wieder eingesetzt.

Gold

Im Jahr 2007 wurden in der Bundesrepublik ca. 97 Mg Gold eingesetzt, wobei 16,6 Mg aus dem Import stammten [61]. Davon wurden ca. 50 % im industriellen Bereich verarbeitet und ca. 18 % in der Schmuckwarenindustrie. Die verbleibenden 32 % wurden im Bereich der Herstellung von Goldbarren zur Wertanlage, Münzen sowie sonstigen Bereichen wie Lebensmittel- oder Pharmaindustrie eingesetzt. Aus der Materialstrombetrachtung des Goldes geht hervor, dass ein nennenswerter Im- und Export mit einem erheblichen Importüberschuss stattfindet.

Gold wird in Deutschland auf zwei Wegen recycelt. Die Aurubis AG gewinnt Gold im Rahmen des Recyclings von Elektronik- und Kupferschrott, indem die aus zerkleinerten Elektroaltgeräten hergestellten Fraktionen pyrometallurgischen Prozessen zugeführt, die Edelmetalle im Kupfer aufkonzentriert und dann mittels Elektrolyse vom Kupfer abgetrennt werden. Durch weitere Raffinationsschritte wird das Gold gewonnen. Der zweite Weg des Goldrecyclings ist der über Goldscheideanlagen, in denen insbesondere Schmuckgold, Dentalgold u. a. Materialien mit hohem Goldanteil verwertet werden und das Gold auf elektrolytischem Wege zu Reinstgold aufkonzentriert wird.

Gold aus Elektro(nik)altgeräten wird nur in sehr geringem Umfang und bei hohem Aufbereitungsgrad in Goldscheideanlagen eingesetzt [66]. Belastbare Daten zur Menge des wiedergewonnenen Goldes konnten nicht erhoben werden. Die Gewinnung von Gold aus Elektro(nik)altgeräten wird in großem Umfang in der Bundesrepublik nur durch die Aurubis AG durchgeführt. Durch Aurubis werden jährlich etwa 3,5 Mg Gold durch das Recycling von Elektroaltgeräten erzeugt [67]. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Menge der Goldmenge der in Deutschland gesammelten Elektroaltgeräte entspricht. Zwar gehen Elektroaltgeräte auch zu Boliden in Schweden bzw. Umicore in Belgien, doch gleichen sich diese Mengen mit denen aus, die Aurubis aus dem Ausland importiert. Nicht abschließend bilanzierbar ist die Menge an Gold, welche als Goldanteil in verschiedenen Abfällen oder in Gebrauchtgeräten im- und exportiert wird, da keine allgemeinen Angaben zu den Goldgehalten in den Abfällen getroffen werden können [2, 29].

Thermoplastische Kunststoffe am Beispiel von HD-/LDPE, PET und PVC

Wie beim Materialstrom zur Gesamtdarstellung der Kunststoffe in der Abfallwirtschaft wurde auch für die detaillierte Materialstrombetrachtung die Consultic-Studie herangezogen, da diese eine ganzheitliche Bilanz der in Deutschland produzierten, verarbeiteten und als Abfall anfallenden Kunststoffe darstellt. Die Studie wird alle zwei Jahre veröffentlicht, entsprechend dem Bilanzjahr wurde die Veröffentlichung der Studie für das Jahr 2007 genutzt [5].

Die herangezogene Statistik zum Im- und Export von Kunststoffwaren und Granulaten basiert auf der Erhebung der Ein- und Ausfuhr von Waren aus dem Kapitel 39 des Warenverzeichnisses des Statistischen Bundesamtes. Dabei ist zu berücksichtigen, dass in den Im- und Exportmengen der Primärkunststoffe auch aufbereitetes Recyclingmaterial enthalten ist, da zu Regranulat aufbereitete Kunststoffabfälle unter dem Zollcode für Primärformen aufgeführt sind [76] und eine getrennte Ausweisung nach Destatis nicht möglich ist [77].

Im- und exportierte Kunststoffe im Produktstatus lassen sich nicht verfolgen, da diese von der Zollstatistik nur nach der Produktart erfasst werden und sich dafür verarbeitete Materialien nicht mehr getrennt nachweisen lassen. Die Im- und Exportzahlen für Kunststoffabfälle sind der Statistik des Umweltbundesamtes für den Im- und Export von nicht notifizierungspflichtigen Abfällen [2] entnommen.

Im Jahr 2007 wurden als Post-Consumer-Abfälle 0,33 Mio. Mg HDPE-, 0,73 Mio. Mg LDPE-, 0,29 Mio. Mg PET- und 0,40 Mio. Mg PVC-Abfälle in Deutschland behandelt. Die Unterscheidung nach Post-Consumer Abfällen und Abfällen aus Produktion und Verarbeitung erfolgt nach Angaben der Consultic-Studie [5]. Eine weitere Differenzierung der Post-Consumer Abfälle nach Branchen erfolgt in dieser Quelle nicht. Dieser Wert wurde über eine Hochrechnung der prozentualen Anteile verarbeiteter Kunststoffmengen in den betrachteten Branchen aus unterschiedlichen Jahren ermittelt. Dabei wurde versucht, die Nutzungsdauer von Kunststoffen bis diese als Abfall anfallen, mit einzubeziehen.

Diese Abschätzung der Post-Consumer-Abfälle nach Branchen ist für die Bestimmung der Verwertungsart der Kunststoffabfälle relevant, da eine getrennte Ausweisung nach Kunststoffarten für die werkstofflich, rohstofflich und energetisch verwerteten Abfälle nicht vorliegt. In der Consultic-Studie [5] sind einzig die Verwertungswege der Gesamtkunststoffabfälle differenziert nach Branchen aufgeführt. Die Verwertungswege unterscheiden sich stark in Abhängigkeit der Branche, wodurch der Bedarf dieser differenzierten Betrachtung entsteht. Durch die gewählte Herangehensweise ist mit Abweichungen vom wirklichen Wert zu rechnen. Die Verifizierung der Daten durch die PVC-Studie der AGPU für das Jahr 2007 [80] und den Vinyl 2010 Fortschrittsbericht für das Jahr 2007 [87] hat eine weitgehende Übereinstimmung der Werte gezeigt.

Zur Kunststoffverwertung werden unterschiedliche werkstoffliche, rohstoffliche und energetische Verwertungsverfahren genutzt. In Abbildung 38 sind die den einzelnen Verwertungsverfahren zukommenden Kunststoffmengen dargestellt.

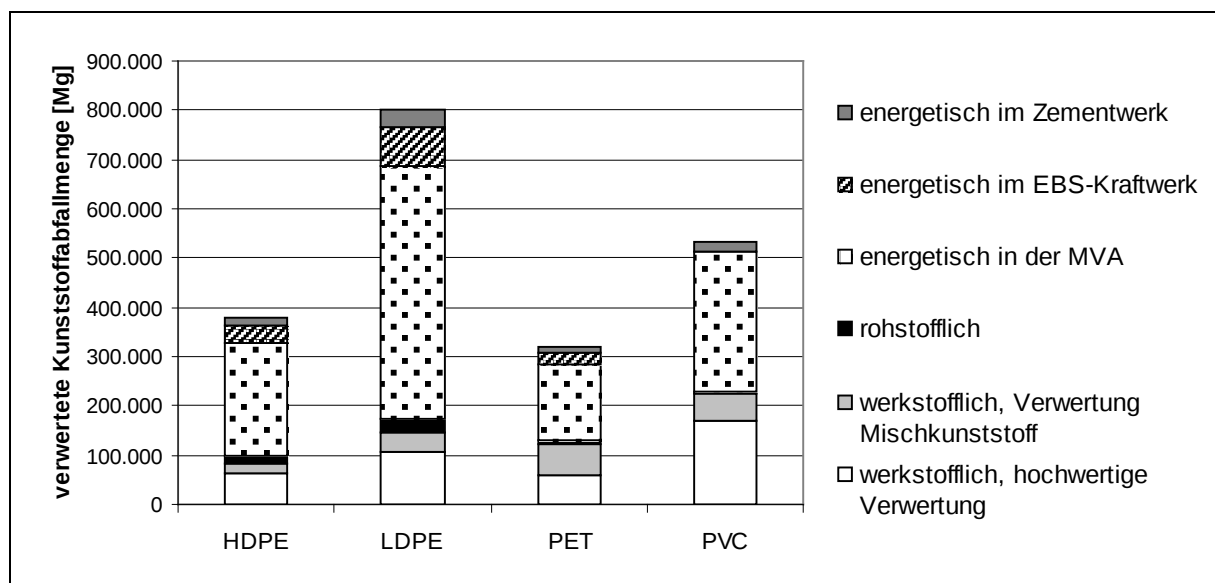


Abbildung 1: Verwertete Kunststoffabfälle (Post-Consumer- und Produktionsabfälle)

Abhängig davon, ob sortenreine Kunststoffe oder Mischkunststoffe vorliegen, erfolgt beim werkstofflichen Recycling nochmals eine Differenzierung des Verwertungsverfahrens und der substituierten Produkte. Durch hochwertiges Recycling sortenreiner Kunststoffe lassen sich

Kunststoffprodukte gewinnen, welche zum Zweck der Substitution von Primärkunststoffen eingesetzt werden. Die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffmischungen erfolgt dagegen durch thermoplastische Verformung und die Herstellung von Produkten, die insbesondere als Holz- oder Betonersatz dienen. Bei den stofflich verwerteten Produktionsabfällen wird von einem hochwertigen werkstofflichen Recycling zur Substitution von Primärkunststoffen ausgegangen. Bei der rohstofflichen Verwertung wurde hier davon ausgegangen, dass die Kunststoffe als Reduktionsmittel im Hochofen eingesetzt werden und so Schweröl substituieren. Eine Aufteilung der energetisch verwerteten Kunststoffabfälle erfolgt entsprechend der Verwertung in MVA, EBS- und Zementkraftwerken.

Effekte der Abfallverwertung

Anhand der aus Materialstrombetrachtungen ermittelten Abfall- bzw. Sekundärrohstoffmengen erfolgte durch einen Vergleich mit substituierten Primärrohstoffen die Quantifizierung von rohstofflichen, energetischen und ökonomischen Einsparungen durch die Abfallverwertung.

Bei der Ermittlung der Substitutionswirkung ist jeweils das durch den Abfall substituierte Produkt bzw. der substituierte Rohstoff entscheidend. Bei den Metallen, bei denen nur die werkstoffliche Verwertung entscheidend ist, wird davon ausgegangen, dass die entsprechenden metallischen Primärrohstoffe substituiert werden. Durch die unterschiedlichen Verwertungsverfahren und Qualitäten der Kunststoffabfälle wird davon ausgegangen, dass unterschiedlichste Primärrohstoffe bzw. Primärenergieträger in Form von Kunststoffen und Nicht-Kunststoffen substituiert werden. Einen Überblick gibt Abbildung 39.

Da durch die verwerteten Abfälle Primärrohstoffe zumeist nicht im Verhältnis 1:1 eingespart werden (z. B. durch Aufbereitungsverluste), wurden Substitutionsfaktoren herangezogen, welche die pro Mg Abfall substituierte Menge an Primärrohstoffen bzw. -energieträgern darstellen. Bei der Substitution unterschiedlicher Materialien, wurde auch ein entsprechender Massefaktor berücksichtigt. Im Falle der Kunststoffverwertung, durch die Energieträger substituiert wurden, stellen sich die Substitutionsfaktoren in Abhängigkeit vom Heizwert dar. Bei der Mischkunststoffverwertung in MVA und EBS-Kraftwerken wird davon ausgegangen, dass eine Substitutionswirkung in Bezug auf den deutschen Strom- und Wärmemix erfolgt.

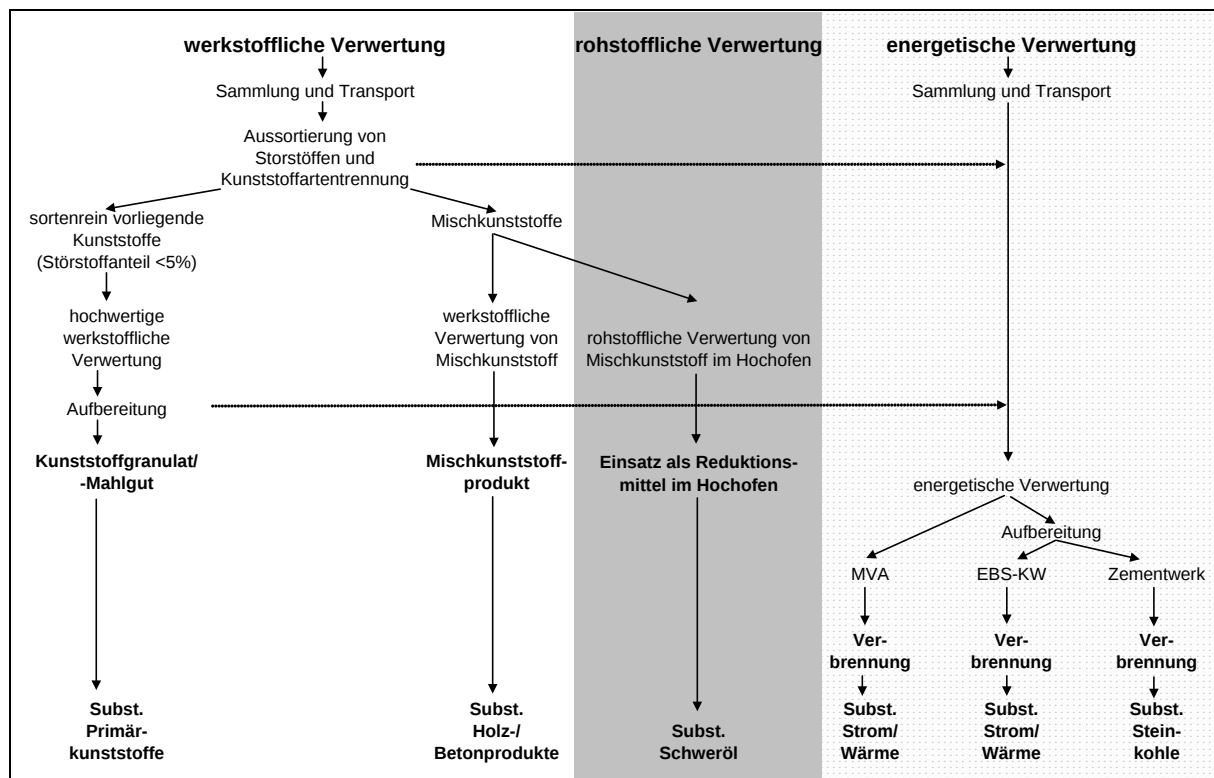


Abbildung 2: Verwertungswege der Kunststoffabfälle

Für die Betrachtung der rohstofflichen und energetischen Substitutionswirkung wurden die Kennzahlen KEA und KRA herangezogen. Der **Kumulierte Energieaufwand (KEA)** ist eine Maßzahl für den gesamten Aufwand an Energieressourcen (Primärenergien) zur Bereitstellung eines Produkts oder einer Dienstleistung. Primärenergieträger fließen in den KEA auch dann ein, wenn sie stofflich genutzt werden (bspw. Erdöl in der Kunststoffproduktion). Der **Kumulierte Rohstoffaufwand (KRA)** ist definiert als die Summe aller in ein System eingehenden Rohstoffe ausgedrückt in Gewichtseinheiten [59].

Da für die Sekundärkunststoffe keine GEMIS -Datensätze vorliegen, wurden hier Angaben aus anderen Quellen zum KEA recherchiert. Über den KEA wurde in Verbindung mit entsprechenden rohstofflichen Daten für Strom und Diesel der KRA berechnet.

Die wirtschaftlichen Effekte durch die Verwertung der betrachteten Metalle und Kunststoffe wurden vereinfacht anhand von Marktpreisvergleichen bestimmt. Die Preisdifferenz, die im Wesentlichen durch Qualitätsunterschiede, Wiederaufarbeitungsaufwand, Transportkosten und Ähnliches charakterisiert wird, entspricht den Bruttokosten, die rohstoffverarbeitende Unternehmen durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen im Idealfall sparen könnten.

Um den Beitrag des Sekundärrohstoffeinsatzes zum Indikator DMI zu ermitteln, wird ein Ergänzungsterm zur näherungsweisen Erfassung der direkten Effekte des Sekundärrohstoffeinsatzes auf Basis der eingesparten Primärrohstoffe inkl. der eingesparten Primärenergieträger ohne Vorketten im Ausland (Direct Effect of Recovery: „DERec“) ermittelt. Dies ist eine virtuelle Kenngröße, die abbildet, in welchem Umfang Primärrohstoffe bzw. -energieträger, aber auch Halb- und Fertigwaren, unter Annahme gleicher Produktionsmuster importiert oder inländisch gefördert werden müssten. Der DERec stellt einen Näherungswert dar, da z. B. keine inländischen Hilfs- und Zuschlagsstoffe bilanziert wurden. Als Vergleichsdaten für den Energieträgerverbrauch der jeweiligen Produktionszweige wurden jeweils die Daten der Umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR) herangezogen [123].

Verwertung von Eisen und Stahl

Abhängig vom Einsatzgebiet des erzeugten Rohstahls und dem Verfahren zur Stahlerzeugung werden in den Stahlwerken die Schrottsorten zu verschiedenen Mengenanteilen eingesetzt. Im Oxygenstahlverfahren können bis zu 20 % Schrott eingesetzt werden. Beim Elektrostahlverfahren kann hingegen bis zu 100 % Stahlschrott zum Einsatz kommen. Der Einsatz von Eisen- und Stahlschrott im Rahmen der Eisen- und Stahlherstellung substituiert Roheisen, welches importiert bzw. unter hohem energetischem Aufwand im Hochofenprozess aus importierten Eisenerzen gewonnen werden muss. Dabei ist die Substitutionswirkung des Schrotteinsatzes im Elektrostahlprozess über den Oxygenstahlprozess zu bewerten. Hier ist lediglich die Rohstoffsubstitution zu betrachten, da aufgrund des exothermen Oxygenstahlprozesses durch den Schrotteinsatz keine Energieeinsparungen bilanziert werden können. Durch den Einsatz von 6,124 Mio. Mg Eisen- und Stahlschrott wurden 6,859 Mio. Mg Roheisen substituiert und insgesamt 17,333 Mio. Mg Rohstoffe eingespart. Da im Rahmen dieses Prozesses die eingesetzten Schrotte allerdings insbesondere auch Kühlzwecken dienen, ist dieses Einsparpotenzial theoretischer Natur und dient an dieser Stelle nur als Grundlage für die Berechnung des Substitutionseffektes.

Die Verwertung von Schrotten im Elektrostahlprozess führt zu einem vollständigen Ersatz des Oxygenstahlprozesses für die erzeugte Elektrostahlmenge. Da im betrachteten Oxygenstahlprozess-Szenario nach GEMIS 4.6 [16] mit dem Einsatz von 16 % Schrotten kalkuliert wird, muss die Substitutionswirkung dieses Schrotteinsatzes gegenüber dem eingesparten Roheisen zusätzlich fiktiv mit bilanziert werden. Im Jahr 2007 wurden durch den Einsatz von 16 % Schrott 6,069 Mio. Mg Roheisen substituiert. Durch die Elektrostahlerzeugung wurden im Jahr 2007 46,025 Mio. Mg an Rohstoffen und 230,45 PJ Energieaufwand eingespart.

Insgesamt wurden nach diesen Bilanzierungen im Jahr 2007 durch den Einsatz von Stahlschrott 63,358 Mio. Mg an Rohstoffen und 230,45 PJ an Energieaufwand eingespart.

Diese Einsparungen umfassen sowohl Rohstoffe und Energie in Deutschland, jedoch in großem Maße auch den Rohstoff- und Energieverbrauch im Ausland. Unter der Annahme, dass Eisenerzkonzentrat zu 100 % importiert wird, konnten durch die 21,744 Mio. Mg im Jahr 2007 eingesetzten Eisenschrotte 38,965 Mio. Mg Eisenerz-Importe eingespart werden. Dazu kommt noch das fiktiv eingesparte Roheisen durch den bilanzierten Schrotteinsatz in der substituierten Oxygenstahlproduktion, was 9,710 Mio. Mg Eisenerzkonzentrat ergibt, so dass sich die Menge an eingesparten Roheisenimporten auf insgesamt 48,675 Mio. Mg beläuft. Die durch den Eisenschrotteinsatz eingesparten Einfuhren an agglomerierten und nicht agglomerierten Eisenerzen führen zu einer Einsparung an Rohstoffen in Höhe von 50,961 Mio. Mg sowie zu einer Einsparung an Primärenergieträgern in Höhe von 74,43 PJ.

Ausgehend von einer Gesamteinsparung an Rohstoffen in Höhe von 63,358 Mio. Mg und einer Energieeinsparung in Höhe von 230,45 PJ ergibt sich, dass durch die mit dem Schrotteinsatz vermiedenen Importe an Eisenerzkonzentraten 80 % der insgesamt eingesparten Rohstoffe und 32 % der insgesamt eingesparten Primärenergieträger auf die Eisenerzgewinnung in den Herkunftsländern sowie den Transport der Eisenerzkonzentrate entfallen.

Verwertung von Kupfer

Durch die elektrolytische Raffination können unedle und edle Verunreinigungen vom Kupferschrott vollständig abgetrennt werden. Somit ist ein mehrmaliges Recycling ohne Wertverlust möglich [22]. Die Substitutionswirkung erfolgt zum einen auf der Stufe der Primärkupfererzeugung, indem Kupfererzkonzentrate durch den Einsatz von Kupferschrott substituiert werden und zum anderen durch die Herstellung von Sekundärkupfer, bei der durch den Einsatz von Kupferschrott und sekundären Vorstoffen die Herstellung von Primärkupfer substituiert wird.

Im Jahr 2007 wurden insgesamt 666.000 Mg Raffinadekupfer hergestellt, davon 364.000 Mg durch den Einsatz von Kupferschrott. Durch die Herstellung von 364.000 Mg Raffinadekupfer aus sekundären Vorstoffen werden 1,485 Mio. Mg Kupfererzkonzentrat substituiert und so 47,512 Mio. Mg an Rohstoffen und 32,43 PJ an Energieaufwand eingespart.

Im Jahr 2007 wurden insgesamt 530.000 Mg Sekundärkupfer durch den direkten Einsatz von Kupferschrott und sekundären Vorstoffen erzeugt. Unter Berücksichtigung des Substitutionseffekts aus dem Kupferschrottanteil in Höhe von 0,57 Mg/Mg Primärkupfer und dem Substitutionsfaktor Kupferschrott zu Kupfererzkonzentrat von 3,87 werden 1.169.127 Mg Kupfererzkonzentrat substituiert. Durch die Herstellung von Sekundärkupfer aus Kupferschrott und sekundären Vorstoffen wurden im Jahr 2007 70,005 Mio. Mg an Rohstoffen und 48,59 PJ an Energieaufwand eingespart.

Insgesamt wurden im Jahr 2007 durch das Kupferrecycling und die damit verbundene Verwertung sekundärer Vorstoffe in der Kupferraffination bzw. durch den Einsatz von Kupferschrott 117,517 Mio. Mg Rohstoffe und 81,02 PJ an Energieaufwand eingespart.

Wie bei Eisen und Stahl resultiert aus der Exportabhängigkeit der deutschen Wirtschaft bei Kupfer ein erheblicher Anteil an Einsparungen im Ausland. Durch den Einsatz sekundärer Vorstoffe und Schrotte in Höhe von 894.000 Mg wird im Jahr 2007 3.459.780 Mg wasserfreies Kupferkonzentrat substituiert. Damit führen die durch den Einsatz von sekundären Vorstoffen und Kupferschrott vermiedene Importe an Kupferkonzentrat zu Einsparungen von 110,727 Mio. Mg an Rohstoffen und 75,58 PJ an Energieaufwand in den Herkunftsländern.

Demzufolge entfallen 94 % der eingesparten Rohstoffe und 93 % der eingesparten Primärenergieträger auf die Kupfererzkonzentratgewinnung in den Herkunftsländern sowie auf die mit deren Einfuhr verbundenen Transporte.

Verwertung von Gold

Gold wird in Deutschland durch die Aurubis AG im Rahmen des Recyclings von Elektronik- und Kupferschrott sowie über Goldscheideanlagen recycelt. Im Rahmen der Materialstrombetrachtung wurde ermittelt, dass in Deutschland im Jahr 2007 insgesamt 80,4 Mg Gold recycelt wurden. Zum KRA bzw. zum KEA des Goldrecycling liegen keine Kennwerte vor.

Basierend auf Daten aus dem Jahr 2007 gibt das Umweltbundesamt [59] für die weltweite Goldförderung die folgenden Werte an:

KRA: 740.317.694 kg/Mg

KEA: 261.210.200 MJ/Mg

Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser kumulierte Rohstoffaufwand nahezu vollständig eingespart wird, da das Recycling von Gold überwiegend aus hochkonzentrierten Ausgangsmaterialien erfolgt.

Für die folgende Betrachtung wird eine vollständige Vermeidung der durch die bergbauliche Goldgewinnung verursachten Energie- und Rohstoffaufwendungen durch das Recycling angenommen und gleichwohl damit die obere Schranke des Potenzials aufgezeigt.

Die durch das Recycling von 80,4 Mg Gold vermiedenen Goldimporte im Jahr 2007 sind mit Einsparungen von bis zu 59,522 Mio. Mg an Rohstoffen sowie bis zu 21,00 PJ an Energie verbunden. Diese Einsparungen betreffen zu nahezu 100 % die Herkunftsländer, in denen auch die Aufbereitung des goldhaltigen Gesteins erfolgt.

Verwertung von thermoplastischen Kunststoffen am Beispiel von HD-/LDPE, PET und PVC

Die Verwertungsverfahren für die einzelnen hier betrachteten thermoplastischen Kunststoffe unterscheiden sich zumeist nicht wesentlich voneinander (hochwertige werkstoffliche Verwertung) bzw. im Falle der Verwertung als Mischkunststoffe sind sie sogar identisch. Vor diesem Hintergrund erfolgt eine gemeinsame Darstellung der verwendeten Grundlagendaten, Ergebnisse werden vergleichend nebeneinander gestellt.

Durch die beigemischten Additive und die Materialalterung ist jeder Recyclingdurchgang bei der **hochwertigen werkstofflichen Kunststoffverwertung** mit einem Qualitätsverlust der Kunststoffe verbunden. Die meisten Kunststoffe lassen sich etwa 3 bis 5 mal recyceln. Der nachfolgende Vergleich von Primärkunststoffen mit Sekundärkunststoffen erfolgt bis einschließlich zur Gewinnung des Granulats bzw. Regranulats.

Der Energieaufwand für Sortierung und Aufbereitung sortenreiner HD- und LDPE-Kunststoffe bis zum Regranulat liegt bei etwa 9.000 MJ/Mg [93]. Sortenreine PET-Flaschen, welche den Reinigungsschritt „Aufschmelzen im Extruder“ nicht benötigen, liegen nach der Aufbereitung meist als PET-Flakes vor [92], der Energieaufwand wurde mit 5.400 MJ/Mg angesetzt. Für PVC wurde ein KEA von 15.000 MJ/Mg herangezogen [94]. Die Ermittlung der KRA erfolgte über die KEA in Verbindung mit entsprechenden rohstofflichen Daten für Strom und Diesel. In Tabelle 72 sind die Material- und Energieeinsparungen aufgrund der Substitution von Primärkunststoffen für die hochwertige werkstoffliche Verwertung von 63.748 Mg HDPE, 105.282 Mg LDPE, 60.491 Mg PET und 169.507 Mg PVC dargestellt. Für alle hier betrachteten Kunststoffe wurden im Jahr 2007 insgesamt 501.977 Mg Rohstoffe und 24,1 PJ Energie eingespart.

Die betrachteten Verfahren für die **Mischkunststoffverwertung** sind in Abbildung 39 in einer Übersicht mit den substituierten Produkten dargestellt. In Tabelle 72 sind die einzelnen ermittelten Rohstoff- und Energieeinsparungen durch die hochwertige werkstoffliche Verwertung und die Mischkunststoffverwertung aufgeführt.

Durch die **werkstofflichen Verwertung von Mischkunststoffen** lassen sich Produkte durch Zerkleinerung und anschließendes Einschmelzen im Extruder herstellen. Eine Reinigung und Auftrennung des Kunststoffgemisches ist hier nicht notwendig, zumeist erfolgt in einem Arbeitsgang mit der Aufbereitung auch die Produktherstellung (dickwandige Platten/Profile). Die erzeugten Produkte sind bspw. Klappboxen, Parkbänke, Backenfüße, Blumenkübel, etc. Damit werden Materialien wie Holz und Beton substituiert, folglich ist die Vergleichbarkeit der Produkte nur auf den funktionalen Einsatz beschränkt. Deshalb wurden hier auf der Materialeinsatzmenge basierende Substitutionsfaktoren herangezogen.

Im Rahmen der **rohstofflichen Verwertung** wurde hier die Mischkunststoffverwertung im Hochofen betrachtet, wodurch das Reduktionsmittel Schweröl substituiert wird. Da bestimmte Anforderungen an die eingesetzten Mischkunststoffe gestellt werden, ist eine Sortierung und Aufbereitung der Kunststoffabfälle notwendig.

Zur Bewertung der **energetischen Verwertung in MVA** wurden durchschnittliche elektrische und thermische Netto-Wirkungsgrade deutscher Müllverbrennungsanlagen im Jahr 2007 betrachtet. In Verbindung mit den Heizwerten der Kunststoffe wurde eine spezifische erzeugte Strom- und Wärmemenge durch die energetische Verwertung bestimmt. Der Aufwand des Transports der Kunststoffabfälle zur MVA wurde den erzeugten Energiemengen gegen gerechnet. Für die **energetische Verwertung in EBS-Kraftwerken** sind Aufwendungen für den Transport und die Vorkonditionierung von Kunststoffen zur Nutzung als Brennstoff notwendig. Über durchschnittliche Netto-Wirkungsgrade deutscher EBS-Kraftwerke und mittels der eingesparten elektrischen und thermischen Energiemengen wurden hier die Rohstoff- und Energieeinsparungen ermittelt. Bei der **energetischen Verwertung im Zementkraftwerk** bleibt für den Vergleich mit dem substituierten Brennstoff Steinkohle der Wirkungsgrad des Zementwerkes unberücksichtigt. Stattdessen wird der KEA- und KRA-Wert für die substituierte Steinkohlemenge herangezogen.

Tabelle 1: Gesamtrohstoff- und Energieeinsparungen durch die Verwertung der thermoplastischen Kunststoffe HD-/LDPE sowie PET und PVC im Jahr 2007

		HDPE	LDPE	PET	PVC
Gesamt verwertete Menge		380.376 Mg	801.842 Mg	317.868 Mg	532.184 Mg
Hochwertige werkstoffliche Verwertung	Rohstoffeinsparung	86.538 Mg	150.406 Mg	135.318 Mg	129.715 Mg
	Energieeinsparung	4,31 PJ	7,60 PJ	5,61 PJ	6,58 PJ
Werkstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen	Rohstoffeinsparung	58.080 Mg	116.022 Mg	177.054 Mg	164.235 Mg
	Energieeinsparung	0,22 PJ	0,45 PJ	0,68 PJ	0,63 PJ
Rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen	Rohstoffeinsparung	7.267 Mg	14.479 Mg	2.254 Mg	-252 Mg
	Energieeinsparung	0,63 PJ	1,26 PJ	0,36 PJ	0,06 PJ
Energetische Verwertung in MVA	Rohstoffeinsparung	145.310 Mg	323.179 Mg	68.220 Mg	81.622 Mg
	Energieeinsparung	5,91 PJ	13,15 PJ	2,78 PJ	3,31 PJ
Energetische Verwertung im EBS-Kraftwerk	Rohstoffeinsparung	21.877 Mg	48.654 Mg	9.542 Mg	
	Energieeinsparung	0,90 PJ	2,01 PJ	0,39 PJ	
Energetische Verwertung im Zementkraftwerk	Rohstoffeinsparung	34.915 Mg	77.652 Mg	15.918 Mg	15.551 Mg
	Energieeinsparung	1,17 PJ	2,61 PJ	0,55 PJ	0,56 PJ
Kunststoffverwertung gesamt	Rohstoffeinsparung	353.986 Mg	730.391 Mg	408.307 Mg	390.511 Mg
	Energieeinsparung	13,15 PJ	27,06 PJ	10,37 PJ	11,14 PJ

Die Hochrechnung der einzelnen rohstofflichen und energetischen Substitutionseffekte bei der Kunststoffverwertung zeigt insgesamt die größten Energie- und Rohstoffeinsparungen beim LDPE. Hier ist maßgeblich die große verwertete Menge dieser Kunststoffart entscheidend. Mit einer wesentlich geringeren verwerteten Menge, aber dafür einem entscheidenden Vorteil bei der Aufbereitung, sticht PET vor allem mit den Substitutionseffekten bei der werkstofflichen Verwertung heraus. Durch den geringen Energiegehalt und die Zusatzaufwendungen bei der Aufbereitung zeigt PVC nur geringe spezifische Substitutionseffekte, wodurch die gesamte Rohstoff- und Energieeinsparung trotz der relativ großen verwerteten

Menge eher gering ausfällt. Hier ist zu beachten, dass gerade beim Haupteinsatzbereich von PVC, dem Baubereich, der Aufbereitungsaufwand unterschiedlicher Bauabfälle aus PVC (z. B. Fenster oder Dachbahnen) sehr verschieden ausfällt und separat betrachtet werden müsste. Hier besteht noch weiterer Bedarf an einer entsprechend detaillierteren Datengrundlage.

Wirtschaftliche Bedeutung von Recycling

Für die Betrachtung der **wirtschaftlichen Effekte der Stahlschrottverwertung** wurden für das Bezugsjahr 2007 die monatlichen durchschnittlichen Schrottpreise (veröffentlicht im EuWid [12]) als jeweiliger Mittelwert einzelner Stahlschrottsorten dem monatlichen Roheisenpreis (Exportpreis ab russischem Seehafen [91]) gegenüber gestellt. Innerdeutsche Roheisen-Handelspreise konnten nicht umfassend für das Betrachtungsjahr ermittelt werden. In Bezug auf die Produktionskette, können Stahlschrott und Roheisen in etwa gleich gestellt werden. Eine vollständige Substitution des Roheisens durch Stahlschrott ist allerdings aufgrund bestimmter Qualitätsanforderungen nicht möglich.

Ausgehend von durchschnittlichen Einsatzmengen einzelner Stahlschrottsorten in der deutschen Stahlindustrie [17] wurde ein gewichteter Durchschnittspreis für Stahlschrott ermittelt. Dieser gewichtete Stahlschrottpreis liegt mit 218 €/Mg um 31 € unter dem durchschnittlichen Roheisenpreis des Jahres 2007 von 249 €/Mg. Durch die 21,7 Mio. Mg Stahlschrott, welche für die Elektro- und Oxygenstahlherstellung im Jahr 2007 eingesetzt wurden, wird eine theoretische Kostenersparnis durch die Einsparung der Primärrohstoffe von 674 Mio. € erreicht.

Durch den Vergleich der Marktpreise für Kupfer und Kupferschrott in Verbindung mit den Kupfermengen lässt sich die **monetäre Bruttoeinsparung durch den Einsatz von Kupferschrott** ableiten. Die Preise für Kupferschrott werden klassifiziert für 13 verschiedene Qualitäten angegeben. Im EuWid werden wöchentlich die Großhandelsankaufpreise frei Lager für sieben Kupferqualitäten in Form von Preisspannen veröffentlicht [12]. Da keine Mengenverteilung des Kupferschrotts auf die verschiedenen Kupferqualitäten vorliegt, wurde vom Durchschnittspreis einzelner Sortenpreise ausgegangen. Im Jahresdurchschnitt lag der Marktwert für Kupferschrott bei 4.315 €/Mg. Dieser steht dem mittleren Jahrespreis für Kupfer von 5.242 €/Mg gegenüber (Differenz 927 €/Mg). Bezogen auf die Sekundärkupfer- und Kupferschrottmenge von 894.000 Mg, ergibt sich eine finanzielle Einsparung von 828 Mio. €.

Der **Goldpreis** steht in enger Beziehung zur Prognose der weltweiten Konjunktorentwicklung. Der über die stark schwankenden Monatsmittelwerte ermittelte mittlere Goldpreis für das Jahr 2007 liegt bei ~17.000 €/kg und für verarbeitetes Gold bei ~18.000 €/kg. Es erfolgt keine getrennte Darstellung der Preise für Primär- und Sekundärgold, wie es auch keine Angaben über ein Mengenverhältnis dieser Rohstoffe gibt. Bei einer Bewertung der 80,4 Mg durch das Recycling bereitgestellten Goldmenge im Jahr 2007 mit dem mittleren Industriepreis ergibt sich ein Gesamtvolumen von 1,367 Mrd. €. Ohne die inländische Recyclinginfrastruktur würde ein Großteil der damit verbundenen Wertschöpfung im Ausland stattfinden.

Um die **monetäre Bruttoeinsparung des hochwertigen Kunststoffrecyclings** darzustellen, wurden die im bvse-Marktbericht [89] veröffentlichten Marktpreise nach Plasticker für Sekundärkunststoffe und nach EuWid für Primärkunststoffe verwendet. Tabelle 2 zeigt die ermittelten Einsparungen für die einzelnen betrachteten Kunststoffe. Im Falle der hochwertigen werkstofflichen Verwertung zeigt sich, dass die höchsten spezifischen Einsparungen beim PET und PVC vorliegen. Bei der Preisrecherche wurde davon ausgegangen, dass diese überwiegend als Mahlgut gehandelt werden. Wird das Mahlgut weiter zu Regranulat aufbereitet, steigen auch die Sekundärkunststoffpreise. Erfahrungswerte aus einer Expertenbefragung zu den rein „technischen Kosten“ für diesen zusätzlichen Aufbereitungsschritt liegen zwischen 100 und 150 €/Mg. Des Weiteren sind hier noch betriebswirtschaftlich bedingte Aufschläge zu berücksichtigen. Hierdurch würden sich spezifische und absolute Einsparung entsprechend verringern.

Für die Abgabe von **Mischkunststoffen zur Verwertung** lässt sich nicht wie bei den sortenreinen Kunststoffen ein Erlös erzielen. Hier sind Zuzahlungen notwendig, welche allerdings durch die Abfallgebühr beglichen sein sollten. Deshalb wurden für die Mischkunststoffverwertung generell nur die Marktwerte der substituierten Primärrohstoffe herangezogen. Volkswirtschaftlich betrachtet müssten die Zuzahlungen allerdings abgezogen werden, da diese Aufwendungen durch die Gebührenzahler getilgt werden. Wie bei der Betrachtung der rohstofflichen und energetischen Substitutionswirkungen der Abfallverwertung, wurden auch hier Substitutionsfaktoren berücksichtigt. In Tabelle 2 sind die monetären Einsparungen durch die werkstoffliche, rohstoffliche und energetische Verwertung der betrachteten Kunststoffe zusammengefasst.

Tabelle 2: Gesamteinsparungen der Wirtschaft durch die Verwertung der thermoplastischen Kunststoffe HD-/LDPE sowie PET und PVC im Jahr 2007

	HDPE	LDPE	PET	PVC
Hochwertige werkstoffliche Verwertung	20,463 Mio. €	44,218 Mio. €	45,610 Mio. €	96,111 Mio. €
Werkstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen	2,782 Mio. €	5,556 Mio. €	8,479 Mio. €	7,865 Mio. €
Rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen	4,362 Mio. €	8,690 Mio. €	2,558 Mio. €	0,442 Mio. €
Energetische Verwertung in MVA	73,503 Mio. €	163,323 Mio. €	34,512 Mio. €	40,983 Mio. €
Energetische Verwertung im EBS-Kraftwerk	10,542 Mio. €	23,190 Mio. €	4,605 Mio. €	
Energetische Verwertung im Zementkraftwerk	1,735 Mio. €	3,859 Mio. €	0,820 Mio. €	0,868 Mio. €
Monetäre Einsparung, gesamt	113,387 Mio. €	248,836 Mio. €	96,584 Mio. €	146,269 Mio. €

Materielle Effekte der Abfallwirtschaft hinsichtlich der Ressourcenproduktivität

Zur Ermittlung des Beitrags der Abfallwirtschaft zur Ressourcenproduktivität wurden die rohstofflichen und energetischen Effekte der Abfallverwertung mit der Inanspruchnahme von Rohstoffen in Beziehung gesetzt, die im Rohstoffproduktivitätsindikator der Nachhaltigkeitsstrategie erfasst werden.

Die Rohstoffproduktivität setzt das Bruttoinlandsprodukt mit physischen Einheiten, dem abiotischen direkten Materialeinsatz (DMI), ins Verhältnis. Der DMI im Nenner des Indikators wird in Gewichtseinheiten erfasst und enthält sowohl die inländisch entnommenen Rohstoffe als auch die Importe an Rohstoffen, Halb- und Fertigwaren. Um auch verwertete Rucksackflüsse zu erfassen, wurde der DMI in Rohstoffäquivalenten gemessen. Anhand dieses Indikators werden alle Güter mit ihren indirekten, wirtschaftlich genutzten Rohstoffflüssen abgebildet, die zu deren Herstellung notwendig, jedoch nicht Bestandteil der Güter selbst sind [136].

Die bislang berechneten kumulierten Rohstoff- und Energieaufwendungen passen sich daher in die Systematik des DMI in Rohstoffäquivalenten ein. Ohne die Vorketten im Ausland können die direkten Effekte des Sekundärrohstoffeinsatzes, d. h. die vermiedenen Importe und die inländisch gewonnenen abiotischen Rohstoffe, auf den DMI anhand des DERec quantifiziert werden.

Bei der Berechnung der spezifischen Energiemenge nach Primärenergieträgern für die Rohstoffäquivalente der einzelnen betrachteten Rohstoffe sind erneuerbare Energien und Fernwärme nicht berücksichtigt.

Der DERec lässt sich auf Basis der folgenden Rechnung näherungsweise bestimmen:

$$\text{DERec [Mg]} = \text{eingesparte Rohstoffmenge [Mg]} + \\ \text{eingesparte inländische Energiemenge [PJ]} * \text{Rohstoffäquivalent [Mg/PJ]}.$$

Durch den Einsatz von **Eisen- und Stahlschrott** wird Roheisen im Faktor 1,12 substituiert. Damit werden durch den Einsatz von 21,744 Mio. Mg Schrott im Jahr 2007 insgesamt 24,353 Mio. Mg Roheisen ersetzt. Zur Herstellung dieses Roheisens ist die 1,6-fache Menge an Eisenerzkonzentrat erforderlich, also insgesamt 38,965 Mio. Mg. Dieser eingesparten Menge stehen eine importierte Eisenerzmenge von 46,268 Mio. Mg sowie eine im Inland produzierte Eisenerzmenge von 0,434 Mio. Mg gegenüber. Somit wurden insgesamt 45 % einer potenziell benötigten Eisenerzmenge von 85,667 Mio. Mg eingespart.

Der Energieverbrauch zur Herstellung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen betrug im Jahr 2007 in Deutschland insgesamt 745,40 PJ [123]. Dem Energieverbrauch steht eine durch das Recycling von Eisen- und Stahlschrott eingesparte Energiemenge im Inland von 156,02 PJ gegenüber. Damit beläuft sich die Energieersparnis durch den Einsatz von Schrott auf 17 % der potenziell benötigten inländischen Gesamtenergiemenge von 901,42 PJ. In Summe ergibt sich aus der eingesparten Eisenerzmenge von 38,965 Mio. Mg und der eingesparten inländischen Energierohstoffmenge von 4,837 Mio. Mg ein DERec_{Fe} von 43,802 Mio. Mg.

Die Substitution von Kupfererzkonzentrat durch **Kupferschrott** erfolgt mit einem Faktor von 3,87. Damit werden durch die Herstellung von 364.000 Mg Raffinadekupfer aus sekundären Vorstoffen 1,485 Mio. Mg Kupfererzkonzentrat substituiert, unter der Berücksichtigung, dass aus 1 Mg Kupferschrott 0,95 Mg Raffinadekupfer entstehen. Zudem werden 530.000 Mg Kupfer durch den direkten Einsatz von Kupferschrott erzeugt, welche 2,159 Mio. Mg Kupfererzkonzentrat ersetzen. Somit werden insgesamt 3,644 Mio. Mg Kupfererzkonzentrat substituiert. Demgegenüber wurden im Jahr 2007 insgesamt 1,316 Mio. Mg Kupfererzkonzentrat eingeführt. Somit beläuft sich die prozentuale Einsparung durch den Sekundärrohstoffeinsatz auf 73 %. Eine spezifische Energiemenge zur Herstellung von Kupfer ist im Datensatz der UGR nicht ausgewiesen. Ausgewiesen ist lediglich der Energieverbrauch zur Herstellung von NE-Metallen und Halbzeugen daraus in Höhe von 86,75 PJ [123]. Dem steht eine Energieeinsparung im Inland durch die Erzeugung von Sekundärkupfer in Höhe von 5,44 PJ gegenüber. In Summe ergibt sich aus der eingesparten Kupfererzkonzentratmenge von 3,644 Mio. Mg und der eingesparten inländischen Energierohstoffmenge von 0,131 Mio. Mg ein DERec_{Cu} von 3,775 Mio. Mg.

Im Jahr 2007 wurden 80,4 Mg **Gold** in Deutschland recycelt. Da Gold am Ort der Gewinnung aufbereitet wird und bereits in Form von Reingold importiert wird, kann angenommen werden, dass der DERec_{Au} für das Recycling von Gold mit diesem Wert gleichzusetzen ist und demzufolge 80,4 Mg beträgt, also die Menge an Gold, deren Import durch das Recycling vermieden wurde. Während die energetischen Aufwendungen für die Herstellung von Gold erheblich sind, aber nahezu ausschließlich im Ausland erfolgen, wird der Energieaufwand für das Recycling von Gold im Inland getätigt. Diese sind aber im Einzelnen nicht bekannt bzw. zu vernachlässigen. Auf jeden Fall ist durch das Recycling von Gold keine Energieeinsparung im Inland zu bilanzieren sondern ein zusätzlicher Energieaufwand im Vergleich zum Import, dessen Höhe auf Basis der vorliegenden Daten jedoch nicht zu beziffern ist.

Bei der **hochwertigen werkstofflichen Kunststoffverwertung** werden Primärkunststoffe im Verhältnis von 1:1 durch Kunststoffgranulat ersetzt, welches aus Sekundärmaterialien erzeugt wurde. Beim $\text{DERec}_{\text{Hwv}}$ sind insbesondere die eingesparten Erdölimporte und sonstige abiotische Rohstoffe sowie die im Inland eingesparte Energiemenge zu berücksichtigen. Die eingesparte Erdölmenge und die der sonstigen Rohstoffe werden aus den einschlägigen GEMIS-Daten [16] errechnet. Tabelle 80 zeigt die mit der spezifischen Rohstoffeinsatzmenge bewertete Verwertungsmenge und die damit eingesparte Rohstoffmenge für die einzelnen betrachteten Kunststoffarten. In Summe ergibt sich aus der eingesparten Erdölimportmenge sowie der Menge an weiteren Rohstoffen von 0,610 Mio. Mg und

der eingesparten inländischen Energierohstoffmenge von 0,054 Mio. Mg ein $DERec_{HVV}$ von 0,664 Mio. Mg.

Tabelle 3: Eingesparten Rohstoffmengen für die einzelnen Kunststoffarten (nach GEMIS [16])

	Verwertete Menge [Mg]	Spezifische Rohstoffeinsatzmenge [Mg/Mg]	Eingesparte Rohstoffmenge [Mg]
HDPE	63.748	1,633	104.100
LDPE	105.282	1,640	172.662
PET	60.491	1,751	105.920
PVC	169.507	1,339	226.970
Summe			609.653

Da nicht bekannt ist, inwieweit Holz und Beton durch die **werkstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen** substituiert werden, wurde vereinfachend von zu gleichen Anteilen substituierten Holz- und Betonprodukten ausgegangen. Holz wird als nachwachsender Rohstoff nicht bilanziert. Der Substitutionsfaktor für Beton schwankt bezüglich der häufigsten Anwendungen zwischen 2,6 (Palisade) und 5,6 (Bauzaunfuß). Bei einem mittleren Substitutionswert und einer werkstofflich verwerteten Mischkunststoffmenge von 176.306 Mg wurden im Jahr 2007 demzufolge 361.427 Mg Beton durch Mischkunststoffe ersetzt. Nach GEMIS ist eine Tonne Beton mit einer Rohstoffentnahme von 1,034 Mg verbunden, die im Regelfall im Inland erfolgt. Demzufolge wurde durch den Einsatz von Mischkunststoffen eine inländische Entnahme von 0,374 Mio. Mg an Rohstoffen vermieden. Die gesamte Energieeinsparung wurde mit 1,98 PJ bilanziert, welche nachfolgend mit dem spezifischen Energiemix für die Erzeugung von Produkten der Forstwirtschaft (0,023 Mio. Mg/PJ) bzw. der Verarbeitung von Steinen und Erden (0,03 Mio. Mg/PJ) bewertet wird. Somit ergeben sich für jeweils 0,99 PJ Energieeinsparung 0,023 Mio. Mg Rohstoffeinsparung für Holz und 0,030 Mio. Mg Rohstoffeinsparung für Beton. In Summe kann unter Maßgabe der o. a. Annahmen für die Verwertung von Mischkunststoffen ein $DERec_{WVM}$ von 0,427 Mio. Mg bilanziert werden.

Durch die **rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen** wurden 2007 insgesamt 2,31 PJ Schweröl substituiert. Bewertet mit einem Heizwert von 39,5 GJ/Mg für Schweröl ergibt dies eine Schwerölmenge von 58.481 Mg. Der Rohstoffaufwand für den Import von Rohöl beträgt umgerechnet nach GEMIS [16] 1,059 Mg pro Mg Rohöl, dichtegewichtet 0,935 Mg/m³ Rohöl (bei 0,883 Mg/m³ Rohöl). Der Rohstoffaufwand für die Herstellung von Schweröl beläuft sich nach GEMIS [16] umgerechnet auf 1,073 Mg pro Mg Schweröl, dichtegewichtet 1,062 Mg/m³ (bei 0,990 Mg/m³). Danach ergibt sich ein Rohstoffaufwand im Inland von 0,127 Mg/m³ bzw. 0,128 Mg/Mg Schweröl. Insofern beträgt für das Jahr 2007 der inländische Rohstoffaufwand, der für die Herstellung des substituierten Schweröls eingespart wurde, 7.486 Mg. Insgesamt berechnet sich demnach der $DERec_{RVM}$ für die Substitution von Schweröl im Hochofenprozess durch den Einsatz von Kunststoffen aus 58.481 Mg substituiertem Schweröl sowie aus 7.486 Mg eingesparter sonstiger Rohstoffe und ergibt zusammen 65.967 Mg.

Durch die **energetische Kunststoffverwertung in MVA und EBS-Kraftwerken** werden elektrische Energie und Wärmeenergie erzeugt, welche mit dem jeweiligen Energiemix unter Beachtung des Wirkungsgrades zu bewerten sind. Der $DERec$ wird über die eingesparte Energiemenge berechnet, welche über den Strom- bzw. Wärmemix gewichtet wird. Von den dabei errechneten Energiequellen ist der Importanteil zu ermitteln, welcher nur mit den importierten Energieträgermengen in den $DERec$ eingeht. Für die im Inland erzeugten Energieträger ist der jeweilige Rohstoffaufwand zu ermitteln, was über Daten aus der GEMIS-Datenbank [16] erfolgt. So ergeben sich die in der folgenden Tabelle dargestellten $DERec$ für die energetische Verwertung der hier betrachteten Kunststoffe in MVA und EBS-Kraftwerken.

Tabelle 4: DERec für die Strom- und Wärmeerzeugung in MVA und EBS-Kraftwerken 2007

Verwertung in	substituierte Energie	DERec	[Mio. Mg]
MVA	Strom	DERec _{EVM-SMVA}	0,259 Mio. Mg
	Wärme	DERec _{EVM-WMVA}	0,264 Mio. Mg
EBS-Kraftwerk	Strom	DERec _{EVM-SEBS}	0,049 Mio. Mg
	Wärme	DERec _{EVM-WEBS}	0,021 Mio. Mg

Im Jahr 2007 wurde durch den Einsatz von **Mischkunststoffen im Zementwerksprozess** insgesamt eine Energiemenge von 4,89 PJ erzeugt. Bewertet mit dem Heizwert für Steinkohlenkoks errechnet sich, dass 170.383 Mg Steinkohlenkoks substituiert worden sind, was 1,498 Mg/Mg Steinkohlenkoks als Rohstoffaufwand für die inländische Steinkohlenkoksproduktion entspricht. Im Jahr 2007 wurden 67,2 % des Steinkohlebedarfs in Deutschland importiert [124]. Aus diesem Grund werden 32,8 % der eingesparten Steinkohlenkoksmenge mit dem Rohstoffaufwand für die inländische Steinkohlenkokserzeugung bewertet. 67,2 % werden lediglich als importierte Menge für den DERec_{EVM-Z} berücksichtigt, der für die Substitution von Steinkohlenkoks in Zementwerken für das Jahr 2007 198.214 Mg beträgt.

Zusammenfassende Darstellung des direkten Effekts der Verwertung (DERec) auf den DMI

Insgesamt werden durch die Verwertung der betrachteten Stoffströme 49,525 Mio. Mg eingespart, welche andernfalls zur Erzeugung der substituierten Rohstoffe und Energieträger aufgebracht werden müssten und den DMI gleichermaßen erhöhen würden. In Tabelle 85 sind die für die verschiedenen Materialströme errechneten DERec_i zusammengestellt. Bereits diese Teilmenge entspricht **3,7 %** des **DMI** der sich im Jahr 2007 auf eine Gesamtmenge von 1,35 Mrd. Mg der inländischen Entnahme und Einfuhr abiotischer Rohstoffe belaufen hat.

Tabelle 5: DERec_i der einzelnen Materialströme

Materialstrom	DERec _i 2007 [Mio. Mg]
Eisen und Stahl - stofflich	38,965
- energetisch	4,837
Summe	43,802
Kupfer - stofflich	3,644
- energetisch	0,131
Summe	3,775
Gold - stofflich	0,00008
- energetisch	-
Summe	0,00008
Kunststoffe - werkstofflich hochwertig	0,664
- werkstofflich Mischkunststoffe	0,427
- rohstofflich	0,066
- energetisch MVA	0,523
- energetisch EBS	0,070
- energetisch Zementwerke	0,198
Summe	1,948
Gesamtsumme	49,525

Fazit

Die Erarbeitung der Studie hat deutlich gemacht, dass die derzeit bestehende statistische Erfassung von Abfallströmen nicht den Anforderungen an ein Monitoring von Stoffströmen vor dem Hintergrund der Ressourcenschonung genügt. Durch eine stoffstromspezifische Gliederung, statt der derzeit üblichen herkunftsbezogenen Aufteilung, ist eine ganzheitlichere Darstellung der Abfallwege und die eigentliche Hochwertigkeit der Abfallverwertung mit den entsprechenden Sekundärrohstoffmengen besser darstellbar, was zu aussagekräftigeren Ergebnissen führt, als nur die erste Stufe der Abfallbehandlung zu betrachten. Auftretende Überschneidungen, durch einzelne in mehreren Abfallbehandlungsanlagen behandelte Abfälle, können durch eine stoffstromspezifische Art der Erfassung vermieden werden.

Mit der Konzeption des DERec (Direct Effect of Recovery) im Rahmen dieser Studie konnte ein aussagekräftiger Indikator mit Anschlussfähigkeit an den DMI ermittelt werden, um direkte Substitutionseffekte von Sekundärrohstoffen zu erfassen. Dieser sollte zukünftig auch für weitere relevante Sekundärrohstoffe ermittelt und fortgeschrieben werden. Obgleich biotische Rohstoffe nicht in den DMI zur Ermittlung der Rohstoffproduktivität innerhalb der Nachhaltigkeitsstrategie einfließen, sollten auch diese anhand des DERec bilanziert werden.

Für die recycelten Stahlschrottmengen ergab sich in Summe über die eingesparte Eisen-erzmenge und die eingesparte inländische Energierohstoffmenge ein $DERec_{Fe}$ von 43,802 Mio. Mg. Über die eingesparte Kupfererzkonzentratmenge und die inländische Energierohstoffmenge ermittelt sich ein $DERec_{Cu}$, der hier bei 3,775 Mio. Mg liegt. Der Beitrag des Goldrecycling ist mit einem $DERec_{Au}$ von 80,4 Mg äußerst gering, was auf den hohen Verarbeitungsgrad des importierten Goldes zurückzuführen ist. Dieser Wert ist zudem noch um die energetischen Aufwendungen für das Goldrecycling zu mindern, die allerdings auf Basis der vorliegenden Daten nicht zu beziffern sind. Durch die unterschiedlichen Formen der Kunststoffverwertung mit entsprechenden eingesparten Rohstoff- und Energiemengen ergibt sich insgesamt ein $DERec_{Poly}$ von 1,948 Mio. Mg. Der **DERec**, bestimmt über alle hier betrachteten Stoffströme in Höhe von **49,525 Mio. Mg**, quantifiziert die Menge an Rohstoffen und weiteren Gütern, die entweder inländisch gewonnen oder importiert werden müssten. Diese wären ohne das Recycling und die energetische Verwertung zur Erzeugung der substituierten Rohstoffe und Energieträger zusätzlich aufzubringen und würden zu einer erheblichen Steigerung des Materialinputs in die Volkswirtschaft führen. Der hier lediglich für die drei Metalle **Eisen/Stahl, Kupfer, Gold** und die Kunststoffe **HDPE, LDPE, PET** und **PVC** ermittelte **DERec** entspricht bereits **3,7 % des DMI**, der sich nach Angaben des Statistischen Bundesamtes im Jahr 2007 durch eine Gesamtmenge der inländischen Entnahme und Einfuhr abiotischer Rohstoffe von 1,35 Mrd. Mg [135] darstellt. Dies unterstreicht die außerordentliche Bedeutung der Sekundärrohstoffwirtschaft für die Ressourcenschonungsziele der Bundesrepublik.

VI. Abstract

The degree of substitution of primary raw materials by secondary raw materials cannot explicitly be seen in the resource productivity indicator of the national sustainability strategy. To incorporate the effects of substitution of primary raw materials, secondary raw materials should be considered in addition as a separate category. In the present study, a reproducible and continuously adaptable presentation of material flows of recyclable wastes has been developed and, on that basis, the contributions of the waste management sector to resource productivity are being described.

An effective and high quality management of waste through material and energy recovery or feedstock recycling makes a significant contribution to the saving of resources both in terms of primary commodities as well as energy sources. To quantify how energy and raw material savings are actually contributing to resource protection was often found to be difficult, however. Gaps in the waste statistics make up part of the problem for example. The statistics of the Federal Republic of Germany on waste does provide information about waste generation but it does not disclose, in what way the waste is eventually utilised. Built upon the European Waste Catalogue, the source-based compilation of statistical data makes it difficult to derive on complete material flows. Yet another factor is, that it is currently not possible to determine the contribution of waste management to resource productivity systematically. The raw material productivity indicates which economic output (in Euro) is generated from one ton of abiotic material input. Developed as part of the UFOPLAN project "Improvement of resource productivity and resource conservation - development of the direct material input indicator" [136] were commodity equivalents, which, instead of the actual weight of all goods, include the weight of the commodities necessary for their production in the calculation. As a result of the said project, the recommendation was derived to consider and display secondary raw materials in addition as a separate category in order to incorporate the effects of raw material substitution in the presentation.

For this purpose a first approach is being made in the present study to develop a reproducible and continuously adaptable presentation of material flows of recyclable wastes. An assessment of the current contribution of waste management to resource productivity is derived through the secondary raw materials being diverted from the quantity of treated waste for the production of new goods and by relating that amount to the primary raw material input. The data used here are for the **base year 2007**. With that, an attempt is undertaken to develop a measurement for the degree of value added by recycling, thus establishing the connection to gross domestic product which accounts for as enumerator in the calculation of the raw material productivity indicator. On that ground gaps in our knowledge on the impacts of raw material substitution can perhaps be seen and measures to further enhance resource productivity identified.

Material flow analyses

In a first step, the material flows of waste from the actual arising up to the finished utilisation were determined. Using a low level of detail, the material flows of metal, plastics, construction and demolition waste and biodegradable waste are presented based on the German waste statistics.

The basic data source for the mapping of material flows has been found in the public statistics supplied by the Federal Statistical Office. For verification of individual sub-flows the data of associations and organizations, such as the Steel Industry Association (WV Stahl), the Federal Association of German Steel Recycling and Disposal Companies eV (BDSV), the Economic Association Metals (WVM), the Federal Association for the Assurance of Compost Quality eV (BGK), the associated and plastics recycling corporation (BKV), Plastics Europe or the Association of German Pulp and Paper Association (VDP) were also reviewed. To ensure data consistency, the Federal Statistical Office was represented in the Advisory Committee formed for this project.

The data for the material flows of metals and plastics were determined through the combination of waste statistical data with such on material specific content. Beside the waste amounts from domestic sources also included in the considerations was the imported waste which has been processed in German waste treatment plants, likewise taken into account were the quantities exported.

Metals from the waste

Within the material flow for "metals" a division into ferrous and nonferrous metals has been made. A first outline of the flow chart for metals revealed the existence of waste material streams in the model where the content of the ferrous and nonferrous metals was not attributable to the disposal of metal-containing wastes but coming from background levels (of the fuels and building materials used). From these geogenic background levels 88% of Fe-metals and 66% of non-ferrous metals have been deposited on landfills. The specific concentrations of individual metals in these wastes are too low to justify a general economic recycling. The relevance as regards quantity is primarily deriving from the high volume of these wastes.

The material flow analysis of metals under the exclusion of the geogenic background levels came to a waste generation amounting to 11.56 million Mg Fe-metals and 3.89 million Mg nonferrous metals. The recycling of metals is exclusively done by way of material utilisation. Small amounts of metal-containing wastes are treated or disposed of in landfills or via waste incinerators. The waste statistics for 2007 reported an amount of 9.2 million Mg Fe-metals and 1.08 million Mg non-ferrous metals as "material recycled".

For the verification of this material flow data, statistics of the Steel Industry Association and the Economic Association Metals were used. In that course it was found that the public waste statistics contain significantly lower amounts of iron and steel scrap. Comparing the 9.2 million Mg of iron and steel scrap displayed in the waste statistics with the amount of 21.7 million Mg of used steel scrap published by the Steel Industry Association leads to a difference of 12.5 million Mg. Assuming that another 1.5 million Mg of iron and steel scrap, which the waste statistics list under the category of "Other Recovery", are also utilized in the iron and steel production, brings this difference down to 11.0 million Mg only. This finding let suspect that waste iron and steel scrap is traded to a considerable extent outside the official waste regime.

According to the statistics of the WV Stahl, the material recycled quantity of aluminium, copper, lead and zinc alone has a volume of 1.54 million Mg. The waste management statistics in contrast place the overall quantity of the directly material recycled non-ferrous metals at 1.08 million Mg. The probable fact that non-ferrous metals contained in the total amount of 3.33 million Mg noted for "Other Recovery" are also material recycled, may however explain the established difference of 0.46 million Mg and let both figures correspond better. Consideration must likewise be made on amounts of copper scrap which, for example, are used without refining directly as secondary raw material and thus not making their way into the waste management statistics.

Plastics from the waste

Plastics make up the material for many uses and are therefore distributed over many types of waste. The utilisation of plastic waste involves both material recycling and energy recovery. Energy recovery is aimed at energy generation mostly through the use of the high-calorific fraction as a fuel. Due to the high calorific value of plastics, the thermal treatment in solid waste incinerators is also counted for as energy recovery in this study. The material recycling is performed from the plastics industry. Landfill disposal represents the elimination path for plastics waste.

The material flows for plastic waste is comprehensively described for each individual type of plastic in the study BVK and Plastics-Europe commissioned under the title 'Production, processing and recycling of plastics in Germany 2007' (Consultic study) [5]. These data and the material stream as it can be derived from the data of Destatis series 19 row 1 are sepa-

rately shown in Sankey diagrams. The data in the whole show a relatively good agreement, such can be seen for example on the material recycled amount which was established to be about 2.3 million Mg according to the waste statistics and has been determined with 2.2 million Mg in the Consultic study. Differences are primarily the result of a different consideration of the proportion plastics take in waste mixtures, especially as far as the non-separated municipal waste is concerned. In the absence of reliable values from literature, only assumptions based on available empirical data could be used for some waste mixtures. The amount of production waste (especially from the plastics processing) was assessed to be smaller in the analysis of statistical data in comparison to the figures provided in the Consultic study.

Material flows selected for detailed investigation

An examination of material flows in greater detail was performed for iron and steel, gold and copper as well as for plastics of the type polyethylene (HD-/LDPE), polyethylene terephthalate (PET) and polyvinyl chloride (PVC). The selection of these detailed material flows was made in respect of their relevance for resource productivity, and here for the raw material productivity in particular. As criteria leading to their selection were considered the mass relevance, meaning in import/export, the access risk, the market price, resource stock, utilisation intensity, cumulative energy demand, raw material/cost consumption and recyclability.

Iron and steel

Iron and the steel derived from it are the world's most widely used metallic materials. In 2007, 48.6 million Mg of crude steel were produced [114] and about 41 million Mg of steel consumed in Germany [116]. The German steel industry provides more than 2,000 varieties of steel [117]. The construction industry, machine-building, the automobile industry as well as the transportation sector and the oil and gas industry are the major steel consumers in Germany. Particularly important is the use of steel in the construction sector for the structural engineering, house building and construction of transport infrastructures, especially bridges.

From the waste statistics an amount of steel in the waste of 12.1 million Mg was calculated for the year 2007. For the most part this amount passed through waste treatment plants, resulting in 9.2 million Mg of steel scrap forwarded from waste treatment to material recycling. Further quantities of steel scrap were imported, purchased from other sources or came directly from the steel works, bringing the total volume of steel scrap to 30.2 million Mg in 2007. From that about 8.5 million Mg went into exports while the rest was sent to scrap recycling, which predominantly occurred in electric arc furnaces.

Smaller quantities of steel scrap are also used to cool the exothermic process during the production of oxygen steel. The 48.6 million Mg crude steel produced in Germany in 2007 were to nearly 69% obtained from the oxygen steel furnace and to 31% in the electric arc furnace, according to the Steel Centre [116]. Due to the specific quality requirements of steel products no complete substitution of pig iron by the use of steel scrap is possible. Certain types of steel can even be produced from pig iron solely.

As part of the overall production of 48.6 million Mg crude steel in 2007 were used 21.7 million Mg steel scrap. The share of scrap steel in the total amount of steel produced thus came to 44.7%. From the 21.7 million Mg steel scrap were obtained 15.6 million Mg of electrical steel and 6.1 million Mg oxygen steel. The vast amount of the steel scrap used for crude steel production are heavy items from old steel.

Copper

The copper consumption in Germany, which takes into account the production of a quantity of 1.857 million Mg semi-finished products and 93 thousand Mg of copper casting, goes far beyond the production of refined copper. The difference is compensated by imports, the use of copper scrap and secondary skimmings. For the year 2007 an amount of secondary copper originating from domestic sources of 530 thousand Mg was set for the flow model, calculated over the use of copper scrap and secondary skimmings. The proportion of secon-

dary skimmings such as slag and dross in copper refining made up 55% in 2007. 364 thousand Mg out of the total of 666 thousand Mg refined copper were made from secondary skimmings. For Germany as an import-dependent country it is of great importance with regard to its security of supply that a high proportion of secondary raw material is available.

Apart from the export of refined copper and semi-finished copper products of great importance is the outflow of copper as a component of various equipment and machinery. How much of copper this comprises cannot be identified, however. Copper is imported to Germany in various stages of processing. Copper ore and concentrates with 1.3 million Mg in aggregate represent the largest import volumes. Also, the amounts of copper which are imported with finished goods cannot be determined separately.

In the frame of the material flow analyses a volume of 0.27 million Mg copper waste was established. Most of it was forwarded to recycling via waste treatment facilities. About 0.15 million Mg of waste containing copper were sent to the treatment installations specifically with the aim of copper recovery. Taking also into account imported quantities, the purchase from other sources and recovered copper scrap brings the total amount of old copper in 2007 up to 1.18 million Mg. 0.89 million Mg from that amount were reused in Germany.

Gold

The total quantity of gold used in Germany in 2007 amounted to 97 Mg, of which 16.6 Mg came from imports [61]. About half of that quantity went into industrial production whereas processing from the jewelry industry consumed approximately 18%. The remaining 32% served value investment and asset protection purposes and were moulded into gold bars, or had been used for coinage and in the foodstuff and pharmaceutical industries. The material flow analysis shows significant import and export movements of gold with a considerable surplus on the import side.

For the recycling of gold two ways are principally followed in Germany. The company Aurubis AG wins back gold during the recycling of electronic and copper scrap in that the fractions won from crushed WEEE are forwarded to pyrometallurgical processes. Here, the precious metals are concentrated in the copper and then separated from the copper by electrolysis. The gold is eventually recovered through further refining steps. The second way is the recycling of gold in gold parting facilities, where especially the gold from jewelry shops, dental gold and other scrap materials with a high proportion of gold is processed and the gold concentrated by electrolysis to pure gold.

Gold containing parts from electrical and electronic equipment only go to gold parting facilities in very small extent and when a high yield can be expected due to an advanced degree of pre-treatment [66]. Reliable data on the recovered amount of gold could not be obtained, however. The extraction of gold from electrical and electronic equipment is conducted in large scale in Germany exclusively from the Aurubis AG. Aurubis produces annually about 3.5 Mg gold from the recycling of WEEE [67]. It can be assumed that this amount corresponds to the amount of gold contained in the WEEE collected in Germany. WEEE amounts exported to the companies Boliden in Sweden and Umicore in Belgium are compensated by equally large quantities of WEEE that the German Aurubis AG acquires from abroad. Non-exhaustively detectable are those amounts of gold, which leave or flow into the country as part of various kinds of waste and scrap equipment imported and exported. Missing for that are general data on the gold content in the different wastes concerned [2, 29].

Thermoplastics viewed on the example of HD-/LDPE, PET and PVC

The overarching, all-embracing approach and balance the Consultic study delivers on the different quantities of plastics produced, processed and discarded in Germany have not just made it a basis for the elaboration of the overall material flow for plastics, her data gave significant input for the detailed material flow analysis as well. This work of Consultic is published every two years. Corresponding to the year chosen as reference for this research the study publication for 2007 was used [5]. The figures which were taken to describe the import and export of plastic products and granule are based on the records kept on the

import and export movements of goods in Chapter 39 of the Federal Index on Goods of the Federal Statistical Office. While referring to these data one has to bear in mind that import and export quantities of primary plastics also include purified recycled materials as there exists no differentiation for granule made from recycled plastic wastes in the custom's code for primary goods [76] and a separate presentation using data from Destatis is not possible either [77].

Imported and exported plastics integrated in products cannot be tracked as to their type considering that the customs statistics only register the kind of product, thus making the material used for their processing no longer detectable. The import and export figures for plastic waste were obtained from the statistics the Federal Environment Agency is keeping on the import and export of waste not subject to notification procedures [2].

In 2007 treated as post-consumer waste in Germany were 0.33 million Mg HDPE, 0.73 million Mg LDPE, 0.29 million Mg PET and 0.40 million Mg PVC waste. The distinction between post-consumer waste and waste from production and processing was adopted from the nomenclature of the Consultic study [5]. This source does not provide a further differentiation of post-consumer waste by industrial branches, however. These amounts were derived by way of an extrapolation of the percentage of different plastic quantities processed in the identified sectors in different years. This was combined with an attempt to also take into account the useful life of plastics until these become a waste.

An assessment of the post-consumer waste according to industrial branches is of relevance for establishing the utilisation pathways for plastic waste as separate records for material utilisation, feedstock recycling and energy recovery are unavailable. The Consultic study [5] only states the disposal pathways for all plastic wastes with a differentiation of the utilising industries. The recycling methods however differ greatly in the various industries hence making such a differentiated view necessary. With the approach taken it cannot be excluded that some deviations from the real flows do occur. The verification undertaken for the used data with the help of the PVC study of AGPU for the year 2007 [80] and the Vinyl 2010 Progress Report for the year 2007 [87] has shown a high degree of conformity, however.

The material utilisation, feedstock recycling and energy recovery of plastic waste is performed in various ways. In Figure 1 are presented the amounts of different types plastic waste and their allocation to the main utilisation outlets.

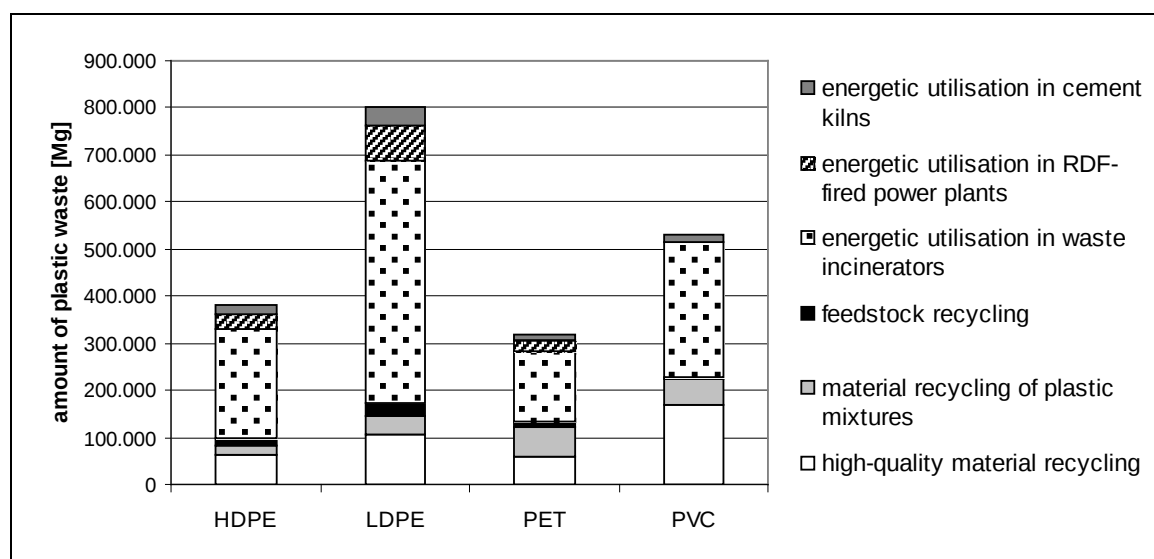


Figure 1: Utilisation pathways for plastic waste (post-consumer and production waste)

In case of material utilisation, a further differentiation between the applied process and the substituted raw material must be made depending on whether the supplied plastic waste are of pure quality or mixed plastic materials. Plastic products suitable for the substitution of primary plastics can be obtained with high-quality recycling from unmixed plastic fractions. The material recycling of plastic mixtures on the contrary uses thermoplastic deformation for

the manufacturing of applications that serve primarily as a replacement of wood or concrete products. In the case of plastics production waste a high-quality material recycling for the substitution of primary plastics is assumed. As feedstock recycling is concerned the underlying assumption is that the recovered plastics are used as reducing agents in blast furnaces, thus substituting heavy oil. For the plastic waste used in energy recovery, a breakdown corresponding to the known share of disposal in waste incinerators and via cement plants and RDF-fired power plants has been undertaken.

Waste utilisation effects

The quantities of waste and secondary materials as derived from the material flow analyses set the basis for the calculation of the material, energy and other economic savings obtained from their utilisation. For this the raw material substitution achieved with these amounts was to be determined.

Of crucial importance in determining the substitution effect is the substituted product respectively commodity. In the case of metals, where material recycling is the principal way to go, it is assumed that a direct substitution of the corresponding raw metal components is taking place. Looking on the different qualities of plastic waste, and various recycling pathways that exist for them makes it clear that a much wider range of raw materials and primary energy sources taking the form of plastics and non-plastics can be substituted. Figure 2 provides an overview for this.

Often it is not the case that recycled waste replaces primary raw materials in a 1:1 ratio (for example due to preparation losses), therefore substitution factors were to be applied. These factors stand representatively for the amount of primary raw materials or energy carriers substituted per Mg input of the corresponding waste-derived material. Where a substitution occurred for different materials, a corresponding weight factor was taken into account. In plastic waste utilisation leading to a replacement of energy carriers, such as crude oil, the substitution factors are a function of the plastics heating value. The substitution effect that can be attained in the case of mixed plastics utilisation in waste incinerators and RDF-fired power plants is based on the German mix of electricity and heat generation.

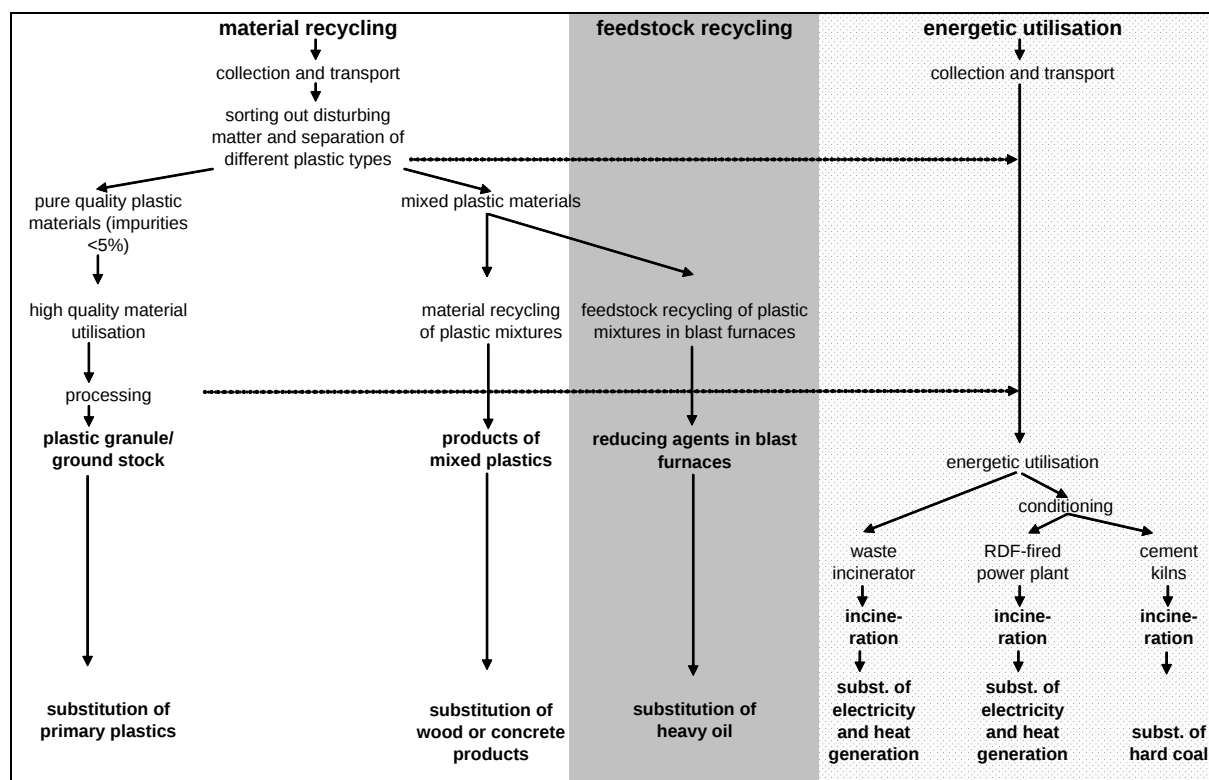


Figure 2: Utilisation pathways for plastic waste

For the presentation of feedstock and energy substitution effects the indicators **cumulative energy demand (KEA)** and **cumulative raw material demand (KRA)** were employed. The KEA is measuring the total (primary) energy input needed for the provision of a specific product or service. Carriers of primary energy find consideration in the KEA also when they were just used as materials (e.g. crude oil in the production of plastics). The cumulative raw material demand depicts the total of all material resources introduced into a system expressed in units of weight [59].

The unavailability of GEMIS records for secondary plastics made it necessary to take information from other sources to perform the KEA analysis in this specific sector. KEA findings in conjunction with corresponding raw material data for the generation of electric and diesel power finally allowed to calculate the KRA.

Economic effects that could be obtained from the utilisation of the metals and plastics covered under this study were expressed by means of market price comparisons. The difference in the price, which is mainly determined from quality differences, reprocessing and transportation costs and the like can be set equal with the gross expenses that raw material processing companies could ideally save by using recycled materials for their production.

Determining the contribution of the secondary raw material input to the indicator Direct Material Input (DMI) was made possible by using a complementary term for the approximate assessment of the direct effects from secondary raw material use based on saved primary raw material and primary energy carriers without preceding steps (Direct Effect of Recovery, "DERec"). This is a virtual parameter which reflects, to what extent primary raw materials or energy carriers, but also semi-finished and finished goods would have to be provided domestically or through imports, assuming the same pattern of production. The DERec represents an approximate value, since, for example, no auxiliary materials and additives from domestic sources are accounted for. As comparative data for the energy consumption of each individual branch of production, the data of the overall environmental-economic accounting scheme (UGR) have been used [123].

Utilisation of recovered iron and steel

Depending on the application of the crude steel and the process used for its production, different scrap grades are used in the steelworks in varying proportions. In the oxygen steel process up to 20% steel scrap can be used. For electric steel processes, the input of steel scrap can go as high as 100%. The use of iron and steel scrap in the iron and steel making substitutes pig iron, which otherwise has to be imported or produced in a highly energy demanding process in the blast furnace from imported iron ore. The substitution effect obtained from using scrap in electric arc processes is to be evaluated over the oxygen steelmaking process. Here, the raw material substitution must be looked at only as no energy savings can be accounted due to the exothermic nature of the oxygen process when scrap is used. Substituted through the use of 6.124 million Mg of iron and steel scrap were 6.859 million Mg of pig iron and a total of 17.333 million Mg commodities saved. However, with most of the scrap actually serving cooling purposes in the process, this remains a rather theoretical potential which to mention is worth as a basis for the calculation of the substitution effect only.

The recycling of scrap steel in the electric steel process replaces completely the oxygen steelmaking process for the quantity of electric steel produced. Having calculated the oxygen steel making scenario of this study after GEMIS 4.6 [16] with 16% scrap, requires the substitution effect on pig iron to be also considered fictitiously in the balance sheet. With 16% of scrap use in 2007, 6.069 million Mg pig iron had been substituted. Electric steel production in 2007 led to savings of 46.025 million Mg raw materials and 230.45 PJ in energy consumption.

Altogether these balances reveal raw material savings of 63.358 million Mg and 230.45 PJ of energy through the use of steel scrap into for 2007.

These savings include both, raw materials and energy in Germany, but to a large extent also the consumption of raw materials and energy abroad. Under the assumption that iron ore concentrate was 100% imported, 38.965 million Mg of iron ore imports were saved from the use of 21.744 million Mg scrap iron in 2007. To this must be counted in addition the fictitiously saved pig iron from the substituted oxygen steel production, amounting to 9.71 million Mg of iron ore concentrate and thus bringing the quantity of saved pig iron imports up to 48.675 million Mg in total.

Spared imports of agglomerated and non-agglomerated iron ores through the use of scrap eventually lead to savings of raw materials amounting to 50.961 million Mg and savings on primary energy carriers equivalent to 74.43 PJ.

Calculated overall savings totalling 63.358 million Mg for raw materials and 230.45 PJ in energy mean that avoided imports of iron ore concentrates from using scrap are attributable for 80% of total raw material savings and 32% of the total savings of primary energy sources to iron ore production in the countries of origin and the transportation of iron ore concentrates.

Utilisation of recovered copper

Electrolytic refining allows for a complete separation of precious and non-precious impurities from copper scrap. In that way, a repeated recycling without losing value is possible [22]. Substitution effects arise in primary copper generation where copper scrap is used to substitute copper ore concentrates, as well as through the production of secondary copper which means a replacement of primary copper production through the use of copper scrap and secondary skimmings.

In 2007, a total of 666 thousand Mg refined copper were produced, of which 364 thousand Mg had been made of copper scrap. With the production of 364 thousand Mg refined copper from secondary material have been substituted 1.485 million Mg copper ore, which relates to savings of 47.512 million Mg of raw materials and 32.43 PJ of energy.

Secondary copper production using copper scrap and secondary materials as input totalled 530 thousand Mg in 2007. Taking into account the substitution effect from the share of copper scrap amounting to 0.57 Mg per Mg primary copper and the substitution ratio of copper scrap and copper ore with the factor 3.87 results in 1.169 million Mg substituted copper ore. The production of secondary copper from copper scrap and secondary material in 2007 account for 70 million Mg saved raw materials and energy savings equivalent to 48.59 PJ.

Copper recycling in 2007 comprising the utilisation of secondary materials in the copper refining process or use of copper scrap in the overall saved 117.517 million Mg of raw materials and 81.02 PJ of energy.

As is the case for iron and steel there is a significant share of savings seen outside the country in result of the German economy's dependence from copper exports. Substituted through the use of 894 thousand Mg scrap and secondary materials in 2007 was the amount of 3.46 million Mg water-free copper concentrate. With the use of secondary materials and copper scrap avoided imports of copper concentrate allowed total savings of 110.727 million Mg of raw materials and 75.58 PJ of energy to be made in the countries of origin.

94% of the saved material resources and 93% of the saved primary energy sources can consequently be allocated to the generation of copper ore concentrates in the countries of origin and to their shipment.

Utilisation of recovered gold

Gold recycling in Germany is basically done from the Aurubis AG as part of the recycling of electronic and copper scrap and via gold parting facilities. The material flow analysis for this material stream showed that a total of 80.4 Mg of gold has been recycled in Germany in 2007. There are no values available which describe the KRA and the KEA for this gold

recycling process. The Federal Environmental Agency [59] has published, based on data from 2007, the following values for the global gold mining:

KRA: 740,317,694 kg/Mg

KEA: 261,210,200 MJ/Mg

When gold is recycled, it can be assumed that the cumulative raw material demand is almost completely saved because the gold recycling predominantly occurs from highly concentrated starting materials. The demand on energy sources are expected to be negligible in relation to the high raw material consumption.

The quantitative assessments of the study are grounded in the assumption that energy and raw material needs caused from gold mining activities are completely avoided with the recycling of gold, which however refers to a demonstration of the upper limit of the achievable saving potentials.

With the recycling of 80.4 Mg of gold in 2007 savings in gold imports equivalent to 59.522 million Mg of raw material and up to 21 PJ of energy resources had been possible. These savings occurred to almost 100% in the country of origin, where also the processing of gold-bearing rock is taking place.

Utilisation of thermoplastics using the example of HD-/LDPE, PET and PVC

The utilisation processes for the individual thermoplastics under consideration usually do not differ significantly from each other (high-quality material recycling) or, as in the case of mixed plastics, are even identical. Against this background a joint presentation of the baseline data is given whereas the results of the analyses are displayed side by side for comparative purposes.

As a consequence of the additives contained and the material aging a loss of quality has to be noted in each cycle of **high quality plastic recycling processes**. Most plastics can be recycled about 3 to 5 times. The comparison of primary plastics with secondary plastics presented hereafter follows the utilisation path up to and including the generation of the granule.

The energy needed for sorting and processing pure HD and LDPE plastics to regranule is about 9000 MJ / Mg [93]. Segregated PET bottles, for which the cleansing step, "melting in the extruder" can be omitted, are usually present in the form of PET flakes after the treatment [92]. In that case the energy demand was determined to reach 5,400 MJ / Mg. For PVC the KEA used was fixed at 15,000 MJ / Mg [94]. The KEA combined with corresponding feed-stock data for electric and diesel power generation provided the basis to establish the KRA respectively.

Table 1 lists the material and energy savings which can be attained in result of the substitution of primary plastics with the high-quality material recycling of 63,748 Mg HDPE, 105,282 Mg LDPE, 60,491 Mg PET and 169,507 Mg PVC. For all the said plastic types together were saved in 2007 a total of 501,977 Mg raw materials and 24.1 PJ of energy.

An overview on the methods considered for **mixed plastics utilisation** is given in Figure 2 together with the substituted products. Table 1 supplies the individual findings made with regard to raw material and energy savings obtained with the high-quality material recycling and mixed plastics utilisation.

Aim of the material recycling of mixed plastics are products obtained by way of crushing and subsequent melting in the extruder. A purification and separation of the plastic mixture is not necessary here, pre-processing is mostly done in one operation with the production of the product (thick-walled plates/profiles). Folding boxes, park benches, marker post studs, flower pots, etc. are for example known as final products. Usually these articles stand for a substitution of wood and concrete materials, thus the comparability is limited to the functional use of the products only. This made it necessary to rely on substitution factors related to the specific material use.

The analyses pertaining to **feedstock recycling** was focussing on the mixed plastics utilisation in the blast furnace, through which heavy oil is substituted. A sorting and processing of plastic waste is necessary here since certain quality requirements have to be met from the mixed plastics.

To estimate the **energy recovery** taking place in **ordinary waste incinerators**, averages of the net electrical and thermal efficiency of German waste incinerators in 2007 were analysed. Corresponding to the calorific value of plastics, a specific amount of heat and electric energy generated in the result of the energetic utilisation was determined. The transportation needs for the plastic waste to reach the incinerator were deducted from the calculated energy generation. A demand for transportation and processing (conditioning) also exists to supply plastics for use as fuel in the energy recovery processes of RDF-fired power plants. Using average net efficiencies of RDF power plants in Germany and the electrical and thermal energy savings resulting from the use of RDF as reference parameters gave the basis for the calculation of the obtained raw material and energy savings.

Plant efficiency is not part of the considerations which have been made on the recovery of energy in cement plants in comparison with hard coal as the fuel substituted. Instead, KEA and KRA values are being used for the amount of coal substituted.

Table 1: Total raw material and energy savings attained from the utilisation of the thermoplastics HD-/LDPE, PET and PVC in the year 2007

		HDPE	LDPE	PET	PVC
total utilised amount		380,376 Mg	801,842 Mg	317,868 Mg	532,184 Mg
High-quality material recycling	Raw material savings	86,538 Mg	150,406 Mg	135,318 Mg	129,715 Mg
	Energy savings	4.31 PJ	7.60 PJ	5.61 PJ	6.58 PJ
Material recycling of mixed plastics	Raw material savings	58,080 Mg	116,022 Mg	177,054 Mg	164,235 Mg
	Energy savings	0.22 PJ	0.45 PJ	0.68 PJ	0.63 PJ
Feedstock recycling of mixed plastics	Raw material savings	7,267 Mg	14,479 Mg	2,254 Mg	-252 Mg
	Energy savings	0.63 PJ	1.26 PJ	0.36 PJ	0.06 PJ
Energetic utilisation in waste incinerators	Raw material savings	145,310 Mg	323,179 Mg	68,220 Mg	81,622 Mg
	Energy savings	5.91 PJ	13.15 PJ	2.78 PJ	3.31 PJ
Energetic utilisation in RDF-fired power plants	Raw material savings	21,877 Mg	48,654 Mg	9,542 Mg	
	Energy savings	0.90 PJ	2.01 PJ	0.39 PJ	
Energetic utilisation in cement kilns	Raw material savings	34,915 Mg	77,652 Mg	15,918 Mg	15,551 Mg
	Energy savings	1.17 PJ	2.61 PJ	0.55 PJ	0.56 PJ
Plastics utilisation in aggregate	Raw material savings	353,986 Mg	730,391 Mg	408,307 Mg	390,511 Mg
	Energy savings	13.15 PJ	27.06 PJ	10.37 PJ	11.14 PJ

An extrapolation of each substitution effect attained with plastics recycling in terms of feedstock and energy savings showed the largest overall savings in the area of LDPE. The large recycled quantity of this type plastic marks the decisive factor here. PET scores high points as regards the substitution effects attained with the material recycling even though the recycled amount is much smaller. The decisive advantage is founded in the pre-processing which is very efficient. PVC, due to the low energy content and the additional preparation needs shows little specific substitution effects, raw material and energy savings are thus at a

rather low level despite the relatively large amounts recycled. Particular attention must however be given on that the major application of PVC is in the construction sector where the needs for preprocessing of the different recovered C&D materials from PVC (e.g. window frames, roofing membranes) are strongly varying and would therefore require separate and more detailed analyses. The need to further enhance and set up a more detailed data base in this field must hence be highlighted here.

The economic effects of recycling

To estimate the **economic effects of steel scrap recycling** the monthly average scrap prices (published in the magazine EuWid [12]) for the reference year 2007 determined in form of mean values for each category of steel scrap have been mirrored against the monthly price for pig iron (export price from Russian seaports [91]). German domestic pig iron market prices could not be established in a comprehensive manner for the year in question. As the production chain is concerned, steel scrap and pig iron can be treated in the same way. A complete substitution of pig iron by steel scrap is however impossible considering certain quality standards that must be observed.

On the basis of the mean consumption of different categories steel scrap by the German steel industry [17], a weighted average price of scrap steel was determined. This weighted steel scrap price was found to be 218 € / Mg and thus 31 € below the average pig iron price in 2007 which has been established with 249 € / Mg. The 21.74 million Mg scrap steel, which were used for the electric and oxygen steel production in 2007 allowed theoretical cost savings by spared primary raw materials of 674 million € to be made.

By comparing the market prices for copper and copper scrap and bringing them in relation with total copper quantities, the **monetary savings through the use of copper scrap** can be derived. Prices for copper scrap are classified on the market for thirteen different qualities. The magazine EuWid publishes weekly wholesale purchase prices ex store for seven copper grades in the form of price ranges [12]. With no figures for the distribution of copper scrap to the different copper qualities being available, an average price for the different grades was to be used. Copper scrap in the reference year has had an annual average value of 4,315 € per Mg on the market. Compared to the average annual market price for copper of 5,242 € per Mg the difference is 927 € per Mg. Seen for the total quantity of 894 thousand Mg secondary copper and copper scrap used in production, financial savings of 828 million € could be attained.

The price of **gold** is strongly linked to the development of supply and demand whereby for the latter a close relationship with the predicted global economic development can be observed. Based on the heavily fluctuating monthly mean values an average market price of approx. 17,000 € per kg solid gold and approx. 18.000 € per kg processed gold could be calculated for 2007. There are no separate prices for primary and secondary gold published, just as there are no information available about the ratio at which both commodities are present on the market. Rating the 80.4 Mg avoided gold imports by recycling in 2007 with the average industry price shows a saving potential of up to € 1.367 billion.

For illustrating the **gross monetary savings attainable with high-quality plastic recycling**, the market prices from the bvse market report [89] and those published in the Plasticker for secondary plastics and in the magazine EuWid for primary plastics were used. Table 2 presents the estimated savings for the individual plastics under consideration. In the case of high-quality material recycling can be seen that the highest specific savings are made for PET and PVC. For the research made in prices it was assumed that the materials are mostly traded in a milled state (grind plastics). An increase in the secondary plastics price can be noted when the grinded plastic is further processed to regranule. Expert experience laid down in a survey put the pure "technical costs" for this additional purification step between 100 € and 150 € per Mg. Moreover, there are business-related costs that need to be considered in addition. These would lower the specific and absolute financial saving that can be attained accordingly.

Unlike for pure plastics, **utilising recovered mixed plastics in production** is generally not associated with positive proceeds for the user. Till now, an additional charging is usually required in the form of co-payments, which should be covered by the fees collected for the disposal of the corresponding waste however. That is the reason why only the market value of the substituted primary raw materials was taken into consideration while elaborating the economic balance of mixed plastics utilisation. From the national economics view point these payments would have to be deducted from the results of the saving balance, as they represent expenses paid by the general public through fees. As in the analysis of the substitution effects of waste recycling with regard to feedstock and energy savings, substitution factors were also applied here. Table 2 shows the monetary savings from the material use, feedstock recycling and energetic utilisation of all plastics covered from the study in an overview.

Table 2: Total economic savings attained in 2007 with the utilisation of thermoplastics HD-/LDPE, PVC and PET

	HDPE	LDPE	PET	PVC
High-quality material recycling	20,463 Mio. €	44,218 Mio. €	45,610 Mio. €	96,111 Mio. €
Material recycling of mixed plastics	2,782 Mio. €	5,556 Mio. €	8,479 Mio. €	7,865 Mio. €
Feedstock recycling of mixed plastics	4,362 Mio. €	8,690 Mio. €	2,558 Mio. €	0,442 Mio. €
Energetic utilisation in waste incinerators	73,503 Mio. €	163,323 Mio. €	34,512 Mio. €	40,983 Mio. €
Energetic utilisation in RDF-fired power plants	10,542 Mio. €	23,190 Mio. €	4,605 Mio. €	
Energetic utilisation in cement kilns	1,735 Mio. €	3,859 Mio. €	0,820 Mio. €	0,868 Mio. €
Plastics utilisation in aggregate	113,387 Mio. €	248,836 Mio. €	96,584 Mio. €	146,269 Mio. €

Material impacts of waste management with regard to resource productivity

To assess the contribution of waste management to resource productivity, the raw material and energy effects of waste utilisation were put into relation with the use of raw materials, which are incorporated in the raw material productivity indicator of the sustainability strategy.

The indicator resource productivity links the gross domestic product with physical units, in that the ratio with the abiotic direct material input (DMI) is established. The DMI as the denominator of the indicator is measured in units of weight and contains both, the domestically extracted raw materials and imports of raw materials, semi-finished and finished goods. In order to also cover the flows of recycled material which incur as the ecological rucksack, the DMI was measured in raw material equivalents. With this indicator all goods are displayed with regard of their indirect, economically relevant commodity flows that are needed for their production, but not part of the goods themselves [136].

The previously calculated accumulated raw material and energy demands thus fit into the systematic of the DMI in the form of raw equivalents. Without consideration of the pre-production chains abroad, the direct effects of the secondary raw material use, i.e. the avoided imports and domestically acquired abiotic raw materials can be quantified for the DMI on the basis of the DERec.

In calculating the specific amount of energy per primary energy source for the raw material equivalent of each individual resource, renewable energy and district heating are not quantitatively taken into account.

The DERec can be approximated based on the following calculation:

$$\text{DERec [Mg]} = \text{amount of raw materials saved [Mg]} + \text{saved domestic energy quantity [PJ]} * \text{raw material equivalent [Mg / PJ]}.$$

Pig iron is substituted by the factor 1.12 through the **use of iron and steel scrap**. A total of 24.353 million Mg of pig iron was hence replaced by the use of 21.744 million Mg scrap in 2007. To produce this amount of pig iron the quantity of iron ore concentrate needed is of factor 1.6 thus totalling 38.965 million Mg. This saved amount is to be compared with an quantity of imported iron ore amounting to 46.268 million Mg and a domestically produced volume of iron ore of 0.434 million Mg. The total savings made are therefore 45% of the iron ore amount of 85.667 million Mg potentially required for production.

The energy consumption for the production of pig iron, steel and ferro-alloys in 2007 was 745.40 PJ in Germany as a whole [123]. This energy consumption is to be seen in a context with a domestically saved amount of energy from the material recycling of iron and steel scrap totalling 156.02 PJ. Thus, the energy saving made through the use of scrap is 17% of the potentially required total domestic energy demand of 901.42 PJ. The iron ore savings in the amount of 38.965 million Mg and 4.837 million Mg saved domestic energy resources in aggregate give a $\text{DERec}_{\text{Fe}^*}$ of 43.802 million Mg.

The substitution of copper ore concentrate by **copper scrap** takes place with a factor of 3.87. Calculating with the fact that one Mg copper scrap is sufficient for 0.95 Mg refined copper leads to the result that with the production of 364 thousand Mg refined copper from secondary material 1.485 million Mg copper ore concentrates are substituted. The additional 530 thousand Mg of copper which are produced directly from scrap copper replace 2.159 million Mg copper ore concentrate. In total, copper ore concentrate in the amount of 3.644 million Mg are thus being substituted. Compared with that a total of 1.316 million Mg copper ore was imported in 2007.

The percentage reduction attained by the use of secondary raw material has consequently been 73%. A specific amount of energy consumed for copper production is not reported in the UGR record. It only shows the energy consumption for the production of nonferrous metals and semi-finished products reaching the amount of 86.75 PJ [123]. The domestic energy savings made with the production of secondary copper were calculated to be 5.44 PJ. The total savings in copper ore concentrates amounting to 3.644 million Mg and the 0.131 million Mg saved domestic energy resources in aggregate give a DERec_{Cu} of 3.775 million Mg.

In 2007, 80.4 Mg **gold** were recycled in Germany. Since gold is processed at the mining site and imported in the form of pure gold already, it can be assumed that the DERec_{Au} for the recycling of gold is equal to this value and therefore amounts to 80.4 Mg, thus the amount of gold, whose import was avoided by recycling. The energy needed for the production of gold is almost exclusively consumed abroad, whereas for the recycling of gold the energy required comes from within the country. This demand is not known in detail but assumed to be negligible. In any case, no energy savings can be accounted through the recycling of gold domestically instead an additional demand of energy in comparison to import arises. The available data did not allow to quantify this amount, however.

Within a high-quality material recycling of plastic primary plastics are replaced in a 1:1 ratio with plastic granule made from secondary materials. In the $\text{DERec}_{\text{HwV}}$ the savings in oil imports and of other abiotic raw materials and the amount of saved domestic energy are of particular importance. The saved amounts of oil and other commodities are calculated from the relevant GEMIS data [16]. Table 3 shows the utilised amount assessed with the specific amount of alternative raw material use and the amounts of raw materials saved for each type of plastic under consideration. The total savings made on oil imports and other raw materials of 0.61 million Mg and the 0.054 million Mg of saved domestic energy resources in aggregate give a $\text{DERec}_{\text{HwV}}$ of 0.664 million Mg.

Table 3: Saved raw materials from secondary plastics utilisation differentiated for each type of plastic produced (according to GEMIS [16])

	Utilised amount [Mg]	Specific raw material input [Mg/Mg]	Raw materials saved [Mg]
HDPE	63,748	1.633	104,100
LDPE	105,282	1.640	172,662
PET	60,491	1.751	105,920
PVC	169,507	1.339	226,970
Total			609,653

As it is not known to what extent wood and concrete are substituted by the **material recycling of mixed plastics**, it has been assumed for simplicity to split the amounts of substituted timber and concrete products to equal parts. Timber is not accounted as a renewable resource. The substitution factor for concrete varies widely, depending on the applications between 2.6 (Palisade) and 5.6 (hoarding stud). Calculating with a mean substitution value and a recycled mixed plastic volume of 176,306 Mg in 2007 an amount of 361,427 Mg concrete was consequently replaced by mixed secondary plastics. According to GEMIS, the generation of one ton of concrete is associated with the consumption of 1,034 Mg commodities, whose exploitation usually takes place within the country.

With the use of mixed recycled plastics a domestic consumption of 0.374 million Mg of raw materials was consequently avoided. Also calculated was an amount of 1.98 PJ in total energy savings which are being assessed on the basis of the specific energy mix used in the production of forestry products (0.023 million Mg / PJ) and for the processing of mineral products (0.03 million Mg / PJ). This gives savings in the amount of 0.023 million Mg in raw wood and 0.030 million Mg of raw materials for concrete production per 0.99 PJ energy saved. Based on the above assumptions for the use of mixed recycled plastics a $DERec_{WVM}$ of 0.427 million Mg can be calculated.

By the feedstock recycling of mixed plastics a total of 2.31 PJ of heavy oil have theoretically been substituted in 2007. Rated with a calorific value of 39.5 GJ / Mg for heavy oil this corresponds to a heavy oil quantity of 58,481 Mg. The raw material demand for the import of crude oil pursuant to GEMIS [16] is 1.059 Mg per Mg of crude oil or density-weighted 0.935 Mg / m³ crude oil (at a specific density of 0.883 Mg / m³ crude oil). The raw material demand for the production of heavy oil after GEMIS [16] conversion amounts to 1.073 Mg per Mg of heavy oil, which density-weighted are 1.062 Mg / m³ (at a specific density of 0.990 Mg / m³). The domestic raw material consumption calculated on that basis is 0.127 Mg / m³ and 0.128 Mg / Mg of heavy oil, respectively. From that follows that the domestic raw material saved for the production of the substituted heavy oil in 2007 was 7,486 Mg in total. Accordingly, the $DERec_{RVM}$ for the substitution of heavy oil through the use of secondary plastics in the blast furnace process is 65,967 Mg, calculated over 58,481 Mg substituted heavy oil and 7,486 Mg other material savings.

Waste incinerators and RDF-fired power plants also use recovered plastic to generate electric and thermal energy, whereby the assessment must be based on the prevailing energy mix and under consideration of the respective energy efficiency. The $DERec$ is to be calculated over the amount of saved energy for which a weighing in relation to the mix of heat and electric power generation must be undertaken. From the calculated energy resources must be determined the share of imports, as for the $DERec$ only the imported amounts of energy sources can be considered. For domestically produced energy source the raw material consumption must be established based on the data base of GEMIS [16]. In that way can be derived the $DERec$ result for the energetic utilisation of recovered plastics in waste incinerators and RDF-fired power plants as shown in the following table.

Table 4: DERec for electric power and heat generation by waste incinerators and RDF-fired power plants in 2007

Utilisation at	Energy substituted	DERec	[Mio. Mg]
Waste incinerators	Electric power	DERec _{EVM-SMVA}	0.259 million Mg
	Heat	DERec _{EVM-WMVA}	0.264 million Mg
RDF-fired power plants	Electric power	DERec _{EVM-SEBS}	0.049 million Mg
	Heat	DERec _{EVM-WEBS}	0.021 million Mg

In 2007 the use of mixed plastic waste in cement kilns contributed with an overall energy production equivalent to 4.89 PJ. Assessing that amount using the calorific value for hard coal coke a substituted amount of 170,383 Mg of coke can be calculated. This is corresponding to 1.498 Mg used raw material for the domestic production of one Mg of coke. From Germany's total demand of hard coal in 2007 were imported 67.2% [124]. On that ground, 32.8% of the savings made on coke are assessed with the raw material demand for domestic hard coal coke. The other 67.2% are considered only as the amount imported. The DERec_{EVM-Z} for the substitution of coke in cement plant processes for 2007 therefore reaches 198,214 Mg.

The direct effect of recycling on the DMI in a summarized view

Through the utilisation of the secondary materials flows covered by this study 49.525 million Mg material resources, which otherwise were to be used to produce the substituted raw materials and energy sources could be saved in 2007. Consequently, the DMI would have to be increased by the same amount. In Table 5 are displayed the calculated DERec_i for the different material flows. The total amount shown here amounts alone to **3.7% of the DMI** in 2007, which was determined to make up a total of 1.35 billion Mg of domestic extraction and imports of abiotic raw materials.

Table 5: DERec_i of each material flow covered

Material flow	DERec _i 2007 [million Mg]
Iron and steel - through materials	38.965
-through energy	4.837
Sum	43.802
Copper - through materials	3.644
-through energy	0.131
Sum	3.775
Gold - through materials	0.0000804
-through energy	-
Sum	0.0000804
Plastics - through high quality material recycl.	0.664
- through mixed plastic material recycling	0.427
- through feedstock recycling	0.066
- through energetic utilisation in incinerators	0.523
- through energetic utilisation as RDF	0.070
- through energetic utilisation in cement kilns	0.198
Sum	1.948
Total	49.525

Conclusions

The present study has made it clear that the currently existing statistical recording of waste streams does not meet the requirements for the monitoring of material flows in the context of resource conservation. By a material-flow-specific structure, instead of the currently available source-based distribution, a more holistic view on waste routes and the high quality of the waste utilisation together with the corresponding quantities of secondary raw materials obtained could actually be presented. This would allow to come to more meaningful insights and conclusions than viewing the first stage of waste treatment only. Also an overlapping of quantities and problem of double accounting which follows from the subsequent treatment of waste amounts in various waste treatment plants could be avoided by a material flow specific data logging and compilation.

With the concept of applying the DERec (Direct Effect of Recycling) as a specific indicator in the context of this study, a powerful instrument with a good connectivity to the DMI could be adopted to establish the direct substitution effects of secondary raw materials. In the future this indicator should be updated in the fields considered and applied more often to obtain further information on relevant secondary raw materials. Also raw materials of biotic nature, although they are not incorporated in the DMI to determine resource productivity within the sustainability strategy, should be accounted using the DERec concept.

The recycled steel scrap volume in 2007 gave a $DERec_{Fe}$ of 43.802 million Mg in aggregate, calculated over the saved quantity of iron ore and the savings in domestic energy resources. With savings made on copper ore concentrates and for domestic energy resources a $DERec_{Cu}$ in the amount of 3.775 million Mg could be identified. Comparatively low is the contribution of gold recycling with a $DERec_{Au}$ of 80.4 Mg, which is however attributable to the high degree of processing of imported gold. This amount is even further lowered by the energy demand for the gold recycling, but available data did not allow this to be quantified.

By taking account of the different processes used for the recycling of plastic with corresponding savings made in raw materials and energy, a $DERec_{Poly}$ of 1.948 million Mg in aggregate could be established for 2007. The **DERec** that can be quantified over all material flows covered by this study amounts to 49.525 million Mg and specifies the amount of raw materials and other goods which would either have to be imported or acquired domestically. Without the recycling and energy recovery of waste they would mean an additional burden to produce the substituted raw materials and energy and would lead to a substantial increase in material inputs into the economy.

The DERec established here only for the three metals iron / steel, copper, gold and the plastic types HDPE, LDPE, PET and PVC already corresponds to 3.7% of the DMI in 2007, which, according to the Federal Statistical Office's calculations has reached a total amount of 1.35 billion Mg domestically acquired and imported abiotic raw materials [135]. This underlines the outstanding importance of the recovery and utilisation of secondary raw materials for the economy and resource conservation goals of the Federal Republic of Germany.

1 Einleitung und Zielsetzung

Der Bedeutung der optimalen Nutzung von Abfällen wird in der Europäischen Union ein besonderes Augenmerk gewidmet. Die entsprechenden Thematischen Strategien - „Nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen“ [137] und „Abfallvermeidung und -recycling“ [138] unterstreichen dies und die fünfstufige Abfallhierarchie der Abfallrahmenrichtlinie [139] spiegelt dies in besonderem Maße wider.

Eine effektive und hochwertige Bewirtschaftung von Abfällen durch werkstoffliche, rohstoffliche und energetische Verwertung leistet einen erheblichen Beitrag zum Ressourcenschutz sowohl im Hinblick auf Primärrohstoffe als auch auf Energiequellen. Zu einzelnen Aspekten des Ressourcenschutzes, bspw. zu den Klimaschutzpotenzialen, liegen bereits Betrachtungen vor, wie die Studie von Öko-Institut und Ifeu (Institut für Energie- und Umweltforschung) „Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft - Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz“ [130]. Diese Studie zeigt auf, dass die Abfallwirtschaft bereits erheblich zum Klimaschutz beiträgt und dies auch in Zukunft tun wird. Den Beitrag zum Ressourcenschutz anhand von Energie- und Rohstoffeinsparungen zu quantifizieren gestaltet sich jedoch bislang als schwierig. Probleme bereiten beispielsweise Lücken in der Abfallstatistik. Die Abfallstatistik der Bundesrepublik Deutschland liefert zwar Angaben über das Abfallaufkommen, doch gibt sie nicht wieder, auf welche Art und Weise die Verwertung von Abfällen letztendlich tatsächlich erfolgt. Die auf dem Europäischen Abfallartenkatalog basierende Statistik macht aufgrund ihrer herkunftsbezogenen Gliederung die Ableitung von Stoffströmen schwierig. Dem kommt hinzu, dass sich der Beitrag der Abfallwirtschaft zur Ressourcenproduktivität derzeit nicht systematisch ermitteln lässt. Der Grad der Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe ist im Rohstoffproduktivitätsindikator der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie nicht explizit abgebildet. Die Rohstoffproduktivität gibt an, welcher wirtschaftliche Output (in Euro) aus einer Tonne abiotischem Materialeinsatz erwirtschaftet wird. Im Rahmen des UFOPLAN-Vorhabens „Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung – Weiterentwicklung des direkten Materialinputindikators“ [136] wurden Rohstoffäquivalente entwickelt, die anstatt des tatsächlichen Gewichts für alle Güter das Gewicht der zu ihrer Produktion notwendigen Rohstoffe in die Berechnung einbeziehen. Im Ergebnis des Projektes wurde die Empfehlung abgeleitet, Sekundärrohstoffe als eigene Kategorie ergänzend zu betrachten und darzustellen, um die Effekte der Substitution von Primärrohstoffen einzubeziehen.

Zu diesem Zweck wird in der vorliegenden Studie der Versuch unternommen, eine einheitliche, reproduzierbare und fortschreibbare Darstellung der Stoffströme verwertbarer Abfälle zu entwickeln. Das Vorhaben dient im ersten Schritt der Erhebung des aktuellen Beitrags der Abfallwirtschaft zur Ressourcenproduktivität. Dabei wird der Beitrag zum Ressourcenschutz durch den Sekundärrohstoffeinsatz aus den Einsatzmengen aufbereiteter Sekundärrohstoffe bei der Produktion neuer Güter abgeleitet und mit dem Einsatz von Primärrohstoffen in Vergleich gesetzt. Darauf aufbauend können Wissenslücken aufgezeigt und Maßnahmen zur weiteren Steigerung der Ressourcenproduktivität abgeleitet werden.

Vor dem Hintergrund der Zielvorgaben zur Ressourceneffizienzsteigerung der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung sowie der Vorgaben der EG-Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL) sind die in diesem Vorhaben zu erfassenden Stoffstrominformationen von besonderer Bedeutung für die Abfall- und Umweltpolitik. Die stoffliche Verwertung, d. h. Recycling im eigentlichen Sinn, wird im Allgemeinen als höherwertig gegenüber der energetischen Verwertung eingeschätzt. Diesem Gedanken trägt auch die EU-Abfallrahmenrichtlinie Rechnung, indem in der dort festgelegten fünfstufigen Abfallhierarchie (Art. 4) das Recycling nicht nur klar abgegrenzt ist (Art. 3), sondern auch Vorrang vor sonstiger, z. B. energetischer Verwertung hat.

Zudem wurde der Versuch unternommen, ein Maß für den Grad der Wertschöpfung für das Recycling zu entwickeln, um eine Verbindung zum Bruttoinlandsprodukt herzustellen, das als Zähler in den Indikator Rohstoffproduktivität einfließt.

2 Untersuchungsmethodik

In einem ersten Schritt wurden die Materialströme von Abfällen von der Entstehung bis zur abgeschlossenen Verwertung ermittelt. Dies erfolgte auf der Basis von Stoffströmen, durch die Zusammenfassung, Aufbereitung und Auswertung des Aufkommens und Verbleibs von Abfällen mit dem Ziel einer einheitlichen und fortschreibbaren Darstellung. Das Basisjahr für die erhobenen Daten war 2007.

Beispielhaft wurden die Stoffströme verwertbarer Abfälle in Form einer Gesamtschau mit niedriger Detailtiefe anhand von Metall-, Kunststoff-, Bau- und Abbruchabfällen sowie biologisch abbaubaren Abfällen dargestellt (siehe Kapitel 3). Die Materialströme mineralischer Abfälle wurden in aktuellen Studien, u. a. des Umweltbundesamtes, bereits eingehend untersucht und deshalb hier nicht neu ermittelt.

Eine Betrachtung in größerer Detailtiefe erfolgte für die Metalle Eisen und Stahl, Kupfer sowie Gold und für die Kunststoffe Polyethylen (HD-/LDPE), Polyethylenterephthalat (PET) und Polyvinylchlorid (PVC). Die Auswahl dieser detaillierten Materialströme erfolgte hinsichtlich der Relevanz für die Rohstoffproduktivität (siehe Kapitel 4). Bei den detaillierten Materialstrombetrachtungen wurden neben der Abfallherkunft auch die Verwertungswege betrachtet und nach Möglichkeit hinsichtlich der Qualität der erzeugten Sekundärrohstoffe bewertet um einen Vergleich mit zu substituierenden Primärrohstoffen gewährleisten zu können.

Aufgrund der sehr uneinheitlichen Darstellung der Abfälle in verschiedenen statistischen Quellen sowie der heterogenen Zusammensetzung der einzelnen Abfallströme mussten eine Vielzahl von Quellen herangezogen und die dabei gewonnenen Daten in eine in sich konsistente Form gebracht werden. Die Datenbasis stellt die öffentliche Statistik des Statistischen Bundesamtes dar. Zur Verifizierung einzelner Teilströme wurden aber auch Daten von Verbänden und Organisationen, wie beispielsweise der Wirtschaftsvereinigung Stahl (WV Stahl), der Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV), der Wirtschaftsvereinigung Metalle (WVM), der Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. (BGK), der Beteiligungs- und Kunststoffverwertungsgesellschaft mbH (BKV), PlasticsEurope oder des Verbandes Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), herangezogen. Um die Datenkonsistenz sicherzustellen, war das Statistische Bundesamt im Begleitkreis dieses Projektes vertreten.

Ausbauend auf den Materialstrombetrachtungen wurde des Weiteren der Beitrag der Abfallwirtschaft zur Rohstoffproduktivität beschrieben sowie eine reproduzierbare Methodik für deren Ermittlung entwickelt. Die Darstellung des Beitrages der Abfallwirtschaft ist in Kapitel 6.2 durch eingesparte Primärrohstoffe und Energie auf Grund von Substitutionen erfolgt. In Kapitel 6.3 ist, basierend auf ermittelten Preisen für Primär- und Sekundärrohstoffe, die wirtschaftliche Bedeutung der Sekundärrohstoffwirtschaft dargestellt.

Auf Basis der durch das Recycling eingesparten Primärrohstoffe und Primärenergieträger wird im Abschnitt 6.4 ergänzend zum Indikator DMI ein Indikator DERec ermittelt, welcher als virtueller Indikator diejenigen Rohstoffe massebezogen beschreibt, welche ohne das Recycling hätten eingesetzt werden müssen, um die gleiche Produktionsleistung zu erreichen.

Die Ergebnisse der Studie wurden am 19.04.2011 im Rahmen eines Expertengesprächs beim Umweltbundesamt vorgestellt und diskutiert. Anmerkungen aus dem Expertenworkshop wurden im vorliegenden Bericht berücksichtigt.

3 Materialstrombilanzen

3.1 Metalle in der Abfallwirtschaft

Metalle werden in einer Vielzahl von Anwendungen genutzt und sind demzufolge ebenso in einer Vielzahl von Abfallströmen vertreten. Grundsätzlich lassen sich diese in folgende Kategorien einteilen:

- Kategorie 1: Getrennt gesammelte Metalle (Alt- und Neuschrotte)
- Kategorie 2: Nach mechanischer Behandlung anfallende Metallfraktionen (relevante Abfallströme sind bspw. Elektro- und Elektronikaltgeräte, Alautos, Bauabfälle, Schlacke)
- Kategorie 3: Dissipativ verwendete Metallfraktionen (relevante Abfallströme sind bspw. Elektronikaltgeräte [Kleingeräte, elektronische Bauteile], Beschichtungen)

Die metallhaltigen Materialströme der ersten beiden Kategorien sind sowohl für die Eisen- als auch die Nichteisenfraktion statistisch dokumentiert. Zur Darstellung dieser Stoffströme dient insbesondere die Fachserie 19 Reihe 1 des Statistischen Bundesamtes [1] in Verbindung mit Angaben zu spezifischen Metallgehalten in den unterschiedlichen Abfallgemischen. Detailliert werden die Materialströme Eisen und Stahl sowie Kupfer betrachtet.

Für die dissipativ verwendeten Metalle können die Daten der Abfallstatistik nur eingeschränkt genutzt werden. Angaben zu deren Gehalten in den einzelnen Abfallarten liegen nicht bzw. nicht vollumfänglich vor. Die Mengen der dissipativ verwendeten Metalle im Gesamtmaterialstrom der Eisen- und Nichteisenmetalle sind insgesamt nur von untergeordneter Bedeutung, allerdings sind dissipativ verwendete Metalle in der Regel werthaltig und das Interesse an einem wirtschaftlichen Recycling ist insofern als hoch einzuschätzen. Exemplarisch für diese Materialien wird der Materialstrom Gold betrachtet. Die Gehalte in den Abfallarten werden insbesondere aus Sekundärliteraturquellen abgeleitet.

Darstellung der Materialströme der Eisen- und Nichteisenmetalle in der Abfallwirtschaft

Das nachfolgende Sankey-Diagramm (Abbildung 3) zeigt den Materialstrom der Eisen- und Nichteisenmetalle im Bereich der Abfallwirtschaft. Die Daten wurden über die Kombination der abfallstatistischen Daten [1] mit den in Anlage 1 dargestellten Stoffgehalten ermittelt.

Beim Materialstrom „Metalle“ wurde in Fe- und NE-Metalle unterschieden. Neben den im Inland anfallenden Abfällen wurden die importierten notifizierungspflichtigen Abfälle, welche in deutschen Abfallbehandlungsanlagen behandelt wurden, ebenfalls in die Betrachtungen einbezogen. Darüber hinaus wurde der Import und Export von nicht notifizierungspflichtigen Abfällen und Schrotten aus NE-Metallen, Abfällen und Schrotten aus Eisen und Stahl (Zoll-Code 7204) sowie Schlacken, Aschen, Walzzunder (Zoll-Codes ex 261900; 26180000; 26210000) [2] berücksichtigt. Bei letzterer Gruppe wurden aufgrund der heterogenen Zusammensetzung Gehalte von 10 % Eisen sowie 5 % NE-Metalle angenommen.

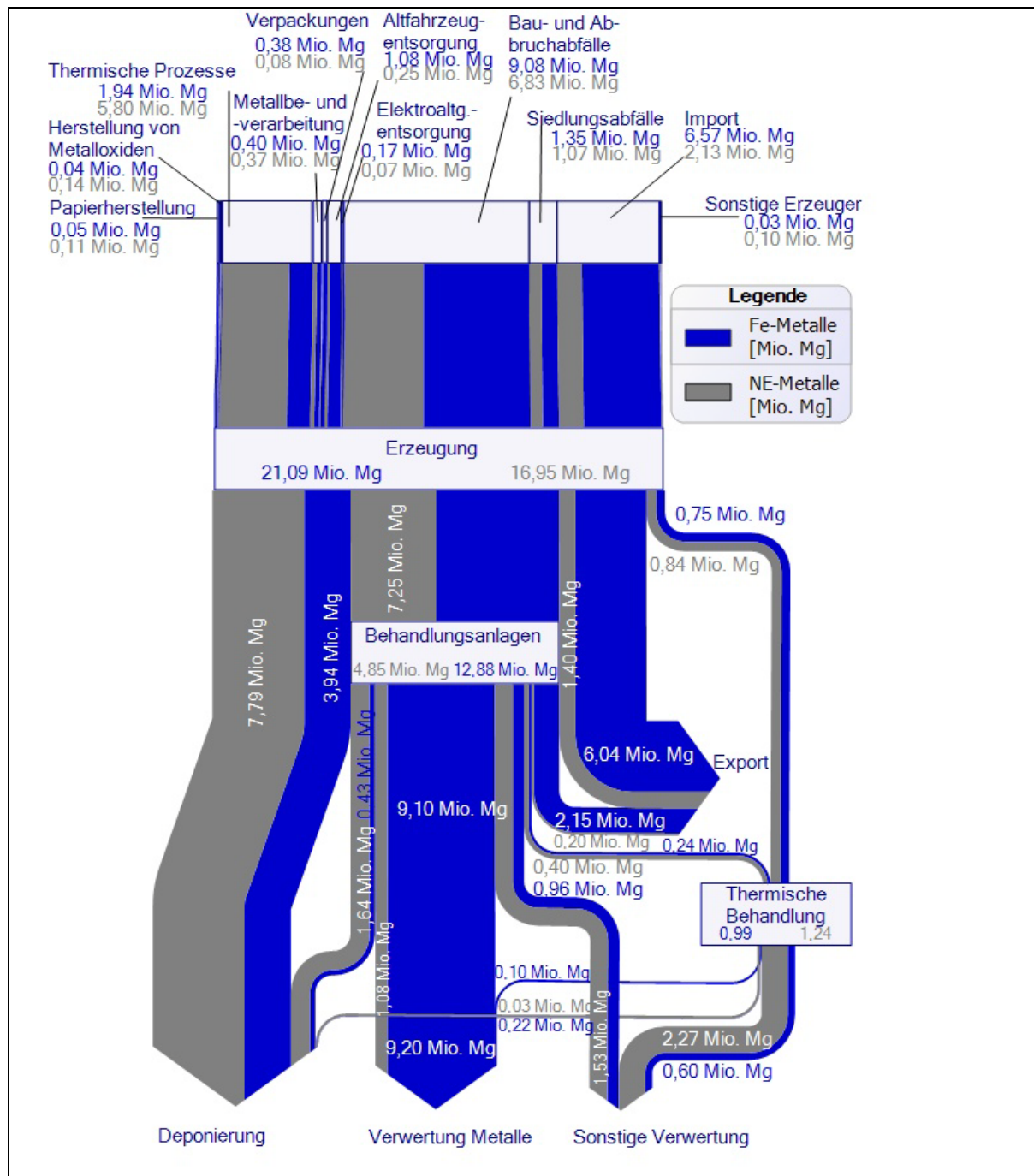


Abbildung 3: Materialstrom Metalle 2007 (nach [1])

Systematisch bedingt sind in dem dargestellten Materialstrom auch Abfallströme enthalten, deren Fe- und NE-Gehalte nicht auf die Entsorgung metallhaltiger Abfälle zurückzuführen sind, sondern auf Hintergrundgehalten (in eingesetzten Brennstoffen bzw. Baumaterialien) beruhen. Mengenrelevant sind hier insbesondere folgende Abfallarten:

- 10 01 01 Rost- und Kesselasche, Schlacken und Kesselstaub mit Ausnahme von Kesselstaub, der unter 10 01 04 fällt
- 10 01 02 Filterstäube aus Kohlefeuerung
- 10 01 05 Reaktionsabfälle auf Kalziumbasis aus der Rauchgasentschwefelung in fester Form
- 17 01 06* Gemische aus oder getrennte Fraktionen von Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik, die gefährliche Stoffe enthalten

- | | |
|-----------|---|
| 17 01 07 | Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 01 06 fallen |
| 17 05 03* | Boden und Steine, die gefährliche Stoffe enthalten |
| 17 05 04 | Boden und Steine mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 05 03 fallen |

Die genannten Abfälle summieren sich auf insgesamt 3,48 Mio. Mg Eisen- sowie 10,99 Mio. Mg NE-Metalle, welche zu 88 % (Fe-Metalle) bzw. 66 % (NE-Metalle) deponiert werden und somit 78 % der deponierten Fe-Metalle bzw. 93 % der deponierten NE-Metalle umfassen. Die spezifischen Gehalte einzelner Metalle in diesen Abfällen sind zu gering, um generell ein wirtschaftliches Recycling zu rechtfertigen. Die Mengenrelevanz resultiert insbesondere aus dem hohen Aufkommen an diesen Abfällen. Die nachfolgende Abbildung 4 zeigt den Materialstrom der Metalle ohne geogen bedingte Hintergrundgehalte.

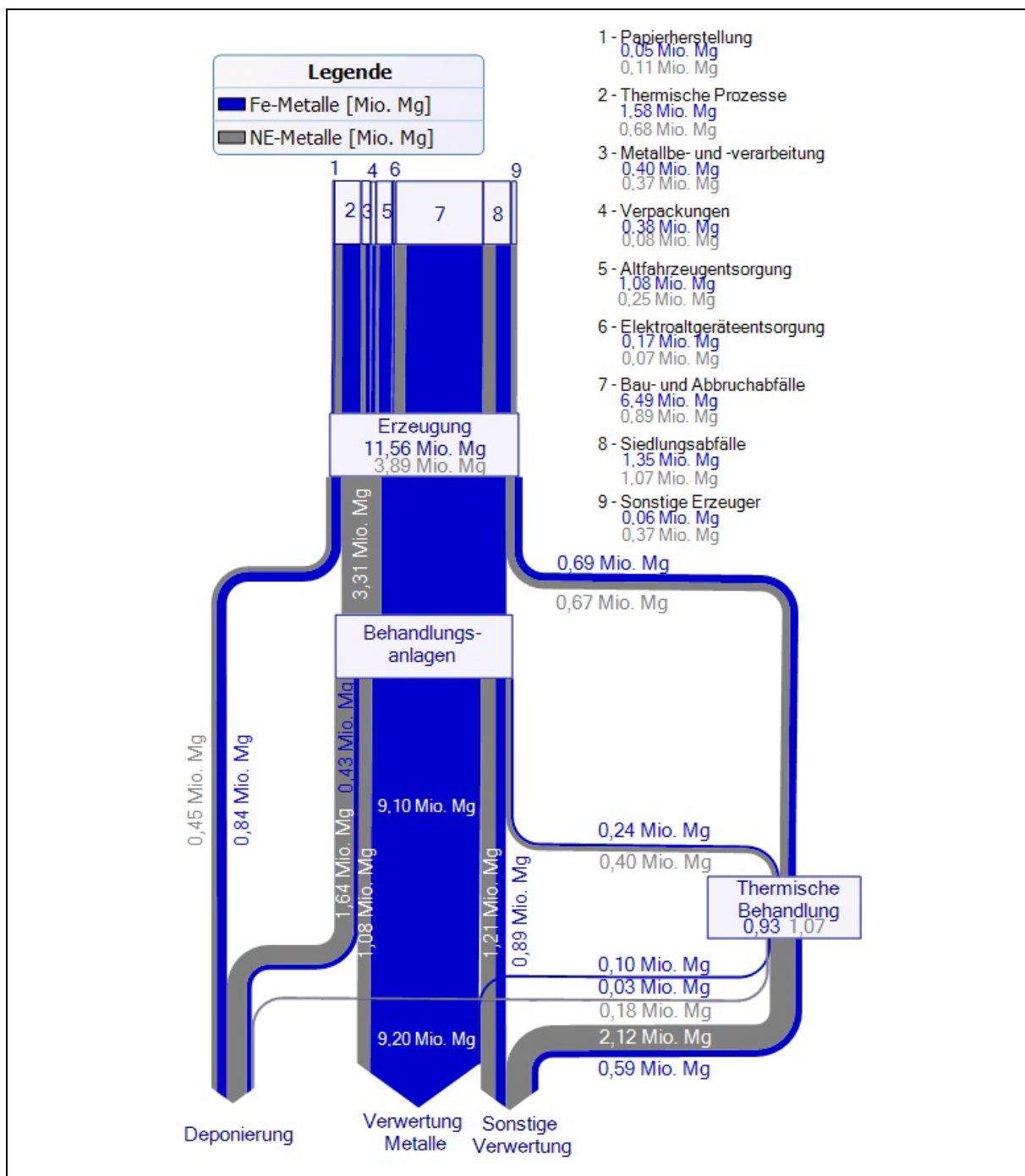


Abbildung 4: Materialstrom Metalle 2007 ohne geogen bedingte Hintergrundgehalte (nach [1])

Grundsätzlich stehen in Abhängigkeit von der Abfallart verschiedene Wege zur Verwertung bzw. Beseitigung zur Auswahl. Die Verwertung erfolgt bei Metallen ausschließlich auf stofflichem Wege. Sonstige Verwertungsarten spielen nahezu keine Rolle. Zudem werden einige Abfälle in MVA behandelt bzw. auf Deponien beseitigt.

Shredder-, Sortier- und sonstige Behandlungsanlagen wurden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht getrennt bilanziert. Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen wurden den Behandlungsanlagen zugerechnet, da diese Anlagen grundsätzlich als Anlagen zur Stoffstromtrennung zu betrachten sind und nachgelagerte Behandlungsschritte erfordern.

Als Vergleichsdaten dieser Mengenströme dienen die Statistiken der Wirtschaftsvereinigung Stahl sowie der Wirtschaftsvereinigung Metalle, welche in Tabelle 6 und Tabelle 7 dargestellt sind. Auffällig ist, dass erhebliche Mengendifferenzen zu den über die Abfallstatistik ermittelten Materialströmen bestehen. Diese sind sicherlich in großem Umfang auf frei gehandelte Mengen zurückzuführen, welche ohne Aufbereitung einer Verwertung zugeführt werden. Auch wenn eine gewisse Schwankungsbreite bei den Daten zur Abfallzusammensetzung bei Abfallgemischen besteht, kann diese erhebliche Mengendifferenz letztlich nicht auf diese Unschärfe der Daten zurückgeführt werden.

Tabelle 6: Stahlschrottbilanz [Mio. Mg] der Wirtschaftsvereinigung Stahl 2007 [3], ergänzt durch BDSV-Stahlrecycling-Bilanz 2007 [4]

Stahlschrottverwendung	
Stahlwerke	21,7
Oxygenstahl	6,1
Elektrostahl	15,6
Eisen-, Stahl- und Temperguß (geschätzt)	7,2
Stahlschrottaufkommen	
Eigenentfall Stahlwerke	5,0
Zukauf vom Handel	17,3
Zukauf von anderen Stellen	1,4
Zukauf Gießereien (geschätzt)	4,0
Stahlschrott Export	- 8,5
Stahlschrott Import	6,3
Saldo	- 2,2

Zwischen der amtlichen Abfallstatistik und der Stahlschrottverwendungsstatistik der entsprechenden Verbände bestehen erhebliche Differenzen. Die Abfallstatistik weist wesentlich geringere Eisen- und Stahlschrottmengen aus. Vergleicht man die 9,2 Mio. Mg an Eisen- und Stahlschrott (siehe Abbildung 4), welche sich aus der Abfallstatistik ergeben, mit dem durch die Wirtschaftsvereinigung Stahl veröffentlichten 21,7 Mio. Mg an verwendetem Stahlschrott ergibt sich eine Differenz von 12,5 Mio. Mg. Unter der Annahme, dass auch die 1,5 Mio. Mg an Eisen- und Stahlschrott, welche in der Abfallstatistik unter „Sonstiger Verwertung“ ausgewiesen werden, ebenfalls in der Eisen- und Stahlerzeugung eingesetzt werden, verringert sich diese Differenz auf 11,0 Mio. Mg. Es kann vermutet werden, dass sich außerhalb des Abfallregimes ein Eisen- und Stahlschrotthandel in erheblichem Umfang etabliert hat.

Tabelle 7: Nichteisenmetall-Schrottbilanz der Wirtschaftsvereinigung Metalle 2007

Erzeugung	
Sekundäraluminium	836.000 Mg
raffiniertes Kupfer aus sekundären Vorstoffen	364.000 Mg
raffiniertes Blei aus sekundären Vorstoffen	244.000 Mg
Sekundärzink aus sekundären Vorstoffen	97.000 Mg
Einfuhr	
Aluminium-Sekundärrohstoffe	613.000 Mg
Kupfer-Sekundärrohstoffe	596.000 Mg
Blei-Sekundärrohstoffe	30.000 Mg
Zink-Sekundärrohstoffe	20.000 Mg
Ausfuhr	
Aluminium-Sekundärrohstoffe	- 770.000 Mg
Kupfer-Sekundärrohstoffe	- 481.000 Mg
Blei-Sekundärrohstoffe	- 18.000 Mg
Zink-Sekundärrohstoffe	- 59.000 Mg
Saldo	
Aluminium-Sekundärrohstoffe	- 157.000 Mg
Kupfer-Sekundärrohstoffe	115.000 Mg
Blei-Sekundärrohstoffe	12.000 Mg
Zink-Sekundärrohstoffe	- 39.000 Mg

1,08 Mio. Mg NE-Metalle werden in Auswertung der abfallwirtschaftlichen Statistik direkt wiederverwertet. Gemäß Tabelle 7 ergibt sich allein an Aluminium, Kupfer, Blei und Zink eine verwertete Menge von 1,541 Mio. Mg. Hier kann allerdings davon ausgegangen werden, dass auch NE-Metalle aus der sonstigen Verwertung als NE-Metalle wiederverwertet werden, so dass die Differenz von 0,46 Mio. Mg über diesen Weg durchaus ausgeglichen sein kann. Zudem werden beispielsweise Kupferschrotte auch direkt ohne vorherige Raffination als Sekundärrohstoff eingesetzt.

3.2 Kunststoffe in der Abfallwirtschaft

Kunststoffe finden als Werkstoff vielfältige Verwendung und finden sich dementsprechend auch verteilt in zahlreichen Abfallarten wieder. Die Verwertung der Kunststoffe kann stofflich sowie aufgrund ihres hohen Heizwertes auch energetisch erfolgen.

Der Materialstrom der Kunststoffabfälle ist umfassend in der von BVK und Plastics-Europe in Auftrag gegebenen Studie „Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2007“ (Consultic-Studie) [5] bilanziert. Über die Stufen Erzeugung → Verarbeitung → Verbrauch → Abfälle und Verwertung ist, unterteilt nach Kunststoffarten, der Materialstrom der Kunststoffe umfassend abgebildet.

Darstellung des Materialstroms der Kunststoffe in der Abfallwirtschaft

Der Materialstrom der Kunststoffabfälle wurde auf Basis der Fachserie 19 Reihe 1 [1] unter Verwendung der in Anlage 1 erfassten spezifischen Gehalte modelliert und in einem Sankey-Diagramm (Abbildung 5) dargestellt. Zum Vergleich wurden die Daten der Consultic-Studie 2007 ebenfalls in einem Sankey-Diagramm (Abbildung 6) abgebildet.

Neben den im Inland anfallenden Abfällen werden die notifizierungspflichtigen importierten Mengen, welche in deutschen Abfallbehandlungsanlagen behandelt wurden, ebenfalls in die Betrachtungen einbezogen.

Zusätzlich wurden die nicht notifizierungspflichtigen Exporte und Importe von Kunststoffabfällen einbezogen. Im Jahr 2007 wurden 0,96 Mio. Mg Kunststoffabfälle exportiert und lediglich 0,24 Mio. Mg importiert. Dieser Saldo lässt sich im Zuge der Materialstrombetrachtung dadurch erklären, dass von den ca. 2,3 Mio. Mg stofflich verwerteten Kunststoffabfällen ca. 0,7 Mio. Mg exportiert worden sind.

In Abhängigkeit von der Abfallart stehen verschiedene Wege zur Verwertung bzw. Beseitigung zur Auswahl. Bei der Verwertung wird zwischen der energetischen sowie der stofflichen Verwertung unterschieden. Die energetische Verwertung erfolgt mit dem Ziel der Energiegewinnung in der Regel durch die Verbrennung heizwertreicher Abfälle. Aufgrund des hohen Heizwertes der Kunststoffe ist die thermische Behandlung in Müllverbrennungsanlagen hier i. d. R. ebenfalls als energetische Verwertung zu betrachten. Die stoffliche Verwertung erfolgt in der Kunststoffindustrie. Sonstige Verwertungsarten spielen nahezu keine Rolle. Die Beseitigung umfasst hier die Deponierung.

Wie bei den Metallen werden Shredder-, Sortier- und sonstige Behandlungsanlagen aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht getrennt bilanziert und mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen den Behandlungsanlagen zugerechnet.

Die Daten der Fachserie 19 und der Consultic-Studie zeigen in der Gesamtheit eine relativ gute Übereinstimmung. Unterschiede werden vorrangig durch eine unterschiedliche Berücksichtigung von Kunststoffanteilen in Abfallgemischen hervorgerufen, insbesondere den nicht separat ausgewiesenen Siedlungsabfällen. Der Bereich der Produktionsabfälle (speziell aus dem Bereich der Verarbeitung) wird durch die Auswertung der statistischen Daten im Vergleich zur Consultic-Studie mengenmäßig geringer bewertet.

Eine gewisse Unschärfe in der Datenlage besteht derzeit noch bei den Daten der Abfallzusammensetzung von Abfallgemischen. Für einige Abfallgemische konnten lediglich Annahmen auf Basis vorliegender Erfahrungswerte getroffen werden, da keine Literaturwerte vorliegen. Die angesetzten Werte und deren Quellen sind in Anlage 1 aufgelistet.

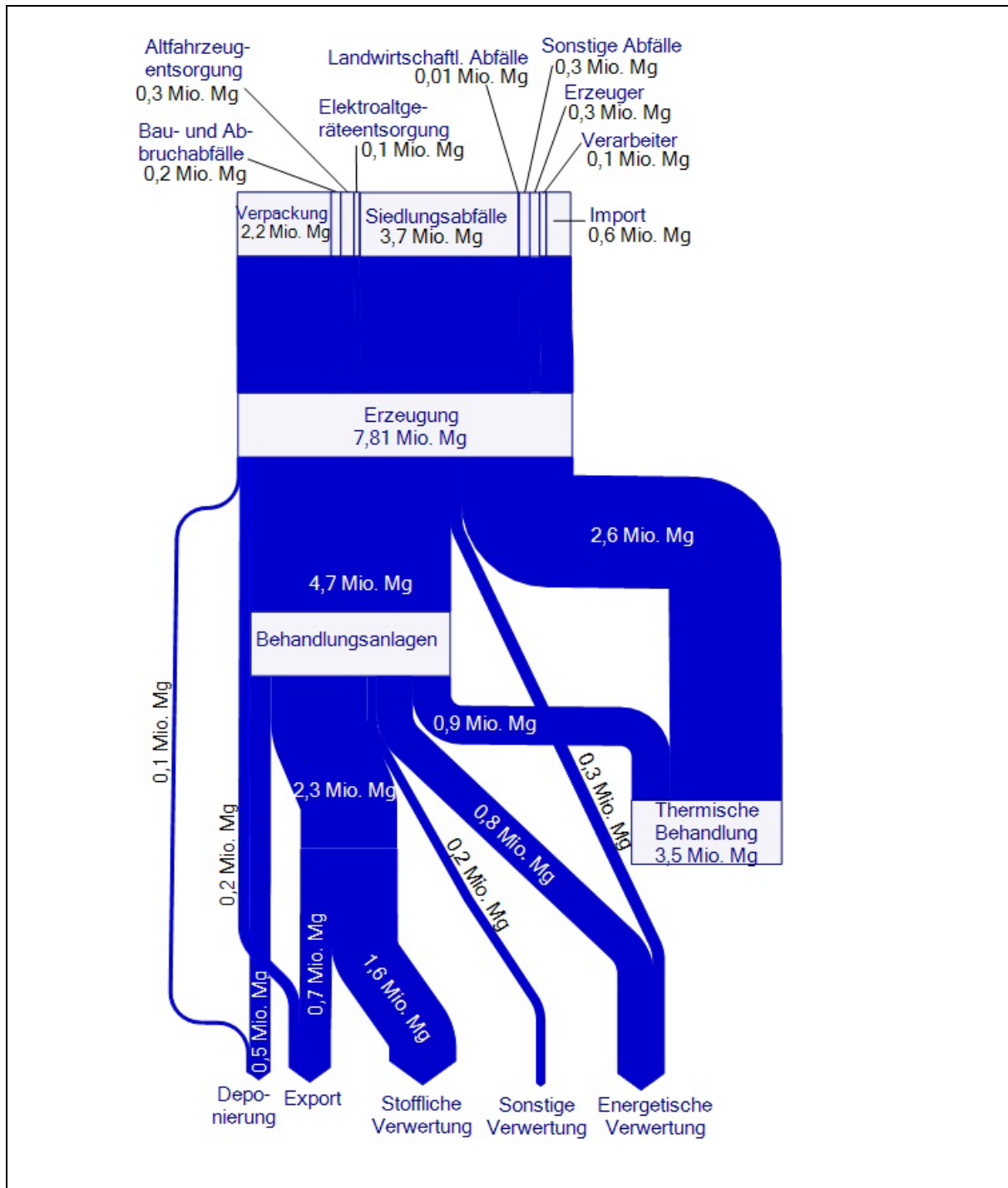


Abbildung 5: Materialstrom Kunststoffe 2007 (nach [1])

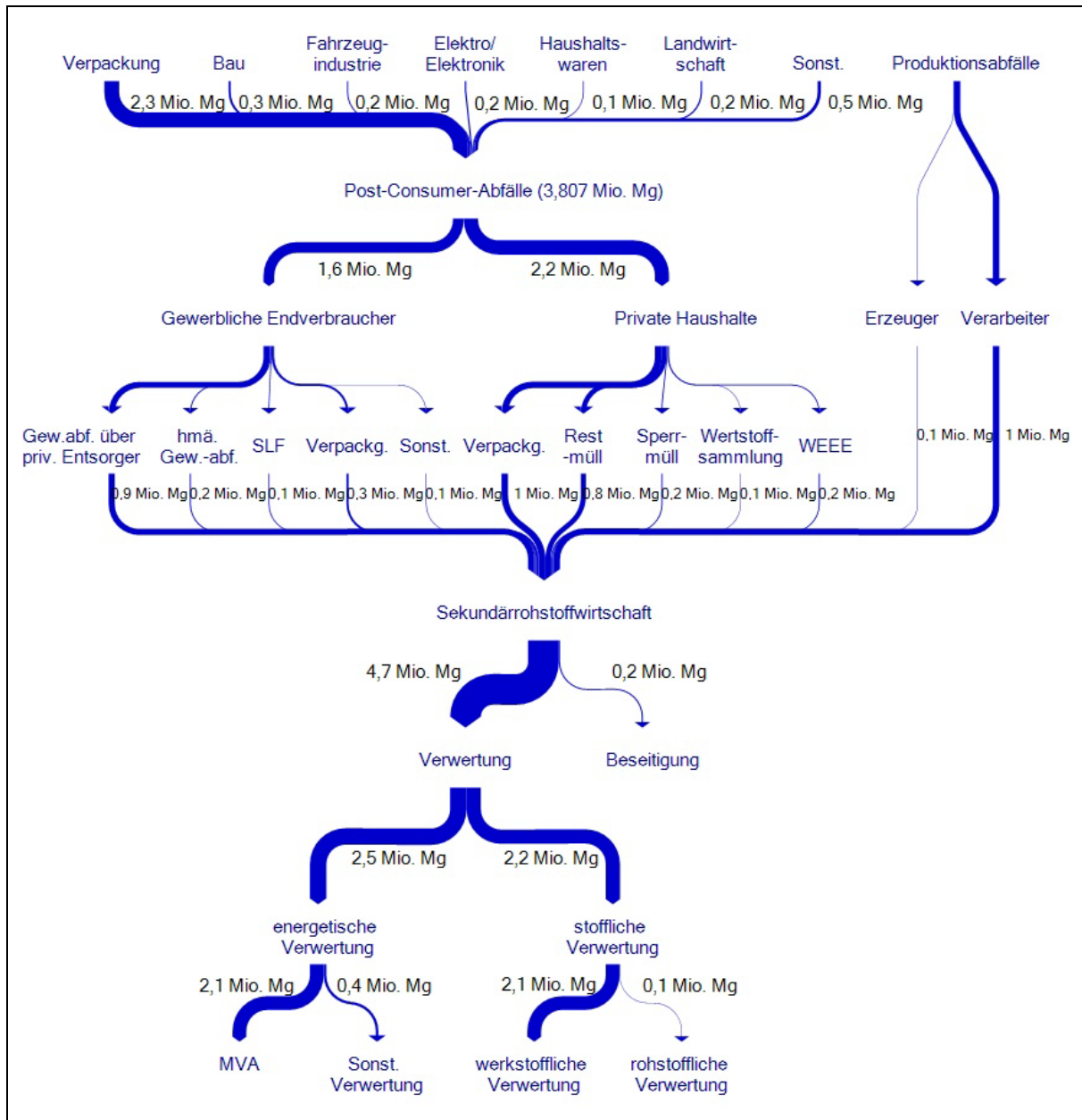


Abbildung 6: Materialstrom Kunststoffe in der Abfallwirtschaft 2007 (nach [5])

3.3 Bau- und Abbruchabfälle in der Abfallwirtschaft

Eine umfassende Mengenstatistik [6] für Bau- und Abbruchabfälle wurde durch die Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (ARGE KWTB) im Rahmen der Selbstverpflichtung der Bauwirtschaft in insgesamt fünf Monitoring-Berichten für die Jahre 1996, 1998, 2000, 2002 und 2004 vorgelegt. Mit der Vorlage des fünften Berichtes im Jahre 2007 endete die Selbstverpflichtung der Bauwirtschaft gegenüber der Bundesregierung.

In diesen Monitoring-Berichten sind die Daten zum Aufkommen und zum Verbleib (Verwertung als RC-Baustoff, Deponierung) der nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfälle (Bauschutt, Straßenaufbruch, Baustellenabfälle, Bauabfälle auf Gipsbasis, Bodenaushub) aufgeführt, wobei der Schwerpunkt der Betrachtung auf den mineralischen Fraktionen liegt.

Die Daten der Monitoring-Berichte wurden nachfolgend mit den Daten des Statistischen Bundesamtes aus der Fachserie 19 Reihe 1 [7] abgeglichen. Die Fachserie gibt allerdings nur Auskunft über das Aufkommen an Bau- und Abbruchabfällen sowie über deren Verarbeitung in Bauschuttaufbereitungs- bzw. Asphaltmischanlagen. Der weitere Verwertungsweg wird durch das Statistische Bundesamt seit dem Jahr 2004 nicht mehr dargestellt.

Darstellung des Materialstroms Bau- und Abbruchabfälle in der Abfallwirtschaft

Datengrundlage zur Mengenbilanzierung für den Bauabfallsektor bildete die Zusammenstellung von Statistikdaten in der Fachserie 19 [7]. Die Daten der Bauabfallentsorgung werden lediglich im 2-Jahresrhythmus erhoben, so dass in der aktuellen Fachserie lediglich die Daten des Jahres 2006 vorliegen. Mittels dieser Daten wurden die Mengenflüsse für die Hauptgruppen des mineralischen Bauabfalls nachgezeichnet. In Anlehnung an die in den Monitoringberichten des KWTB zum Bauabfallgeschehen vorgenommene Zusammenführung von Abfallarten zu Hauptabfallgruppen wurde wie folgt unterschieden:

Hauptabfallgruppe	Dazugehörige Abfälle lt. Abfallschlüsselnummern des EAK
Bauschutt	170101, 170102, 170103, 170107
Straßenaufbruch	170302
Baumischabfälle	170904, 1704, 170604, 170201, 170202, 170203
Abfälle auf Gipsbasis	170802
Bodenaushub	170504, 170506, 170508

Auch bei der Zuordnung der jeweiligen Erfassungsdaten zu einzelnen Verwertungs- und Beseitigungswegen wurde versucht eine Methodik zu finden, die mit der des KWTB in den bisherigen Monitoringberichten vergleichbar ist. Hierzu wurden der 5. Monitoring-Bericht Bauabfälle mit Datenbasis 2004 und das Datenwerk der Fachserie 19 Reihe 1 für das gleiche Bilanzjahr gegeneinander abgeglichen und Gespräche mit Vertretern der an der Erarbeitung des Monitoringberichtes beteiligten Verbände geführt. Hierbei kamen auch vorläufige Ergebnisse aus der derzeit laufenden Fortschreibung der Bauabfallbilanz beim KWTB für das Bilanzjahr 2006 zur Sprache, die ebenfalls mit dem für 2006 vorliegenden Datenmaterial der Fachserie 19 Reihe 1 abgeglichen wurden um die Passgenauigkeit der Zuordnungsmethodik überprüfen zu können. Bei der im Anschluss damit vorgenommenen vollständigen Mengenbilanzierung der Hauptbauabfallströme auf Basis der in 2008 veröffentlichten Daten der Fachserie 19 Reihe 1, Umwelt – Abfallentsorgung für das Bilanzjahr 2006 [7] konnte im Ergebnis eine weitgehende Deckungsgleichheit mit den vorläufigen Bilanzierungsergebnissen des KWTB verzeichnet werden.

Die Ergebnisse der Massebilanzierung für 2006 wurden im nachfolgenden Sankey-Diagramm (Abbildung 7) zusammengeführt.

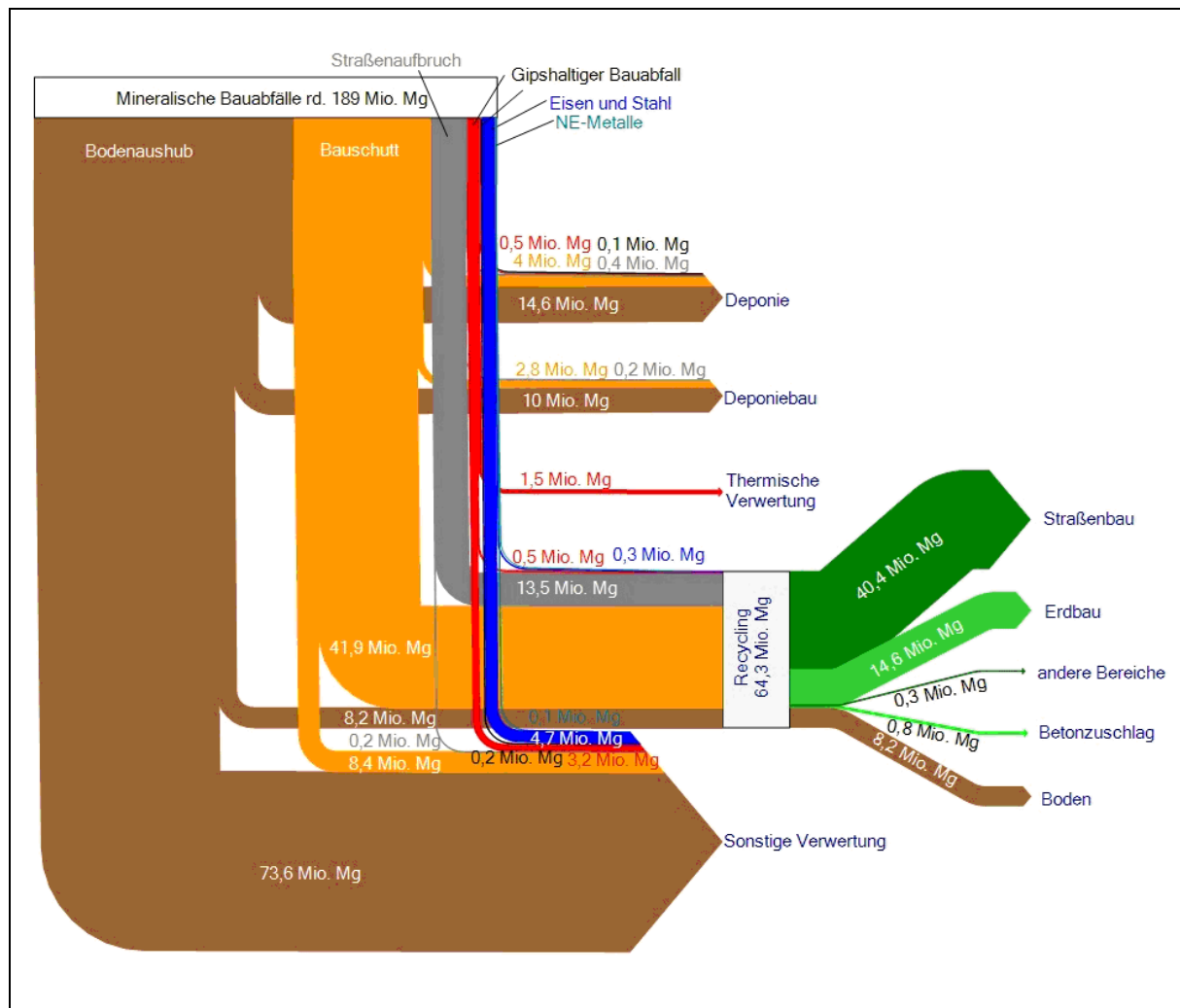


Abbildung 7: Materialstrom Bauabfälle 2006 (nach [7])

Da Bodenaushub bei Baumaßnahmen zwar als Abfall anfällt, allerdings mit seiner Verbringung und Ablagerung im Regelfall keine Substitutionswirkung verbunden ist, wurde er in der vorliegenden Studie nicht betrachtet. Abbildung 8 zeigt den Materialstrom der Bauabfälle ohne diesen mengenrelevanten Stoffstrom.

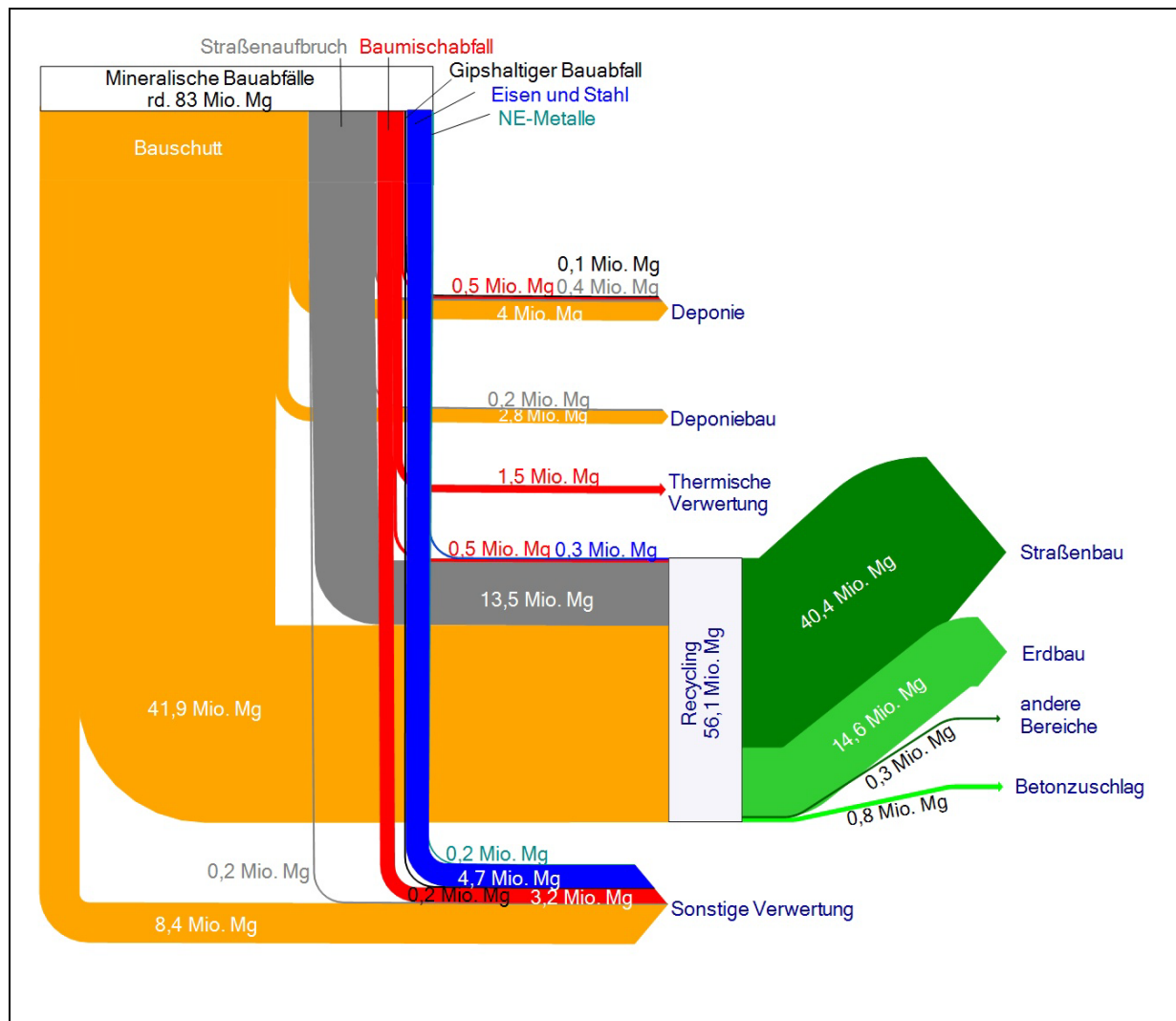


Abbildung 8: Materialstrom Bauabfälle 2006 ohne Bodenaushub (nach [7])

Im Vergleich mit den Bilanzmengen des KWTB liegen die Abweichungen bei einzelnen Bilanzparametern in den in Tabelle 8 dargestellten Größenordnungen.

Tabelle 8: Abweichungen der bilanziellen Ansätze

Bilanzgröße	Abweichung prozentual (%)	Abweichung absolut (Tsd. Mg)	Anmerkung zu Gründen der Abweichung
Gesamtmenge Bauabfälle	-0,16	-300	
davon			
Bodenaushub	-0,4	-400	
Bauschutt	0	0	
Straßenaufbruch	0	0	
Abfälle auf Gipsbasis	33	100	
Baumischabfall	0,55	60	
recycelte Mengen	-0,36	-200	

Bilanzgröße	Abweichung prozentual (%)	Abweichung absolut (Tsd. Mg)	Anmerkung zu Gründen der Abweichung
verwertete Mengen davon	14,1	14.790	im Wesentlichen durch Mengendifferenz beim verwerteten Anteil von Bodenaushub begründet
Bodenaushub	16,4	13.700	Zuordnung zum Deponiebau
Bauschutt	5,4	600	
Straßenaufbruch	0	0	
Abfälle auf Gipsbasis	44,5	80	
Baumischabfall	4,65	410	Zuordnungsunterschiede bei Recycling und Verwertung
deponierte Mengen davon	-75	-14.720	im Wesentlichen durch Zuordnungsunterschiede die Verwertung betreffend begründet
Bodenaushub	-96,6	-14.100	Zuordnung zum Deponiebau
Bauschutt	-15	-600	Zuordnung zur Verwertung
Straßenaufbruch	0	0	
Abfälle auf Gipsbasis	-16,7	-20	
Baumischabfall	0	0	

Insbesondere die Mengenbilanz der Baumischabfälle bedarf hinsichtlich der Verteilung auf die Verwertungswege einer gesonderten Betrachtungsweise, da es in der üblichen Kategorisierung sonst zu Fehlbewertungen kommen kann. So sind in der als Baumischabfall zusammengefassten Abfallmenge erhebliche Mengen an Metallen (ca. 47 % Anteil an der Gesamtmenge) aus dem Baubereich enthalten. Diese fließen entweder direkt oder nach erfolgter Separierung in Aufbereitungsprozesse dem Recycling zu und sind somit aus dem auf baumineralische Stoffe ausgelegten Verwertungsstrom herauszurechnen. In Statistiken wird diesem Umstand offenbar unterschiedliche Aufmerksamkeit zuteil, was dazu führen kann, dass verschiedene Arten von Verwertungswegen in Aussagen zusammengeführt werden, denen es an Deutlichkeit in Bezug auf deren stoffliche Basis fehlt. Die auf mineralische Abfälle ausgelegten Gesamtmaterialestrombilanzen enthielten in diesem Falle zum Zwecke ihrer Schlüssigkeit bis zum Ende Stoffmengen (Metalle, Holz), die eigentlich separat zu betrachten sind. Hieraus erklärt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auch der fast um den Faktor 10 ausfallende Mengensprung auf der Betrachtungsebene der angefallenen bzw. verwerteten Baumischabfälle im Vergleich zur bislang vom KWTB vorliegenden Auswertungen der Jahre 2004 und 2006. Dem Ansatz der separaten Betrachtung wesentlicher stofflich verschiedener Teilströme gleicher Herkunft (Baubereich) wird nunmehr im obigen Mengenstromgerüst gefolgt.

Eine auffällige Abweichung von Bilanzzahlen ist auch beim Einsatz von Recyclingbaustoffen durch unterschiedliche Zuordnung zu den Einsatzbereichen Straßenbau und sonstige bauliche Verwendung feststellbar. Hier bilanziert der KWTB anstelle eines Einsatzes im Straßenbau rd. 4 Mio. Mg mehr für den Bereich der sonstigen Verwendung.

Bezogen auf die Hauptabfallgruppen fällt (unter Berücksichtigung der obigen Anmerkungen) die Bilanzierung jedoch nahezu deckungsgleich aus, wobei Abweichungen insbesondere auf unterschiedliche Zuordnungen zu den Bereichen Verwertung und Deponierung zurückzuführen sind. Von zentraler Bedeutung ist dabei die Frage, wie die Mengen deklariert wurden, ob als deponiert oder aber im Deponiebau eingesetzt bzw. als Verfüllmaterial eingesetzt. Nach Fachserie 19 Reihe 1 sind die entsprechenden Mengen aber durch die Angaben der Tabelle

2.4, Deponiebaumaßnahmen, als relativ gut abgrenzbar anzusehen. Etwas unterschiedlich gestalten sich auch die Zuordnungsmuster in Bezug auf die thermisch verwerteten Mengen.

Um, ungeachtet davon, den Gesamtbilanzierungsansatz weitgehend nachvollziehbar und vergleichbar zu gestalten, wurde bei deren Zusammenführung unter nachfolgend erläuterten Prämissen (Tabelle 9) vorgegangen.

Tabelle 9: Prämissen der Gesamtbilanzierung der Bauabfälle

Bilanzgröße	einbezogene Übersichten der Fachserie 19 Reihe 1	Anmerkungen
deponiertes Aufkommen	2.1 bzw. 2.3	bei Baumischabfällen zusätzlich 3.1 ausgehend von der Annahme, dass eine Verbrennung in MVA und damit Beseitigung stattfindet
Recycling (RC-Baustoffe)	17.1, 18.1	
Verwertung im Deponiebau	2.4	
Thermische Verwertung	10.1, 17.2	ausgehend von der Annahme, dass Baumischabfall-Shreddergut und Holz als EBS zur Verwendung kommt nur diese Abfallgruppe betreffend
Sonstige Verwertung	Übersichten zu den entsprechenden Behandlungsanlagen	Berücksichtigung der Verwertungsmengen in den Outputströmen bzw. Inputstroms in Verfüllstätten und Sortieranlagen (bei Baumischabfall auch MBA) ausgehend von der Annahme, dass sich jeweils eine vollständige Verwertung anschließt

Die Mengenbilanzierung für RC-Baustoffe nach Einsatzbereichen wurde auf Basis der Angaben zum Produktoutput von Bauabfallaufbereitungsanlagen (Tabelle 17.2, Fachserie 19 Reihe 1) vorgenommen.

3.4 Biologisch abbaubare Abfälle in der Abfallwirtschaft

Im Bereich der biogenen Abfälle sind in den vergangenen Jahren insbesondere vor dem Hintergrund des energetischen Potenzials dieses Materialstroms zahlreiche Untersuchungen durchgeführt worden.

Eine umfassende Bilanz biogener Abfälle wurde im Rahmen des UBA-Vorhabens „Stoffstrommanagement von Biomasseabfällen mit dem Ziel der Optimierung der Verwertung organischer Abfälle“ durch ifeu- und Öko-Institut erarbeitet [128]. Im Rahmen des Projektes wurden alle wesentlichen Abfallströme biogenen Ursprungs quantifiziert. Die Autoren nutzten sowohl die Auswertung statistischer Primärdaten als auch Sekundärquellen (bspw. Mengenabschätzungen auf Basis von Kennzahlen) zur Quantifizierung der Materialströme.

Eine weitere Studie zum Thema im Auftrag des UBA wurde unter dem Titel „Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz“ (FKZ 3707 33 304) durch das Witzenhausen-Institut erstellt [129]. Die Studie konzentrierte sich auf die biogenen Abfälle aus dem Bereich der Haushalte (Bio- und Grünabfälle, biogenes Potenzial im Restmüll), Abfälle aus der Landschaftspflege sowie Speiseabfälle.

Daneben gibt es eine Vielzahl weiterer Studien, welche sich insbesondere auf regionaler Ebene (meist Bundesländer) mit den biogenen Abfallströmen beschäftigen.

Da der Umfang der in Frage kommenden Abfallarten erheblich ist und eine regelmäßige statistische Erfassung in vielen Fällen (bspw. Landschaftspflegeabfälle) nicht erfolgt, ist besonderes Augenmerk darauf zu legen, dass das Datenmodell auf fortschreibungsfähigen Quellen beruht, um der Anforderung einer zukünftigen Wiederholbarkeit der Erhebung zu genügen.

Bei der Erstellung des Materialstroms der biologisch abbaubaren Abfälle wurden alle im Anhang 1 der BioAbfV [8] aufgelisteten Abfälle berücksichtigt. Die Stoffströme „Holz“ und „Papier“ wurden getrennt ausgewiesen. Basis hierfür bildete zum einen das im Auftrag des Verbandes Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP) durch die INTECUS GmbH in Zusammenarbeit mit INFRO – Informationssysteme für Rohstoffe - im Jahr 2004 entwickelte und 2007 aktualisierte Stoffstrommodell Holz [9]. Hier wurden auch Abfallgemische, wie Hausmüll und Sperrmüll, berücksichtigt, aus denen Holz zur Verwertung ausgetragen wird. Für andere organische Fraktionen wird ein solcher Austrag aus Abfallgemischen für eine nachfolgende Verwertung im Regelfall nicht praktiziert¹. Dem Stoffstrom Papier dient eine jährlich durch die INTECUS GmbH im Auftrag des VDP erstellte Altpapierbilanz [10] als Grundlage. Die einbezogenen Abfallarten sowie die Faktoren der materialspezifischen Gehalte in den Abfallgemischen sind im Anhang dieses Berichtes enthalten. Im folgenden Materialstrom nicht mit dargestellt sind die Klärschlamm-mengen. Diese wurden unter Abschnitt 3.4.4 separat betrachtet, da Klärschlamm nicht in Anhang 1 der BioAbfV [8] aufgeführt und kein fester Siedlungsabfall ist.

Unter Verwendung der materialspezifischen Gehalte sowie der Daten der Fachserie 19 Reihe 1 des Statistischen Bundesamtes [1] für das Jahr 2007 wurde der Materialstrom modelliert. Dabei wurden die unter Abschnitt 3.4.1, 3.4.2 und 3.4.3 erläuterten Prämissen berücksichtigt.

Das Potenzial an biologisch abbaubaren Abfällen ist weitaus größer (etwa um den Faktor 3 bis 4 [122]) als die Abfallmenge, welche das abfallwirtschaftliche System durchläuft.

¹ Bspw. wird der organische Anteil im Hausmüll im Regelfall weder energetisch noch stofflich verwertet, lediglich in wenigen mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen wird der organische Anteil durch die Erzeugung von Biogas verwertet.

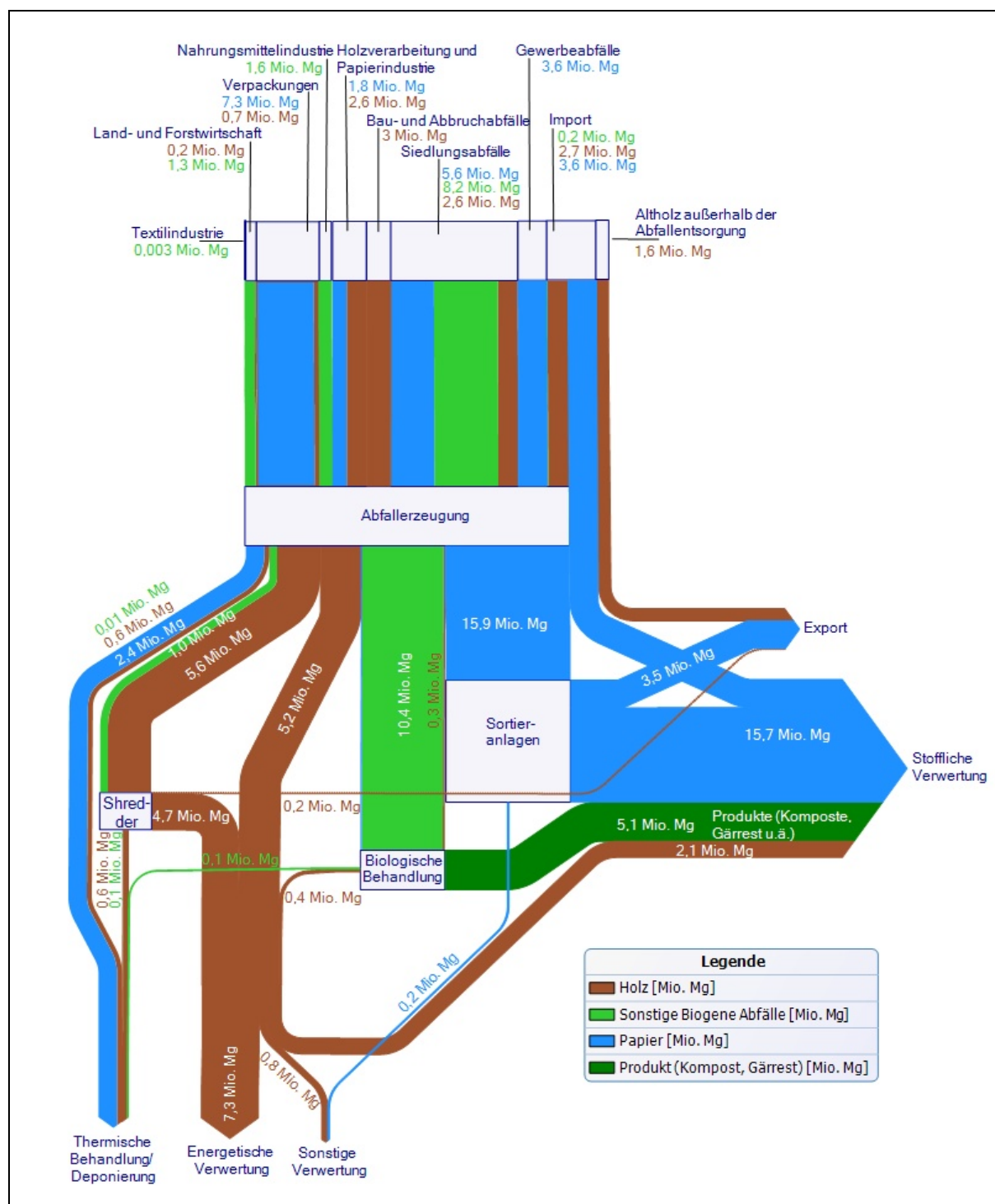


Abbildung 9: Materialstrom biologisch abbaubare Abfälle 2007

3.4.1 Küchen- und Gartenabfall in der Abfallwirtschaft

Für die einzelnen Bioabfallarten werden auf Basis von Literatur- und Erfahrungswerten (z. B. aus Sortieranalysen) prozentuale Gehalte an biologisch abbaubaren Materialien angesetzt, welche eine Darstellung der jeweiligen Bioabfallmasse ermöglichen.

Neben den im Inland anfallenden Abfällen werden die importierten Mengen, welche in deutschen Abfallbehandlungsanlagen behandelt wurden, ebenfalls in die Betrachtungen einbezogen.

In Abhängigkeit von der Abfallart stehen verschiedene Wege zur Verwertung bzw. Beseitigung zur Auswahl.

Bei der Verwertung wird zwischen der energetischen sowie der stofflichen Verwertung unterschieden. Die energetische Verwertung erfolgt mit dem Ziel der Energiegewinnung mittels verschiedener Verfahren (Verbrennung, Biogaserzeugung). Die stoffliche Verwertung ist bei Altholz vorwiegend durch den Einsatz in der Spanplattenindustrie gekennzeichnet. Geringere Altholzmengen werden über die Kompostierung stofflich verwertet. Sonstige biologisch abbaubare Abfälle werden durch Kompostierung stofflich verwertet. Andere Verwertungsarten spielen nahezu keine Rolle. Vergleichsweise geringe Mengen werden in MVA behandelt bzw. deponiert.

Shredder-, Sortier- und sonstige Behandlungsanlagen wurden, wie bereits in Abschnitt 3.1 erläutert, nicht getrennt bilanziert. Lediglich die biologische Behandlung wurde separat ausgewiesen. Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen wurden als Anlagen der Stoffstromtrennung den Behandlungsanlagen zugerechnet.

Eine Verifizierung der Daten mit anderen Statistiken ist kaum durchführbar, da für diesen Bereich keine umfassenden Statistiken existieren.

Die Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK) gibt bspw. in ihrer Statistik 8 Mio. Mg Bioabfall an, welche durch ihre Mitgliedsbetriebe verwertet wurden. Dabei wurden ca. 3 Mio. Mg Kompost erzeugt. Allerdings liegt der Organisationsgrad in der BGK lediglich bei ca. 50 % aller Anlagen, wobei insbesondere die Bioabfallkompostierungsanlagen organisiert sind, welche einen wesentlich höheren Input verarbeiten als der Großteil der Grünabfallkompostierungsanlagen². Dadurch liegt der Anteil der unter BGK-Gütekriterien erzeugten Komposte mit ca. 59 % vergleichsweise höher, derjenige des Inputmaterials sogar bei ca. 73 %.

Grundsätzlich besteht ein Mangel an Daten zur Abfallzusammensetzung bei Abfallgemischen. Dieser Mangel ist allerdings bei den biologisch abbaubaren Abfällen weitaus geringer ausgeprägt als bei anderen zu betrachtenden Stoffströmen, so dass für die biologisch abbaubaren Abfälle hier von einer relativ hohen Datensicherheit ausgegangen werden kann.

3.4.2 Altholz in der Abfallwirtschaft

Für den Bereich des Altholzes wurden die Daten des Stoffstrommodells Holz [9], welches von INTECUS in Kooperation mit INFRO – Informationssysteme für Rohstoffe (Prof. Dr. Udo Mantau) erarbeitet wurde, verwendet. Das Modell wurde erstmalig im Jahr 2005 (mit Daten von 2002) erarbeitet und im Jahr 2010 (mit Daten von 2007) verbessert und fortgeschrieben. Neben dem Bereich des Aufkommens und der Verwendung des Holzes wird die Behandlung und Entsorgung von Altholz abgebildet. Dabei wurde folgendermaßen vorgegangen:

Anhand der Datenbasis des Statistischen Bundesamtes wurde für das Altholz eine Zusammenfassung in acht relevante Abfallgruppen (nach Abfallschlüsselnummern) vorgenommen. Diese stellen die Ausgangsbasis für den Altholzstoffstrom im Bereich der Entsorgungswirtschaft dar. Basierend auf der Holzmarktstatistik bildet dies den Übergang zum Altholz in der Entsorgungswirtschaft. Die Fertigwarenbereiche des Holzes entfallen in der Entsorgung in die verschiedensten Abfallgruppen. Anhand der Abfallstatistiken wurde auf Basis der Schlüsselnummern ermittelt, aus welchem Bereich die Abfälle zur Behandlung stammen. Die Zuordnung der Abfallgruppen zu den Fertigwarenbereichen erfolgte über die Struktur der Abfallgruppen und zusätzliche Annahmen, die auf Erfahrungen mit den Abfallgruppen gestützt werden. Für die aktuelle Studie wurde die Fachserie 19 Reihe 1 „Abfallentsorgung“ des Statistischen Bundesamtes des Jahres 2007 [1] ausgewertet. Eine Absicherung und Überprüfung der Werte erfolgte anhand der Daten der Statistischen Landesämter.

² Jährlicher Input 2007 lt. Abfallstatistik [1] Bioabfallkompostierungsanlagen (325 Stück): 15.226 Mg/a, Grünabfallkompostierungsanlagen (633 Stück): 4.152 Mg/a

Folgende Altholzquellen wurden betrachtet:

- Abfälle aus der Forstwirtschaft
- Abfälle aus Halb- und Fertigwarenherstellung
- Bau- und Abbruchabfälle
- Verpackungsabfälle
- Altholz im Sperrmüll
- Getrennt erfasstes Altholz im Siedlungsabfall
- Altholz im Hausmüll und in hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen
- Gefährliche Abfälle
- Im- und Export

Weiterhin ist davon auszugehen, dass an der Entsorgungswirtschaft vorbei insbesondere Altholz zur Verwertung gelangt, ohne abfallwirtschaftliche Anlagen zu durchlaufen. Diese Mengen sind demzufolge statistisch nicht erfasst. Gleichzeitig gibt es insbesondere im Rahmen der land- und forstwirtschaftlichen Verwertung fließende Übergänge zur Abfallwirtschaft, so dass auch hier eine statistisch saubere Trennung nicht gewährleistet werden kann.

Die nachfolgende Grafik (Abbildung 10) zeigt den Mengenstrom des Altholzes in Deutschland für das Jahr 2007.

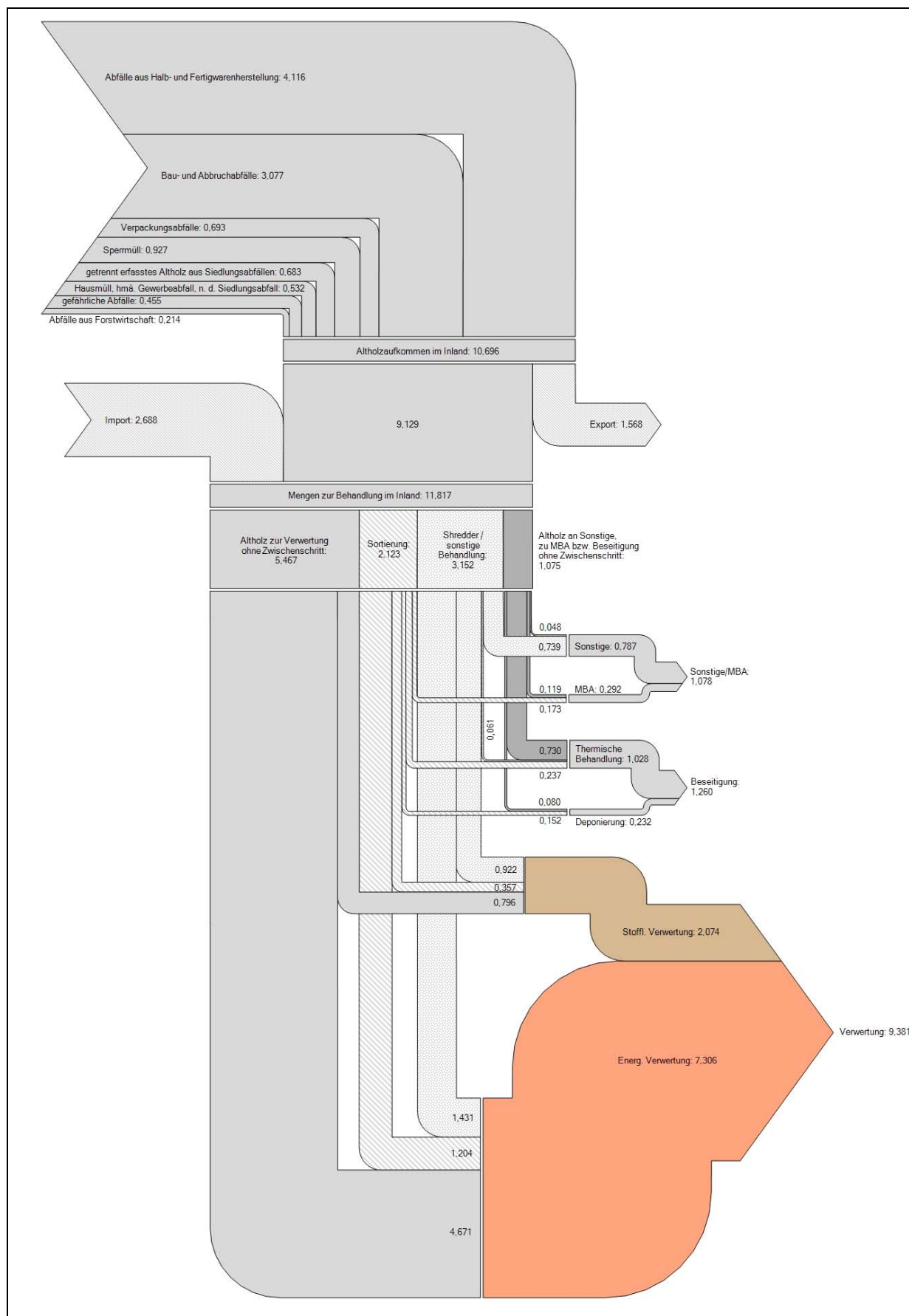


Abbildung 10: Altholz 2007 – Materialstrom-Modell – Flussdiagramm (in Mio. Mg_{lütro})

3.4.3 Altpapier in der Abfallwirtschaft

Für den Stoffstrom Altpapier wurde die Statistik des Verbandes Deutscher Papierfabriken e.V. (VDP) [10] zugrunde gelegt, welche seit dem Jahr 1992 jährlich durch die INTECUS GmbH erarbeitet wird. Dabei kommt folgende Methodik zur Anwendung:

Der VDP erhebt von seinen Mitgliedern statistische Daten. Aus diesen Daten kann der VDP die Bilanz von der Papier-/Pappeherzeugung bis zum theoretischen Altpapier-Potenzial beim Endverbraucher erstellen.

In diese Bilanz gehen u. a. auf der Inputseite ein:

- Neufaser/Hilfsstoffe,
- Altpapier innerhalb der Papierfabrikation (inkl. Altpapierim- und -export) unter Berücksichtigung des Altpapiereinsatzes außerhalb der Papierfabrikation und
- Zusatzstoffe zur Papierherstellung.

Aus der Bilanz gehen:

- Export von Papier/Pappe (seit 2002 bis dahin Altpapierimport)
- Produktionsspezifische Abfälle,
- Langlebige Produkte,
- Nicht erfassbare Produkte (Abwasser, Hausbrand),
- Nicht verwertbares Abfallpapier beim Endverbraucher,
- Remittenden (wieder in den Altpapierkreislauf) und
- Altpapier aus der Verarbeitung (wieder in den Altpapierkreislauf).

Ausgehend vom theoretischen Altpapier-Potenzial beim Endverbraucher wird in Auswertung von Restabfallzusammensetzungen der Altpapieranteil, welcher somit in die Restabfallentsorgung geht, bestimmt. Die Differenz zwischen dem theoretischen Altpapier-Potenzial beim Endverbraucher und dem Altpapier in der Restabfallentsorgung ist das getrennt gesammelte Altpapier aus Haushalt und Gewerbe.

Zur Bestimmung der haushaltsnahen (kommunalen) Erfassung werden die Abfallbilanzen der Bundesländer ausgewertet. Die Hochrechnung auf die Bundesrepublik ergibt die Menge an haushaltsnah erfasstem Altpapier. Die Differenz zum getrennt gesammelten Altpapier aus Haushalt und Gewerbe ist die gewerblich erfasste Menge. Die gewerbliche Erfassung erfolgt somit auf den Wegen

- Sammlung an Großverkaufsstellen und beim Erzeuger (Kaufhausaltpapier),
- Gemischte gewerbliche Sammlung (Kleingewerbe) und
- alternative gewerbliche Sammlungen zur kommunal organisierten Altpapiersammlung (private blaue Tonne, Aufkaufstellen etc.).

Nach dieser Statistik befanden sich im Jahr 2007 insgesamt 18,429 Mio. Mg Altpapier im Bereich der Abfallentsorgung, welche sich aus den folgenden Bestandteilen zusammensetzten:

- Altpapier in der Restabfallentsorgung: 2,558 Mio. Mg (Deponierung: 0,093 Mio. Mg, thermische Behandlung (MVA+EBS): 2,285 Mio. Mg, Kompostierung: 0,180 Mio. Mg)
- getrennt erfasstes Altpapier aus Haushalten: 6,298 Mio. Mg
- getrennt erfasstes Altpapier aus dem Gewerbe: 7,733 Mio. Mg
- Altpapier aus der Verarbeitung: 1,440 Mio. Mg
- Remittenden (geschätzt): 0,400 Mio. Mg

Der Altpapiereinsatz in der Papierindustrie betrug im Jahr 2007 15,746 Mio. Mg, wobei sich Im- und Exporte und der Einsatz von Altpapier außerhalb der Papierfabrikation nahezu ausgleichen. Eine Gesamtübersicht über den Mengenstrom Papier und Altpapier in Deutschland zeigt die Abbildung 11.

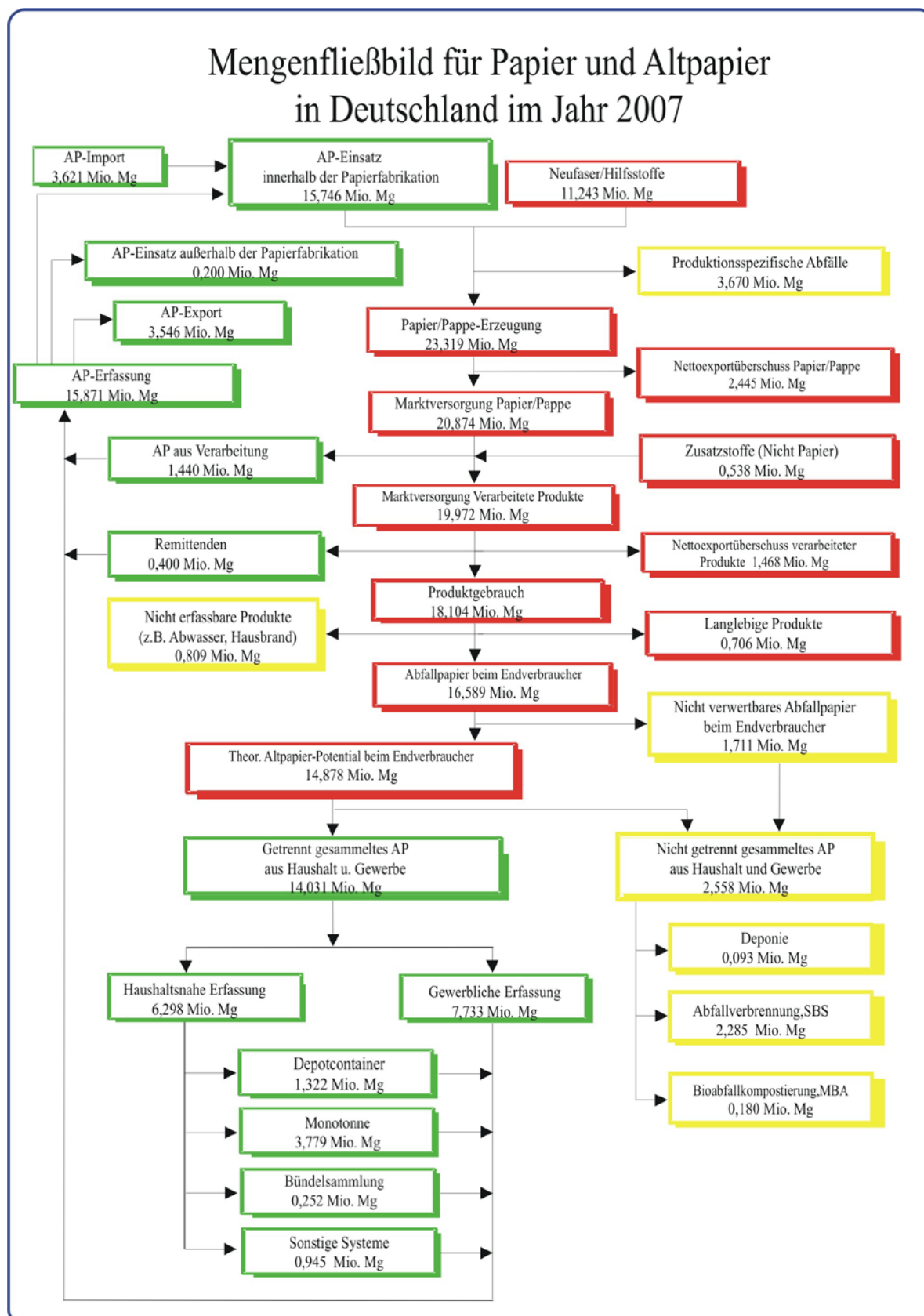


Abbildung 11: Mengenfließbild für Papier und Altpapier in Deutschland 2007 [10]

Die Abfallstatistik weist demgegenüber lediglich folgende Mengen aus, welche sich auf insgesamt 8,8018 Mio. Mg summieren:

- Verpackungen aus Papier und Pappe (getrennt erfasst): 3,646 Mio. Mg
- Verpackungen aus Papier und Pappe (Abfälle zur Verwertung (AzV) aus Behandlungsanlagen): 0,1973 Mio. Mg
- Papier und Pappe (getrennt erfasst): 4,5015 Mio. Mg
- Papier und Pappe (AzV aus Behandlungsanlagen): 0,1191 Mio. Mg
- Papier und Pappe (nicht differenzierbar): 0,3379 Mio. Mg

Unklar ist der Anteil an Papieren im Bereich der Abfälle aus der Herstellung und Verarbeitung von Zellstoff, Papier, Karton und Pappe (ASN 03 03), wo bei einigen Abfällen eine Zuordnung von Altpapier aus der Verarbeitung sowie Remittenden vermutet werden kann.

Folgende Mengen wurden lt. Abfallstatistik im Jahr 2007 durch die Abfallwirtschaft abgegeben (insgesamt 8,3929 Mio. Mg):

- Papier und Pappe (verschiedene Sorten, Abfälle zur Beseitigung (AzB)): 0,0312 Mio. Mg
- Papier und Pappe (verschiedene Sorten, AzV): 8,3617 Mio. Mg

Die Differenzen im Bereich der Abfallentsorgung (Deponie, MVA, EBS, Kompostierung) sind insbesondere dadurch zu erklären, dass hier Altpapier, welches Bestandteil in gemischt erfassten Fraktionen (insbesondere gemischter Siedlungsabfall) ist, Berücksichtigung findet und sich somit als getrennt erfasste Fraktion in der Statistik nicht wiederfindet.

Erhebliche Differenzen in Höhe von 7,5 Mio. Mg sind für den Bereich der Altpapierverwertung festzustellen. Einem (im-/exportbereinigten) Altpapiereinsatz in und außerhalb der Papierindustrie in Höhe von 15,871 Mio. Mg stehen lediglich 8,3617 Mio. Mg Papier und Pappe gegenüber, welche lt. Abfallstatistik durch die Entsorgungswirtschaft bereitgestellt werden. Die Differenzmenge dürfte insbesondere aus Altpapiermengen bestehen, welche von Altpapierhändlern direkt ohne Sortierung den Papierfabriken als Handelsware zugeführt werden.

3.4.4 Klärschlamm

Im Jahr 2008 fielen in Deutschland ca. 2 Mio. Mg Klärschlamm (Trockenmasse) an. Die Klärschlammverwertung erfolgt im Landschaftsbau und in der Landwirtschaft sowie über verschiedene Entsorgungs- und Verwertungsverfahren innerhalb der Abfallwirtschaft, insbesondere durch thermische Verwertung. Die landwirtschaftliche Verwertung zeigt in den letzten Jahren in Deutschland eine leicht rückläufige Entwicklung. Hingegen gewinnt die thermische Verwertung zunehmend an Bedeutung.

Der biogene Anteil im kommunalen Klärschlamm wird von Faulstich [125] mit ca. 60 % angegeben.

Eine einheitliche statistische Erhebung zur Klärschlammbehandlung in Deutschland gibt es aktuell nicht. Die Klärschlamm-mengen, welche im Rahmen des abfallwirtschaftlichen Bereiches behandelt werden, sind in der Fachserie 19 Reihe 1 des Statistischen Bundesamtes dokumentiert. Die Angaben darin beziehen sich auf einen durchschnittlichen Trockensubstanzgehalt des Klärschlammes von ca. 30 %.

Die Darstellung des Materialstroms für das Jahr 2008 (Abbildung 12) erfolgte auf Basis des Trockensubstanzgehaltes. Die Mengen innerhalb der Abfallwirtschaft wurden unter Nutzung der Fachserie 19 [127] ermittelt. Die Angaben zu den Mengen, welche außerhalb der Abfallwirtschaft verwertet werden, wurden anhand von Veröffentlichungen des BMU [126] berechnet.

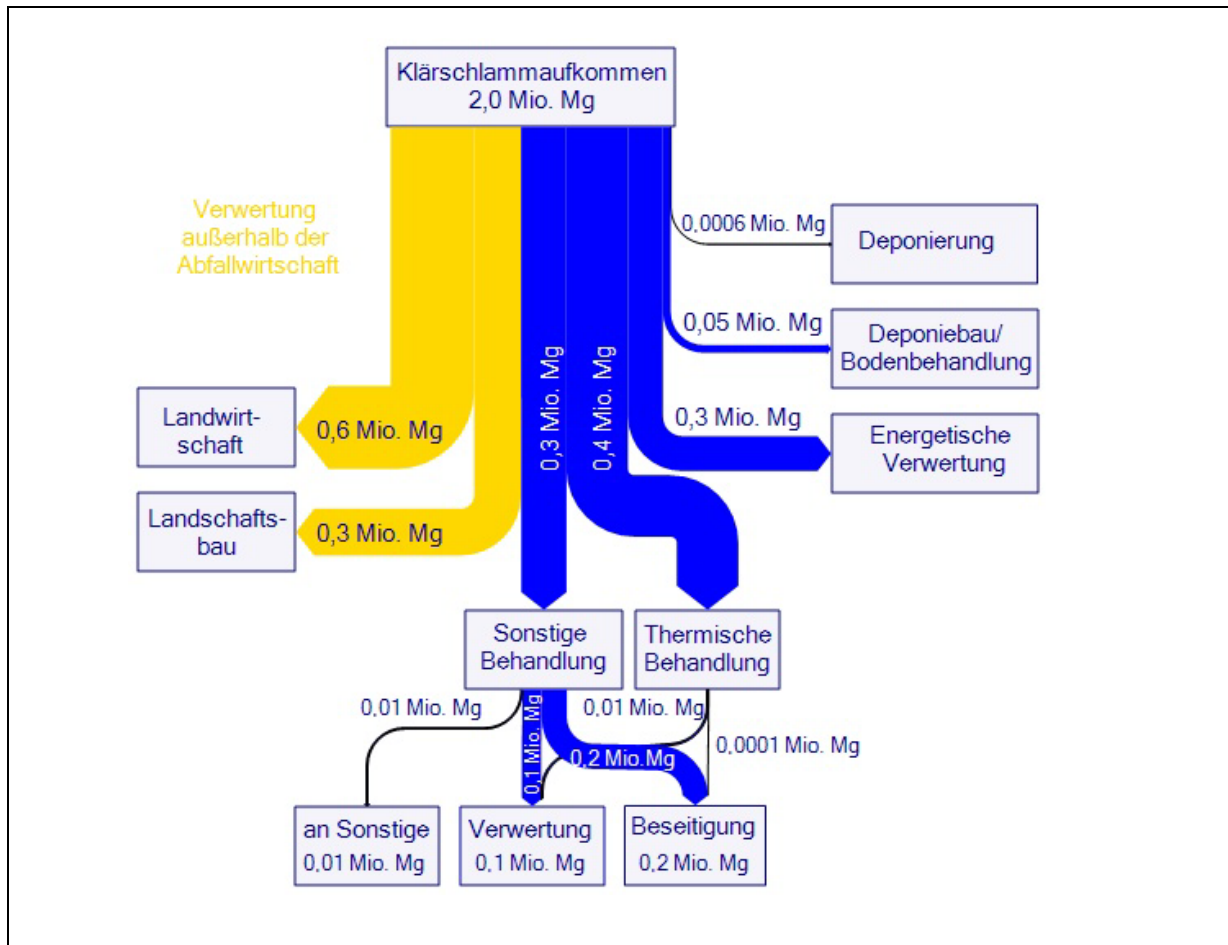


Abbildung 12: Materialstrom Klärschlamm 2008

4 Auswahl detaillierter Materialströme

Im Rahmen der Betrachtung detaillierter Materialstrombilanzen wurden jeweils drei Metalle sowie Kunststoffe nach den im jeweiligen Abschnitt einleitend beschriebenen Kriterien charakterisiert und eine Auswahl begründet. Diese Kriterien sollen die jeweilige Bedeutung der ausgewählten Materialströme für die Ressourcenproduktivität, im Speziellen die Rohstoffproduktivität, dokumentieren.

4.1 Materialströme der Metalle

Zur Auswahl der näher zu betrachtenden Metalle wurden folgende Kriterien herangezogen:

Ökonomische Kriterien:

- Mengenrelevanz
- Import/Export
- Importrisiko
- Marktpreise
- Statische Ressourcenreichweite
- Verwendung

Ökologische Kriterien:

- Kumulierter Energieaufwand
- Rohstoff- / Materialaufwand

Unter Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden auf dieser Basis

- **Eisen und Stahl**
- **Kupfer**
- **Gold**

zur detaillierten Analyse ausgewählt. Die Ausprägungen der betrachteten Kriterien für diese Metalle sind im Folgenden dargelegt.

Mengenrelevanz:

Ein wesentlicher Faktor für einen Beitrag zur Ressourcenproduktivität ist die Mengenrelevanz. Je größer die produzierte Menge eines Materials bzw. der mit seiner Produktion verbundene Rohstoffeinsatz ist, desto größer ist bei entsprechender Recyclingquote der mögliche Beitrag zur Rohstoffproduktivität, die als Indikator in der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie fortgeschrieben wird. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Verwertungsquote erfasster Altmetalle bei nahezu 100 % liegt. Aufgrund des zunehmenden Bedarfs sowie des Einflusses des anthropogenen Lagers entstammen allerdings bei den Materialien Eisen und Stahl sowie Kupfer lediglich zwischen 50 und 60 % der Produktion aus sekundären Vorstoffen [3, 11, 12]. Ein Recycling von Gold aus Abfällen, worin Gold dissipativ vorkommt, findet nur untergeordnet durch vereinzelte Technologieanbieter (bspw. Aurubis) statt. Das Kriterium Mengenrelevanz ist insbesondere für die Rohstoffe Eisen und Stahl kennzeichnend.

Mengenrelevanz	
Eisen und Stahl (2007)	Rohstahlproduktion: 48,6 Mio. Mg, davon 21,7 Mio. Mg Schrotteinsatz Verbrauch in Deutschland: ~41 Mio. Mg
Kupfer (2007)	Produktion: 712.000 Mg Raffinadekupfer, davon 364.000 Mg aus sekundären Vorstoffen, Recyclingrate ~55 % [22] Verbrauch in Deutschland: ~1,1 Mio. Mg [24]
Gold (2007)	Einsatz in Deutschland: 97 Mg

Import/Export:

Das Verhältnis von Importen zu Exporten charakterisiert die Abhängigkeit eines Rohstoffmarktes von ausländischen Quellen. Die Bundesrepublik Deutschland ist aufgrund fehlender eigener Reserven, was metallische Rohstoffe angeht, ein klassisches Importland. Während bei Eisen und Stahl ein Exportüberschuss bei Schrott zu verzeichnen ist, ist der Saldo bei Kupfer nahezu ausgeglichen. Ursächlich für den Exportüberschuss ist die gesteigerte Nachfrage ausländischer Märkte. Primärrohstoffe werden nahezu ausschließlich importiert. Insofern ist abzuleiten, dass ein Beitrag zur Rohstoffproduktivität darin bestehen kann, die Verwertung von Sekundärmaterialien im Inland zu erhöhen. Hier sind allerdings auch die vorhandenen inländischen Produktionskapazitäten zu berücksichtigen. Letztlich zeigt sich am Import-/Export-Verhältnis die Abhängigkeit eines Marktes von ausländischen Rohstoffmärkten. Für alle drei hier betrachteten Metalle Eisen und Stahl, Kupfer und Gold ist die Abhängigkeit von ausländischen Rohstoffmärkten in jedem Fall belegt.

Im- und Export [3]	
Eisen und Stahl (2007)	Stahlschrott: Einfuhr: 6,33 Mio. Mg, Ausfuhr: 8,5 Mio. Mg Eisenerz: ausschließlich Import
Kupfer (2007)	Kupferschrott: Einfuhr: 358.000 Mg, Ausfuhr: 289.000 Mg Kupfererze und -konzentrate: Einfuhr: 1.300.000 Mg, Ausfuhr: 0 Mg Kupfer zum Raffinieren: Einfuhr: 32.000 Mg, Ausfuhr: 0 Mg Raffiniertes Kupfer: Einfuhr: 892.000 Mg, Ausfuhr: 138.000 Mg
Gold (2007)	Importüberschuss: 16,6 Mg

Importrisiko:

Das Importrisiko wird durch einen Risikoindikator gekennzeichnet. Dieser Risikoindikator wurde von RWI Essen, ISI und BGR [11] entwickelt und beschreibt für importierte Materialien, deren Förderung auf wenige Länder konzentriert ist, anhand der Mittelung fünf verschiedener Indikatoren der Weltbank das Risiko, dass die Importe aufgrund politischer und wirtschaftlicher Instabilität der Importländer ausfallen könnten. Als kritische Grenze wurde der Wert 0,59 gewählt, wobei alle Länder, deren Wert geringer ist, als politisch und wirtschaftlich risikoreich eingestuft werden. Von den hier betrachteten Metallen gilt demzufolge der Import von Kupfer als besonders risikoreich.

Importrisiko	
Eisen- und Stahl	gering
Kupfer	hoch, Risikoindikator 0,56
Gold	niedrig, Risikoindikator >0,56

Marktpreise:

Je teurer ein metallischer, importierter Rohstoff ist, desto größer ist der Beitrag zur Rohstoffproduktivität, wenn ein Primärrohstoff durch einen inländisch gewonnenen Sekundärrohstoff substituiert wird. Vor diesem Hintergrund kommt Gold eine besondere Bedeutung aus dem Blickwinkel dieses Indikators zu, eine mittlere Bedeutung hat Kupfer. Stahl und Eisen haben ein vergleichsweise niedriges Preisniveau, wobei die Preissteigerungen aufgrund der Nachfrage des asiatischen Marktes durchaus volkswirtschaftliche Relevanz besitzen.

Marktpreise [12]	
Eisen- und Stahl (2007)	Roheisen: 249 €/Mg Stahlschrott: 218 €/Mg
Kupfer (2007)	Kupferschrott: 4.315 €/Mg Kupfer: 5.242 €/Mg
Gold (2007)	Gold: ~17.000 €/kg, Preise stark schwankend Gold verarbeitet: ~18.000 €/kg, Preise stark schwankend

Statische Ressourcenreichweite:

Bei der Darstellung der statischen Reichweite wird zwischen der statischen Reservenreichweite und der statischen Ressourcenreichweite unterschieden. Während die Reserven die Vorkommen beschreiben, die bei den gegenwärtigen Preisen wirtschaftlich gewinnbar sind, beschreiben die Ressourcen sämtliche Lagerstätten, welche zukünftig unter Berücksichtigung von technologischem Fortschritt sowie möglicher Preissteigerungen nutzbar sind. Die Reserven sind insofern in erheblichem Maße vom Marktpreis und dem wissenschaftlich-technischen Fortschritt abhängig und demzufolge als Indikator wenig geeignet. Unter Bewertung der statischen Ressourcenreichweite ergibt sich ein besonderes Augenmerk auf Kupfer und Gold, während Eisen und Stahl als quasi unendlich verfügbar gelten.

Statische Ressourcenreichweite [11, 13, 14]	
Eisen und Stahl	> 600 Jahre, praktisch unerschöpflich
Kupfer	> 190 Jahre
Gold	> 37 Jahre

Verwendung:

Bei der Verwendung wird unterschieden in dissipative und nicht dissipative Verwendung wobei die Übergänge durchaus fließend sind. Die dissipative Verwendung ist gekennzeichnet durch eine breit verteilte Verwendung eines Materials in jeweils geringen Konzentrationen. Derartige Verwendungen erschweren das Recycling und sind Hauptursache für geringe Recyclingraten. Diese Art der Verwendung ist bei den betrachteten Metallen kennzeichnend für Gold.

Verwendung [15]	
Eisen und Stahl	überwiegend nicht dissipativ, Fahrzeugbau, Bauindustrie, Maschinen- und Anlagenbau
Kupfer	überwiegend nicht dissipativ, Elektroindustrie (Kabel, Kontakte, Transformatoren, Elektromotoren), Bauindustrie, Maschinenbau, Münzwesen
Gold	Überwiegend dissipativ, Schmuckwaren, Elektronikindustrie (Bonddraht, Kontakte, Schaltkreise), Zahlungsmittel, Zahntechnik

Energieverbrauch:

Recycling ist eine wesentliche Möglichkeit zur Einsparung von Energie, da die Gewinnung von Sekundärmetallen im Regelfall weniger Energieaufwand erfordert als die Gewinnung von Primärmetallen. Mittlere Effekte werden bei Eisen und Stahl sowie Kupfer erzielt. Für Gold sind die Effekte bedeutend.

Energieverbrauch [16, 59]	
Eisen und Stahl	22.573 MJ/Mg (Oxygenstahl)
	7.225 MJ/Mg (Elektrostahl)
Kupfer	69.973 MJ/Mg (Primärkupfer)
	26.472 MJ/Mg (Sekundärkupfer)
Gold	261.210.200 MJ/Mg (Primärrohstoff)

Rohstoff-/ Materialaufwand:

Ein wichtiges Kriterium ist der Rohstoff- bzw. Materialaufwand, angegeben als Quotient der verwendeten Rohstoff- oder Materialmenge und der erzeugten Metallmenge. Hierfür existieren verschiedene Kennzahlensysteme mit unterschiedlichen Bilanzgrenzen. Als Indikator wurde hier der kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) anhand der Datenbank GEMIS des Öko-Instituts [16] berechnet. Der KRA ist besonders hoch bei Kupfer und vergleichsweise gering bei Eisen und Stahl. Für Gold, das aufgrund seiner sehr geringen Erzkonzentrationen einen immensen Materialrucksack aufweist, ist mit sehr hohen Effekten zu rechnen.

Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) nach [16, 59]	
Eisen und Stahl	2,513 Mg/Mg (Oxygenstahl)
	0,471 Mg/Mg (Elektrostahl)
Kupfer	62,204 Mg/Mg (Primärkupfer)
	0,718 Mg/Mg (Sekundärkupfer)
Gold	740.317,694 Mg/Mg (Primärrohstoff)

Zusammenfassung:

Die einzelnen hier aufgeführten, spezifischen Indikatoren zeigen unterschiedliche Profile für die betrachteten Metalle. Entscheidend für den Beitrag zur Rohstoffproduktivität auf volkswirtschaftlicher Ebene sind allerdings auch immer die Produktionsvolumina sowie die Recyclingquoten. Für die Gesamtbewertung sind die einzelnen Indikatoren immer anhand dieser mengenbezogenen Indikatoren zu charakterisieren.

4.2 Materialströme der Kunststoffe

Zur Auswahl der näher zu betrachtenden Kunststoffe wurden folgende Kriterien herangezogen:

Ökonomische Kriterien:

- Mengenrelevanz
- Marktpreise
- Verwendung

Ökologische Kriterien:

- Kumulierter Energieaufwand
- Rohstoff- / Materialaufwand
- Recyclierbarkeit

Unter Abstimmung mit dem Auftraggeber wurden auf dieser Basis folgende Kunststoffarten für die nähere Betrachtung ausgewählt:

- **Polyethylen (PE) (HDPE und LDPE)**
- **Polyethylenterephthalat (PET)**
- **Polyvinylchlorid (PVC)**

Die Ausprägungen der betrachteten Kriterien für diese Kunststoffe sind im Folgenden dargelegt.

Mengenrelevanz:

Ein wesentlicher Faktor für einen Beitrag zur Ressourcenproduktivität ist die Mengenrelevanz. Je größer die importierte, bzw. produzierte Menge eines Materials ist, desto größer ist bei entsprechender Recyclingquote der mögliche Beitrag zur Rohstoffproduktivität. Mengenrelevant sind insbesondere PVC und PE.

Mengenrelevanz [5]	
Polyethylen (PE) (2007)	Produktion: 2.755.000 Mg, Verarbeitung: 3.230.000 Mg, Abfälle: 1.871.000 Mg
Polyethylenterephthalat (PET) (2007)	Produktion: 590.000 Mg, Verarbeitung: 500.000 Mg, deutliches Wachstum, Abfälle: 397.000 Mg
Polyvinylchlorid (PVC) (2007)	Produktion: 1.875.000 Mg, Verarbeitung: 1.865.000 Mg, deutliches Wachstum, Abfälle: 563.000 Mg

Marktpreise:

Je teurer ein Rohstoff ist, desto größer ist der Beitrag zur Rohstoffproduktivität, wenn ein aus primären Rohstoffen hergestellter Kunststoff durch einen inländisch gewonnenen Sekundärrohstoff substituiert wird. Das Preisniveau der Sekundärrohstoffe liegt bei allen drei betrachteten Kunststoffen deutlich unter dem Preisniveau der Primärware.

Marktpreise [12]	
Polyethylen (PE) (2007)	Primärkunststoffe: ~1.250 €/Mg Sekundärkunststoffe: 830-930 €/Mg
Polyethylenterephthalat (PET) (2007)	Primärkunststoffe: 1.270 €/Mg Sekundärkunststoffe: 516 €/Mg
Polyvinylchlorid (PVC) (2007)	Primärkunststoffe: 976 €/Mg Sekundärkunststoffe: 409 €/Mg

Verwendung:

Die Verwendung von Kunststoffen erfolgt in vielen Fällen schwerpunktmäßig in wenigen bestimmten Anwendungsbereichen, in denen die Erfassung recycelbarer Kunststoffe gut durchzuführen ist. Dies trifft sowohl für PVC, PET und PE zu.

Verwendung [5]	
Polyethylen (PE)	Verpackung, Bau
Polyethylenterephthalat (PET)	Verpackung
Polyvinylchlorid (PVC)	Bau

Energieverbrauch:

Recycling ist eine wesentliche Möglichkeit zur Einsparung von Energie, da die Gewinnung von Sekundärkunststoffen im Regelfall weniger Energieaufwand erfordert als die Gewinnung von Primärkunststoffen. Die Datengrundlage ist hier eher eingeschränkt. Grundsätzlich ist der Energieaufwand für die Erzeugung von Kunststoffen relativ hoch, wobei dieser definitionsgemäß auch den Energieinhalt des Kunststoffs selbst beinhaltet.

Kumulierter Energieaufwand [16]	
Polyethylen (PE)	HDPE-Primärkunststoff: 76.650 MJ/Mg LDPE-Primärkunststoff: 81.160 MJ/Mg
Polyethylenterephthalat (PET)	PET-Primärkunststoff: 98.100 MJ/Mg
Polyvinylchlorid (PVC)	PVC-Primärkunststoff: 53.820 MJ/Mg

Rohstoff- / Materialaufwand:

Ein wichtiges Kriterium ist zudem der Rohstoff- bzw. der Materialaufwand, angegeben als Quotient der verwendeten Rohstoff- oder Materialmenge und der erzeugten Kunststoffmenge. Hierfür existieren verschiedene Kennzahlensysteme mit unterschiedlichen Bilanzgrenzen. Als Indikator wurde hier der kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) anhand der Datenbank GEMIS des Öko-Instituts [16] berechnet.

Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) nach [16]	
Polyethylen (PE)	HDPE-Primärkunststoff: 1,969 Mg/Mg LDPE-Primärkunststoff: 2,040 Mg/Mg
Polyethylenterephthalat (PET)	PET-Primärkunststoff: 2,585 Mg/Mg
Polyvinylchlorid (PVC)	PVC-Primärkunststoff: 1,814 Mg/Mg

Recyclierbarkeit:

Die Eignung von Kunststoffen für das Recycling ist grundsätzlich gut. Probleme können durch Störstoffe vorkommen. Das Recycling von PVC wird insbesondere durch das darin enthaltene Chlor negativ beeinflusst.

Recyclierbarkeit [74]	
Polyethylen (PE)	Regranulation, gute Recyclierbarkeit, Probleme durch Einfärbungen möglich
Polyethylenterephthalat (PET)	vielfältig möglich durch mechanische und chemische Verfahren, gute Recyclierbarkeit, Probleme durch Etikettenkleber und Restfeuchte möglich
Polyvinylchlorid (PVC)	vielfältig möglich, momentan hauptsächlich durch mechanische Verfahren (Mahlgut oder Regranulat); chemische Verfahren, auch mit HCl-Rückgewinnung, möglich; Umweltgefahren durch frei werdendes Chlor bei thermischer Beanspruchung

Zusammenfassung:

Die einzelnen hier aufgeführten, spezifischen Indikatoren zeigen unterschiedliche Ausprägungen für die betrachteten Kunststoffe, obgleich diese insgesamt homogener sind, als jene der Metalle. Entscheidend für den Beitrag zur Rohstoffproduktivität auf volkswirtschaftlicher Ebene sind auch hier die Produktionsvolumina sowie die Recyclingquoten. Für die Gesamtbewertung sind die spezifischen Indikatoren anhand dieser mengenbezogenen Indikatoren zu charakterisieren.

5 Detaillierte Materialstrombilanzen

5.1 Eisen und Stahl

Die Eisen- und Stahlschrottbilanz wurde bereits im Abschnitt 3.1 gemeinsam mit den NE-Metallen dargestellt. An dieser Stelle soll neben der Darstellung des Stahlverbrauchs nach unterschiedlichen Herkunftsbereichen fortführend auf die Eisen- und Stahlschrottverwertung eingegangen werden.

Herkunftsbereiche

Eisen, bzw. der daraus gewonnene Stahl, ist weltweit der am meisten eingesetzte metallische Werkstoff. Im Jahr 2007 wurden 48,6 Mio. Mg Rohstahl in Deutschland erzeugt [114]. Weltweit waren dies im gleichen Zeitraum 1.343 Mio. Mg Stahl [115].

Zirka 41 Mio. Mg Stahl wurden im Jahr 2007 in Deutschland verbraucht [116]. Die deutsche Stahlindustrie bietet mehr als 2.000 Stahlsorten an [117]. Den Stahlverbrauch durch einzelne Branchen zeigt die Abbildung 13 für das Jahr 2005.

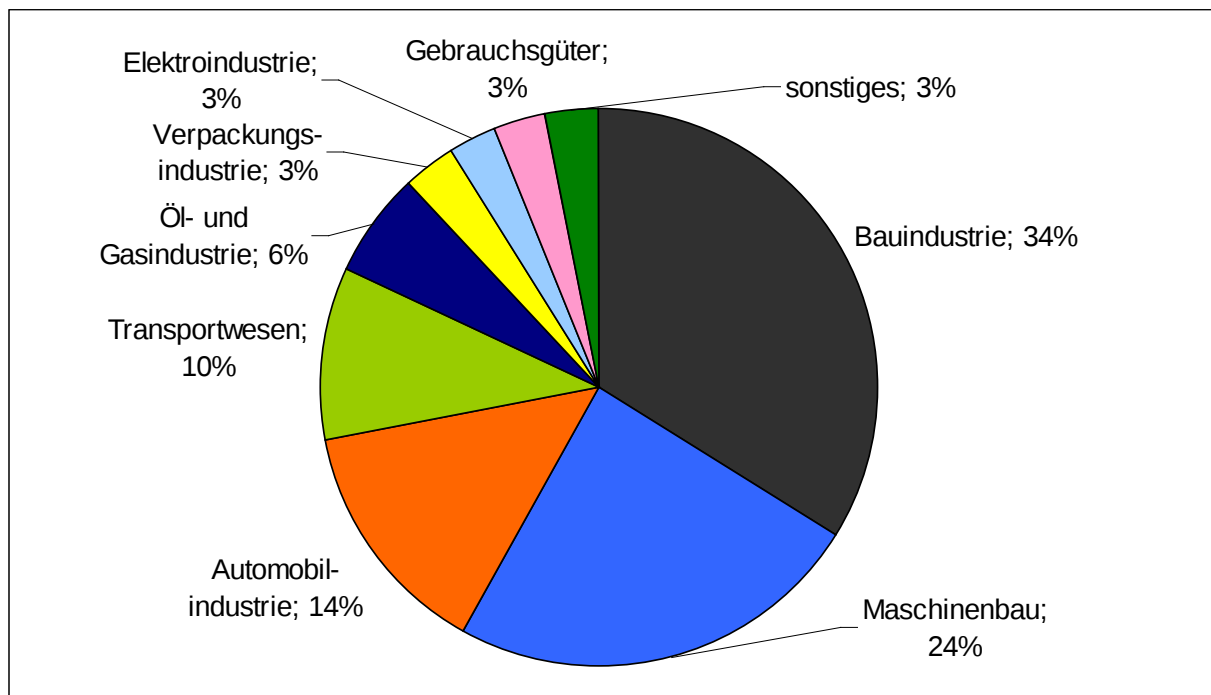


Abbildung 13: Stahlverbrauch nach Branchen - 2005 [118]

Die Bauindustrie ist die Branche, welche im Jahr 2005 die größten Stahlmengen verarbeitet hat. Von besonderer Relevanz sind hier die Einsatzbereiche Stahlbau, Wohnungsbauwesen und Verkehrsbau (speziell Brückenbau). Die Verwendung von Stahl im Bauwesen hat den Vorteil einer weitreichenden Vorfertigung der eingesetzten Stoffe sowie, dass durch dieses Material mit geringen Querschnitten große Lasten getragen werden können.

Im Maschinenbau kann die Stahlqualität sehr flexibel an Anforderungen der zu produzierenden Bauteile angepasst werden. So können beispielsweise Spezialstähle mit hoher Verschleißfestigkeit an Aggregaten eingesetzt werden, die starken Beanspruchungen ausgesetzt sind.

Die prozentuale Entwicklung der nach Branchen differenzierten Verwendung von Stahl in Deutschland ab dem Jahr 2003 wurde von der Wirtschaftsvereinigung Stahl [119] wie in Abbildung 14 dargestellt erhoben.

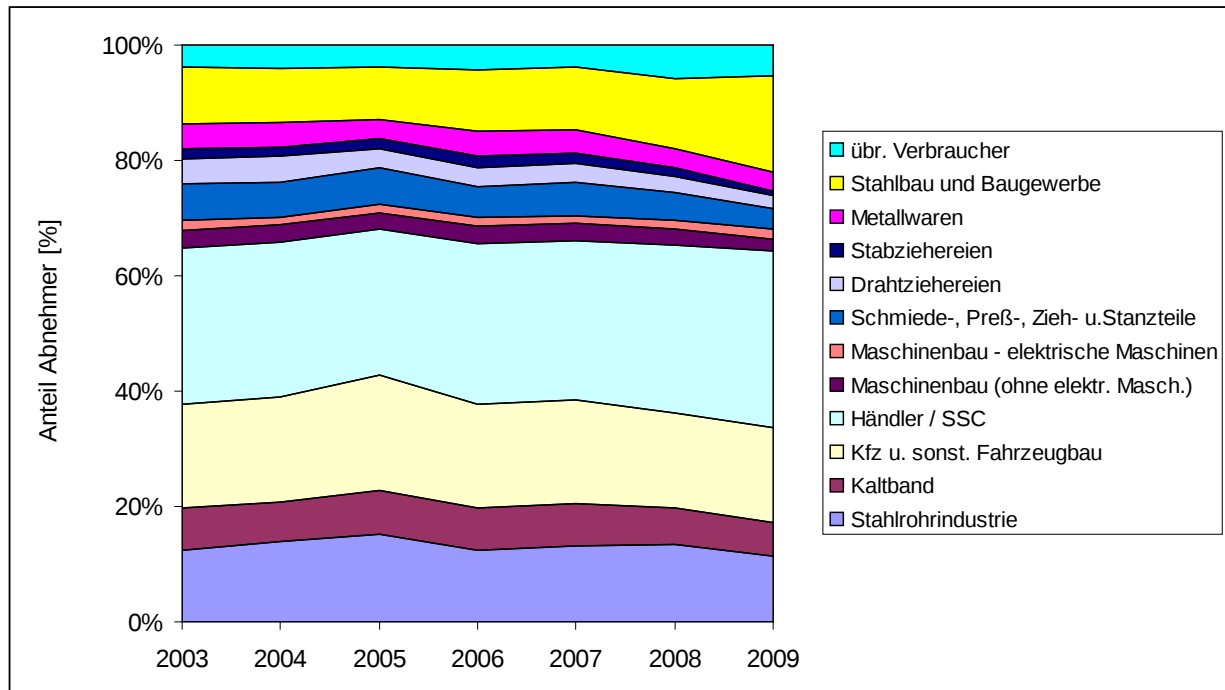


Abbildung 14: Inlandslieferungen der Werke an Stahl nach Abnehmergruppen [119]

Das prozentuale Verhältnis des Stahleinsatzes in den verschiedenen Branchen unterliegt Schwankungen, welche sich beispielsweise ab dem Jahr 2007 mit einer Erhöhung des Stahlanteils für den Stahlbau und das Baugewerbe und entsprechendem Rückgang bspw. in der Stahlrohrindustrie oder dem Kaltband widerspiegeln. Der Rückgang der absoluten Mengen als Auswirkung der Wirtschaftskrise schlug sich in den Jahren 2008 und 2009 bei bestimmten Branchen mit drastischen Einbrüchen im Auftragseingang nieder. So fiel beispielsweise der Bedarf an Stahlrohren innerhalb eines Jahres um ca. 65 %. Beim Maschinen- und Fahrzeugbau wie bei der Metallwarenindustrie war ein Auftragsrückgang um 40 % bis 50 % zu verzeichnen. Ab 2009 konnte ein leichter Wiederanstieg der Auftragslage verzeichnet werden (siehe Abbildung 15).

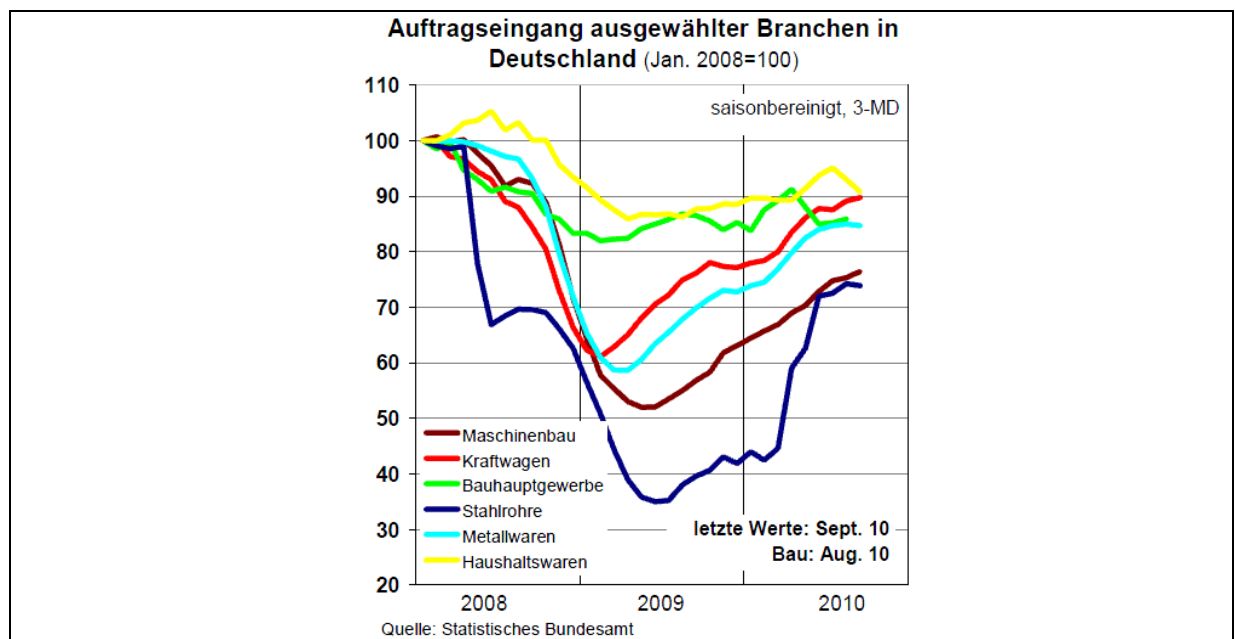


Abbildung 15: Auftragseingang ausgewählter stahlverarbeitender Branchen in Deutschland [120]

Lager

Nach Wittmer [54] beträgt die einwohnerspezifische anthropogene Stahllagermenge in der Schweiz etwa 5 bis 10 Mg/Einwohner. Diese Zahl kann in vergleichbarer Größenordnung auf Deutschland übertragen werden. Ausgehend von einer Einwohnerzahl von 82,2 Mio. für das Jahr 2007 ergibt sich eine Stahl-Lagermenge im Bereich von 400 bis 825 Mio. Mg Stahl. Eine detaillierte Analyse des Stahllagers wurde bislang nicht vorgenommen.

Recyclingverfahren

Das Stahlschrottrecycling erfolgt überwiegend im Elektrolichtbogenofen. In wesentlich geringeren Mengen wird Stahlschrott auch für die Herstellung von Oxygenstahl zur Kühlung des exothermen Prozesses genutzt. Nach Stahl-Zentrum [116] wurden in Deutschland 2007 die 48,6 Mio. Mg Rohstahl zu ~69 % im Oxygenstahlhofen und ~31 % im Elektrolichtbogenofen hergestellt (siehe Abbildung 16). Aufgrund von Qualitätsanforderungen an bestimmte Stahlprodukte kann der Einsatz von Stahlschrott den Roheiseneinsatz nicht vollständig substituieren. So lassen sich bestimmte Stahlsorten nur aus Roheisen herstellen.

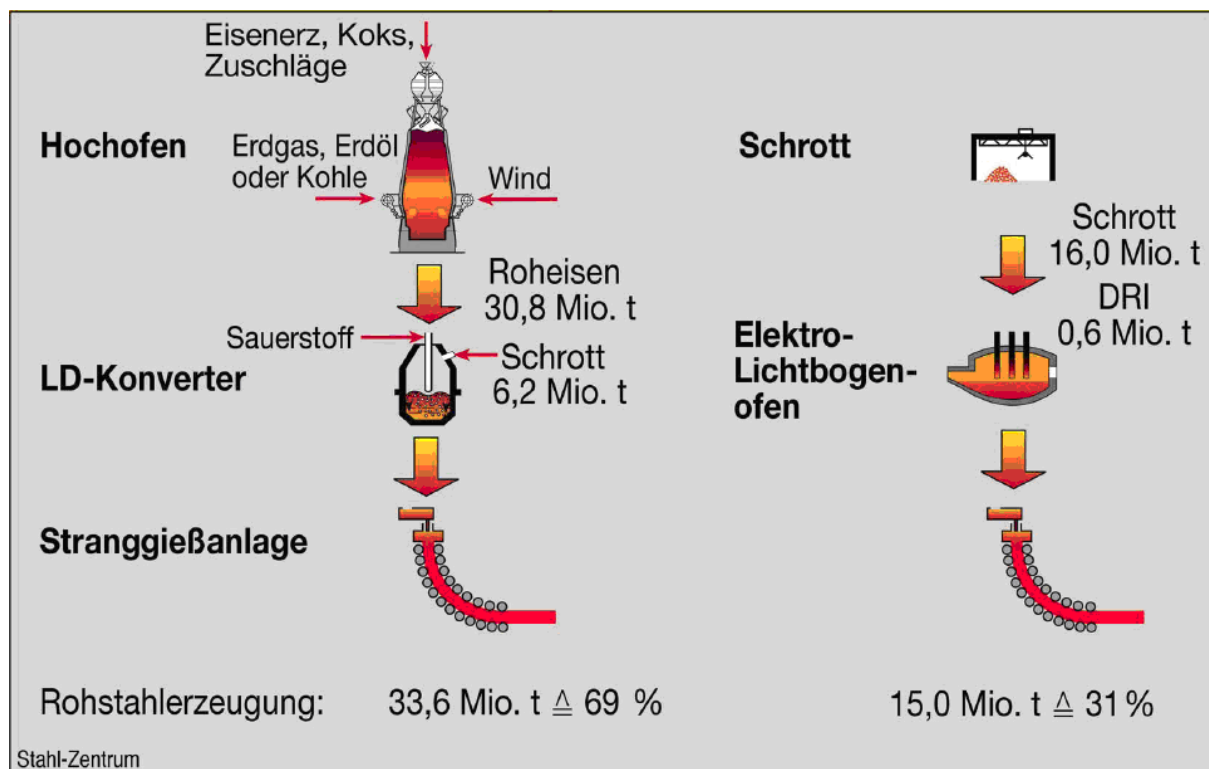


Abbildung 16: Rohstahlerzeugung in Deutschland 2007 [116]

Aufteilung der Stahlschrottarten auf die Stahlproduktion in Hochofen- und Stahlwerken

Im Jahr 2007 wurden für die Produktion von 48,6 Mio. Mg Rohstahl 21,7 Mio. Mg Stahlschrott eingesetzt. Damit wurden 44,7 % der produzierten Stahlmenge aus Stahlschrott hergestellt. Die Aufteilung der Stahlschrottmenge auf die jeweiligen Sorten ist in der folgenden Tabelle 10 zusammengestellt.

Tabelle 10: Aufteilung des Zukaufsschrotts der Hochofen- und Stahlwerke im Bundesgebiet 2007 nach Sorten (% des Gesamtvolumens) [17]

Sorte	Sortenbeschreibung	Mengenanteil
Sorte 0	Stahlaltschrott , der nicht unter die Definitionen der Sorten 1 und 3 fällt, Höchst- abmessungen: 1,50 x 0,50 x 0,50m	0,2 %
Sorte 1	Stahlaltschrott , mind. 4 mm Stärke, Höchstabmessungen: 1,50 x 0,50 x 0,50m	9,4 %
Sorte 2	Stahlneuschrott , mind. 3 mm Stärke, Höchstabmessungen: 1,50 x 0,50 x 0,50m	14,5 %
Sorte 3	Schwerer Stahlaltschrott , mind. 6 mm Stärke, Höchstabmessungen: 1,50 x 0,50 x 0,50m	24,4 %
Sorte 4	Shredderstahlschrott , frei von Stahlschrott aus der Müllverbrennung oder –separation Schüttgewicht (i. tr.): mind. 1,1 t/m ³ Fe-Gehalt metallisch: mind. 92 %	5,1 %
Sorte 5	Stahlspäne , frei von Guss- und Automatenstäben	10,3 %
Sorte 6	Pakete , aus neuem, leichten Stahlblechschrott	10,8 %
Sorte 7		4,2 %
Sorte 8	Stahlneuschrott , unter 3 mm Stärke, Höchstabmessungen: 1,50 x 0,50 x 0,50	14,6 %
Sorte 9		2,6 %
Sorte 42	Geshreddeter oder durch ähnliche Verfahren aufbereiteter Stahlschrott aus Stahlfeinblech-, Stahlfeinstblech- und Weiß- blechverpackungen aus dem Kreislaufsystem Blechverpackun- gen Stahl (KBS)	0,2 %
Sorte 46	Geshreddeter oder durch ähnliche Verfahren aufbereiteter Stahlschrott aus der Müllverbrennung	0,6 %
Sorte 47	Geshreddeter oder durch ähnliche Verfahren aufbereiteter Stahlschrott aus der Müllseparation	1,1 %
Sorte 76	Weißblechdosenschrott (paketierte),	1,8 %
Sorte 79	Stahlschrott aus der Müllverbrennung	0,3 %

(Zu beachten ist, dass diese Erhebung bei der zugrunde gelegten Zukaufsmenge einen hohen Abdeckungsgrad erreicht, jedoch nicht 100 %.)

Bei der überwiegenden Menge des in die Rohstahlproduktion eingesetzten Stahlschrotts handelt es sich entsprechend Tabelle 10 um schweren Altstahlschrott.

Neben der Clusterung nach den verschiedenen in der Stahlproduktion eingesetzten Schrottarten kann weiterhin eine Aufteilung nach der Herkunft des Schrotts erfolgen. Lt. Hömann [17] stammen 21 % aus dem Eigenanfall deutscher Stahlwerke, 73 % aus dem Zukauf vom Handel und 6 % aus dem Zukauf von anderen Stellen.

Abhängig vom Einsatzgebiet des erzeugten Rohstahls und dem Verfahren zur Stahlerzeugung werden in den Stahlwerken die Schrottsorten zu verschiedenen Mengenanteilen eingesetzt. Im Oxygenstahlverfahren können bis zu 20 % Schrott eingesetzt werden. Beim

Elektrostahlverfahren kann hingegen bis zu 100 % Stahlschrott zum Einsatz kommen. Die Stahlproduktion aus Stahlschrott verursacht eine um ca. 56 % geringere CO₂-Belastung als die Primärproduktion aus Eisenerz [18]. Abbildung 17 stellt den Materialstrom Eisen und Stahl im Bereich der Abfallwirtschaft und der Stahlschrottverwendung dar.

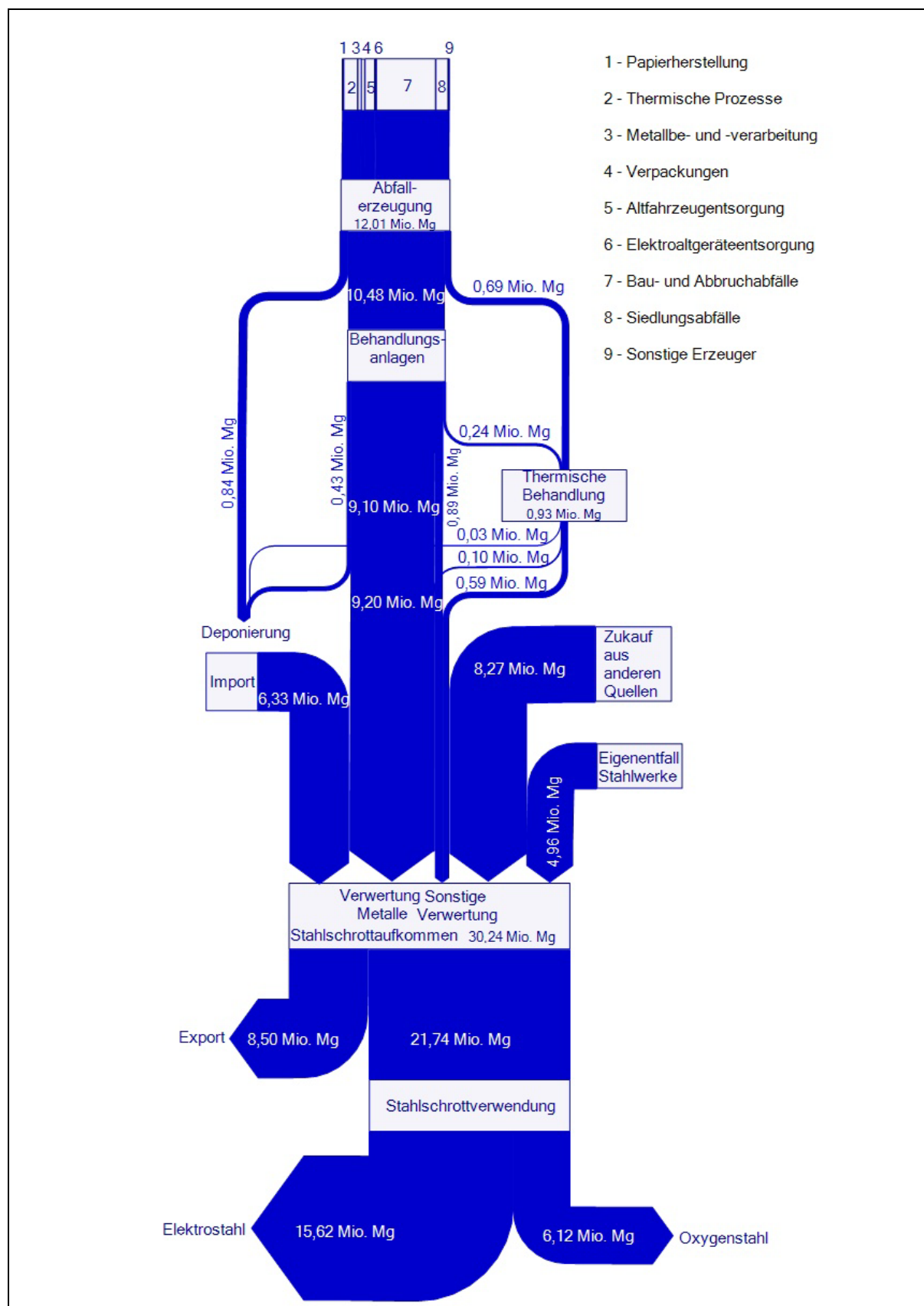


Abbildung 17: Materialstrom Eisen und Stahl für das Jahr 2007

5.2 Kupfer

Die geringfügig in Deutschland vorhandenen Kupfererzvorkommen sind nahezu erschöpft. In der Kupfermine der Mansfelder Region wurde bis in die 1980er Jahre Kupfererz abgebaut [22]. Aufgrund des steigenden Bedarfs an Metallen wurde Mitte 2009 die Firma KGHM HMS Bergbau AG gegründet, welche nach aussichtsreichen Vorerkundungen die Suche nach Kupfer im Freistaat Sachsen durchführen soll. Die hierfür notwendigen Lizenzen sind bereits erteilt [23].

In der Erdkruste liegt der Kupfergehalt durchschnittlich bei 0,006 % und steht damit an 23. Stelle der am häufigsten vorkommenden Elemente in der Erdkruste [22].

Kupfer ist wegen seiner Materialeigenschaften ein vielfältig einsetzbares Metall. Aufgrund seiner hervorragenden Wärme- und elektrischen Leitfähigkeit findet es vielfachen Einsatz, beispielsweise in der Elektro- und Sanitärtechnik. Durch seine bakterienabweisende/anti-bakterielle Wirkung wird Kupfer im medizinischen wie auch lebensmitteltechnischen Bereich und im Münzwesen häufig eingesetzt [22].

Im Jahr 2005 war Deutschland mit einem Verbrauch von ca. 1,1 Mio. Mg Kupfer der weltweit viertgrößte und bezogen auf Europa der größte Konsument von Kupfer [24].

Lebenserwartung kupferhaltiger Produkte

Der Anfall von Kupfer zum Recycling ist abhängig von der Lebensdauer kupferhaltiger Produkte. Die folgende Tabelle stellt durchschnittliche Lebenserwartungen ausgewählter Produkte dar:

Tabelle 11: Durchschnittliche Lebenserwartung kupferhaltiger Produkte [25]

Produkt	durchschn. Lebenserwartung [a]
Auto	8-10
Elektromotor	10-12
Kabel	30-40
Gebäude	60-80
Kupfer im Gebäude	30-40

Produktionsmengen

Im Jahr 2007 wurden in Deutschland 712.000 Mg an raffiniertem Kupfer und Kupfergusslegierungen produziert. Die Halbzeugproduktion sowie die Erzeugung von Metallguss betrug 1,95 Mio. Mg [22].

Für importabhängige Verbrauchsländer, wie Deutschland, ist ein hoher Sekundärrohstoffanteil im Hinblick auf die Versorgungssicherheit von großer Bedeutung. Etwa 55 % der jährlichen deutschen Kupferproduktion stammen aus Schrotten und kupferhaltigen Zwischenprodukten wie Schlacken, Krätzen usw. [22]. Weltweit wird die Recyclingquote auf 35 % geschätzt [26].

Außenhandel

Import wie auch Export von Kupfer-Sekundärrohstoffen zeigten im Jahr 2007 höchste Mengen im Vergleich zu den Jahren zwischen 2003 und 2009. Der Import ist in den Folgejahren stärker rückläufig als der Export der Kupfersekundärrohstoffe.

In der folgenden Abbildung 18 sind die Import- und Exportmengen für den Zeitraum von 2003 bis 2009 und das Vergleichsjahr 1994 dargestellt.

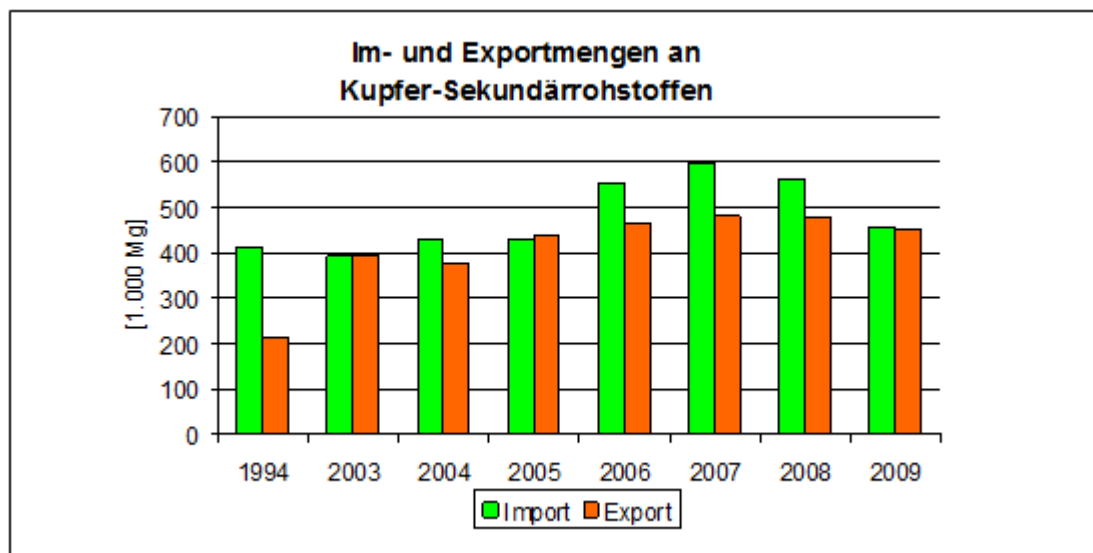


Abbildung 18: Im- und Exportmengen an Kupfersekundärrohstoffen in Deutschland [3, verschiedene Jahre]

In der nachfolgenden Abbildung 19 sind die Kupfermengen des Außenhandels für den Rohstoff- und Halbzeugbereich im Jahr 2007 zusammengestellt.

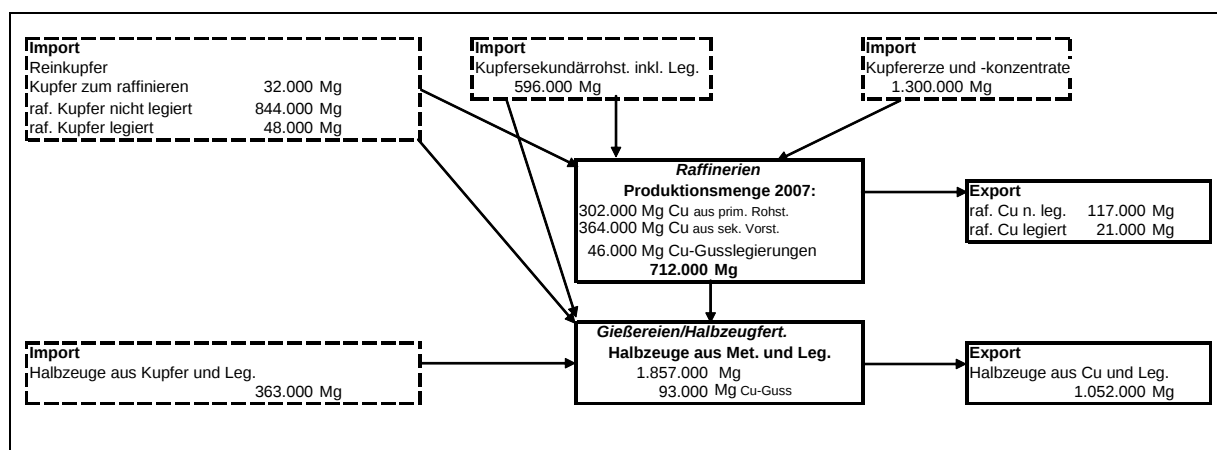


Abbildung 19: Im- und Export von Kupferrohstoffen und -halbzeugen 2007 [3, 22]

Export

Beim Kupferexport ist die Verbringung von Material unterschiedlicher Produktionsstufen zu berücksichtigen. So werden neben legiertem und nicht legiertem Kupfer aus Raffinerien auch kupferhaltige „Abfälle“ wie beispielsweise Altfahrzeuge oder Elektroaltgeräte exportiert. Mit der Zusammenstellung in Tabelle 12 wird ein Überblick der 2007 exportierten Mengen gegeben.

Tabelle 12: Kupferexport 2007

Produktionsstufe/Branche	Material	Exportmenge Kupfer	Quelle
Raffinerien	raf. Kupfer nicht legiert	117.000 Mg	[3]
	raf. Kupfer legiert	21.000 Mg	[3]
Gießereien/Halbzeuge	Halbzeuge aus Kupfer und Kupferlegierungen	1.052.000 Mg	[3]
Fahrzeugindustrie	Kupfer in Pkw	86.000 Mg	[eigene Berechnung; 27]
Elektro- und Elektronikindustrie	Elektro- und Elektronikgeräte	155.000 Mg *	[28]
	davon Monitore	50.000 Mg *	
Abfallbereich	Kupferabfälle und Schrott mit Legierungen	481.000 Mg	[29]
	Notifizierungspflichtig mit Kupferanteilen	5.490 Mg	berechnet aus notifizierungspflichtigen Abfallmengen mit > 2 % Cu-Anteil nach [29]
	Altfahrzeuge	41.200 Mg	berechnet über Pkw-Export nach [30] und Kupfergehalt von 20 kg/Pkw

* Gerätemenge 2008

Neben dem Export von raffiniertem Kupfer sowie entsprechenden Halbzeugen ist der Export von Kupfer als Bestandteil verschiedener Geräte und Maschinen von großer Bedeutung. Eine statistische Erfassung von exportierten Kabeln, Maschinen und Ähnlichem nach Anzahl oder Menge erfolgt nicht, es ist lediglich der finanzielle Warenwert dargestellt, welcher auf Grund der heterogenen Warenstruktur eine Mengenberechnung nicht zulässt.

Für ausgewählte Bereiche wurden beispielsweise vor dem Hintergrund der Erfassung exportierter Wertstoffe Mengenerhebungen für kupferhaltige Geräte vorgenommen.

Die aus Deutschland 2008 exportierte Menge an Elektro- und Elektronikgeräten (neu, alt oder gebraucht) wird auf 155.000 Mg geschätzt. Davon waren ca. 50.000 Mg Monitore. (Es gibt jedoch Datenunsicherheiten bei den Zollanmeldungen) [28].

Die Verteilung der Arten der Elektrogeräte im Export wurde durch das UBA gemäß Abbildung 20 angegeben.

Eine Analyse der Wiedergewinnungsquote von Edel- und Sondermetallen in den Importländern ist bisher nicht möglich, hier gibt es diesbezüglich lediglich Abschätzungen. Mit dem Ziel einer höchstmöglichen Wiedergewinnung von Wertstoffen ist der Aufbau einer geeigneten Abfall- und im speziellen Recycling-Infrastruktur anzustreben [28].

Für die Fahrzeugbranche lässt sich die exportierte Kupfermenge in neuen Personenkraftwagen nach [27] mit ca. 86.000 Mg berechnen. Für andere Fahrzeugarten ist dieses Verfahren zur Bestimmung der exportierten Kupfermenge nicht möglich, da hier keine Exportzahlen vorliegen.

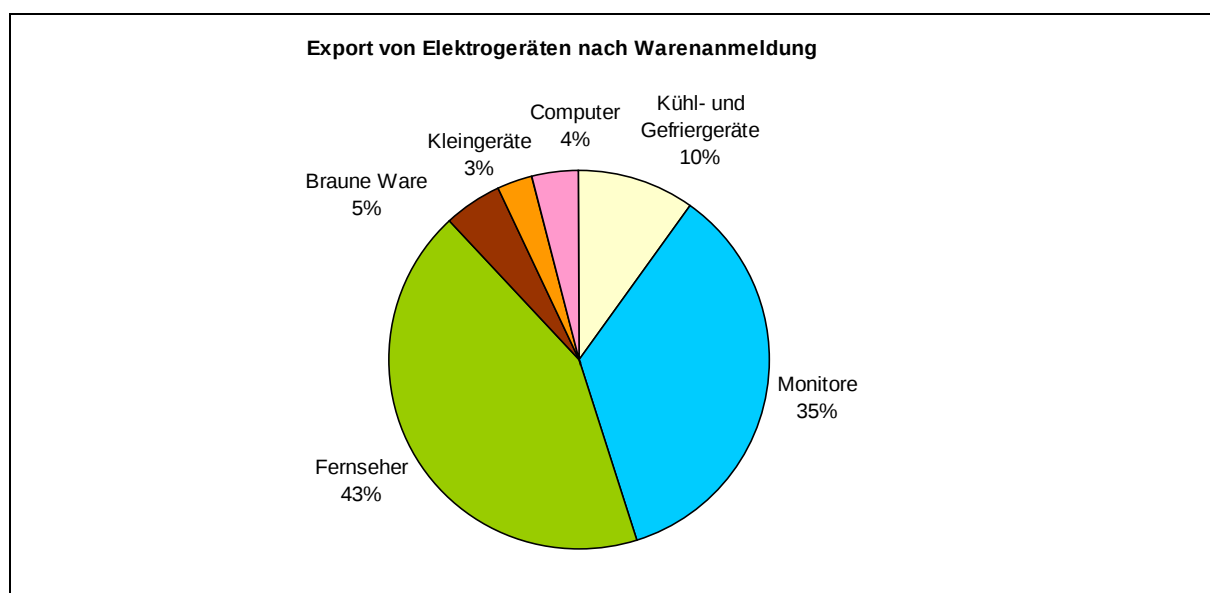


Abbildung 20: Verteilung der Exporte nach Elektrogerätearten (Gliederung nach finanziellem Warenwert - Warenanmeldung 2008) [28]

Import

Kupfer wird in den verschiedensten Verarbeitungsstufen nach Deutschland importiert. Mit 1,3 Mio. Mg bilden Kupfererze und –konzentrate die größten Importmengen. In Tabelle 13 sind die Mengen zusammengestellt, welche über die Metallstatistik [3] als Kupferimporte dokumentiert werden. Die Mengen an Kupfer, welche mit fertigen Waren importiert werden, lassen sich nicht explizit ausweisen.

Tabelle 13: Importmengen von Kupfer 2007 [3]

Material	Menge 2007 [Mg]
Kupfererze und –konzentrate	1.300.000
Reinkupfer	
Kupfer zum Raffinieren	32.000
raffiniertes Kupfer nicht legiert	844.400
raffiniertes Kupfer legiert	48.000
Kupfersekundärrohstoffe inkl. Legierungen	596.000
Kupferhalbzeuge aus Kupfer und Legierungen	363.000
Kupfer in Konsumgütern, Maschinen, Fahrzeugen...	???

Einsatzgebiete

Kupfer kann aufgrund seiner Eigenschaften vielseitig verwendet werden.

Für die Materialstromdarstellung (Abbildung 21) wurde die 2007 verarbeitete Kupfermenge von 1.857.000 Mg zzgl. der 93.000 Mg Kupferguss und unter Berücksichtigung des Import-/Exportsaldos verwendet. Die prozentuale Aufteilung des Kupfereinsatzes nach Branchen erfolgte durch die Daten des Kupferinstituts für das Jahr 2007 [22].

Diese Einsatzmengen nach Branchen sind als überschlägige Größe auf Basis der prozentualen Angaben zu bewerten. Statistische Werte zu Einsatzmengen von Kupfer in verschiedenen Branchen liegen nicht vor.

Speziell für die Fahrzeugbranche lässt sich eine Berechnung auf Basis der durch Hild [27] veröffentlichten Produktions- und Exportmengen für Pkw im Jahr 2007 durchführen. Mit

einem durchschnittlichen Kupferanteil von 20 kg ergibt sich für die Pkw-Branche eine Einsatzmenge an Kupfer von 114.182 Mg, von denen 86.076 Mg exportiert wurden und 28.106 Mg in Deutschland verblieben. Diese Einsatzmenge unterscheidet sich deutlich von der in Abbildung 21 für die Fahrzeugindustrie angegebenen Menge von 75.660 Mg.

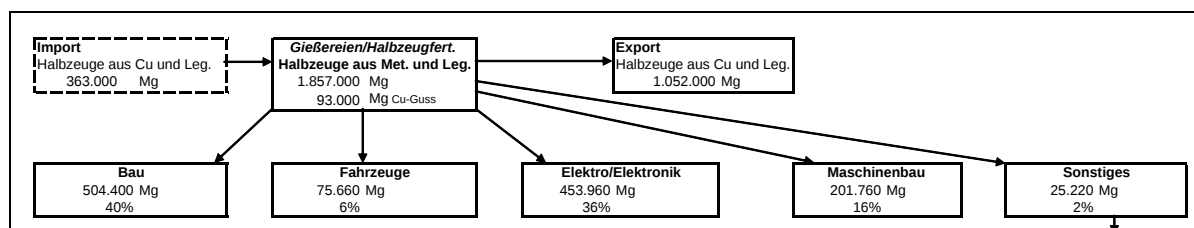


Abbildung 21: Aufteilung der Kupfermengen aus den Gießereien und der Halbzeugfertigung nach Branchen [3, 22]

Das Kupferinstitut geht davon aus, dass sich aufgrund der günstigen Stoffeigenschaften bzgl. der elektrischen wie auch der Wärmeleitfähigkeit des Kupfers und dessen Legierungen der Einsatz in der Fahrzeugbranche verstärken wird. Auch in anderen technischen Bereichen, wie der Solarthermie, ist Kupfer mit seinen Legierungen wesentlicher Bestandteil mit voraussichtlich steigenden Einsatzmengen [22]. Eine Prognose des Kupferbedarfs für 2025 im Vergleich zu 2004 zeigt Tabelle 14. Für das Jahr 2025 wurde ein leichter Rückgang des Kupferbedarfs um 1,5 % prognostiziert.

Tabelle 14: Entwicklung des Bedarfs an Kupfer in ausgewählten Branchen [26]

Produktsegment	Anteile 2004	Anteile 2025
Trinkwasserrohre	4,5 %	2,3 %
Dachdeckung und –entwässerung, Fassaden	3,6 %	0,0 %
Elektrische Gebäudeinstallationen	16,6 %	16,6 %
Übrige	12,3 %	12,3 %
Bauwesen insgesamt	37,0 %	31,3 %
IKT Kabel	8,0 %	4,0 %
Übrige	24,0 %	24,0 %
Elektrotechnik, Elektronik gesamt	32,0 %	28,0 %
Stellmotoren in Fahrzeugen	0,8 %	1,6 %
Elektrische Traktionsmotoren in Fahrzeugen	0,0 %	7,5 %
Übrige	7,2 %	7,2 %
Fahrzeugbau insgesamt	8,0 %	16,3 %
Maschinenbau und Übrige	23,0 %	23,0 %
Insgesamt	100,0 %	98,5 %

Recyclingverfahren

Kupferabfälle zum Recycling fallen in den verschiedensten Qualitätsstufen an. Diese reichen von den reinen Produktionsabfällen, welche direkt wieder in Gießereien oder auch Halbzeugwerken eingesetzt werden können bis zum Kupferschrott aus Kabeln, Elektronikschrott aber auch kupferhaltigen Filterstäuben oder Schlämmen.

Das Kupfer in den Kabeln wird nach der Zerkleinerung mechanisch vom Kunststoffmantel getrennt und kann dann mit einer Reinheit von ca. 99,5 % direkt in Gießereien und Halbzeugwerken eingesetzt werden.

Elektronikschrott und vergleichbare Materialien komplexer Zusammensetzung werden in mehrstufigen Abläufen aufbereitet, um möglichst reine Stoffgruppen zum geeigneten Recycling zu gewinnen.

Sekundärrohstoffe geringerer Qualität (Krätzen, Filterstäube) werden in Kupferhütten zu Kupferanoden aufgearbeitet und anschließend in der elektrolytischen Raffination veredelt.

Der Energieeinsatz zum Recycling von Kupfer ist vergleichsweise gering im Verhältnis zur Kupfergewinnung aus Kupfererz. Die OECAM [31] spricht von einem Energiebedarf von 10 %-20 % verglichen mit dem Energiebedarf für die Primärproduktion aus Erz, [32] von 35 %-40 %. Ursache für die Energieeinsparung ist der Wegfall der Arbeitsschritte und der diesbezüglichen Energieaufwendungen für die Aufbereitung des Erzes (Flotation, das partielle Rösten oder Schmelzen) vor dem hydrometallurgischen Verfahren der elektrolytischen Raffination [33].

Durch die elektrolytische Raffination können unedle und edle Verunreinigungen vom Kupferschrott (Kupfer- und Kupferlegierungsschrotten, kupferhaltige Rückstände aus Gießereien und der kupferverarbeitenden Industrie, Shreddermaterialien oder Elektronikschrotte) vollständig abgetrennt werden. Somit ist ein mehrmaliges Recycling ohne Wertverlust möglich [22].

Schrott-Aufbereitung

Die Fa. Aurubis als Europas größter Kupferproduzent verfügt seit 2005 über eine Materialvorbereitungs- und –aufbereitungsanlage für 200.000 Mg Elektronikschrott pro Jahr. Momentan erfolgt eine Erweiterung zur Verarbeitung weiterer 60.000 Mg Recyclingrohstoffe.

Die Verarbeitung des Kupfer-Sekundärrohstoffs erfolgt nach dem Kayser-Recycling-System (KRS) mit Elektrolyse. Dieses Verfahren ist geeignet, neben den herkömmlichen Recyclingmaterialien wie Schlacken, Stäube oder Legierungsschrotte auch andere Materialien, wie Shreddermaterial oder Elektro-/Elektronikschrott zu verarbeiten. In Abhängigkeit vom zu verarbeitenden Material werden unterschiedliche Vorbehandlungsstufen bzw. Verarbeitungsschritte gewählt [37].

Das Verfahren eignet sich sowohl zum Einsatz von Recyclingmaterialien mit geringeren Kupfer- und Edelmetallgehalten als auch von komplexen Materialien.

Neben der Aurubis AG ist die KME Germany als Tochter der KME Group S. p. A. ein wesentlicher Halbzeugfertiger und Güterproduzent für Kupferwaren. Für ihre Produktion setzt KME 65 % des Kupfers als Recyclingmaterial ein. Weitere wesentliche Halbzeug- und EndproduktHersteller sind beispielsweise die Deutsche Gießdraht GmbH sowie die Wieland-Werke AG.

Kupfereinsatz nach Herkunftsbereichen

a) Kabel

Durch das Wuppertal-Institut wurde für 2005 ein Kupfereinsatz für die Kabelherstellung im Vergleich zu den anderen Einsatzgebieten von 42 % angegeben [24].

Es gibt verschiedene Arten von Kabeln, in denen Kupfer enthalten ist:

- Kupfer-Aluminium-Kabel
- Kupfer-Blei-Kabel
- Kupferkabel

Der Kupfergehalt in Stromkabeln verschiedener Einsatzbereiche wird durch das Wuppertal-Institut [24] wie in Tabelle 15 angegeben.

Tabelle 15: Kupfergehalt in Stromkabeln [24]

Niederspannungsbereich	1,5	Mg/km
Mittelspannungsbereich	1,4	Mg/km
Hochspannungsbereich	4	Mg/km

Lager

Durch das Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE [38] wird der überwiegende Teil des deutschen Stromnetzes erfasst. Die Verbindung der Länge der jeweiligen Kabelart mit den entsprechenden Kupfergehalten ermöglicht eine Abschätzung des Kupferlagers im Bereich der Stromkabel (Tabelle 16).

Tabelle 16: Berechnung des Kupferlagers in Stromkabeln [24, 38]

	geschätzte Kabellänge in Dtl.	Kupferanteil	Kupfermenge
	Quelle [38]	Quelle [24]	
	[km]	[Mg/km]	[Mg]
Niederspannung	990.300	1,5	1.485.451
Mittelspannung	360.182	1,4	504.255
Hochspannung	5.814	4	23.255
Höchstspannung	102	4	409
Gesamt			2.013.370

Neben den Stromkabeln sind die für die Telekommunikation genutzten Kabel ebenfalls Bestandteil des anthropogenen Lagers. Das Wuppertal-Institut [24] gibt pro Einwohner ein Kupferlager in Leitungen der Telekommunikation von 16 kg an. Über die Einwohnerzahl für Deutschland von 2007 von 82.217.800 ergibt sich eine Lagermenge von mind. 1,3 Mio. Mg.

Diese angegebenen Mengen beinhalten nicht die in Häusern verbauten Kabelmengen. Eine diesbezügliche Abschätzung liegt bislang nicht vor.

Kabelabfallaufkommen

Laut Statistischem Bundesamt [1] wurden 141.700 Mg Kabel (davon 103.800 Mg aus Deutschland) im Jahr 2007 deutschen Verwertungsunternehmen zugeführt. Die Herkunft der Kabel (z. B. aus dem Baubereich, der Elektroindustrie oder dem Maschinenbaubereich) ist nicht nachzuvollziehen. Die Verwertung der Kabel nach Behandlungsanlagen ist in Tabelle 17 ersichtlich:

Tabelle 17: Verteilung der Altkabel- und Kabelschrottinputmengen auf die Verwertungsverfahren [1]

	170410*		170411	
	[Mg]	[%]	[Mg]	[%]
Shredder	1.900	45%	66.400	48%
Sortieranlagen	100	2%	4.400	3%
Zerlegeeinrichtungen für Elektroaltgeräte	500	12%	12.200	9%
sonstige Behandlungsanlagen	1.700	40%	54.400	40%
Gesamt	4.200	100%	137.400	100%

170410*...Kabel, die Öl, Kohlenteer oder andere gefährliche Stoffe enthalten

170411 ...Kabel mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 04 10 fallen

Inwieweit eine Überschneidung der Mengen, welche in die Shredder- bzw. Sortieranlagen gelangen mit denen, welche in sonstigen Behandlungsanlagen behandelt werden, vorliegt, ist nicht zu quantifizieren. Hierbei besteht die Problematik darin, dass Outputströme aus Abfallbehandlungsanlagen nicht zwingend eine 19er Abfallschlüsselnummer (Abfälle aus Abfallbehandlungsanlagen...) tragen müssen. Dieser Sachverhalt zeigt sich in den In- und Outputmengen verschiedener Behandlungsanlagen der AVV-Nummer 170411 in Abbildung

22. Mehr als 20.000 Mg Abfall verlassen die Shredderanlagen als Kabel mit der Schlüsselnummer 170411 und könnten damit beispielsweise Bestandteil der Inputmenge von ca. 45.000 Mg der sonstigen Behandlungsanlagen sein.

Andere Outputströme der betrachteten Behandlungsanlagen (wie beispielsweise Kupfer) können auf Basis der Daten in Fachserie 19 nicht auf bestimmte Inputströme zurückgeführt werden. Eine derartige Datenerhebung ist aufgrund des Inputgemisches in Abfallbehandlungsanlagen praktisch nicht umzusetzen.

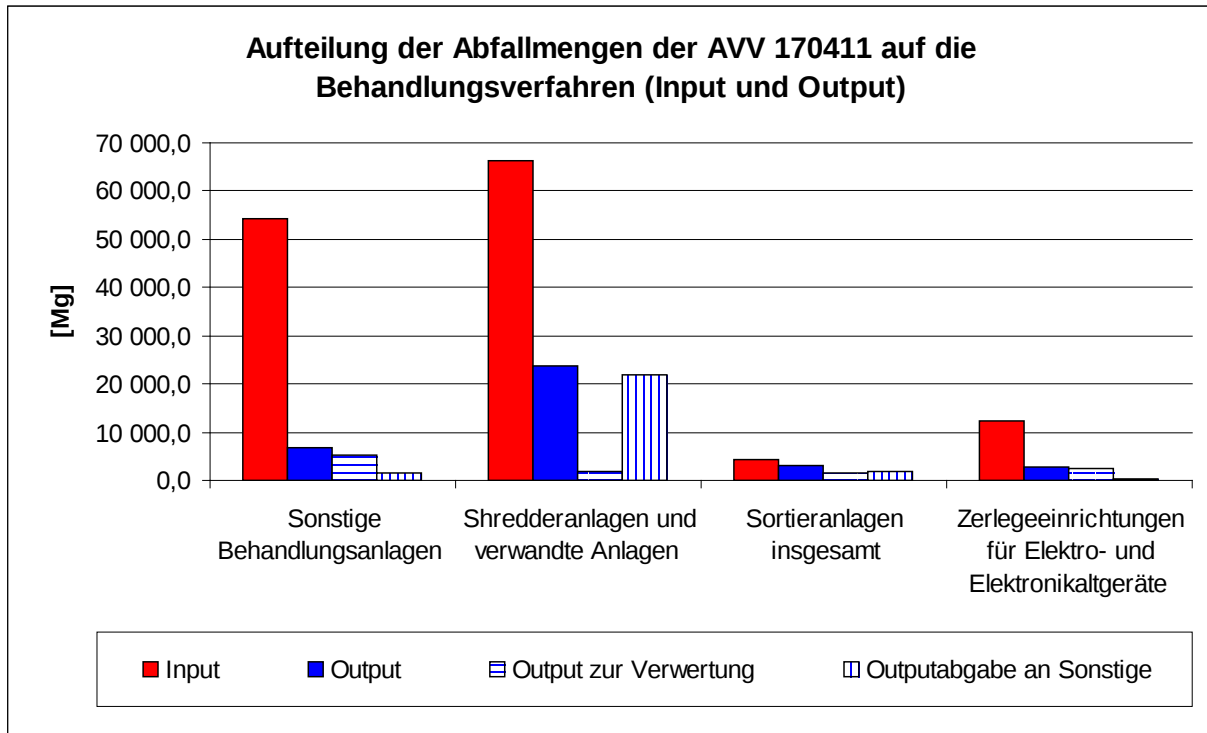


Abbildung 22: Aufteilung der Abfallmengen der AVV 170411 auf die Behandlungsverfahren (Input und Output)

Bei den sonstigen Behandlungsanlagen handelt es sich nach Auskunft des Statistischen Landesamtes Sachsen [39] überwiegend um betriebliche Produktionsanlagen, welche Abfälle einsetzen. Dazu zählen auch Kabelaufbereitungsanlagen.

Bspw. liefert die Cabo Metall-Recycling und Handel GmbH als bedeutender Kabelaufbereiter jährlich ca. 24.000 Mg Kupfer aus der Kabelaufbereitung an das Mutterunternehmen Aurubis AG.

Die Kabelabfälle werden zum überwiegenden Teil stofflich verwertet. Dies trifft vor allem auf die Metallkomponenten, aber auch auf verschiedene Kunststofffraktionen zu. Nicht stofflich verwertbare Kunststoffkomponenten werden thermisch verwertet [40]. Anhand der statistischen Daten ist nicht eindeutig zu quantifizieren, wie viel Kupfer bei der Aufbereitung von Kabelabfällen stofflich recycelt wird. Aufgrund des geringen Datenumfangs für die Beseitigung wie auch der relativ weit entwickelten Umsetzung der Kabelabfallerfassung zur Aufbereitung und Verwertung ist von einer hohen Recyclingquote beim Kabelrecycling auszugehen.

Schäfer [41] gibt einen durchschnittlichen Kupfergehalt in Altkabeln bzw. Kabelschrott mit 36,7 % an. In [42] wird der Kupfergehalt mit 50.000 mg/kg (5 %) angegeben. Die Unterschiede in den Angaben sind sehr groß. Nachfragen bei der Recyclingfirma Cabo wie auch beim VDM mit der Qualitätsgemeinschaft der Kabelzerleger erbrachten keine entsprechenden Informationen, allerdings kann eingeschätzt werden, dass ein Kupferanteil von lediglich 5 % zu niedrig sein dürfte.

Mit einem angenommenen Kupfergehalt von durchschnittlich 36,7 % ergibt sich ein Kupferpotenzial bei der sachgerechten Verwertung der in deutsche Abfallbehandlungsanlagen angelieferten Kabel (inkl. Import) von 51.883 Mg Kupfer.

Aufbereitung

Die Kabelaufbereitung erfolgt prinzipiell in drei Stufen [40]:

1. Vorsortierung – manuell nach unterschiedlichen Metallen und/oder Kunststoffen
2. Zerkleinerung – Vorzerkleinerung und Schneidmühlen sowie weitere Mühlen zur Trennung von Metallkern und Ummantelung
3. Trennen – mittels Separiertisch und/oder Windsichtung

Der mögliche Reinheitsgrad liegt bei 99 %. Vom eingesetzten Kupfer gelangen ca. 95 % in das Endprodukt [41].

b) Fahrzeuge

Durch das Wuppertal-Institut [24, 44] wurden in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp durchschnittliche Kupfergehalte veröffentlicht (siehe Tabelle 18).

Tabelle 18: Durchschnittliche Kupfergehalte nach Fahrzeugtyp [24, 44]

	je Fahrzeug	Kabellänge	Cu-Anteil
PKW	20-25 kg	1.000 m	2-3 %
Kompaktklasse		800 m	
Premiumklasse		3.000 m	
Nutzfahrzeug	67 kg		
Kraftrad	7 kg		

In den letzten Jahren sind die Anteile an Kupfer in den Fahrzeugen gestiegen. So gibt [45] bspw. an, dass im Jahr 1990 ein Fahrzeug mit durchschnittlich 900 kg Gewicht einen Kupferanteil von ca. 11 kg hatte. Man geht davon aus, dass aufgrund der fortschreitenden Entwicklung in der Elektronik der Fahrzeuge ein Anstieg des Kupfergehaltes im Fahrzeug von 20 kg im Jahr 2000 auf 40 kg im Jahr 2020 zu verzeichnen sein wird [24].

Lager

Ein durchschnittliches Lager an Kupfer in Kraftfahrzeugen lässt sich durch Verknüpfung der Kupfergehalte je Fahrzeugtyp [24] mit dem Fahrzeugbestand für 2007, erhoben über das Kraftfahrt-Bundesamt [46], ermitteln.

Dieses Lager beträgt in Summe für Pkw, Krafträder und Nutzfahrzeuge 1,29 Mio. Mg Kupfer.

Für die Fahrzeuge des Schienen-, Flug- und Schiffsverkehrs liegt eine gleichartige Erhebung auf Grund unbekannter Kupferanteile sowie des Bestandes an entsprechenden Fahrzeugen nicht vor.

Altfahrzeugaufkommen

Altfahrzeuge wurden nach Destatis [1] im Jahr 2007 in 1.263 Demontagebetrieben für Altfahrzeuge demontiert. Die Aufteilung der Mengen auf die verschiedenen Verwertungsanlagen wird in Tabelle 19 dargestellt:

Tabelle 19: Verteilung der Altfahrzeugmengen auf die relevanten Verwertungsverfahren [1]

	160104*		160106	
	[Mg]	[%]	[Mg]	[%]
Demontagebetriebe für Altfahrzeuge	422.600	100%	29.800	7%
Shredderanlagen	0	0%	384.300	93%
sonstige Behandlungsanlagen	500	0%	0	0%
Gesamt	423.100	100%	414.100	100%

160104*...Altfahrzeuge

160106... Altfahrzeuge, die weder Flüssigkeiten noch andere gefährliche Bestandteile enthalten (Restkarossen)

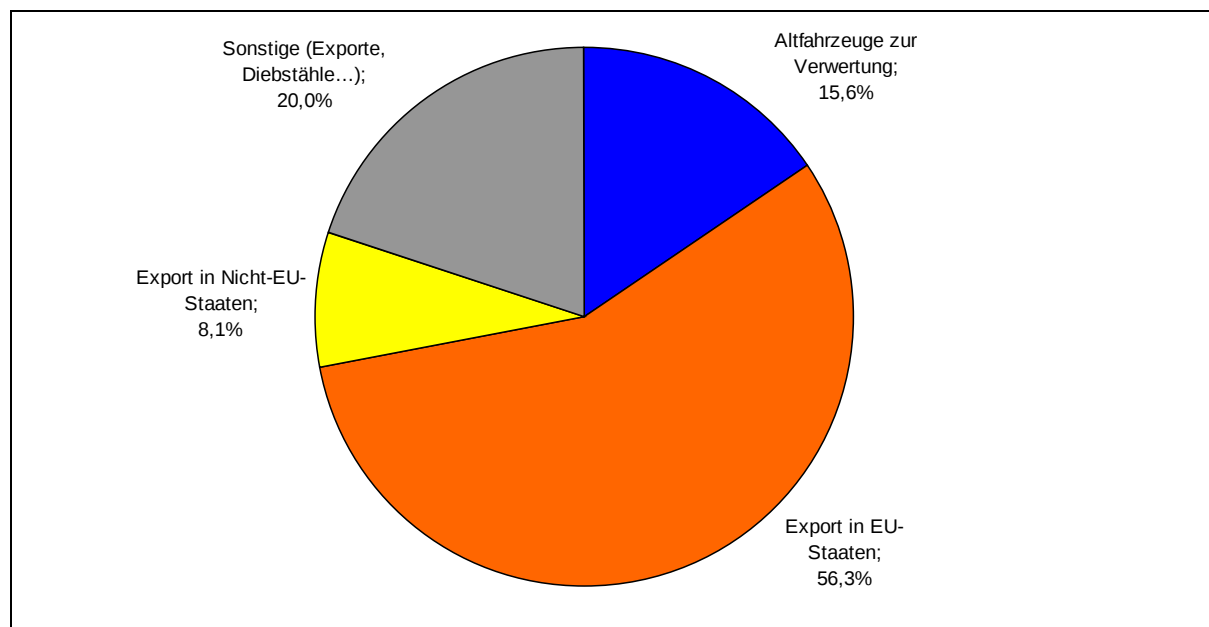
Bei den Fahrzeugkarossen mit der Schlüsselnummer 16 01 06 handelt es sich überwiegend um Karossen, welche zuvor die Bearbeitung in den Demontagebetrieben durchlaufen haben. In Demontagebetriebe für Altfahrzeuge wurden als AVV 160104* 422.600 Mg Fahrzeugkarossen eingesetzt und 358.200 Mg als AVV 160106 abgegeben. In Shredderanlagen wurden 384.300 Mg AVV 160106 eingesetzt.

Ausgehend von einer durchschnittlichen Konzentration von 1,6 % Kupfer im Altfahrzeug [41] ergibt sich aus der in Demontagebetriebe eingesetzten Fahrzeugmenge eine Kupfermenge von 7.038 Mg. Es handelt sich hierbei um einen theoretischen Wert. Die tatsächlich separierte Menge an Kupfer aus Altfahrzeugen ist nicht bekannt.

Fahrzeugexport

Nur ein geringer Teil der in Deutschland abgemeldeten Fahrzeuge, wird in Deutschland verwertet. Von mehr als 3,2 Mio. gelöschten Fahrzeugen im Jahr 2006 waren das lediglich 0,5 Mio. [47].

Ausgehend von einem Kupfergehalt pro Pkw von 20 kg verlassen die Bundesrepublik Deutschland jährlich mindestens 54.000 Mg Kupfer auf diesem Weg (berechnet aus Exporten in EU und Nicht-EU-Staaten).

**Abbildung 23: Verbleib der 2006 in Deutschland gelöschten Pkw [47]**

Sonstige: hauptsächlich sonstige Exporte, Diebstahl, Nutzung auf nicht öffentlichem Gelände, Exportmengen in EU-Staaten aus dem Jahr 2007

Das Abfallregime im Bereich der Altfahrzeuge steht zunehmend in Konkurrenz zu verschiedenen Teilmärkten wie Gebrauchtwagenhandel, Einzelteilhandel (demontiert) oder Schrotthandel.

Aufbereitung

Gemäß AltfahrzeugV müssen Altfahrzeuge anerkannten Annahme- und Rücknahmestellen bzw. Demontagebetrieben zur umweltgerechten Demontage und Entsorgung übergeben werden.

Laut EU-Altfahrzeug-Richtlinie sind (2000/53/EG) ab dem Jahr 2015 95 Gew.-% (derzeit 85 %) eines Altfahrzeuges einer Verwertung zuzuführen. Hiervon sollen 85 % (derzeit 80 %) einer stofflichen Verwertung zugeführt werden.

Im Vergleich zu anderen Wertstoffkomponenten (Stahl, Aluminium, Kunststoff) ist der Kupfergehalt von ca. 20 kg je Fahrzeug von mengenmäßig untergeordneter Bedeutung, so dass nach [41] eine auf Kupfer orientierte Demontage kaum umgesetzt wird. Vor dem Hintergrund der Rohstoffverknappung und der steigenden Weltmarktpreise für Kupferschrott wird eine Demontage mit Gewinnung von hochwertigen „Abfällen“ immer attraktiver.

In [48] wurde basierend auf umfassenden Recherchen ein Mengenstromdiagramm für die Aufbereitung von Altfahrzeugen erstellt:

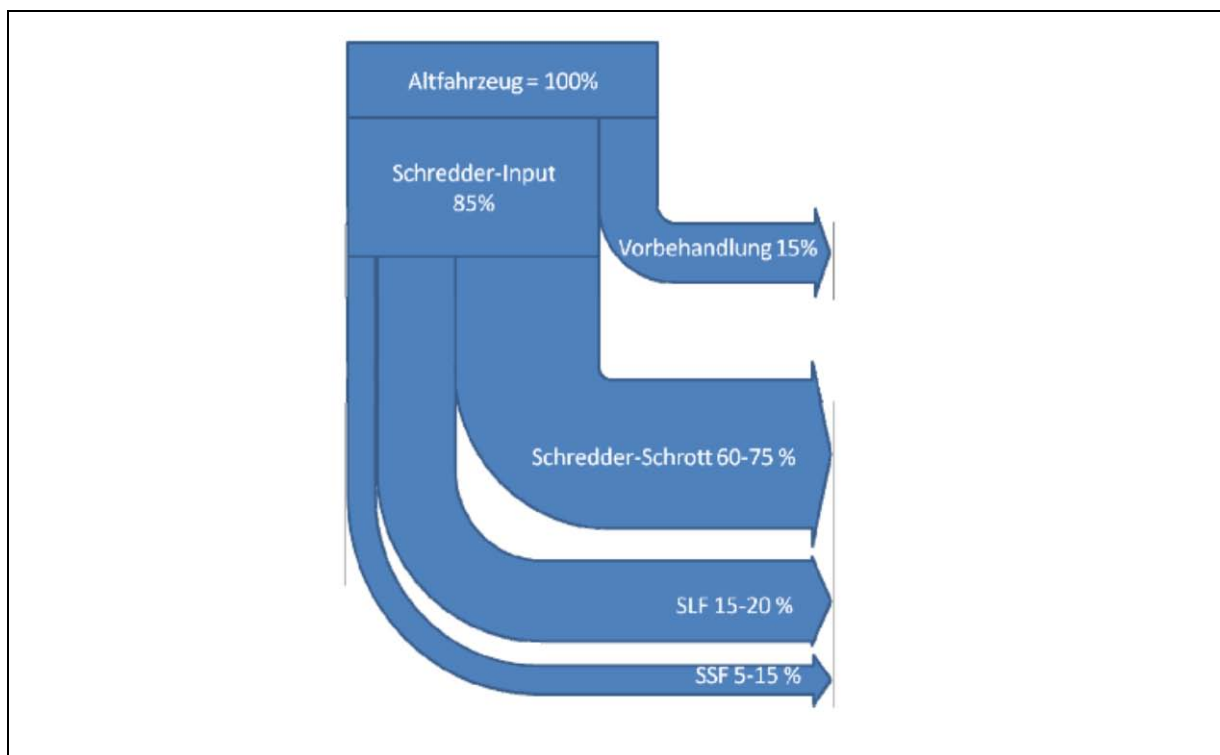


Abbildung 24: Stoffstrom Altfahrzeugverwertung [48]

Neben Motoren oder der elektrischen Anlage, welche schon im Rahmen der Vorbehandlung demontiert werden, findet sich Kupfer zu einem großen Teil in den Gemischen der Shredderleichtfraktion (SLF) und Shredderschwerfraktion (SSF).

Der Metallanteil in der Shredderschwerfraktion liegt bei ca. 50 %. Zum durchschnittlichen Kupfergehalt in der Shredderschwerfraktion gibt es keine eindeutigen Aussagen.

Die Schredderleichtfraktion aus Fahrzeug-Restkarossen setzt sich, wie in Tabelle 20 dargestellt, folgendermaßen zusammen:

Tabelle 20: Zusammensetzung der Shredderleichtfraktion (Vormaterial: Restkarossen) [49]

Materialart	Anteil an SLF von Restkarossen
Kunststoffe (vor allem Thermoplaste PU, PVC)	30 % - 48 %
Elastomere inkl. Reifen	10 % - 32 %
Glas und Keramik	3 % - 16 %
Faserstoffe (z. B. Textilien, Holz, Pappe, Papier)	4 % - 26 %
Betriebsflüssigkeiten	15 % - 17 %
Lacke und Unterbodenschutz	3 % - 10 %
Metalle	0,5 % - 20 %
<i>davon</i> <i>Zink</i>	7 % - 17 %
<i>Eisen</i>	0,1 % - 20 %
<i>Aluminium</i>	1 % - 16 %
<i>Kupfer</i>	1 % - 4 %
<i>Blei</i>	0,5 % - 2 %
<i>Edelstahl</i>	0,1 % - 0,5 %

Der Kupferanteil liegt nach Recherchen von [49] in der Shredderleichtfraktion in einem Bereich von 1 % bis 4 %.

Die Shredderleichtfraktion wird zum überwiegenden Teil energetisch verwertet. Aufgrund der fortschreitenden Rohstoffverknappung nimmt eine stoffliche Verwertung einzelner Komponenten der Shredderleichtfraktion an Bedeutung zu. Sogenannte Post-Shredder-Anlagen (PST-Anlagen) bereiten das Shreddergut mit dem Ziel der Gewinnung stofflich verwertbarer Komponenten auf.

Das Wuppertal-Institut hat für 2004 für Metalle aus Altfahrzeugen eine Rückgewinnungsrate von 98 % angegeben. Aufbauend auf diese Angaben würden bei der Altfahrzeugaufbereitung ca. 6.900 Mg Kupfer zurückgewonnen werden [24].

Aufgrund der relativ langen Nutzungsdauer im Verhältnis zum vergleichsweise geringen Kupferanteil von Zügen, Schiffen und Flugzeugen ist deren Betrachtung hinsichtlich des Kupferanteils von untergeordneter Bedeutung [41]. Im Kupfer-Stoffkreislauf werden die aus diesen Quellen recycelten Kupfermengen Bestandteil der raffinierten Kupfermenge aus sekundären Vorstufen sein. Eine Einzeldarstellung ist nicht möglich. Wie bei den Altautos ist auch aus der Reedereibranche bekannt, dass die „Verschrottung“ von Schiffen überwiegend im Ausland erfolgt.

c) Elektro- und Elektronikaltgeräte

Hagelüken [50] sowie das Wuppertal-Institut [24, 44] haben für ausgewählte Elektro- und Elektronikgeräte bzw. Bauteile die durchschnittlichen Anteile an Kupfer veröffentlicht.

Tabelle 21: Kupferanteile in ausgewählten Elektro- und Elektronikgeräten bzw. Bauteilen [24, 44, 50]

	Min	Max	Durchschnitt
Fernsehgeräte			3%
Computer	5%	7%	
Computer-Platinen			20%
alte Monitore			8%
Unterhaltungselektronik			4%
Handy	13%	15%	
Mobilteile Telefon			10%
tragbare Audiogeräte			21%
Laptops		16%	

Lager

Ausgehend von einem geschätzten Gerätebestand in Deutschland von

- ca. 120 Mio. Handys
- ca. 80 Mio. Computerleiterplatten sowie
- ca. 30 Mio. tragbaren Audiogeräten

lässt sich beispielhaft ein Kupferlager von mind. 9.600 Mg Kupfer berechnen.

Abfallaufkommen

Die folgende Tabelle 22 zeigt eine Zusammenstellung der Sammelmengen sowie die Recycling- und Verwertungsquoten für Elektro- und Elektronikaltgeräte nach Angaben des BMU [63].

Tabelle 22: Sammelmenge sowie Recycling- und Verwertungsquote der Elektro- und Elektronikaltgeräte des Jahres 2007 [63]

Kat.	Produktkategorie	gesamelte Menge [Mg]	behandelte Menge [Mg]	in Dtl. behandelte Menge [Mg]	verwertete Menge [Mg]	Verwertg.-Quote [%]	wiederverw. Menge+Rec. [Mg]	Recycling- quote [%]	wiederverw. Geräte [Mg]
1	Haushaltsgroßgeräte	232.277	231.261	226.864	217.591	94,1%	197.515	85,4%	1.016
2	Haushaltskleingeräte	52.472	51.746	51.579	48.673	94,1%	37.578	72,6%	725
3	IT- und Telekommunikationsgeräte	117.749	114.846	112.581	108.498	94,5%	92.573	80,6%	2.904
4	Geräte der Unterhaltungselektronik	130.620	130.227	130.162	123.272	94,7%	105.090	80,7%	393
5	Beleuchtungskörper	316	191	158	177	92,7%	153	80,1%	125
5a	Gasentladungslampen	7.692	7.692	7.692	7.506	97,6%	7.463	97,0%	0
6	Elektrische und elektronische Werkzeuge	12.868	12.667	12.306	12.046	95,1%	9.313	73,5%	200
7	Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte	4.282	4.251	4.249	3.892	91,6%	3.036	71,4%	31
8	Medizinische Geräte	23.244	22.741	22.710	21.066	92,6%	17.562	77,2%	504
9	Kontroll- und Überwachungsinstrumente	2.470	2.425	2.407	2.286	94,3%	1.943	80,1%	45

Hinsichtlich des Kupfergehaltes sind vor allem die folgenden (in der Tabelle gelb markierten) Produktgruppen von Relevanz:

- 1 Haushaltgroßgeräte
- 2 Haushaltskleingeräte
- 3 IT- und Telekommunikationsgeräte und
- 4 Geräte der Unterhaltungselektronik
- 6 Elektrische und elektronische Werkzeuge
- 7 Spielzeug sowie Sport- und Freizeitgeräte

Der Kupfergehalt von Elektroaltgeräten der Kategorie 1 „Haushaltsgroßgeräte“, auch Weiße Ware genannt, liegt nach Angaben von Schäfer [41] bei ca. 5 %. Für die sogenannte Braune Ware, welche den Kategorien 2, 6, 7 und teilweise 4 entspricht, gibt Schäfer einen durch-

schnittlichen Kupfergehalt von 14 % an. Die Geräte der anderen Kategorien weisen ebenfalls Kupferbestandteile auf, welche sich jedoch aufgrund der Vielfältigkeit der Geräte an dieser Stelle nicht quantifizieren lassen.

Die Verwertungsquote für Geräte der Kategorie 7 liegt bei 91,6 %, die der Kategorie 6 bei 95,1 %.

Für einzelne Geräte mit hohem Kupfergehalt ist der Anteil von der Gesamtmenge der zugehörigen Kategorien bekannt. Die Stiftung Elektro-Altgeräte Register (EAR) veröffentlicht in regelmäßigen Abständen die grobe Zusammensetzung der Kategorien. Für den überwiegenden Anteil der Gerätegruppen 3 und 4 ist somit für das Jahr 2007 eine Darstellung der in die Erstbehandlung gegebenen Mengen und über die entsprechenden Kupferanteile auch eine Angabe der entsprechenden Kupfermengen möglich. Für die anderen betrachteten Kategorien sind keine Zusammensetzungen innerhalb der Kategorien (Kat. 1) bzw. keine spezifischen Kupfergehalte (Kat. 6, 7) bekannt. Die folgende Tabelle 23: stellt für ausgewählte Kategorien bzw. Elektrogeräte die verwerteten Mengen in Verbindung mit den Kupferanteilen dar.

Tabelle 23: Kupfermengen in ausgewählten Elektroaltgeräten der Kategorien 1, 3 und 4 [24, 44, 50, 63]

Kat.	Geräteart		Anteil an der Kategorie	verwertete Menge 2007	Kupferanteil	Kupfermenge
		Beispiele	[%]	[Mg]	[%]	[Mg]
1	Haushaltsgroßgeräte	Elektroherd, Kühlschrank	100,0%	217.591	5,0%	10.880
3	Persönliche Informations- und/oder Datenverarbeitung	Laptop, Computer	26,7%	28.933	10,0%	2.893
	Mobil-Telefone	Handy	0,2%	241	13,0%	31
	Datensichtgeräte	Bildschirme	44,4%	48.221	8,0%	3.858
4	TV-Geräte		81,8%	100.859	3,0%	3.026

Der Mengenanteil an Mobiltelefonen ist vergleichsweise gering im Verhältnis zu den anderen in der Kategorie 3 betrachteten Geräten. Bildschirme stellen in der Kategorie 3 und Fernsehgeräte in der Kategorie 4 die überwiegenden Mengen. Die Kupfermenge der verwerteten Elektro- und Elektronikaltgeräte, von denen Fraktionsanteil und Kupfergehalt bekannt sind (siehe Tabelle 23), lag im Jahr 2007 bei 20.688 Mg. Es handelt sich hierbei um eine Teilmenge.

Unter der Maßgabe, dass für die verwerteten Mengen der Kategorien 2, 6 und 7 der Kupfergehalt nach Schäfer [41] für die Braune Ware von 14 % und für die verbliebenen Mengen der Kategorien 3 und 4 der Kupfergehalt von 5 % angesetzt würde, ergibt sich eine Kupfermenge in diesen Kategorien von 11.721 Mg und in Summe aller betrachteten Kategorien 32.409 Mg. Da hier nur die Kategorien mit bekanntem Kupferanteil betrachtet wurden, wird die Kupfermenge aller über die EAR erfassten Elektro- und Elektronikaltgeräte größer sein. Welche Kupfermengen explizit separiert und zurück gewonnen wurden, ist nicht zu quantifizieren, Expertenschätzungen gehen von einem Kupferanteil in Elektro- und Elektronikaltgeräten von etwa 5 % aus.

In einer alternativen Betrachtung wurden die Daten der Abfallstatistik des Statistischen Bundesamtes (Fachserie 19) zu den relevanten Elektro- und Elektronikaltgeräten der AVV-Kategorie 20 (Siedlungsabfälle) ausgewertet.

Die in der Fachserie 19 [1] unter den Abfallschlüsselnummern 200123*, 200135*, 200136 zusammengefassten Elektro- und Elektronikaltgeräte wurden im Jahr 2007 entsprechend der nachfolgenden Tabelle 24 in Deutschland behandelt. Die unter 200121* dokumentierten Mengen an Leuchtstoffröhren wurden nicht in die Betrachtung aufgenommen, da deren Kupferanteil als Bestandteil von Messingkontakten minimal ist und nicht sortenspezifisch einem Kupferrecycling zugeführt wird. Für zukünftige Bilanzierungen ist zu beachten, dass durch den vermehrten Einsatz von Energiesparlampen und deren Anfall als Abfall ein

Kupferrecycling vorgenommen werden wird, da die Kupferspule auf der Leiterplatte dieser Lampen nach Demontage zurück gewonnen werden wird.

Tabelle 24: Verteilung der Elektro- und Elektronikaltgeräte auf die relevanten Verwertungsverfahren [1]

	200123*		200135*		200136	
	[Mg]	[%]	[Mg]	[%]	[Mg]	[%]
Sortieranlagen	200	0,2%	1.500	1%	1.400	2%
Zerlegeeinrichtungen für Elektro- und Elektronikaltgeräte	94.500	85%	194.200	99%	57.300	69%
Shredder	16.900	15%			24.500	29%
Sonstige Behandlungsanlagen					400	0,5%
Gesamt	111.600	100%	195.700	100%	83.600	100%

200123*...gebrauchte Geräte, die Fluorchlorkohlenwasserstoffe enthalten

200135*...gebrauchte elektrische und elektronische Geräte, die gefährliche Bauteile enthalten, mit Ausnahme derjenigen, die unter 200121 und 200123 fallen

200136...gebrauchte elektrische und elektronische Geräte mit Ausnahme derjenigen, die unter 200121, 200123 und 200135 fallen

In Deutschland wurden im Jahr 2007 insgesamt 301 Zerlegeeinrichtungen für Elektro- und Elektronikaltgeräte betrieben. In diesen wurde der überwiegende Teil der Elektro- und Elektronikaltgeräte demontiert³.

Geht man davon aus, dass es keine Überschneidungen bzw. Doppelnennungen bei den Inputmengen in die Abfallbehandlungsanlagen gibt, so wurden im Jahr 2007 390.900 Mg Elektro- und Elektronikaltgeräte in Abfallbehandlungsanlagen verwertet. Davon wurde ca. 1 % aus dem Ausland importiert, 384.500 Mg stammen aus dem Inland.

Ausgehend von einem durchschnittlichen Kupfergehalt für Elektro- und Elektronikaltgeräte von durchschnittlich 5 % (Expertenschätzung) ergibt sich eine Kupfermenge in den zur Behandlung abgegebenen Abfällen von 19.225 Mg. Unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen Recyclingquote von 81,7 % [63] lässt sich eine theoretisch zurück gewonnene Menge an Kupfer von ca. 15.707 Mg angeben.

Bedingt durch die unterschiedlichen ausgewiesenen Elektro- und Elektronikaltgerätemengen zur Behandlung in Deutschland durch die EAR und die Fachserie 19 (nach Angabe der Fachserie 19 lagen die EAR-Daten zum Zeitpunkt der Erhebung noch nicht vor) wurden hier unterschiedliche Kupfermengen ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass die abfallwirtschaftliche Statistik nicht alle EAG-Mengen erfasst.

Neben dem Einsatz in Abfallbehandlungsanlagen werden bestimmte Elektroaltgeräte oder -teile in speziellen Anlagen zur Metallerückgewinnung eingesetzt. Der Input in diese Anlagen stammt überwiegend aus Zerlegeeinrichtungen, erfolgt aber auch teilweise ohne den Kontakt zur Abfallwirtschaft.

Aufbereitung/Recycling

Im Allgemeinen werden Elektro- und Elektronikaltgeräte in einem ersten Schritt der Aufbereitung einer (manuellen) Erstbehandlung unterzogen. Hierbei werden die Geräte entsprechend ihrer Art in einzelne Komponenten zerlegt (z. B. Computer in Gehäuse, Leiterplatten und Prozessoren, Netzteil sowie Laufwerke und Festplatten). Nach diesem Schritt werden die gewonnenen Komponenten einem spezifischen Recycling zugeführt bzw. der unspezifische Teilstrom mittels Shredder zerkleinert.

Durch Chancerel und Rotter [52] wurde eine Kupferbilanz über das Recycling von Elektro- und Elektronikaltgeräten erstellt (siehe Abbildung 25).

³ Auch Abfälle anderer Schlüsselnummern werden in diesen Zerlegeeinrichtungen behandelt. Mengenrelevant sind hierbei 160213* (gefährliche Bestandteile enthaltende gebrauchte Geräte) sowie 160214 (gebrauchte Geräte) mit insgesamt 175.300 Mg, welche aus Deutschland angeliefert wurden. Recycelte Kupferanteile sind nicht bekannt.

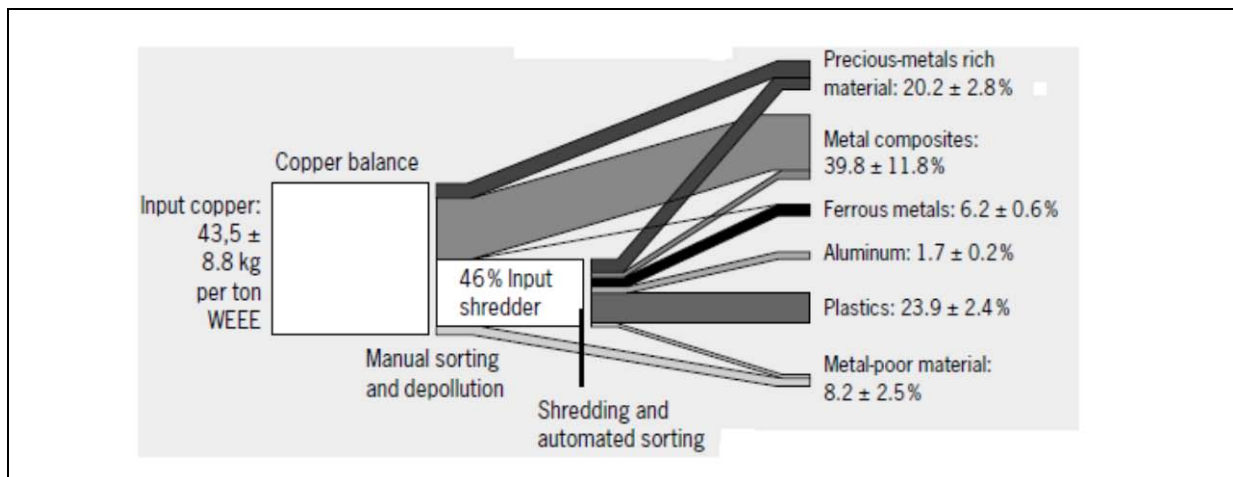


Abbildung 25: Kupferbilanz über das Recycling von Elektro- und Elektronikaltgeräten [52]

Eine Tonne Elektro- und Elektronikaltgeräte enthält nach Chancerel und Rotter [52] eine Kupferkonzentration von durchschnittlich 43,51 kg. Dieser Wert deckt sich auch mit der Expertenschätzung, die von einem Kupfergehalt von 5 % ausgeht. Diese Menge verteilt sich nach der so genannten Erstaufbereitung zu 46 % in den Shredderinput und zu über 50 % in den Metall- und Metallverbundstoffstrom. Für die Rückgewinnung von Kupfer aus den Metallverbindungen kommen metallurgische Prozesse zum Einsatz. Circa 8,2 % der Kupferanteile gelangen nach der manuellen Aufbereitung bzw. dem Shreddern ins metallarme Material. Der größte Kupferverlust erfolgt über die Kunststofffraktion, welche noch ca. 24 % des Kupferinputs beinhaltet.

Ausgehend von den 2007 verwerteten Mengen der Kategorien 3 und 4 ergibt sich eine Kupfermenge in den Stoffströmen „edelmetallreiches Material“ bzw. „Metallverbunde“ von ca. 6.000 Mg Kupfer [63].

Export

Ein großes Problem bei Elektroaltgeräten ist der Rohstoffverlust durch Export der Geräte bzw. die nicht sachgemäße Verwertung.

Hagelüken [45] schätzt, dass 60 % der Elektroaltgeräte bzw. 70 % der IT-Geräte in Europa keinem ordentlichen Recycling zugeführt werden.

Das Umweltbundesamt gibt eine aus Deutschland exportierte Menge an Elektrogeräten (inkl. Altgeräte) von 155.000 Mg an [28].

d) Bau

Im Jahr 2007 wurden 40 % der Kupferproduktion im Bauwesen eingesetzt [22]. Ein Haupteinsatzgebiet von Kupfer im Bausektor sind Kupferwasserleitungen. Mit dem zunehmenden Kunststoffeinsatz in diesem Bereich zeigt sich allerdings ein Rückgang der Kupferrohanteile von 66 % im Jahr 1992 auf 40 % 2004 [26]. Durch das Kupferinstitut [53] wird ausgeführt, dass Kupferlegierungen, wie Messing oder Bronze, im Bausektor immer mehr Einsatz finden.

Durch Schäfer [41] und Wittmer [54] wurden Kupferanteile für Gebäude in Abhängigkeit von der Wohnfläche (für den Wohnungsbau) bzw. Bruttogeschossfläche (für den Nichtwohnungsbau) angegeben (siehe Tabelle 25).

Tabelle 25: Spezifische Stoffkennwerte für Kupfer nach Gebäudetypen

Bereich / Gebäudeart		nach [41]	nach [54])
Wohnungsbau (kg/m ² Wohnfläche)	Einfamilienhaus	keine Werte	0,92
	Mehrfamilienhaus		0,62
	Wohngebäude gesamt	min: 0,59; max: 2,19	0,79
Nichtwohnungsbau (kg/m ² Bruttogeschossfläche)	Dienstleistungsgebäude	keine Werte	0,64
	Produktionsgebäude		0,36

Die Kupfergehalte liegen je nach Gebäudetyp in einem Bereich von 0,62 bis 0,92 kg/m² Wohnfläche bzw. Bruttogeschossfläche. In Wohngebäuden wurde bzw. wird durchschnittlich mehr Kupfer verbaut als in Gebäuden, die nicht Wohnzwecken dienen.

Lager

Das Umweltbundesamt [55] gibt basierend auf Kupferanteilen in Verbindung mit Wohn-Bruttogeschossflächen für das Jahr 2005 Angaben zum Kupferlager sowie Kupfermengen für das Jahr 2020 an (Tabelle 26).

Tabelle 26: Kupferlager und Kupfermengen in und aus Gebäuden [55]

Kupfer Deutschland [Mg]	Kupferlager (Mg) (2005)	Kupfermenge (2020) (Mg/a)	
		Output	Input
Wohnen	2.615.329	6.122	16.916
Einfamilienhaus		2.738	12.806
Mehrfamilienhaus		3.383	4.110
Gewerbe	keine Werte	7.009	16.164
Dienstleistungsgebäude		3.174	6.790
Produktionsgebäude		3.835	9.374
Gesamt	keine Werte	13.131	33.081

Für das Jahr 2005 wurde das Kupferlager in deutschen Wohnbebauungen auf ca. 2,62 Mio. Mg geschätzt [55]. Wittmer [54] hat in seiner Dissertation ein Pro-Kopf-Lager an Kupfer in Gebäuden (Strom, Telekommunikation, Heizung, Sanitär, Dach...) für die Schweiz von 91 kg ermittelt. In dieser Angabe sind alle Gebäudetypen (Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser, Dienstleistungsgebäude, Produktionsgebäude) berücksichtigt. Unter der Annahme einer vergleichbaren Gebäudestruktur in der Schweiz und in Deutschland sowie 82.218.000 Einwohnern in Deutschland im Jahr 2007, ergibt sich ein Kupferlager in allen Gebäudetypen von ca. 7,5 Mio. Mg.

Abfallaufkommen

In Auswertung der deutschen Abfallstatistik [1], ergeben sich die in Tabelle 27 dargestellten Mengen an Abfällen aus der Baubranche, welche in deutschen Abfallbehandlungsanlagen eingesetzt wurden. Hierbei ist zu beachten, dass es sich um die Gesamt-Inputmenge aller Anlagen handelt. Auf Grund der Art der Anlagen wird davon ausgegangen, dass es teilweise zu Doppelnennungen kommt. Diese lassen sich jedoch nicht explizit ausweisen.

Tabelle 27: Inputmengen von Bau- und Abbruchabfällen in deutsche Abfallbehandlungsanlagen (2007) [1], Kupferanteile nach [56]

	Input aus		Cu-Anteil	Cu-Menge
	Deutschland	Ausland		
	[1.000 Mg]	[1.000 Mg]	[%]	[Mg]
170101	619		0,17%	1.052
170102	339		0,17%	576
170103	115		0,17%	196
170106 *	919		0,17%	1.562
170107	3.926		0,17%	6.674
170401	108	44	90,00%	136.800
170904	2.649	72	0,35%	9.525
Summe	8.674	116		156.384

170101...Beton

170102...Ziegel

170103...Fliesen, Ziegel und Keramik

170106*...Gemische aus oder getrennte Fraktionen von Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik, die gefährliche Stoffe enthalten

170107...Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 01 06 fallen;

170401...Kupfer, Bronze, Messing

170904...gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01, 17 09 02 und 17 09 03 fallen

In Abhängigkeit vom Kupfergehalt der jeweiligen Abfallart ergibt sich eine Kupfermenge im Bau- und Abbruchabfall von ca. 156.384 Mg für das Jahr 2007. Von dieser Menge wurde jedoch nur ein Teil zurück gewonnen.

Der Abfall mit der Schlüsselnummer 170401 (Kupfer, Bronze, Messing) wird in speziellen Abfallbehandlungsanlagen eingesetzt und als Recyclingmaterial wieder bereitgestellt. Ausgehend von einer Inputmenge von 152.000 Mg und einem Kupfergehalt von 90 % entspricht dies einer Menge von 136.800 Mg Kupfer. Die Auswertung der Fachserie 19 [1] zeigt, dass ca. 75 % des Abfalls mit der Schlüsselnummer 170401 in sonstigen Behandlungsanlagen eingesetzt wurde. Es handelt sich hierbei zum überwiegenden Teil nicht um klassische Aufbereitungsanlagen, sondern eher um produzierende Gewerbebetriebe. In diesem speziellen Fall kann es sich bspw. um Raffinerien oder Gießereien handeln, die aus dem Kupferinput Produkte herstellen.

Die Verteilung der Abfallmenge von Kupfer/Bronze/Messing mit der Abfallschlüsselnummer 170401 auf die jeweiligen Behandlungsverfahren ist in Abbildung 26 dargestellt. (Darstellung der Behandlungswege der unter Datenschutz stehenden Mengen nicht möglich.)

Aus der Auswertung der Fachserie 19 [1] wird ersichtlich, dass die in Sortieranlagen eingesetzten Abfälle der Schlüsselnummer 170401 in ähnlicher Größenordnung die Anlage wieder verlassen. Es ist somit in der Gesamtbilanz anzunehmen, dass teilweise Doppelnennungen auftreten.

Ausgehend davon, dass die Abfallmenge von 111.600 Mg für Kupfer/Messing/Bronze nahezu vollständig in geeigneten Behandlungsanlagen eingesetzt wird, wird eine Kupfermenge von 78.800 Mg dort als Sekundärkupfer verwertet. Diesbezügliche statistische Angaben sind nicht verfügbar.

Aufbereitung

Durch selektiven Rückbau kann eine relativ reine Kupferfraktion mit der Abfallschlüsselnummer 170401 gewonnen werden. Dieser Materialstrom kann in Abhängigkeit von der Reinheit direkt entsprechenden Metallaufbereitungsanlagen/Raffinerien angedient werden oder vorher bspw. in Shredder- oder Sortieranlagen behandelt werden.

Die Aufbereitung der anderen geringfügig kupferhaltigen Abfallströme erfolgt weniger vor dem Hintergrund der Kupfergewinnung. Sofern eine Sortierung erfolgt, wird die Gewinnung einer Metallfraktion vor allem vor dem Hintergrund der Sekundärrohstoffpreise angestrebt.

Nach Schäfer [41] könnten aus 1.000 Mg Bauschutt durch manuelle Sortierung 2 Mg Kupfer mit einer Reinheit von 85 % gewonnen werden. Durch die manuelle Sortierung von 1.000 Mg Baustellenabfällen könnten 3,8 Mg Kupfer mit einer Reinheit von 90-95 % selektiert werden.

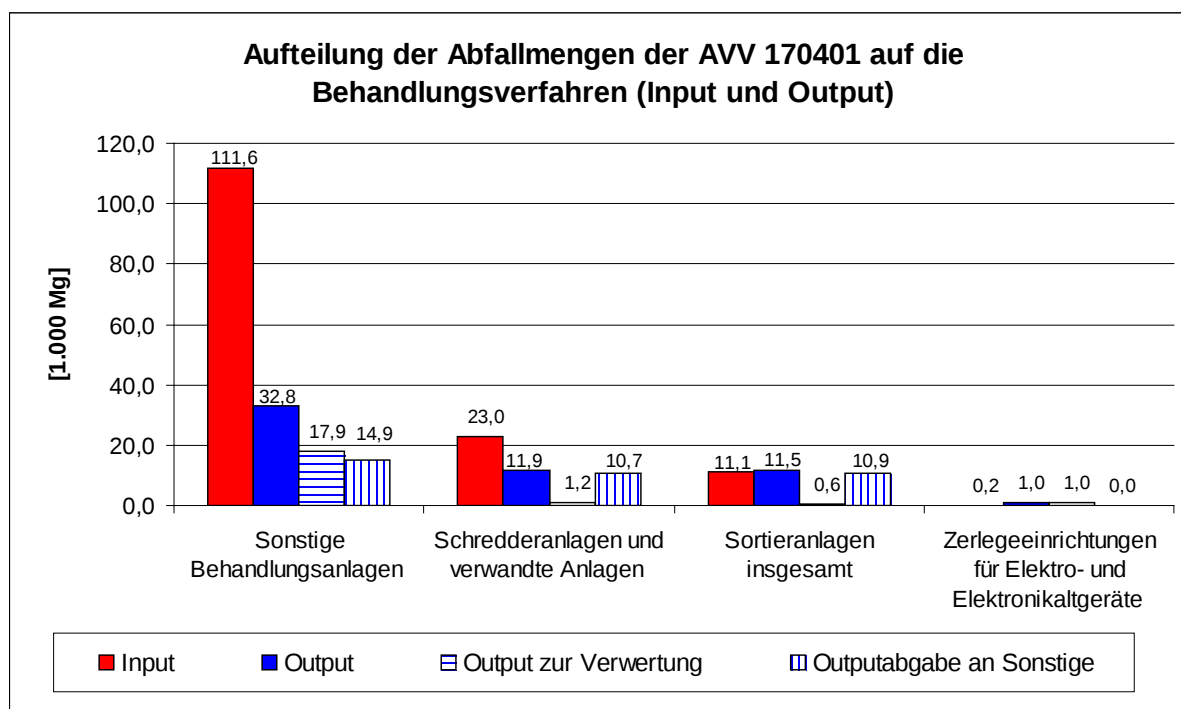


Abbildung 26: Aufteilung der Abfallmengen der AVV 170401 (Kupfer/Bronze/Messing im Bauabfall) auf entsprechende Behandlungsverfahren (Input und Output)

e) Sonstiges

Zu den sonstigen kupferhaltigen Produkten zählen beispielsweise Schmuck, Einrichtungs- und Gebrauchsgegenstände wie auch Münzen. Abschätzungen zu Bestandsmengen der ersten drei Kategorien sind schwer möglich.

Münzen

Der Kupfergehalt in den Euromünzen ist bekannt. Über die zur Währungsreform in Verkehr gebrachten Münzmengen in Deutschland wurde beispielhaft die Kupfermenge ermittelt.

Tabelle 28: Kupfermenge in den Münzen zur Erstausrüstung bei Währungsreform in Deutschland (Kupferanteile [42])

	Erstausrüstung	Einzelgewicht	Cu-Anteil	Cu-Lager
	[Stück]	[g]	[%]	[Mg]
2 Euro	1.000.000.000	8,5	75%	6.375
1 Euro	1.700.000.000	7,5	75%	9.563
50 ct	1.600.000.000	7,8	89%	11.107
20 ct	1.600.000.000	5,7	89%	8.117
10 ct	3.300.000.000	4,1	89%	12.042
gesamt				47.203

Zum Zeitpunkt der Währungsreform waren ca. 47.000 Mg Kupfer als Bestandteil der Euro-/Centmünzen in Deutschland im Umlauf. Da es keine Erhebungen über den derzeitigen Bestand an Münzen bei der deutschen Bevölkerung gibt, kann keine Aussage über den aktuellen Stand getroffen werden.

Schlacken und Aschen

Weiterhin werden in der Kategorie „Sonstiges“ die Rückstände aus der Müllverbrennung wie Schlacken und Rauchgasreinigungsrückstände betrachtet. Der durchschnittliche Kupferge-

halt der Rückstände aus der Verbrennung von Haus- und Gewerbemüll beträgt 10 g/kg TS [54]. Im Jahr 2007 fielen in deutschen thermischen Abfallbehandlungsanlagen 4,47 Mio. Mg „Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 01 11 fallen“ mit der Abfallschlüsselnummer 190112 an. Verglichen mit den anderen Produkten der Müllverbrennung ist dies der Hauptstoffstrom. Schlacken haben je nach Verfahren einen Wassergehalt von bis zu 20 %. Ausgehend von einer durchschnittlichen Feuchte von ca. 13 % [58] ergibt sich eine Kupfermenge in der Schlacke bzw. den Aschen von ca. 39.000 Mg. Bestimmte Mengen der Schlacke werden abgelagert, womit der Kupferanteil nicht mehr verfügbar ist. Der überwiegende Teil der Schlacken (2,4 Mio. Mg) wird in die sonstige Behandlung gegeben. Zur sonstigen Behandlung zählen auch Verfahren zur Aufbereitung von Schlacke. Diese verfolgen bspw. das Ziel der Abtrennung von Eisen- und Nichteisenmetallen. Der Einsatz entsprechender Verfahren der Schlackeaufbereitung gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die derzeitige Menge an rückgewonnenem Kupfer aus Verbrennungsschlacke ist nicht bekannt.

Kupferverluste

Durch witterungsbedingten Abtrag bzw. das Herauslösen von Kupfer-Ionen ist bei im Außenbereich eingesetztem Kupfer ein Verlust im Kreislauf zu verzeichnen. Verluste treten weiterhin durch die Abnutzung von Brems- und Reibbelägen, Fahrdrähten und Stromschienen sowie bei Kupferzusatz in Pflanzenschutzmitteln bzw. in der Medizin auf. Die Mengen sind jedoch von vergleichbar geringer Relevanz [42].

Zusammenfassung

Lager

Das anthropogene Lager an Kupfer, wie in Tabelle 29 dargestellt, beträgt mindestens 7,3 Mio. Mg Cu.

Tabelle 29: Auszug anthropogenes Lager von Kupfer in Deutschland

Bereich	betrachtete Segmente	Menge [Mio. Mg]	offene Segmente
Baubereich	Wohnbebauung	2,62	gewerblich genutzte Gebäude
Fahrzeugsbereich	PKW Nutzfahrzeug Krad	1,29	Fahrzeuge des Schienen-, Flug- und Schiffsverkehrs
Elektro- und Elektronikbereich	Handys PC-Leiterplatten Tragbare Audiogeräte	0,01	weitere kupferhaltige Elektrogeräte
	Kabel	3,31	Kabel innerhalb von Gebäuden
Sonstiger Bereich	Münzen	0,047	Schmuck, Gebrauchsgegenstände
Maschinenbau			gesamt

Hinzu kommen noch Kupferanteile, welche aufgrund der Datenlage schwer zu erheben sind, z. B.:

- Kabel innerhalb von Bebauungen,
- Gewerbegebäuden,
- Schiffen, Flugzeugen, Bahnen,
- Verschiedenen elektrischen und elektronischen Geräten,
- Maschinenbeständen der Produktion,
- Schmuck und Gebrauchsgegenständen.

Die Größenordnung dieses nicht bekannten Anteils wird vor allem durch den Maschinenbau als bedeutsam eingeschätzt.

Kupfer im Abfall

In der Fachserie 19 Reihe 1 des Statistischen Bundesamtes [1] werden die Abfälle nach Abfallschlüsselnummern dokumentiert und die Mengen den Behandlungsanlagen im In- und Output zugeordnet. In der folgenden Übersicht sind die kupferhaltigen Abfälle der jeweiligen Branche sowie deren Kupfergehalte (berechnet über Anteilswerte) dargestellt, weiterhin erfolgt eine Darstellung der importierten Abfallmengen sowie der (berechneten oder recherchierten) Kupfermengen zum Recycling.

Tabelle 30: Kupferpotenzial in den Abfallströmen sowie Recyclingmengen

	Kabel	Bau	Fahrzeuge	Elektro/Elektronik	Sonstiges
aus Inland zur Abfallbehandlung					
Menge kupferhalt. Abfälle	103.800 Mg	8.674.300 Mg	420.400 Mg	384.500 Mg	4.471.100 Mg Schlacke
Kupfergehalt	37%	Kupfergehalt je AVV var.	1,60%	5%	10 g/kgTS
Kupferpotenzial	38.060 Mg	116.531 Mg Cu	6.726 Mg Cu	19.225 Mg Cu	38.899 Mg Cu
Import zur Abfallbehandlung					
Menge kupferhalt. Abfälle	37.700 Mg	116.100 Mg	19.500 Mg	4.800 Mg	
Kupferpotenzial	13.823 Mg	39.852 Mg Cu	312 Mg Cu	240 Mg Cu	
Gesamtpotenzial	51.883 Mg	156.384 Mg Cu	7.038 Mg Cu	19.465 Mg Cu	38.899 Mg Cu *
Recycling					
	Fa. Cabo	AVV-Nr. 170401 ca.	lt. UBA 98% Metallrec	lt. EAR ca. 80 % Rec.-qu.	
Kupfermenge	24.000 Mg	100.440 Mg Cu	6.898 Mg Cu	15.572 Mg Cu	

*...Potenzial aus Schlacke; auch in anderen Abfallströmen können sich noch Kupferbestandteile befinden, die jedoch im Vergleich zu den Betrachteten von untergeordneter Mengenrelevanz sind

Über die in Abfallbehandlungsanlagen eingesetzten kupferhaltigen Abfallmengen und deren Kupfergehalte lassen sich die Kupferpotenziale berechnen. In Abhängigkeit von der Konzentration, dem Aufbereitungsverfahren und der Verfügbarkeit schwanken die recycelbaren Anteile. Explizite Mengenangaben der gesamten recycelten Kupfermenge je Branche sind nicht möglich, so dass durch Wahl eines geeigneten Ansatzes die jeweiligen Kupfermengen berechnet wurden.

Für Kabel wurde von Deutschlands größter Kabelrecyclingfirma die recycelte Kupfermenge dargestellt. Für die Baubranche erfolgte die Ermittlung der Recyclingmenge über die Auswertung der Fachserie 19 [1] für den Abfall 170401 (Kupfer, Bronze, Messing). Für die Fahrzeug- und EAG-Branchen wurden auf Basis bekannter Recyclingquoten sowie durchschnittlicher Metallgehalte Kupfermengen aus dem Recycling berechnet. Die Kupferbestandteile im Sperrmüll, Restabfall und ähnlichen wurden nicht betrachtet, da diese sehr gering sind und kein stoffspezifisches Recycling erfahren. Zum Recycling von Verbrenungsschlacken und -aschen wurden bereits Ausführungen gemacht. Abfallströme innerhalb der Industrie (Halbzeugfertigung – Gießereien) sind zum überwiegenden Teil nicht darzustellen, da die Unternehmen ihre Mengen und Verwertungswege nicht bekannt geben und die Verbände nicht über entsprechende Daten verfügen.

Ein Teil des in der Abfallbehandlung eingesetzten Abfalls mit Kupferanteil wird nicht unter der Prämisse der Kupferrückgewinnung verwertet. Diese Mengen werden, wie in Abbildung 27 dargestellt, der sonstigen Verwertung zugeführt.

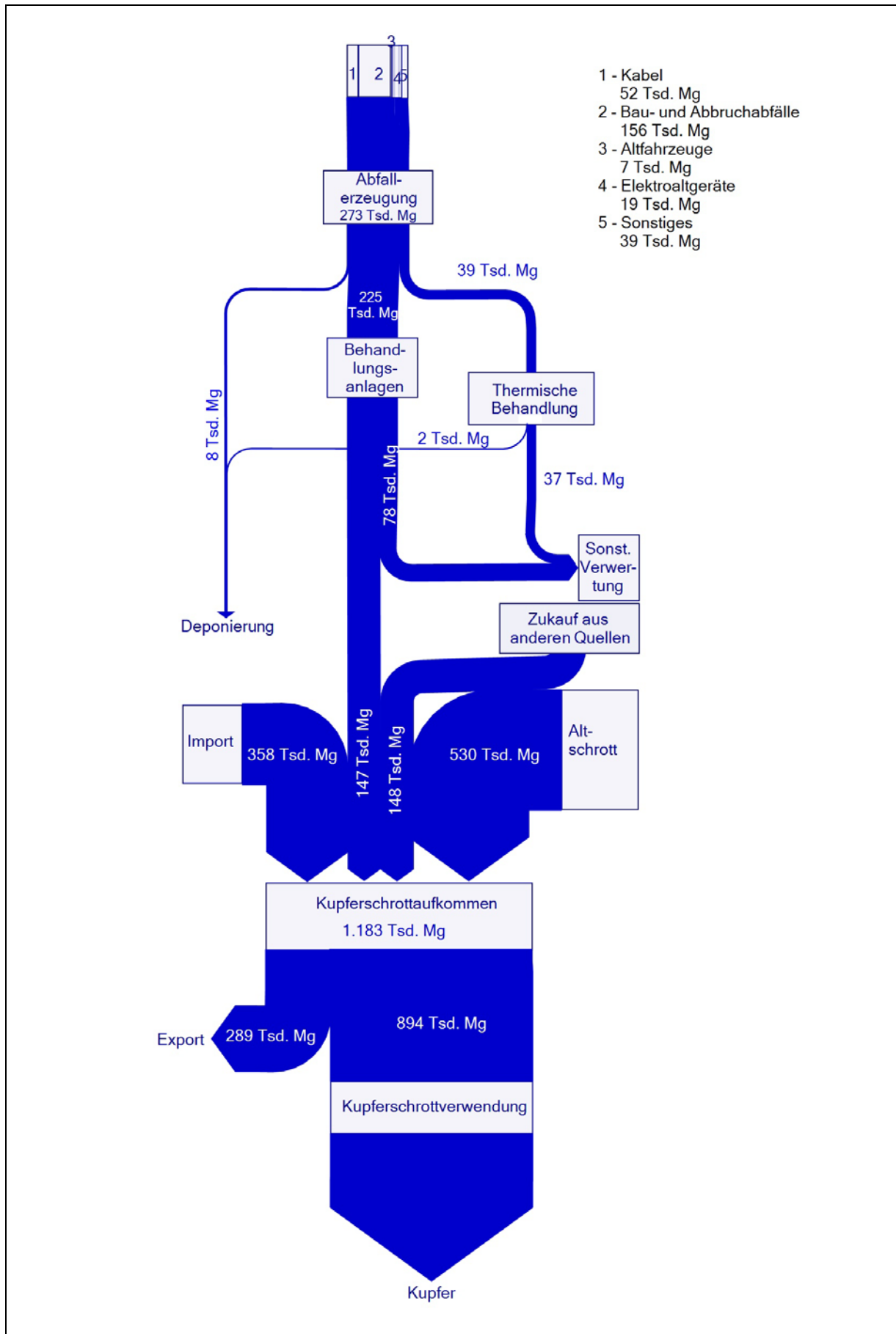


Abbildung 27: Materialstrom Kupfer für das Jahr 2007

5.3 Gold

Im Jahr 2007 wurden in der Bundesrepublik ca. 97 Mg Gold eingesetzt, wobei 16,6 Mg aus dem Import stammten [61]. Davon wurden ca. 50 % im industriellen Bereich verarbeitet und ca. 18 % in der Schmuckwarenindustrie. Die verbleibenden 32 % wurden im Bereich der Herstellung von Goldbarren zur Wertanlage, Münzen sowie sonstigen Bereichen wie Lebensmittel- oder Pharmaindustrie eingesetzt.

Lager

Belastbare Daten zum anthropogenen Goldlager liegen nicht vor. Dies gilt insbesondere für die Bereiche Schmuck und Wertanlagen. Hagelüken et al. [62] gehen davon aus, dass ca. 10 % des Schmucks in den Produktionsprozess zurückgeführt werden, allerdings erst nach sehr langen Zeiträumen. Für das Jahr 2002 wurde eine Menge an Gold aus Altschmuck von 3,6 Mg/a bestimmt [62], eine wesentliche Änderung dieser Menge wird nicht erwartet.

Belastbare Daten zum Gold aus dem Bereich der Zahntechnik im anthropogenen Lager fehlen ebenfalls.

Wertanlagen stehen für die Produktion von Gold nicht zur Verfügung.

Altgold aus dem Bereich der Elektro-/Elektronikbranche hingegen wird, wenn auch nur teilweise, getrennt erfasst und wieder gewonnen. Nach Darstellung des BMU [63] standen 2007 den ~1,6 Mio. Mg in Umlauf gebrachten Elektroaltgeräten (goldhaltige und nichtgoldhaltige) ca. 580.000 Mg recycelte Elektroaltgeräte gegenüber.

Für ausgewählte Altgeräte wird überschlägig an ausgewählten Beispielen die Größenordnung an Gold im anthropogenen Lager abgeschätzt.

Tabelle 31: Abschätzung der Goldmenge anhand ausgewählter Elektronikgeräte bzw. -teile im anthropogenen Lager

	Mobil- telefon (a)	Computer- leiterplatten (b)	Telefon- hörer (c)	Taschen- rechner (d)	Quellen
Stück	120 Mio.	80 Mio.	80 Mio.	120 Mio.	a [Groh 2010] b,c,d eig. Annahmen
Masse [g]	-	300	175	80	b,d eigene Annahmen c [Hagelüken 2007]
Goldanteil [ppm]	24 kg/ 1 Mio. Stück	250	120	50	a [UBA 2007] b,c,d [Hagelüken]
Gold gesamt [Mg]	2,9	6,0	1,7	0,5	

Für die beispielhaft abgeschätzten Goldmengen bei den vier Elektronikgeräten bzw. -teilen ergibt sich eine Goldmenge im anthropogenen Lager von ca. 11 Mg. Die tatsächliche Menge an Gold aus dem Bereich der Elektro-/Elektronikbranche ist weitaus höher einzuschätzen, da zu der bilanzierten Goldmenge noch weiteres Gold hinzu kommt, wenn alle goldhaltigen Geräte wie tragbare Audiogeräte, Leiterplatten in Fernsehgeräten usw. bilanziert werden. Die Herstellung und Verwendung von goldhaltigen Elektrokleingeräten ist in den letzten Jahren gestiegen, so dass eine Zunahme des Goldes aus dem Bereich der Elektro-/Elektronikbranche im anthropogenen Lager zu erwarten ist.

Gold wird weiterhin bei der Herstellung von Steckverbindungen (z. B. Fahrzeugbau, Medizintechnik, Unterhaltungselektronik) eingesetzt. So liegt beispielsweise der Goldeinsatz im Stecker bei Vollbandselektiver Streifenbeschichtung (einseitig) bei 5,34 g/1.000 Kontakte und beim fertig gebogenen Stanzband bei 0,35 g/1.000 Kontakte [64]. Insbesondere im Fahrzeugbau ist eine Zunahme des Einsatzes von elektronischen Bauteilen zu verzeichnen.

Bei niedrigen Spannungen und Strömen sowie niedrigen Kontaktdrücken wird Gold als das optimale Material angesehen. Die Menge an Kontaktstellen im Auto variiert zwischen 700 Kontaktstellen bei Kleinfahrzeugen und 3.000 Kontaktstellen bei Fahrzeugen der Oberklasse [64]. Belastbare Daten zum Goldeinsatz im Fahrzeugbau liegen nicht vor. Die Größenordnung, in welcher Menge Gold im Fahrzeugbestand im anthropogenen Lager vorliegen könnte, soll folgende grob überschlägige Schätzung zeigen. Bei einem Bestand von rund 55,5 Mio. Fahrzeugen im Jahr 2007 [65] und angenommenen durchschnittlich 1.500 Kontaktstellen in einem Mittelklasse-Pkw sowie den Annahmen, dass die Steckverbindungen durchschnittlich 1 g/1.000 Kontakte Gold enthalten und 5 % aller Kontakte mit Goldanteil sind, ergibt sich eine geschätzte Goldmenge im zugelassenen Fahrzeugbestand von ca. 4 Mg.

Recyclingmöglichkeiten

Das Recycling von Gold erfolgt auf zwei Wegen. Zum einen durch klassische Scheideanlagen für Gold aus Schmuck und Gold aus der Zahntechnik, so genanntem Dentalgold, zum anderen erfolgt die Gewinnung von Gold aus Elektro(nik)altgeräten mittels spezieller Aufbereitungsverfahren.

In Scheideanlagen werden Gold unterschiedlichster Qualität bzw. andere edelmetallhaltige Stoffe eingesetzt. Gold aus Elektro(nik)altgeräten wird nur in sehr geringem Umfang und bei hohem Aufbereitungsgrad eingesetzt [66]. Die Bandbreite wird in Abbildung 28 dokumentiert.

Belastbare Daten zur Menge des wiedergewonnenen Goldes konnten nicht erhoben werden.

Die Gewinnung von Gold aus Elektro(nik)altgeräten wird in großem Umfang in der Bundesrepublik nur durch die Aurubis AG durchgeführt. Die edelmetallhaltigen Altgeräte werden entsprechend aufbereitet. Über verschiedene Bearbeitungsstufen wird das Gold gewonnen. Durch Aurubis werden jährlich etwa 3,5 Mg Gold durch das Recycling von Elektroaltgeräten erzeugt [67]. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Menge der Goldmenge der in Deutschland gesammelten Elektroaltgeräte entspricht. Zwar gehen Elektroaltgeräte auch zu Boliden in Schweden bzw. Umicore in Belgien, doch gleichen sich diese Mengen mit denen aus, die Aurubis aus dem Ausland importiert.

Einsatz

Der Einsatz des Goldes in Deutschland kann wie folgt zusammenfassend beschrieben werden:

- Goldeinsatz: 97 Mg/a
 - Importüberschuss (16,6 Mg/a)
 - Produktion Aurubis (u. a. durch Elektroaltgeräte-recycling)
 - Rest aus Scheideanstalten bzw. von Edelmetallrecyclern
- Branchen
 - Industrieller Bereich: 48,5 Mg/a
 - davon 22 Mg/a Zahntechnik und
 - 26,5 Mg/a überwiegend Elektro- und Elektronikbranche
 - Schmuckherstellung: 17,5 Mg/a
 - Goldbarren, Münzen, Sonstige: 31 Mg/a

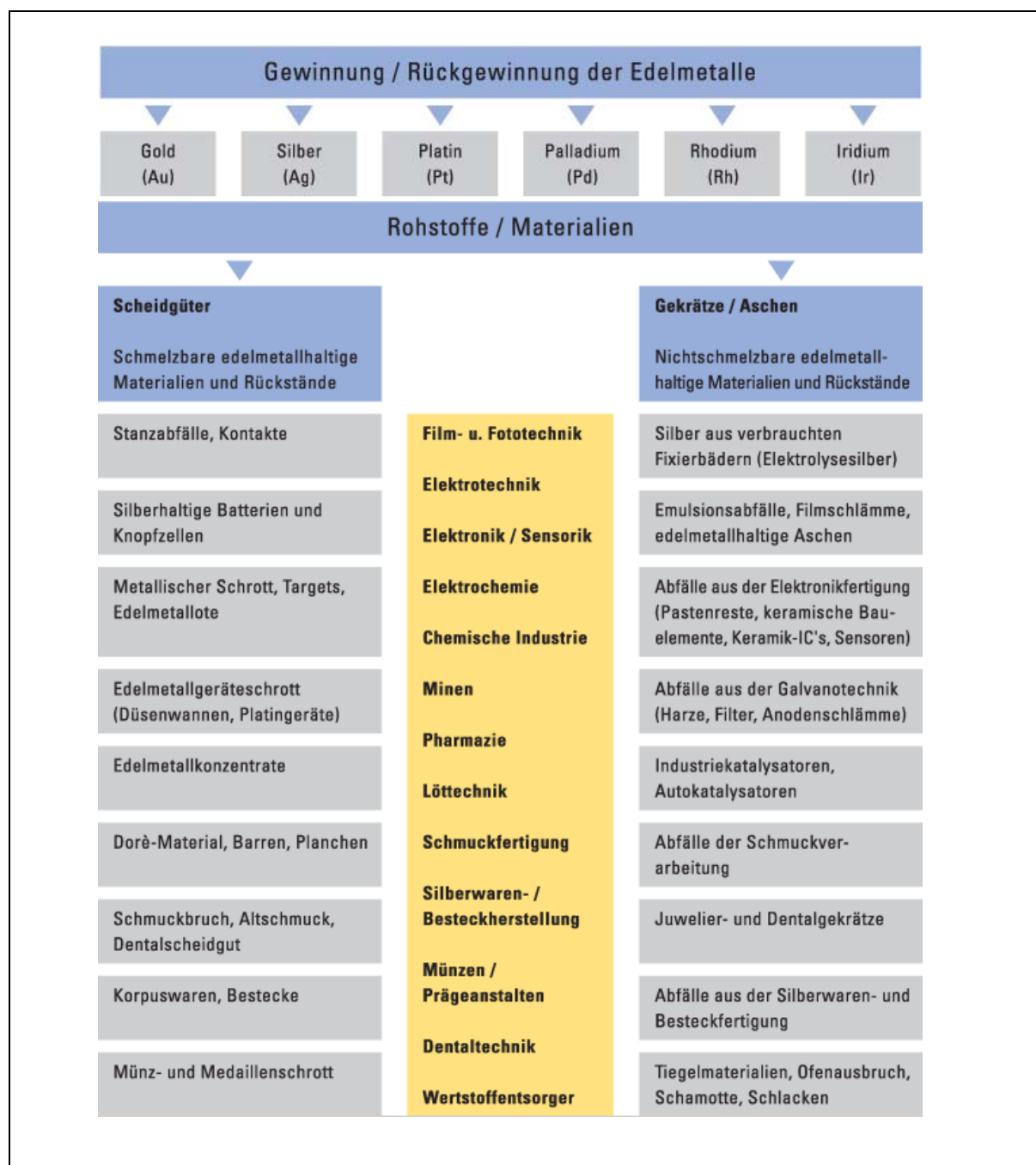


Abbildung 28: Rohstoffe und Materialien zur Gewinnung/Rückgewinnung der Edelmetalle [66]

Dissipative Verluste

Bei der Herstellung bzw. Verarbeitung von Goldprodukten treten Verluste auf. Beispielhaft entstehen bei der Goldschmuckherstellung ca. 2-5 % Verluste, welche nach Einschätzung von Experten nicht weiter minimiert werden können. Unterstellt man diese Verlustspanne auf den gesamten Goldeinsatz, so ist der Verlust mit 1,9 bis 4,9 Mg/a zu beziffern.

Abfallwirtschaft

Die Sammlung, Aufbereitung und Verwertung goldhaltiger Elektro(nik)altgeräte wurde durch Chancerel [70] ausführlich untersucht. Die Rücksprache mit der Autorin ergab, dass die Stoffstromanalyse von Gold anhand umfangreicher Recherchen und Analysen sowie Befragungen erstellt wurde, jedoch auch Annahmen zur Hochrechnung erforderlich waren. Neben der Erfassungsquote goldhaltiger Elektro(nik)altgeräte beeinflusst die Art der Aufbereitung

die Recyclingquote signifikant. Die Stoffstrombilanz Gold für Elektro(nik)altgeräte kann wie folgt zusammengefasst werden, wobei eine Menge von 400.000 t/a an Elektrokleingeräten der Abfallwirtschaft zur Verfügung steht [70].

Tabelle 32: Stoffstrom Gold in Elektro(nik)kleingeräten [70]

Stufe	Gold [kg/a]	Spannbreite [kg/a]	Anteil [%]
in Elektro(nik)kleingeräten gesamt	2.152	± 104	100 %
getrennt erfasst	1.381	± 69	64 %
nicht getrennt erfasst	771	± 80	36 %
Wiederverwendung	88	± 13	4 %
Wiedergewinnung	512	± 29	24 %
Verlust	1.552	± 90	72 %

Es zeigt sich, dass 72 % des in Kleingeräten enthaltenen Goldes der Kreislaufwirtschaft verloren geht. Gestützt werden die Aussagen durch die Untersuchungen von Sander [71] und Hagelüken [72]. Sander [71] beziffert die Spannbreite der Rückgewinnungsraten an Gold nach der Sammlung zwischen 22,8 % (Großshredder) bis hin zu 92,2 % (manuelle Zerlegung vertieft). In Summe ergeben sich Gesamtrückgewinnungsraten für Gold bei einer unterstellten Sammelquote von 50 % zwischen 11 % und 46 % in Abhängigkeit von der Aufbereitung. In den Zahlen ist der Verlust von 5 % bei der Metallscheidung bzw. in der Hütte enthalten. Hier handelt es sich um theoretische Angaben, die Untersuchungen von Chancerel haben ergeben, dass die Rückgewinnungsrate auch weitaus geringer sein kann.

Im- und Export

Nicht abschließend bilanzierbar ist die Menge an Gold, welche als Goldanteil in verschiedenen Abfällen im- und exportiert wird [2, 29]. Den Importen nicht notifizierungspflichtiger Abfälle (Zollcodenummer: 71129100) von 1.307 Mg/a stehen Exporte von 15 Mg/a im Jahr 2007 gegenüber. Keine Angaben können zu den Goldgehalten in den Abfällen getroffen werden. Bei den notifizierungspflichtigen Abfällen kann die Menge an Gold durch den Goldanteil in den Abfällen abgeschätzt werden, wobei der Maximalanteil an Gold 0,03 % nicht übersteigt. Exportiert werden in Summe 4.397 Mg/a goldhaltige Abfälle, so dass von einem Goldanteil bis zu 0,8 Mg/a ausgegangen werden kann. Die importierte Menge goldhaltiger Abfälle liegt bei 161.503 Mg/a mit einem rechnerisch bestimmten Goldanteil bis zu 36,3 Mg/a [56]. Entsprechend der ABANDA-Daten sollte der überwiegende Anteil (bis zu 26,8 Mg/a) in Schlämmen aus der physikalisch-chemischen Behandlung vorliegen, die gefährliche Stoffe enthalten (AVV 19 02 05). Dieser Stoffstrom wird energetisch verwertet oder thermisch behandelt.

Als Gebrauchsgüter verlässt jährlich eine große Menge an Elektro(nik)geräten und Elektro(nik)altgeräten insbesondere über den Hamburger Hafen die Bundesrepublik in Nicht-EU-Staaten. In diesen Ländern existieren Entsorgungsstrukturen, welche zur Sicherstellung einer weitgehenden Wiedergewinnung unter Berücksichtigung des Schutzes der menschlichen Gesundheit und der Umwelt nicht geeignet sind. Das Umweltbundesamt [73] gibt die Menge an Gold aus Elektro(nik)geräten und Elektro(nik)altgeräten mit 0,12 Mg/a im Minimum bis 0,61 Mg/a im Maximum entsprechend der Varianten des exportierten Gerätemixes an. Neben der Verbringung über den Hamburger Hafen gibt es weitere Wege, auf denen Elektro(nik)geräte und Elektronikaltgeräte die Bundesrepublik verlassen. Insbesondere in den östlichen Bundesländern werden vor Wertstoffhöfen diverse Abfälle und Gebrauchsgüter abgegriffen und anschließend in den osteuropäischen Raum verbracht. Die Menge an Gold ist über diesen Weg nicht quantifizierbar.

Zusammenfassung

Zusammenfassend kann eine vereinfachte Goldbilanz für die Bundesrepublik wie folgt dargestellt werden:

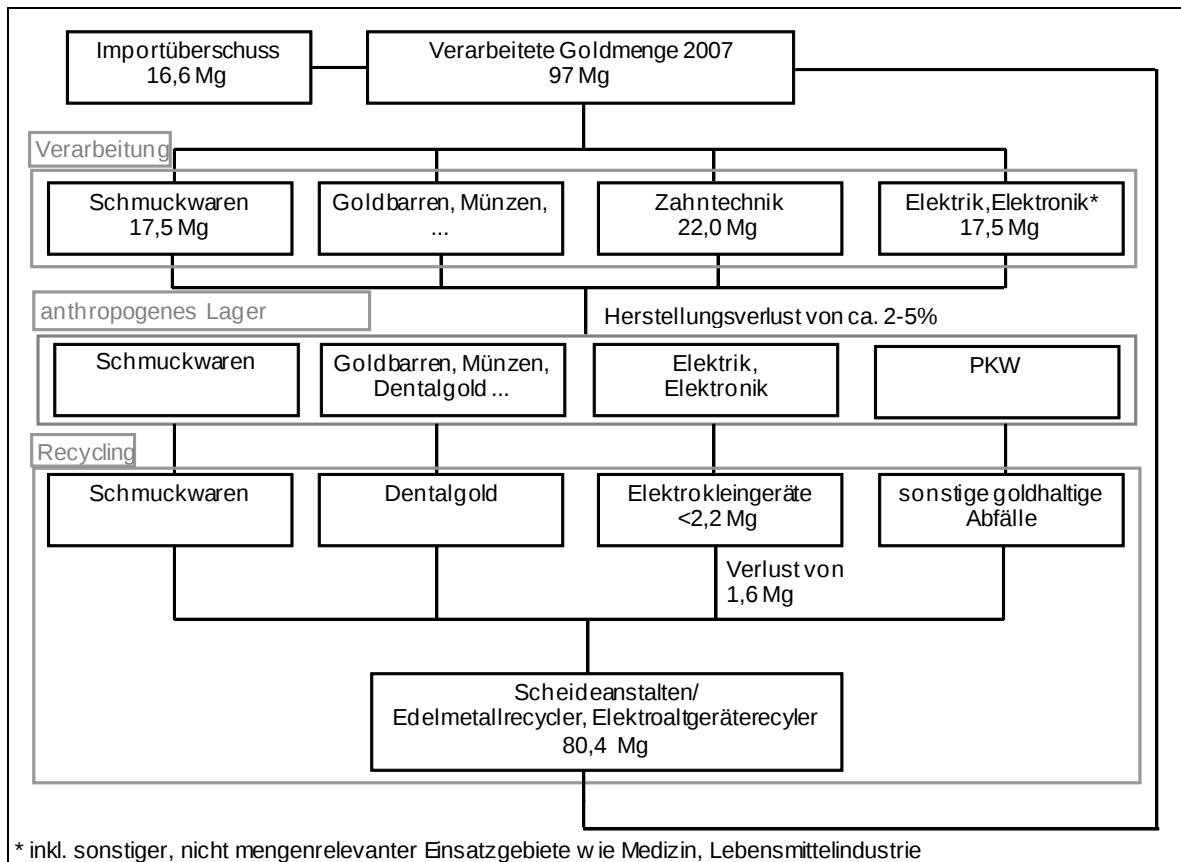


Abbildung 29: Vereinfachte Goldbilanz der Bundesrepublik

Aus der Materialstrombetrachtung des Goldes geht hervor, dass ein nennenswerter Im- und Export mit einem erheblichen Importüberschuss stattfindet. Dieser dient insbesondere auch der Wertanlage und findet sich somit in einem wachsenden anthropogenen Lager wieder. Genaue Angaben liegen hierzu nicht vor.

5.4 Thermoplastische Kunststoffe am Beispiel von HD-/LDPE, PET und PVC

Herkunftsbereiche

Im Folgenden werden die Kunststoffe Polyethylen (PE), Polyethylenterephthalat (PET) und Polyvinylchlorid (PVC) näher betrachtet, welche vor allem als Verpackungskunststoff (PE und PET) bzw. im Bauwesen (PVC) eingesetzt werden. Die absoluten Verarbeitungsmengen der einzelnen Kunststoffarten differenziert nach Branchen zeigt die folgende Abbildung. Zu den dort angegebenen sonstigen Anwendungsgebieten gehören beispielsweise Haushaltswaren sowie Waren für Sport, Spiel und Freizeit.

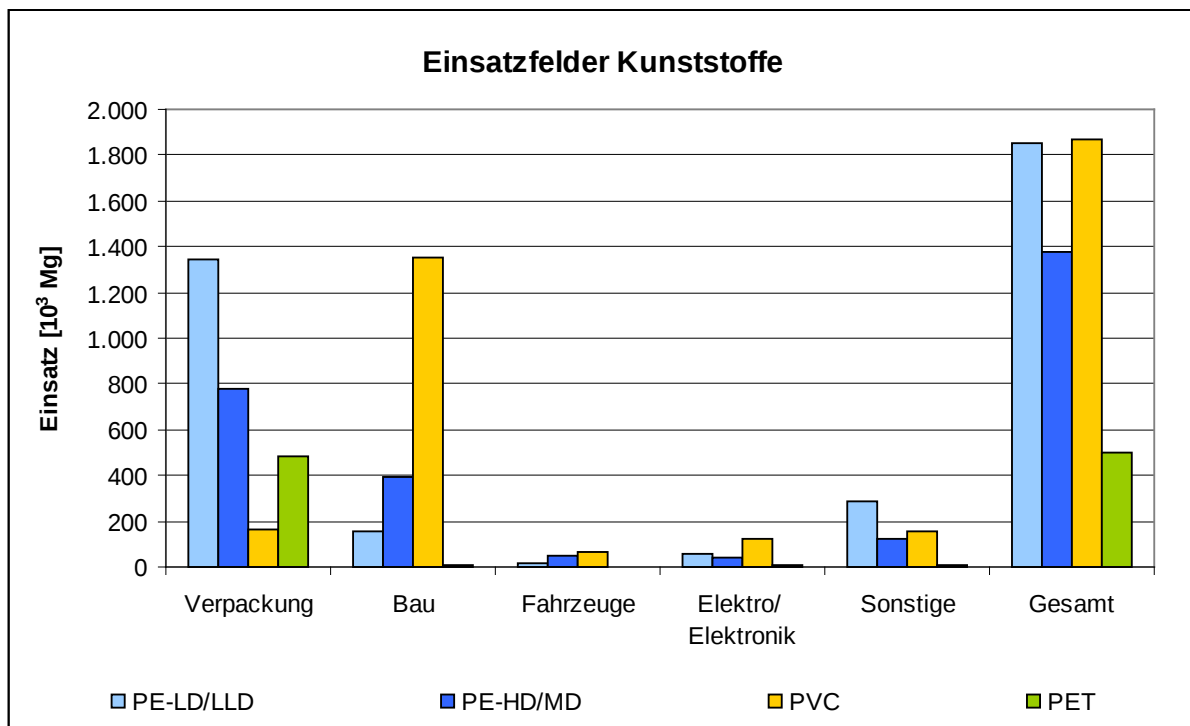


Abbildung 30: Anwendungsgebiete der Kunststoffe HD-/LDPE, PVC und PET [5]

a) HDPE

Die PE-Kunststoffe hoher Dichte („high density“) werden mit 56 % größtenteils als Verpackungskunststoff verwendet und 28 % kommen im Baubereich zum Einsatz. Gegenüber dem flexiblen LDPE ist es steifer und abriebfester und wird deshalb eher zu Hohlkörpern verarbeitet. Im Gegensatz zu PET ist PE für Sauerstoff, Kohlendioxid und Aromastoffe durchlässig, damit ist es als Verpackung für Lebensmittel wie kohlensäurehaltige Getränke, Tee und Öl ungeeignet.

Anwendungen von HDPE-Kunststoffen sind:



Abbildung 31: PE-Verpackungskunststoffe

- Getränkekästen, Fässer, Schüsseln
- Plastiktüten, Folien
- Lebensmittelbehälter, seit kurzer Zeit auch für Getränke
- Spielwaren
- Dünnfolienbeutel für SB-Frischwaren
- Flaschen für Haushaltsreiniger und Shampoo
- Technischer Spritzguss
- Technische Folien und Rohre

Abbildung 31 zeigt eine sortierte PE-Verpackungsfraction (überwiegend HDPE), die sich charakteristisch aus Haushaltsreiniger-, Shampoo-, Waschmittel- und Getränkeverpackungen zusammensetzt.

b) LDPE

Der am häufigsten verwendete Verpackungskunststoff ist Polyethylen geringer Dichte („low density“). Im Verpackungsbereich kommen 73 % dieses Kunststoffes zum Einsatz. Weitere relevante Einsatzbereiche sind Garten und Landwirtschaft, die der Kategorie „Sonstiges“ zugeordnet sind, sowie der Baubereich.

Durch Eigenschaften wie Chemikalien- und Stromresistenz, Schlagfestigkeit und die geringe Feuchtigkeitsaufnahme sowie die gezielte Beeinflussung dieser durch Copolymerisation, bietet sich ein breites Anwendungsspektrum. Bei den PE-Kunststoffen geringer Dichte handelt es sich überwiegend um Folien, wie Frischhaltefolien, Müllsäcke und flexible Behälter. In Form von Hohlkörpern werden diese nur vereinzelt eingesetzt.

Anwendungen von LDPE-Kunststoffen sind:

- | | |
|---------------------------------|----------------------|
| • Lebensmittelverpackungsfolien | • Kabelummantelungen |
| • Müllsäcke | • Schlauchleitungen |
| • Schrumpffolien | • Hohlkörper |
| • Landwirtschaftsfolien | • Baufolien |

c) PET

Im Vergleich zu den vergangenen Jahren hat sich der Einsatz von PET im Verpackungsbereich vervielfacht und ist auch weiterhin mit hohen Wachstumsraten behaftet. Mit 96 % liegt der vornehmliche Einsatz im Verpackungsbereich. Als Verpackung wird PET überwiegend für die Herstellung von Kunststoffflaschen verwendet. Aufgrund der guten Gasbarriereigenschaften wird es bevorzugt für kohlenensäurehaltige Getränke eingesetzt.

Molekular besitzt PET einen linearen Aufbau ohne Verzweigungen, womit die Voraussetzung für die Ausbildung kristalliner Bereiche und somit die Herstellung von Fasern gegeben ist. Als Textilfaser ist PET prädestiniert für Sportbekleidung, da es wenig Wasser aufnimmt, reiß- und scheuerfest ist. PET-Fasern werden z. B. zu Kleidungsstücken, Teppichen, Fliesteilen und Faserfüllstoffen verarbeitet. Als transparenter Verpackungskunststoff wird PET für Getränkeflaschen und durchsichtige Lebensmittelverpackungen (Salatschalen) eingesetzt.

Eigenschaften wie hohe Festigkeit, geringe Feuchtigkeitsaufnahme, Transparenz und geringe Ausdehnung unter Wärmeeinfluss, ermöglichen die folgenden Anwendungen für PET-Kunststoffe:



Abbildung 32: PET-Verpackungskunststoffe

- Verpackungen für Lebensmittel (aromadicht), Kosmetika, Arzneimittel und Infusionen
- Apparatebau (Schaltschränktüren, Transportschienen, Kühlgerätebau, Küchengeräte)
- Lebensmittelindustrie (Transportbehälter, Tiefkühlbereich, Verpackungen)
- Möbelbau (Schrankscheiben, Bilderglas)
- Elektroindustrie (Lampenschirme, Lampenröhren, Armaturen)
- Textilfasern (Fleece-Stoffe, Sportkleidung, Teppiche, Kopfkissenfüllungen, Sicherheitsgurte, Airbags)

d) PVC

Polyvinylchlorid wird mit 73 % dominierend im Baubereich verwendet, beispielsweise für Fensterrahmen, Rohre und Dachbahnen. Ein großer Teil wird auch als PVC-Schaum für die Sandwichbauweise in Rotorblättern und Sportbootrümpfen verwendet.

PVC ist hart und spröde, durch Zugabe von Weichmachern kann die Elastizität breit variiert werden. In harter Form wird es zu Koffern, Schallplatten, Medizinverpackungen, Tapeten, Fenster- und Türrahmen, Rohren und Dachrinnen verarbeitet. Aus Weich-PVC werden Fußbodenbeläge, Zelte, Kabelummantelungen, Vorhänge, Bekleidung, Verpackungen und Gartenschläuche hergestellt. In aufgeschäumter Form wird es als Wärmedämmstoff eingesetzt.

Das Enthalten von gesundheitsschädlichen Weichmachern (Anteil bis zu 30 %) hat dazu geführt, dass PVC beim Einsatz als Verpackung weitgehend von den Polyolefinen (PE, PP) und PET verdrängt worden ist.

Die Anwendung von PVC ist je nach Rezepturänderung sehr vielfältig:

- Babyartikel, Kinderspielzeug
- Schallplatten
- PVC-Hartschaum in der Faserverbundtechnologie: Rumpf von Sportbooten, Rotorblätter
- Kleidung, Kunstleder
- Kabelummantelungen
- Kreditkarten
- Elektronikverpackungen
- Wasserbetten
- Bausektor: Dachbahnen, Fensterprofile, Fußbodenbeläge, Abflussrohre, Tapeten, Dichtungen
- PVC-Folien als rutschfeste Unterlagen

Materialströme thermoplastischer Kunststoffe am Beispiel von HD-/LDPE, PET und PVC

Der Verband der Kunststoffherzeuger in Deutschland „PlasticsEurope Deutschland e.V.“ veröffentlicht jährlich die Zahlen und Fakten zur Kunststoffherzeugung in Deutschland. In diesen Angaben sind die Produktions- und Verarbeitungsmengen der einzelnen Kunststoffarten enthalten. Die durch PlasticsEurope und die Plattform für Kunststoffe und Verwertung (BKV) in Auftrag gegebene Studie „Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland“, welche von der Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH erstellt wird, stellt eine ganzheitliche Bilanz der in Deutschland produzierten, verarbeiteten und als Abfall anfallenden Kunststoffe dar. Diese Studie wurde seit dem Jahr 1999 fortgeschrieben und wird alle zwei Jahre veröffentlicht. Diese Studie wird hier als Grundlage für die nachfolgenden Materialstrombetrachtungen der Kunststoffe verwendet. Entsprechend dem Bilanzjahr wurde die Veröffentlichung der Studie für das Jahr 2007 genutzt [5].

Bei den in den Materialströmen betrachteten Kunststoffen handelt es sich um komplette Formmassen [5], so dass jeweils auch den Kunststoffen beigefügte Additive und Weichmacher bei Produktionsmengen wie Abfallmengen berücksichtigt sind. Nicht-Werkstoff-Anwendungen, wie Polymere, die zur Herstellung von Klebstoffen, Lacken, Harzen und Fasern verwendet werden, sind nicht mit bilanziert.

Wie bereits beschrieben, werden nachfolgend die Materialströme der Kunststoffe HD-/LDPE, PET und PVC betrachtet. Als erste Stufe der Kunststoffmaterialströme sind die Produktionsmengen der Kunststoffe dargestellt. Diese Mengen basieren überwiegend auf der Consultic-Studie [5], nur beim PET wurden keine Produktionsmengen ausgewiesen. Hier wurde ein entsprechender Wert von PlasticsEurope [75] verwendet.

Die verarbeiteten Kunststoffmengen wurden für alle hier betrachteten Kunststoffarten der Consultic-Studie [5] entnommen. Der Materialeinsatz lässt sich dabei für die Branchen Verpackung, Bau, Fahrzeuge, Elektro/Elektronik und Sonstiges getrennt darstellen.

Der Mengenunterschied zwischen den produzierten und den verarbeiteten Kunststoffmengen wird durch importierte und exportierte Kunststoffe sowie Lagermengen hervorgerufen. Import, Export und die Lagerhaltung spielen an jeder Stelle des Materialstromes eine Rolle. Auf die Erhöhung oder Senkung von Lagermengen kann durch die Differenz von der zur Verfügung stehenden Kunststoffmenge, Import- und Exportmengen geschlussfolgert werden. Die Ein- und Ausfuhr von Waren, welche sich entsprechend der Zuordnung zum Zollcode getrennt aufführen lassen, werden durch das Statistische Bundesamt im Warenverzeichnis erfasst. Die Erhebung getrennt nach Kunststoffarten erfolgt im Kapitel 39 „Kunststoffe und Waren daraus“ des Warenverzeichnisses. Unterschieden wird in Primärformen; Abfälle, Schnitzel und Bruch von Kunststoffen sowie Halb- und Fertigerzeugnisse. Polymergemische werden der Kunststoffart zugeordnet, die gewichtsmäßig gegenüber jedem anderen einzelnen Copolymer überwiegt [76].

Zu den Primärformen gehören Kunststoffe in flüssiger Form sowie in fester Form wie Blöcke, Pulver, Flocken und Granulate. Auch zu Regranulat aufbereitete Kunststoffabfälle sind unter dem Zollcode für Primärformen und nicht unter der Kategorie „Abfall“ aufgeführt [76]. Eine getrennte Ausweisung von Primärkunststoff und Regranulat ist nach Angaben von Destatis nicht möglich [77]. Deshalb ist bei den Kunststoffmaterialströmen zu berücksichtigen, dass in den Im- und Exportmengen der Primärkunststoffe auch aufbereitetes Recyclingmaterial enthalten ist.

Sind die Kunststoffe zu Produkten verarbeitet, werden diese Produkte von der Zollstatistik getrennt erfasst. Unterschieden wird dabei nur nach der Produktart. Die dafür verarbeiteten Materialien lassen sich nicht mehr getrennt nachweisen. Damit lassen sich importierte und exportierte Kunststoffarten im Produktstatus nicht verfolgen.

Die Import- und Exportzahlen für Kunststoffabfälle sind der Statistik des Umweltbundesamtes für den Im- und Export von nicht notifizierungspflichtigen Abfällen [2] entnommen. Die Daten basieren auf der Außenhandelsstatistik des Statistischen Bundesamtes.

Ethylenpolymere lassen sich durch diese Statistiken nicht getrennt nach HD- und LDPE ausweisen. Als Ansatz für die Differenzierung von Im- und Exportmengen dieser Kunststoffabfälle wurde das Verhältnis der jeweils anfallenden Abfallmengen verwendet. Für PET-Abfälle liegt bislang kein getrennter Zollcode vor, wodurch sich diese auch nicht getrennt ausweisen lassen. Nach Auskunft der Außenhandelsabteilung des Statistischen Bundesamtes [77] sind die PET-Abfälle dem Zollcode 3915 90 80 für Abfälle aus Kunststoff a. n. g. zuzuordnen. Hier liegen für das Bilanzjahr keine Angaben der ein- bzw. ausgeführten Abfallmenge vor. Als Ansatz für Import und Export von PET-Abfall werden europaweite Betrachtungen herangezogen. Laut bvse [78] werden von einer Gesamtabfallmenge von 1.300.000 Mg/a in Europa zwischen 210.000 Mg und 390.000 Mg PET-Abfälle exportiert. Das entspricht einer mittleren Exportmenge von 23 % der anfallenden PET-Abfälle. Auf Deutschland übertragen handelt es sich hierbei eher um einen extensiven Ansatz, da laut bvse die deutschen PET-Abfälle nicht nur von Asien, sondern auch vom europäischen Ausland stark nachgefragt werden. Petcore [79] weist für 2009 Importmengen der europäischen Länder von 67.000 Mg PET-Flaschen aus. Dies entspricht etwa 5 % der Sammelmenge. Über die Prozentwerte für im- und exportierte europäische PET-Abfälle und die PET-Abfallmenge in Deutschland 2007 lassen sich Im- und Exportmengen lediglich mit hohem Unsicherheitsfaktor abschätzen.

Als Richtwerte der Materialstrombetrachtung sind die im anthropogenen Lager befindlichen Kunststoffmengen zu verstehen. Diese Angaben beruhen auf Schätzungen. Die Lagermengen der im Einsatz befindlichen PVC-Kunststoffe basieren auf Annahmen der Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt e.V. (AgPU) [80]. Danach ist davon auszugehen, dass auf Grundlage der langen Lebensdauer von PVC-Produkten bislang weniger als 1 % jährlich als Abfall anfällt. Mit diesem Ansatz kann über die Abfallmenge die im anthropogenen Lager befindliche Menge hergeleitet werden. Neben diesem Ansatz wurde auch die Kunststoffmenge im urbanen Lager der Wohngebäude abgeschätzt. Über die Anzahl der Wohngebäude [81], den Anteil und das Gewicht von Kunststoffen in Mehrfamilienhäusern [82] sowie spezifische Kunststoffanteile [83] konnten die Lagermengen von PVC-, HD- und LDPE-Kunststoffen in Wohngebäuden berechnet werden. Für PET, welches hauptsächlich als Verpackungskunststoff eingesetzt wird, lassen sich keine Lagermengen ausweisen, da Lagerbestände in Industrie und Haushalten für diesen Verpackungskunststoff nicht bekannt sind. Zudem sind die Nutzungszeiträume für PET kurz, so dass eher von Umlaufmengen gesprochen werden kann.

Die Abfallmengen sind für das Jahr 2007 dargestellt. Bei den Verpackungskunststoffen kann davon ausgegangen werden, dass diese im Jahr der Produktverarbeitung überwiegend als Abfall wieder anfallen. Aus den anderen Branchen wird der Kunststoffabfall eher von Produkten mit längerer Lebensdauer anfallen. Die Daten, wie sie in der Consultic-Studie [5] ausgewiesen wurden, stehen für die in Deutschland angefallenen Kunststoffabfälle, welche aber nicht weiter in Deutschland behandelt werden müssen. Deshalb erfolgt an dieser Stelle eine Bereinigung durch die Im- und Exportzahlen der Kunststoffabfälle. Die Unterscheidung nach Post-Consumer Abfällen und Abfällen aus Produktion und Verarbeitung erfolgt entsprechend der Aufteilung in der Consultic-Studie [5]. Eine weitere Differenzierung der Post-Consumer Abfälle nach Branchen erfolgt in dieser Quelle nicht. Um diese Werte zu ermitteln erfolgte eine Hochrechnung über den prozentualen Anteil der verarbeiteten Kunststoffmengen und die Gesamtkunststoffabfallmenge. Da Kunststoffprodukte in den seltensten Fällen (außer im Verpackungsbereich) im gleichen Jahr als Abfall anfallen, wurden Publikationen zu den eingesetzten Kunststoffmengen in den betrachteten Branchen aus unterschiedlichen Jahren herangezogen. In der nachfolgenden Tabelle 33 sind den Branchen die verwendete Quelle und das Bilanzjahr zugeordnet. Multipliziert mit dem Anteil der einzelnen Kunststoffarten im Materialeinsatz 2007 lässt sich eine Abfallmenge der Kunststoffart nach Branche ermitteln. Weicht die Summe dieser Mengen für alle Branchen von der Gesamtabfallmenge der Kunststoffart ab, so wurde die Differenz entsprechend prozentual den Branchenmengen zugerechnet oder abgezogen. Mittels dieses Ansatzes wird versucht, die Nutzungsdauer von Kunststoffen, bis diese als Abfall anfallen, einzubeziehen. Das Datenmodell ist mit zukünftig zu erhebenden Daten weiter zu verfeinern.

Tabelle 33: Bilanzjahr und Quellen für die Ermittlung der Kunststoffabfälle nach Branchen

Branche	Bilanzjahr	Quelle
Bau	1995	[83]
Verpackung	2007	[5]
Fahrzeuge	1999	[84]
Elektro/Elektronik	2003	[85]
Landwirtschaft	1999	[84]
Sonstige	2003	[85]

Das verwendete Bilanzjahr ist vor allem von der Verfügbarkeit der Quellen abhängig. Im Baubereich, wo Kunststoffabfälle überwiegend erst nach mehr als 30 Jahren anfallen [86], war eine plausible Datengrundlage aus den Jahren 1977 und älter nicht verfügbar. Es wurden die Anteile der einzelnen Kunststoffarten im Jahr 1995 in Gebäuden verwendet [83]. Um eine einheitliche Datengrundlage zu nutzen, wurden für die anderen Branchen bevorzugt die Erhebungen der Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH verwendet, welche ab dem Jahr 1999 vorliegen. Die Branche Landwirtschaft ist bei den Kunststoffstoffströmen unter Sonstiges eingeordnet.

Diese Abschätzung der Post-Consumer-Abfälle nach Branchen ist für die Bestimmung der Verwertungsart der Kunststoffabfälle relevant, da eine getrennte Ausweisung nach Kunststoffarten für die werkstofflich, rohstofflich und energetisch verwerteten Abfälle nicht vorliegt. In der Consultic-Studie [5] sind einzig die Verwertungswege der Gesamtkunststoffabfälle differenziert nach Branchen getrennt aufgeführt. Die Verwertungswege unterscheiden sich stark in Abhängigkeit der Branche, wodurch der Bedarf einer differenzierten Betrachtung entsteht. Da durch diese Herangehensweise zwar die Verwertungswege nach Branchen vorliegen, aber sich diese Wege mitunter auch nach Kunststoffart unterscheiden, ist mit Abweichungen vom wirklichen Wert zu rechnen. Für PVC wurde eine separate Studie durch die Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH im Auftrag der AgPU mit dem Bilanzjahr 2007 erstellt [80]. Zur Verifizierung der Daten nach dem beschriebenen Vorgehen wurden die Verwertungsanteile der PVC-Abfälle den Ergebnissen der PVC-Studie [80] gegenübergestellt. Der stofflich verwertete Anteil liegt bei identischer Post-Consumer-Abfallmenge unter Verwendung der hier beschriebenen Vorgehensweise bei 21 %, nach PVC-Studie bei 19 % [80].

Eine weitere Verifizierung von Daten aus dem Materialstrom PVC ist durch den Vergleich der ermittelten werkstofflich verwerteten Post-Consumer Abfallmenge aus dem Baubereich mit den Angaben des Vinyl 2010 Fortschrittsberichts 2008 für das Jahr 2007 [87] möglich. An dieser Erhebung sind überwiegend Unternehmen aus dem Baubereich beteiligt. Dieser Quelle zufolge wurden in Deutschland 35.925 Mg PVC-Abfälle aus der Baubranche werkstofflich verwertet, in der vorliegenden Studie wurden 30.630 Mg ermittelt. Die Abweichungen können u. a. durch eine unterschiedliche Zuordnung bei den Branchen entstehen.

Die Verwertung von Abfällen aus Produktion und Verarbeitung ist in der PVC-Studie der AgPU [80] für PVC im Jahr 2007 ausgewiesen. Erwartungsgemäß erfolgt mit 90 % eine überwiegend stoffliche Verwertung dieser sehr sauberen Abfälle. Da für die anderen Kunststoffarten keine Daten zur Verwertung der Abfälle aus Produktion und Verarbeitung vorliegen, wird dieser Ansatz übertragen.

In Abbildung 33, Abbildung 34, Abbildung 35 und Abbildung 36 sind die Stoffströme der betrachteten Kunststoffarten, HDPE, LDPE, PET und PVC dargestellt.

Bei der Betrachtung der Stoffströme ist zu berücksichtigen, dass ein Teil des Recyclingmaterials exportiert wird und nur ein Anteil in Deutschland für die weitere stoffliche Nutzung zur Verfügung steht. Da für diese Exportmenge keine separate Statistik vorliegt, lässt sich diese Menge nicht getrennt ausweisen.



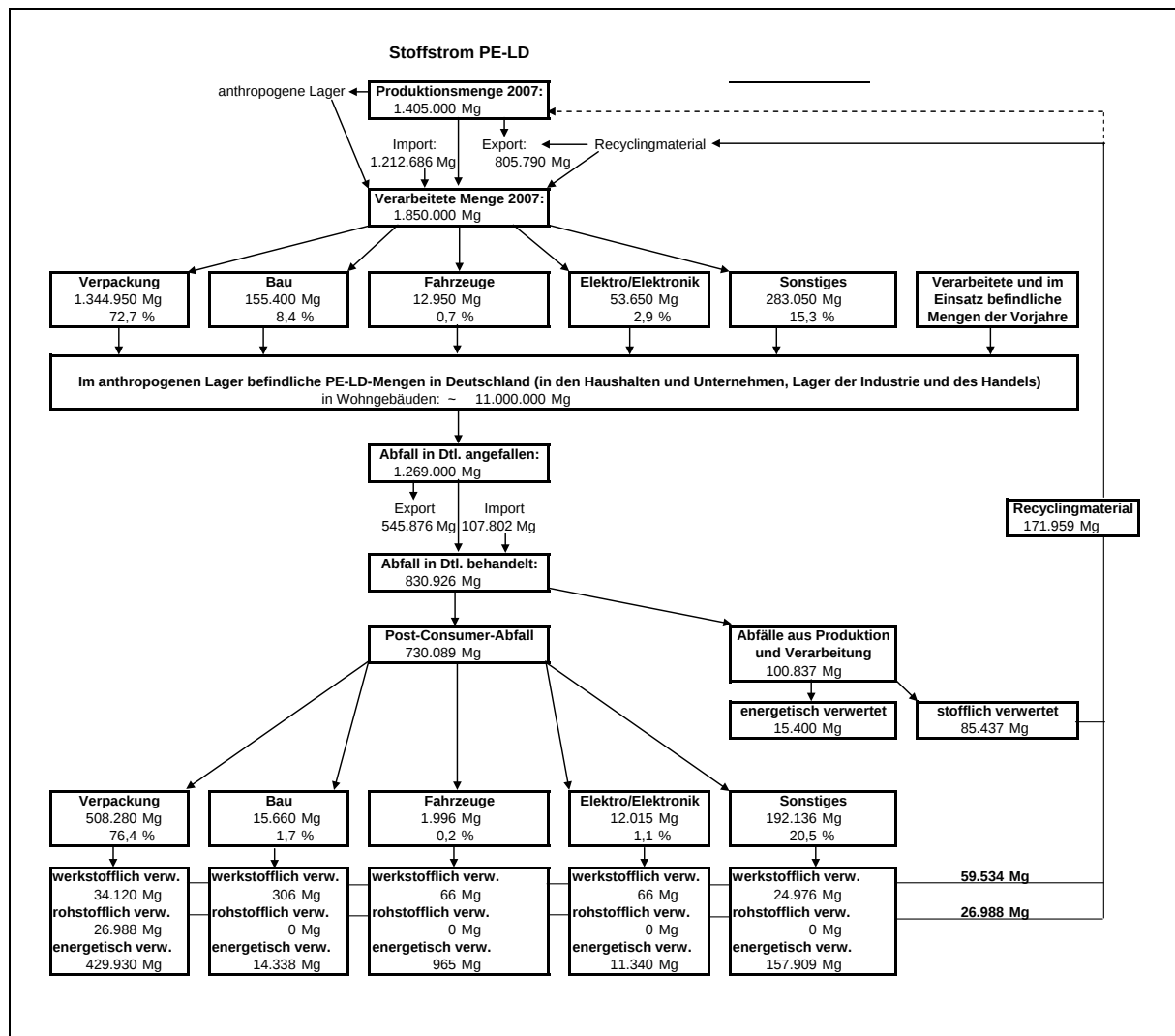


Abbildung 34: Materialstrom LDPE für das Jahr 2007

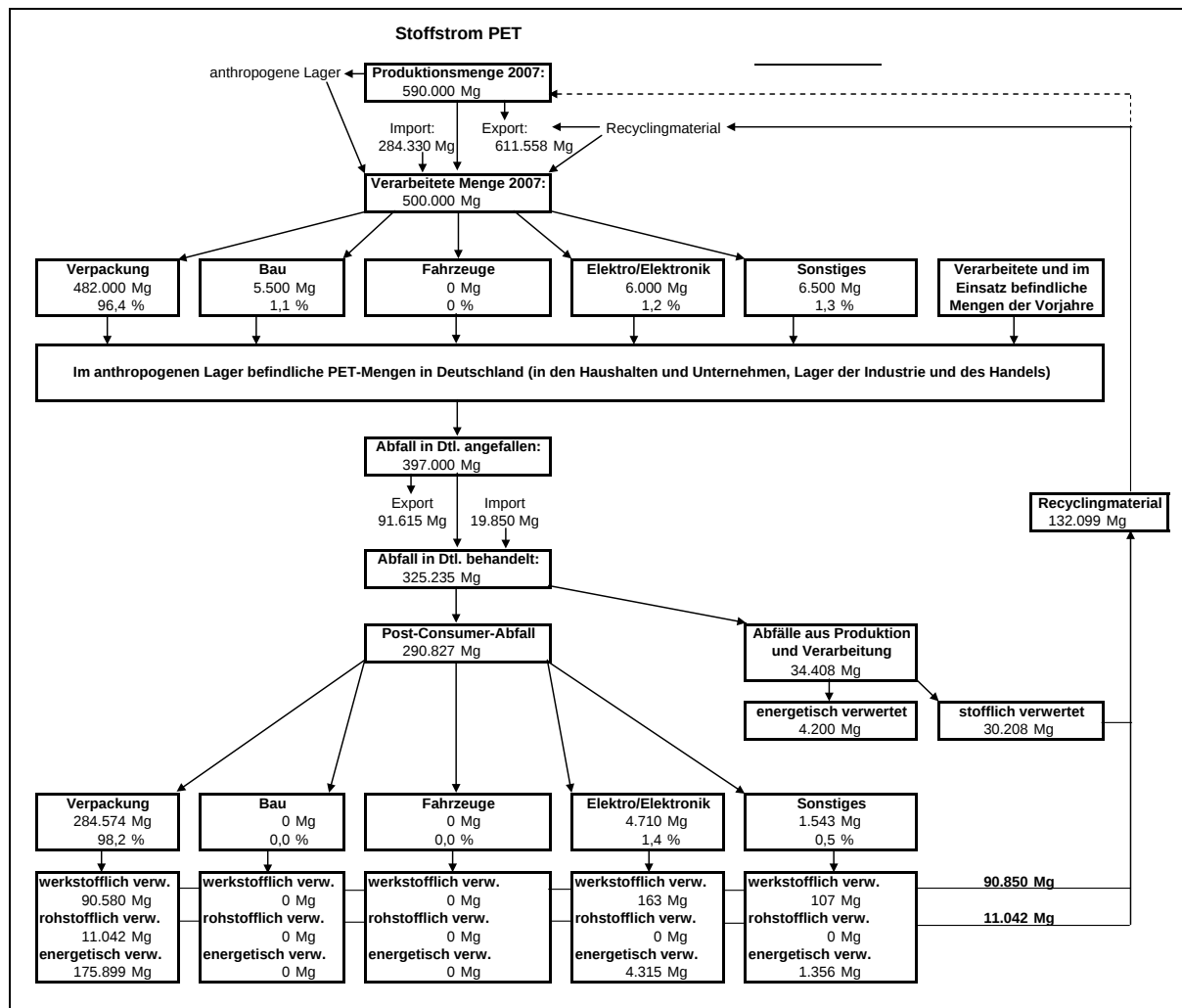


Abbildung 35: Materialstrom PET für das Jahr 2007

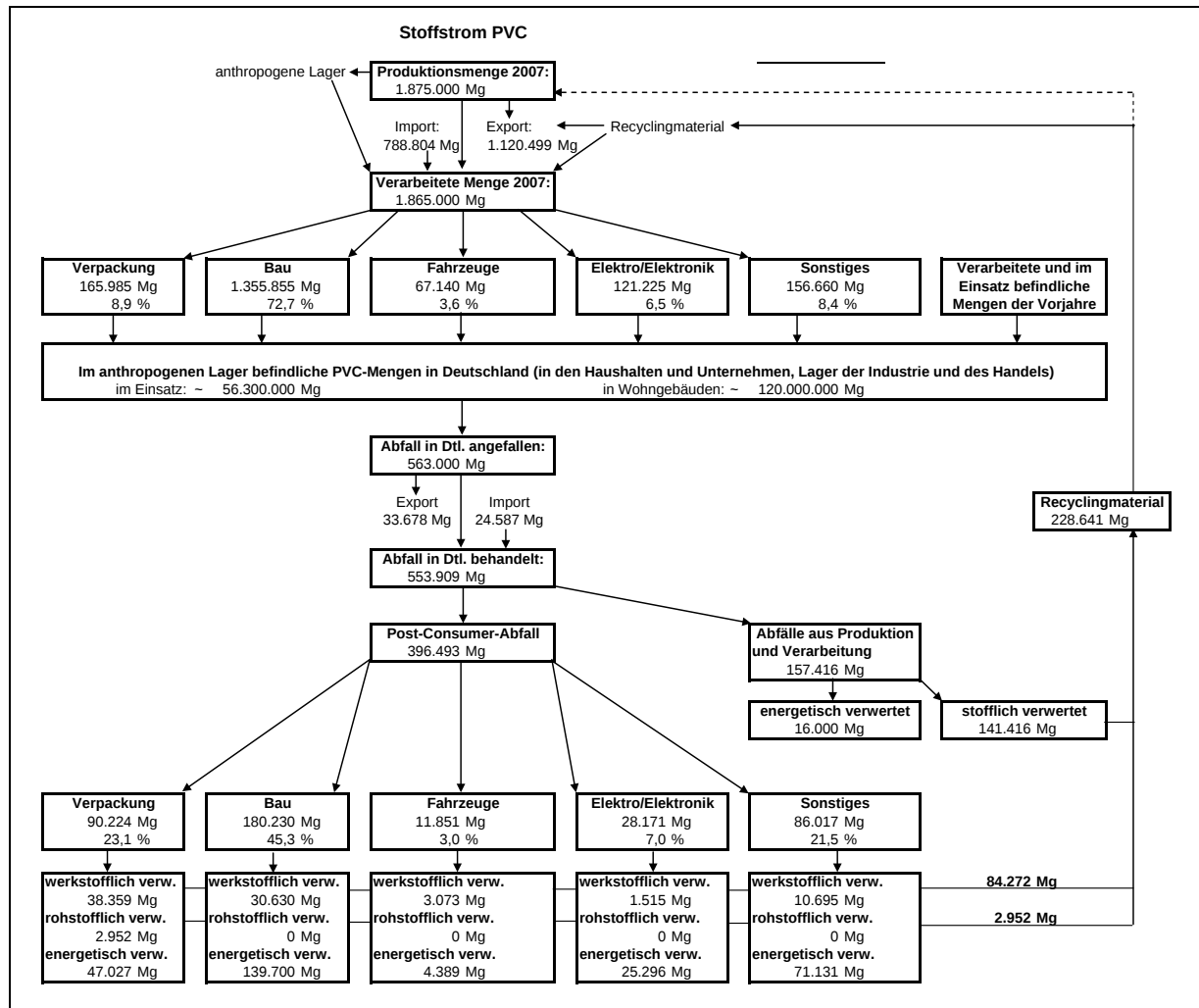


Abbildung 36: Materialstrom PVC für das Jahr 2007

Weitere Differenzierung der Kunststoffverwertungsverfahren

Da zur Kunststoffverwertung unterschiedliche werkstoffliche, rohstoffliche und energetische Verwertungsverfahren genutzt werden, erfolgt hier eine weitere Differenzierung der Materialstromdaten. Das werkstoffliche Recycling erfolgt je nach Qualität der Kunststoffabfälle, so dass sich mehr oder weniger hochwertige Produkte gewinnen lassen. Durch hochwertiges Recycling sortenreiner Kunststoffe lassen sich Kunststoffprodukte gewinnen, welche zum Zweck der Substitution von Primärkunststoffen eingesetzt werden. Die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffmischungen erfolgt dagegen durch thermoplastische Verformung und die Herstellung von Produkten, die insbesondere als Holz- oder Betonersatz dienen. Nach Angaben der IEA [43] kann davon ausgegangen werden, dass ein Drittel der Recyclingprodukte Kunststoffe substituiert, während zwei Drittel Nicht-Kunststoffe ersetzen. Bei den stofflich verwerteten Produktionsabfällen wird von einem hochwertigen werkstofflichen Recycling zur Substitution von Primärkunststoffen ausgegangen.

Des Weiteren erfolgt die Aufteilung der energetisch verwerteten Kunststoffabfälle hinsichtlich der Verwertung in MVA, EBS- und Zementkraftwerken entsprechend Ansätzen nach Krähling [57] (Abbildung 37).

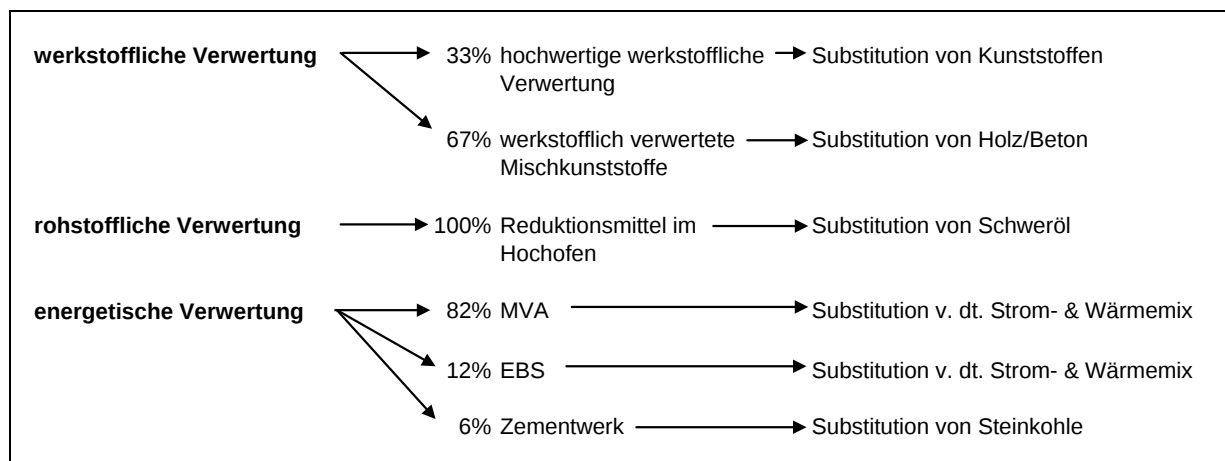


Abbildung 37: Aufteilung der werkstofflich, rohstofflich und energetisch verwerteten Kunststoffabfälle

In Tabelle 34 sind die im Jahr 2007 verwerteten Kunststoffabfallmengen differenziert nach den speziellen Verwertungsverfahren (Abschätzung) zusammengefasst und in Abbildung 38 sind die den einzelnen Verwertungsverfahren zukommenden Kunststoffabfallmengen grafisch dargestellt.

Tabelle 34: Verwertete Kunststoffabfälle (Post-Consumer- und Produktionsabfälle)

Verwertung:	HDPE [Mg]	LDPE [Mg]	PET [Mg]	PVC [Mg]
werkstofflich, hochwertige Verwertung	63.748	105.282	60.491	169.507
werkstofflich, Verwertung Mischkunststoff	19.868	39.689	60.567	56.182
rohstofflich	13.546	26.988	11.042	2.952
energetisch in der MVA	232.234	516.504	152.331	285.330
energetisch im EBS-Kraftwerk	33.986	75.586	22.292	***
energetisch im Zementwerk	16.993	37.793	11.146	18.213

*** da die Verbrennung im EBS-Kraftwerk nicht gewünscht ist und nach Möglichkeit vermieden wird, wurde die Menge der MVA zugeschlagen

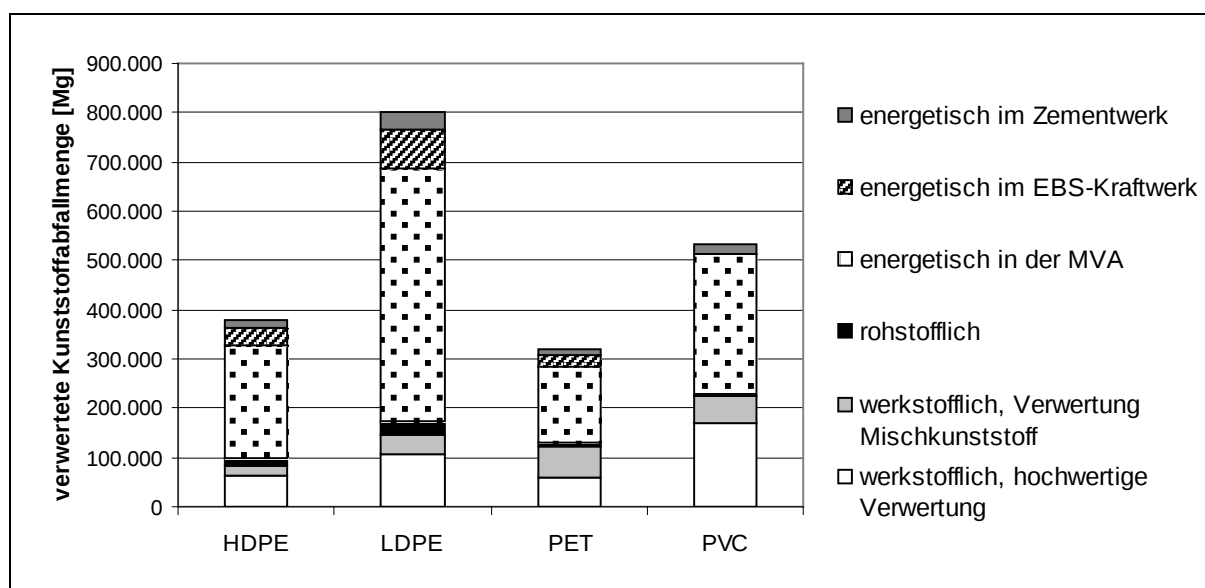


Abbildung 38: Verwertete Kunststoffabfälle (Post-Consumer- und Produktionsabfälle)

6 Effekte der Abfallverwertung

Nachfolgend werden die Effekte der Abfallverwertung bilanziert. Im einleitenden Abschnitt ist die Methodik zur Bestimmung der hier betrachteten Substitutionswirkungen erläutert. Es werden rohstoffliche und energetische sowie wirtschaftliche Effekte bilanziert.

6.1 Methodik zur Bestimmung der Effekte des Recyclings

6.1.1 Verwertungswege, substituierte Rohstoffe und Substitutionsfaktoren durch die Verwertung der betrachteten Metalle und Kunststoffe

Nachfolgend wird das methodische Vorgehen zur Ermittlung der Substitutionswirkungen durch den Ersatz von Primärrohstoffen mittels Sekundärrohstoffen beschrieben. Untersucht werden diese Faktoren für die bereits in den detaillierten Materialstrombetrachtungen dargestellten Metalle (Eisen und Stahl, Kupfer, Gold) und Kunststoffe (HD-/LDPE, PET und PVC).

Die Substitutionswirkungen unterscheiden sich abhängig vom Verwertungsweg der hier betrachteten Abfälle. Bei den Metallen ist nur die werkstoffliche Verwertung von Bedeutung. Es kann davon ausgegangen werden, dass durch die werkstoffliche Verwertung entsprechende Primärrohstoffe substituiert werden. Kunststoffabfälle werden dagegen unterschiedlichsten Verwertungswegen zugeführt, welche hier getrennt zu betrachten sind, da dadurch unterschiedlichste Primärrohstoffe bzw. Primärenergieträger substituiert werden. Einen Überblick über die hier betrachteten Verwertungswege der Kunststoffabfälle und die dadurch substituierten Primärrohstoffe bzw. Primärenergieträger gibt Abbildung 39. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass durch die hochwertige werkstoffliche Verwertung Primärkunststoffe substituiert werden. Für die weiteren Verwertungswege wird von der Substitution unterschiedlicher Nicht-Kunststoffmaterialien ausgegangen.

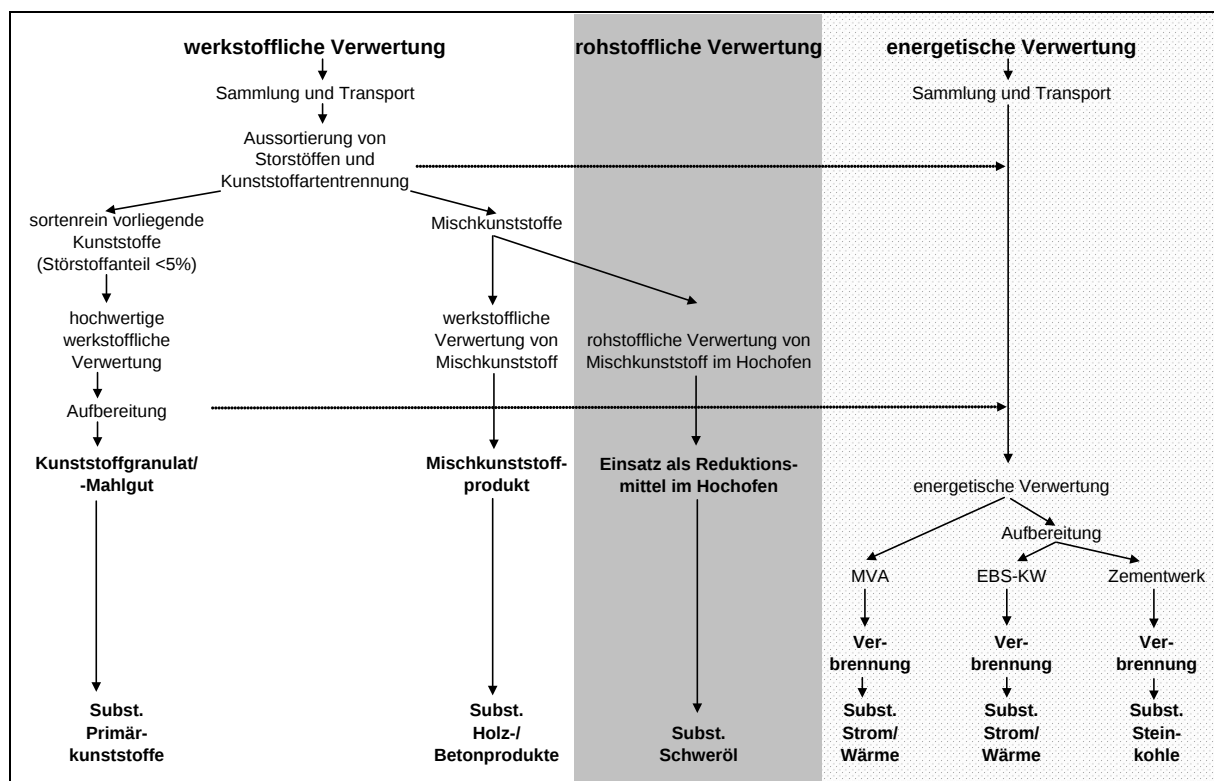


Abbildung 39: Verwertungswege der Kunststoffabfälle

Da durch die verwerteten Abfälle zumeist nicht im Verhältnis 1:1 Primärrohstoffe eingespart werden (z. B. durch Aufbereitungsverluste), sind für die weitere Betrachtung Substitutionsfaktoren zu berücksichtigen, welche die pro Mg Abfall substituierte Menge an Primärrohstoffen bzw. -energieträgern darstellen. Die Substitutionsfaktoren der werkstofflichen Verwertung

der Metalle und Kunststoffe beruhen auf Literaturangaben oder der Auswertung von Statistiken zur eingesetzten Abfallmenge und zur erzeugten Sekundärrohstoffmenge.

Für die Substitutionsfaktoren der werkstofflich verwerteten Mischkunststoffe wurden ebenfalls Literaturwerte herangezogen. Es ist besonders zu berücksichtigen, dass hier andere Materialarten substituiert werden, von denen massebezogen andere Einsatzmengen benötigt werden, um gleichwertige Produkte herzustellen. Weitere abweichende Materialeigenschaften, wie bspw. die Lebensdauer, wurden nicht berücksichtigt.

Bei der rohstofflichen Verwertung der Kunststoffe im Hochofen und der energetischen Verwertung im Zementwerk wird von der Substitution von Primärenergieträgern (hier Schweröl bzw. Steinkohle) ausgegangen. Die relevante Einflussgröße ist in diesem Fall die durch die Kunststoffabfälle bzw. substituierten Primärenergieträger bereitgestellte Energiemenge, deren Verhältnis den Substitutionsfaktor ergibt.

Bei der Mischkunststoffverwertung in MVA und EBS-Kraftwerken wird davon ausgegangen, dass eine Substitutionswirkung in Bezug auf den deutschen Strom- und Wärmemix erfolgt. Die substituierte Energiemenge wurde über die durch die Kunststoffverbrennung bereitgestellte Energie (Heizwert der Kunststoffe) sowie die elektrischen und thermischen Wirkungsgrade von MVA/EBS-Kraftwerken [96] ermittelt.

6.1.2 Methodik zur Bestimmung der rohstofflichen und energetischen Substitutionswirkungen

Für die Betrachtung der Substitutionswirkung werden folgende Kennzahlen berücksichtigt:

Kumulierter Energieaufwand (KEA): Maßzahl für den gesamten Aufwand an Energieressourcen (Primärenergien) zur Bereitstellung eines Produkts oder einer Dienstleistung. Primärenergieträger fließen in den KEA auch dann ein, wenn sie stofflich genutzt werden (bspw. Erdöl in der Kunststoffproduktion). Hiervon abzugrenzen ist der Kumulierte Energieverbrauch (KEV), der sich vom KEA darin unterscheidet, dass er den erforderlichen energetischen Aufwand zur Bereitstellung ohne die stofflich gebundenen Energieinhalte, d.h. ohne die Heizwerte von Produkten, bilanziert.

Kumulierter Stoffaufwand (KSA): Maßzahl für den gesamten Aufwand an stofflichen Ressourcen (Rohstoffe) zur Bereitstellung eines Produkts oder einer Dienstleistung (stoffbezogene komplementäre Größe zum kumulierten Energieaufwand (KEA)). Primärenergieträger werden darin allerdings nicht berücksichtigt.

Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA): Der Kumulierte Rohstoffaufwand (KRA) ist definiert als die Summe aller in ein System eingehenden Rohstoffe ausgedrückt in Gewichtseinheiten [59].

Im Unterschied zum KSA sind im KRA auch energetische Rohstoffe bilanziert, allerdings kein Wasser und keine Luft.

Da der KRA-Ansatz hinsichtlich der Bewertung des Rohstoffverbrauchs praktikablere Daten als der KSA liefert, wurden auf Basis der in GEMIS 4.6 angegebenen detaillierten Ressourceninanspruchnahme eigene KRA ermittelt und nachfolgend verwendet. Dabei wurden die einzelnen Ressourceninanspruchnahmen, mit Ausnahme von Wasser und Luft, aufaddiert. Um auch die in Anspruch genommenen Primärenergieträger zu bewerten, wurden die angegebenen Energiemengen mit Hilfe der in Tabelle 35 angegebenen Faktoren in Massewerte umgerechnet. Allokationseffekte durch Gutschriften und erneuerbare sowie andere Rohstoffe, wie Abfall, Sekundärrohstoffe oder Biomasse, wurden nicht mit bilanziert.

Tabelle 35: Faktoren zur Errechnung der Masse an genutzten Primärenergieträgern

Primärenergieträger	Umrechnungsfaktor
Atomkraft	388,89 kg Uran/TJ
Braunkohle	22,0 MJ/kg (Braunkohlenstaub)
Erdgas	38,0 MJ/kg
Erdöl	42,8 MJ/kg
Steinkohle	28,7 MJ/kg (Steinkohlekoks)

Neben den Daten zur detaillierten Ressourceninanspruchnahme für die KRA-Berechnung, wurde auch der KEA GEMIS 4.6 entnommen. Da für die Sekundärkunststoffe keine GEMIS - Datensätze vorliegen, wurden hier Angaben aus anderen Quellen zum KEA recherchiert. Über den KEA wurde in Verbindung mit entsprechenden rohstofflichen Daten für Strom und Diesel der KRA berechnet. Der in den KEA einfließende Aufwand für Sammlung und Transport wurde dabei getrennt betrachtet und mit dem KRA für Diesel (nach GEMIS berechnet [Mg/MJ]) bewertet. Der verbleibende KEA wurde dem elektrischen Energieverbrauch zugeschrieben und mit dem KRA für den deutschen Strommix (ebenfalls nach GEMIS berechnet [Mg/MJ]) bewertet. Der KRA der Sekundärkunststoffe wurde über die Addition der aus dem Diesel- und Strommixverbrauch resultierenden KRA ermittelt.

Die Substitutionswirkungen der betrachteten Metalle und Kunststoffe lassen sich bestimmen, indem die jeweiligen Energie- und Rohstoffaufwendungen für Primär- und Sekundärrohstoffe subtrahiert werden. Dabei sind die entsprechenden Substitutionsfaktoren zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 6.1.1). Die folgenden Formeln zeigen den mathematischen Zusammenhang der einzelnen betrachteten Faktoren zur Ermittlung der Rohstoff- bzw. Energieeinsparung bei der werkstofflichen Verwertung.

$$\text{Rohstoffeinsparung [Mg]} = (KRA_{Prim} * \text{Substitutionsfaktor} - KRA_{Sek}) * (\text{Sekundärrohstoffmenge} * \text{Rohstoffgehalt}^{[4]})$$

$$\text{Energieeinsparung [MJ]} = (KEA_{Prim} * \text{Substitutionsfaktor} - KEA_{Sek}) * (\text{Sekundärrohstoffmenge} * \text{Rohstoffgehalt})$$

(1.1)

Für die Berechnung der primärseitigen Rohstoff- und Energieeinsparungen durch die energetische Verwertung der Kunststoffe in MVA und EBS-Kraftwerken wurden die folgenden Formeln verwendet.

$$\text{Energienmenge [MJ]} = (\text{Heizwert}_{Kunststoff} * \text{Wirkungsgrad}_{el./th. Anlage} - \text{Aufbereitungsaufwand}_{Sek}^{[5]}) * \text{Kunststoffmenge}_{verwertet}$$

$$\text{Rohstoffeinsparung [Mg]} = \text{Energienmenge}_{el.} * KRA_{Strom} + \text{Energienmenge}_{th.} * KRA_{Wärme}$$

$$\text{Energieeinsparung [MJ]} = \text{Energienmenge}_{el.} * KEA_{Strom} + \text{Energienmenge}_{th.} * KEA_{Wärme}$$

(1.2)

Durch die Aufsummierung der Effekte der einzelnen Verwertungsverfahren für Kunststoffabfälle und die Effekte der werkstofflichen Metallverwertung lassen sich die durch den Abfalleinsatz eingesparten Primärrohstoff- und Primärenergieträgermengen darstellen, welche

⁴ Faktor für den Rohstoffgehalt des eingesetzten Abfallstoffs im Verhältnis zum erzeugten Produkt, z. B. durch unterschiedliche Metallgehalte oder, sofern bekannt, den unterschiedlichen Additivanteil der Kunststoffe.

⁵ Dieser enthält auch den Transportaufwand für Kunststoffabfälle.

teilweise bei der Verarbeitung in Deutschland und teilweise bei der Rohstoffgewinnung im Ausland eingespart werden. Auch die im Ausland eingesparten Primärrohstoff- und Primärenergieträgeraufwendungen lassen sich durch die Substitutionsfaktoren der vermiedenen Rohstoffexporte nach Deutschland ermitteln.

6.1.3 Methodik zur Bemessung der wirtschaftlichen Bedeutung des Recyclings

Die wirtschaftlichen Effekte durch die Verwertung der betrachteten Metalle und Kunststoffe wurden vereinfacht anhand von Marktpreisvergleichen bestimmt. Entsprechend wurden für die hochwertig verwerteten Metalle und Kunststoffe Marktpreise für Primär- und Sekundärrohstoffe recherchiert. Die Preisdifferenz, die im Wesentlichen durch Qualitätsunterschiede, Wiederaufarbeitungsaufwand, Transportkosten und Ähnliches charakterisiert wird, entspricht den Bruttokosten, die rohstoffverarbeitende Unternehmen durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen im Idealfall sparen könnten. Wie bei den rohstofflichen und energetischen Substitutionswirkungen wurden die Substitutionsfaktoren für die substituierte Primärrohstoffmenge berücksichtigt. Über die spezifische monetäre Einsparung, welche durch die Preisdifferenz zwischen Primär- und Sekundärrohstoff bestimmt wird, und die Sekundärrohstoffmenge, lässt sich die absolute monetäre Einsparung ermitteln (siehe folgende Formel 1.3).

Monetäre Einsparung [€] =

$$(Preis_{Prim} * Substitutionsfaktor - Preis_{Sek}) * Sekundärrohstoffmenge * Rohstoffgehalt$$

(1.3)

Für die Mischkunststoffverwertung erfolgt, wie in Abschnitt 6.1.2 erläutert, eine differenzierte Betrachtung einzelner Verwertungswege. Da für die Mischkunststoffverwertung i. d. R. Zuzahlungen notwendig sind, welche allerdings bereits über die Abfallgebühr beglichen sein sollten, werden hier nur die Marktwerte der substituierten Primärrohstoffe herangezogen. Volkswirtschaftlich betrachtet müssten die Zuzahlungen allerdings abgezogen werden, da diese Aufwendungen durch die Gebührenzahler getilgt werden.

Bei den Kunststoffen erfolgt die Ermittlung der insgesamt eingesparten monetären Aufwendungen durch die Aufsummierung der Effekte einzelner Verwertungsverfahren.

6.1.4 Methodik zur Bemessung der Effekte des Recyclings hinsichtlich der Ressourcenproduktivität

Die entsprechend dem Vorgehen nach Abschnitt 6.1.2 ermittelten rohstofflichen und energetischen Effekte des Recyclings sollen nachfolgend mit der Inanspruchnahme von Rohstoffen in Beziehung gesetzt werden, die über den DMI im Rohstoffproduktivitätsindikator der Nachhaltigkeitsstrategie erfasst werden.

Um den Beitrag des Sekundärrohstoffeinsatzes zum Indikator DMI zu ermitteln, wird ein Ergänzungsterm zur näherungsweisen Erfassung der direkten Effekte des Sekundärrohstoffeinsatzes auf Basis der eingesparten Primärrohstoffe sowie der eingesparten Primärenergieträger ohne Vorketten im Ausland (Direct Effect of Recovery: „DERec“) ermittelt. Dies ist eine virtuelle Kenngröße, die abbildet, in welchem Umfang Primärrohstoffe und -energieträger, aber auch Halb- und Fertigwaren, unter Annahme gleicher Produktionsmuster importiert oder inländisch gefördert werden müssten. Es werden hierbei alle Formen der Verwertung, d.h. sowohl (werk-) stoffliche als auch energetische Verwertungspfade berücksichtigt.

Als Vergleichsdaten für den Energieträgerverbrauch der jeweiligen Produktionszweige werden die Daten der Umweltökonomischen Gesamtrechnung (UGR) herangezogen [123].

Über die Substitutionsfaktoren (siehe Tabelle 35) und die Sekundärrohstoffmenge lässt sich die Rohstoffeinsparung durch die Sekundärrohstoffverwertung ermitteln. Die Rohstoffmenge, welche dafür theoretisch hätte importiert werden müssen, lässt sich ebenfalls über Substitutionsfaktoren (z. B. benötigte Eisenerzmenge pro Mg Eisen) ermitteln.

Die eingesparten Erz-/Erdölmengen und die eingesparte Menge der sonstigen Rohstoffe werden aus den entsprechenden GEMIS-Daten errechnet. Die eingesparte Energiemenge wird über den Energiemix aus der UGR berechnet.

Des Weiteren wird ein Primärenergieträgeräquivalenzfaktor benötigt, welcher über die Energiemenge zur Primärrohstoffherstellung (aus Tabelle 3.2.3.5 UGR) und über den Heizwert ermittelt wird.

Der DERec lässt sich unter Einbeziehung dieser Faktoren durch folgende Formel bestimmen:

$\text{DERec [Mg]} = \text{eingesparte Importe u. inländisch gewonnene Primärrohstoffe [Mg]} + \text{eingesparte inländische Energiemenge [PJ]} * \text{Primärenergieträgeräquivalent [Mg/PJ]}$

(1.4)

Der so ermittelte DERec stellt einen Näherungswert dar, da z. B. keine inländischen Hilfs- und Zuschlagsstoffe bilanziert wurden.

6.2 Rohstoffliche und energetische Substitutionswirkungen

6.2.1 Verwertung von Eisen und Stahl

Eisen und Stahl gelten als vollständig und wiederholt recyclebar. Tatsächlich kommt es während des Gebrauchs- und in der Nachgebrauchsphase zu dissipativen Verlusten. Hier sind insbesondere Verluste in der Gebrauchsphase durch Verschleiß und Korrosion zu nennen. Im Bereich der abfallwirtschaftlichen Erfassung ist mit weiteren Verlusten zu rechnen, indem Eisen und Stahl aufgrund ihrer Verwendung in Verbunden sowie aufgrund zu geringer Korngrößen nicht getrennt erfasst werden und mit anderen Stoffen deponiert werden. Dieser Materialstrom beläuft sich nach den in Abbildung 17 dargestellten Schätzungen auf 1,27 Mio. Mg pro Jahr, welche insbesondere als Restgehalt in deponierten oder im Deponiebau verwerteten Schlacken zu finden sind.

Als Hauptausgangsmaterial der Stahlherstellung dient Roheisen, welches aus nahezu ausschließlich importierten Eisenerzen im Hochofenprozess hergestellt wird. Im Hochofen wird das Eisenerz bei Temperaturen von bis zu 2.200°C durch Einblasen von 1.200°C heißer Luft reduziert. Als Reduktionsmittel dienen neben Koks und Kohle und anderen fossilen Energieträgern, auch aufbereitete Sekundärbrennstoffe, wie bspw. Kunststoffe. Als Schlackebildner werden Kalk, Dolomit u. a. Stoffe zugegeben. Neben Schlacke und Roheisen entsteht in diesem Prozess auch Gichtgas, welches sowohl innerbetrieblich als auch außerbetrieblich als Brennstoff der Energieerzeugung dient.

Die Rohstahlproduktion erfolgte im Jahr 2007 in Deutschland zu ca. 65 % als Oxygenstahl und zu ca. 35 % als Elektrostahl.

Elektrostahl wird im Elektrolichtbogenofen produziert. Als Ausgangsmaterial wird überwiegend Eisen- und Stahlschrott eingesetzt. Die erforderliche Schmelzwärme wird mittels elektrischer Energie in einem Lichtbogen erzeugt.

Der spezifische Schrotteinsatz (Menge erzeugten Elektrostahls dividiert durch die Menge eingesetzten Schrotts) in der Elektrostahlerzeugung lag im Jahr 2007 im Mittel bei 1,04. Die betriebspezifische Schwankungsbreite beträgt dabei nach Informationen angefragter Stahlwerksbetreiber 1,02 bis 1,07. Zusätzlich werden noch Eisenträger, insbesondere Roheisen und Eisenschwamm, mit einer Menge von ca. 10 % des Stahlschrotteinsatzes in den Prozess eingebracht⁶.

⁶ Öko-Institut e.V. [16]: Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) Version 4.6 (im Weiteren GEMIS 4.6): **9,3 %**; Buttermann, H.G., Hillebrand, B. (2005): Die Bedeutung von Stahl-Werkstoffen als „Rohstoff“ für die Wirtschaftsstruktur in Deutschland, EEFA-Energie- und Analysen-Analysen, 08/2005: **11,4 %**

Im Jahr 2007 wurden unter Einsatz von 15,620 Mio. Mg Schrott [106] zzgl. ca. 10 % weiterer Eisenträger bei der Elektrostahlerzeugung 15,015 Mio. Mg Elektrostahl produziert. Mit einer Tonne Stahlschrott und Eisenträgern wurden demzufolge bei der Elektrostahlerzeugung 0,87 Mg Elektrostahl erzeugt. Die erzeugte Schlacke belief sich auf 1,91 Mio. Mg [105], welche überwiegend der Verwertung im Straßen- und Deponiebau zugeführt wird.

Da die Erzeugung von Elektrostahl nahezu ausschließlich auf der Basis des Einsatzes von Eisen- und Stahlschrott erfolgt, ist der Substitutionseffekt über die Substitution des nahezu ausschließlich auf der Basis von Roheisen erfolgenden Oxygenstahlprozesses zu bewerten.

Beim **Oxygenstahlverfahren** wird überwiegend Roheisen verarbeitet. Durch Sauerstoffzugabe werden die im Roheisen enthaltenen Verunreinigungen oxidiert. Der exotherme Prozess liefert die zur Flüssighaltung des Stahls erforderliche Wärme. Die Verunreinigungen werden als Schlacke abgezogen. Um den Prozess zu kühlen werden bis zu 25 % Schrott zugesetzt.

Im Jahr 2007 wurden insgesamt 6,124 Mio. Mg Stahlschrott zur Herstellung von Oxygenstahl eingesetzt [106], was einer Einsatzquote von 18,3 % entspricht [104]. Der Roheiseineinsatz in der Stahlerzeugung betrug insgesamt 30,29 Mio. Mg, wobei davon ausgegangen werden kann, dass der Einsatz zu über 95 % in der Oxygenstahlerzeugung erfolgte. Dabei wurden insgesamt 33,536 Mio. Mg Oxygenstahl hergestellt. Die Schlackeerzeugung belief sich dabei auf 3,62 Mio. Mg [105]. Rechnerisch ergibt sich daraus ein Schlackeanteil von 10,4 %⁷. Unter Anrechnung von Schlacke und Staub in Höhe von ca. 10,5 % des Inputmaterials kann davon ausgegangen werden, dass theoretisch betrachtet 5,48 Mio. Mg Oxygenstahl anteilig durch den Einsatz von Stahlschrott hergestellt wurden. Da der Einsatz von Stahlschrott hier insbesondere auch der Kühlung des exotherm verlaufenden Stahlherstellungsprozesses dient, wäre die Substitution des Stahlschrotts durch Roheisen insbesondere mit zusätzlichen Aufwendungen für die Kühlung verbunden. Diese Effekte finden in der vorliegenden Studie allerdings keine Beachtung, da diese Art der Substitution nicht praxisrelevant ist und auch keine Daten für den Fall vorliegen, dass ein Oxygenstahlprozess ausschließlich mit Roheisen betrieben werden würde. Es wird nachfolgend davon ausgegangen, dass mit einer Tonne Stahlschrott (Fe-Gehalt 95 %) bei der Oxygenstahlherstellung etwa 1,12 Mg Roheisen (Fe-Gehalt 85 %) substituiert werden.

Substitutionswirkung

Der Einsatz von Eisen- und Stahlschrott im Rahmen der Eisen- und Stahlherstellung substituiert Roheisen, welches importiert bzw. unter hohem energetischem Aufwand im Hochofenprozess aus importierten Eisenerzen gewonnen werden muss.

Wie bereits dargestellt, ist dabei die Substitutionswirkung des Schrotteinsatzes im Elektrostahlprozess über den Oxygenstahlprozess zu bewerten, wobei dieser hier mit der gesamten Produktionsroute von Oxygenstahl (inkl. Kokerei, Sinteranlage, Hochofen und Oxygenstahlwerk) in die Betrachtung eingeht.

Nachfolgend wird diese Substitutionswirkung beschrieben. Zur Berechnung der Substitutionswirkung werden die wie oben beschrieben hinsichtlich des KRA angepassten Daten von GEMIS 4.6 [16] genutzt, welche zusammenfassend in Tabelle 36 dargestellt sind.

⁷ GEMIS 4.6 [16]: **10,7 %**

Tabelle 36: Material- und Energieintensitäten zur Stahlerzeugung (nach [16])

	Stahl-DE-Oxygen-2010	Stahl-Elektro-DE-2010	Fe-roh-DE-2010	Fe-Erz-Import-mix-DE-2010	Fe-Pellets-Import-Mix-DE-2010
Kumulierter Rohstoffaufwand	2,513 Mg/Mg	0,471 Mg/Mg	2,527 Mg/Mg	1,046 Mg/Mg	1,049 Mg/Mg
Kumulierter Energieaufwand	22.573 MJ/Mg	7.225 MJ/Mg	23.553 MJ/Mg	1.851 MJ/Mg	2.189 MJ/Mg

In den Oxygenstahlprozess gehen neben dem Roheisen auch 16 % Schrott ein, während im Elektrostahlprozess neben Schrott auch 9 % andere Eisenträger eingesetzt werden. Diese Einsatzmengen wurden im KRA nicht berücksichtigt.

Demzufolge ergeben sich die nachfolgend dargestellten Substitutionswirkungen.

Tabelle 37 zeigt die Substitutionswirkung durch den Schrotteinsatz im Oxygenstahlprozess. Hier ist lediglich die Rohstoffsubstitution zu betrachten, da aufgrund des exothermen Oxygenstahlprozesses durch den Schrotteinsatz keine Energieeinsparungen bilanziert werden können. Durch den Einsatz von 6,124 Mio. Mg Eisen- und Stahlschrott wurden 6,859 Mio. Mg Roheisen substituiert.

Tabelle 37: Substitution von Roheisen durch den Einsatz von Schrott im Oxygenstahlprozess

	Fe-roh-DE-2010	spezifische Einsparung	absolute Einsparung 2007 bei einer Einsparung von 6,859 Mio. Mg Roheisen
Kumulierter Rohstoffaufwand	2,527 Mg/Mg	2,527 Mg/Mg	17,333 Mio. Mg
Kumulierter Energieaufwand	23.553 MJ/Mg	-	-

Durch den Einsatz von Eisenschrott werden im Oxygenstahlprozess insgesamt 17,333 Mio. Mg Rohstoffe eingespart. Da im Rahmen dieses Prozesses die eingesetzten Schrotte allerdings insbesondere auch Kühlzwecken dienen, ist dieses Einsparpotenzial theoretischer Natur und dient an dieser Stelle nur als Grundlage für die Berechnung des Substitutionseffektes.

In Tabelle 38 ist die rechnerische Ermittlung der Rohstoff- und Energiesubstitution durch den Elektrostahlprozess dargestellt. Hier ist als Einsparung die Differenz zwischen den Verbräuchen der Elektrostahlerstellung und denen der Oxygenstahlerstellung zu betrachten.

Tabelle 38: Substitution des Oxygenstahlprozesses durch die Herstellung von Elektrostahl

	Stahl-DE-Oxygen-2010	Stahl-Elektro-DE-2010	spezifische Einsparung	absolute Einsparung 2007 bei 15,015 Mio. Mg Elektrostahlerzeugung
Kumulierter Rohstoffaufwand	2,513 Mg/Mg	0,471 Mg/Mg	2,042 Mg/Mg	30,661 Mio. Mg
Kumulierter Energieaufwand	22.573 MJ/Mg	7.225 MJ/Mg	15.348 MJ/Mg	230,45 PJ

Die Verwertung von Schrotten im Elektrostahlprozess führt zu einem vollständigen Ersatz des Oxygenstahlprozesses für die erzeugte Elektrostahlmenge. Dies ist in großem Umfang möglich, findet seine Grenzen allerdings zum einen in der Schrottverfügbarkeit, welche

begrenzt wird durch das stetig wachsende anthropogene Lager und durch zeitliche und räumliche Disparitäten zwischen Schrottanfall und –nachfrage, welche insbesondere durch das immense Wachstum einzelner Volkswirtschaften hervorgerufen wird. Zum anderen wirkt die nachgefragte Stahlqualität insofern begrenzend, dass Elektrostahl nicht für alle Einsatzbereiche geeignet ist.

Da im betrachteten Oxygenstahlprozess-Szenario nach GEMIS 4.6 [16] mit dem Einsatz von 16 % Schrotten kalkuliert wird, muss die Substitutionswirkung dieses Schrotteinsatzes gegenüber dem eingesparten Roheisen zusätzlich fiktiv mit bilanziert werden. Auch hier ist aufgrund der oben geschilderten Zusammenhänge nur die Wirkung beim Rohstoffaufwand zu bilanzieren. Im Jahr 2007 wurden durch den Einsatz von 16 % Schrott (5.419 Mg bei 95 % Fe-Gehalt) 6,069 Mio. Mg Roheisen (Faktor 1,12) substituiert.

Tabelle 39: Fiktive Substitution von Roheisen durch den Einsatz von Eisen- und Stahlschrott bei der durch die Elektrostahlerzeugung vermiedenen Oxygenstahlerzeugung

	Fe-roh-DE-2010	spezifische Einsparung	absolute Einsparung 2007 durch Substitution von 6,069 Mio. Mg Roheisen in der vermiedenen Oxygenstahlerzeugung
Kumulierter Rohstoffaufwand	2,527 Mg/Mg	2,527 Mg/Mg	15,364 Mio. Mg
Kumulierter Energieaufwand	23.553 MJ/Mg	-	-

Damit wurden durch den fiktiven Ersatz von Roheisen durch den Schrotteinsatz im substituierten Oxygenstahlprozess 15,364 Mio. Mg Rohstoffe substituiert.

Durch die Elektrostahlerzeugung wurden im Jahr 2007 46,025 Mio. Mg an Rohstoffen und 230,45 PJ Energieaufwand eingespart.

Insgesamt wurden nach diesen Bilanzierungen im Jahr 2007 durch den Einsatz von Stahlschrott 63,358 Mio. Mg an Rohstoffen und 230,45 PJ an Energieaufwand eingespart.

Diese Einsparungen umfassen sowohl Rohstoffe und Energie in Deutschland, jedoch in großem Maße auch den Rohstoff- und Energieverbrauch im Ausland. Unter der Annahme, dass für 1 Mg Roheisen 1,6 Mg Eisenerzkonzentrat eingesetzt werden müssen [103] und diese zu 100 % importiert werden, konnten durch die im Jahr 2007 eingesetzten Eisenschrotte im Umfang von 21,744 Mio. Mg insgesamt Eisenerz-Importe von 38,965 Mio. Mg⁸ eingespart werden. Dazu kommen noch die fiktiv eingesparten 6,069 Mio. Mg an Roheisen durch den bilanzierten Schrotteinsatz in der substituierten Oxygenstahlproduktion, welche 9,710 Mio. Mg Eisenerzkonzentrat ergeben, so dass sich die Menge an eingesparten Roheisenimporten auf insgesamt 48,675 Mio. Mg beläuft. Im Jahr 2007 wurden insgesamt 31,325 Mio. Mg (67,7 %) nicht agglomerierte Eisenerze und 14,920 Mio. Mg (32,3 %) agglomerierte Eisenerze importiert [100]. Unter Zugrundelegung dieses Verhältnisses sind allein im Ausland die in Tabelle 40 dargestellten Einsparungen durch vermiedene Eisenerzimporte verbunden.

⁸ Faktor 1,12 für Ersatz Roheisen durch Eisen- und Stahlschrott sowie Faktor 1,6 für Eisenerzkonzentrat zu Roheisen

Tabelle 40: Substitutionseffekte bei Eisenerzimporten

	Fe-Erz-Import-mix-DE-2010 (67,7 % Importanteil)	Fe-Pellets-Import-Mix-DE-2010 (32,3 % Importanteil)	absolute Einsparung 2007 bezogen auf 45,034 Mio. Mg vermiedene Eisenerzkonzentrat-Importe
Kumulierter Rohstoffaufwand	1,046 Mg/Mg	1,049 Mg/Mg	50,961 Mio. Mg
Kumulierter Energieaufwand	1.851 MJ/Mg	2.189 MJ/Mg	74,43 PJ

Die durch den Eisenschrotteinsatz eingesparten Einfuhren an agglomerierten und nicht agglomerierten Eisenerzen führen zu einer Einsparung an Rohstoffen in Höhe von 50,961 Mio. Mg sowie zu einer Einsparung an Primärenergieträgern in Höhe von 74,43 PJ.

Ausgehend von einer Gesamteinsparung an Rohstoffen in Höhe von 63,358 Mio. Mg und einer Energieeinsparung in Höhe von 230,45 PJ ergibt sich, dass durch die mit dem Schrotteinsatz vermiedenen Importe an Eisenerzkonzentraten 80 % der insgesamt eingesparten Rohstoffe und 32 % der insgesamt eingesparten Primärenergieträger auf die Eisenerzgewinnung in den Herkunftsländern sowie den Transport der Eisenerzkonzentrate entfallen.

6.2.2 Verwertung von Kupfer

Wie Eisen und Stahl gilt auch Kupfer als beliebig oft ohne Qualitätseinbußen recyclebar.

Die Gewinnung von Kupfer erfolgt aus zu Kupferkonzentrat aufbereiteten Kupfererzen, welches einen Kupfergehalt von 25-35 % Kupfer aufweist⁹. Dieses Kupferkonzentrat wird im Schwebeschmelzofen aufgeschmolzen, anschließend konvertiert und im Anodenofen zu Anodenkupfer mit einem Kupfergehalt von über 99 % angereichert. Das Anodenkupfer wird durch Raffination soweit von Verunreinigungen befreit, dass ein Raffinadekupfer mit einer Reinheit von bis zu 99,9 % entsteht.

Im Jahr 2007 betrug der Anteil sekundärer Vorstoffe bei der Kupferraffination 55 %. Von insgesamt 666.000 Mg raffiniertem Kupfer wurden 364.000 Mg aus sekundären Vorstoffen erzeugt.

Der Verbrauch an Kupfer in Deutschland liegt mit einer Produktion von Halbzeugen in Höhe von 1,857 Mio. Mg sowie 93 Tsd. Mg Kupferguss weit über der Produktion von Raffinadekupfer. Die Differenz wird über Importe, den Einsatz von Kupferschrott und sekundären Vorstoffen ausgeglichen. Die aus inländischen Quellen stammende Sekundärkupfererzeugung durch den direkten Einsatz von Kupferschrott und sekundären Vorstoffen ergibt sich aus der Differenz zwischen

- Erzeugung Halbzeug und Kupferguss (1.950.000 Mg),
- abzüglich raffiniertes Kupfer (666.000 Mg),
- abzüglich Einfuhr von raffiniertem Kupfer (892.000 Mg) und
- zuzüglich Ausfuhr von raffiniertem Kupfer (138.000 Mg) [3].

Daraus ergibt sich eine Menge an 530.000 Mg Sekundärkupfer, welches durch den Einsatz von Kupferschrott und sekundären Vorstoffen hergestellt wurde.

Substitutionswirkung

Die Substitutionswirkung erfolgt zum einen auf der Stufe der Primärkupfererzeugung, indem Kupfererzkonzentrate durch den Einsatz von Kupferschrott substituiert werden und zum

⁹ Es wird in Auswertung der GEMIS4.6-Daten hier mit einem Kupfergehalt von 25 % bilanziert.

anderen durch die Herstellung von Sekundärkupfer, bei der durch den Einsatz von Kupferschrott und sekundären Vorstoffen die Herstellung von Primärkupfer substituiert wird.

Nachfolgend wird diese Substitutionswirkung beschrieben. Zur Berechnung der Substitutionswirkung werden die wie oben beschrieben hinsichtlich des KRA angepassten Daten von GEMIS 4.6 [16] genutzt, welche zusammenfassend in Tabelle 41 dargestellt sind. Dabei werden für das Kupfererzkonzentrat 30,2 Mg Erz pro Mg Kupfer berücksichtigt, nicht jedoch die 55,7 Mg Abraum, die am Ort der Entnahme verbleiben.

Tabelle 41: Material- und Energieintensitäten zur Kupfererzeugung (nach [16])

		Abbau-Kupfererz (Konz.)	Kupfer-DE-Primär- 2010	Kupfer-DE-Sekundär- 2010
Kumulierter Rohstoff-	aufwand	32,004 Mg/Mg	62,204 Mg/Mg	0,718 Mg/Mg
Kumulierter Energie-	aufwand	21.846 MJ/Mg	69.973 MJ/Mg	26.472 MJ/Mg

Daraus lassen sich die nachfolgend erläuterten Substitutionswirkungen ableiten.

Im Jahr 2007 wurden insgesamt 666.000 Mg Raffinadekupfer hergestellt, davon 364.000 Mg durch den Einsatz von Kupferschrott. Demzufolge wird die Herstellung von Kupfer aus primären Vorstoffen substituiert.

1 Mg Kupferschrott (95 % Kupfergehalt) ersetzt 3,87 Mg Kupfererzkonzentrat (bei 25 % Kupfergehalt). Somit werden durch die Herstellung von 364.000 Mg Raffinadekupfer aus sekundären Vorstoffen 1,485 Mio. Mg Kupfererzkonzentrat substituiert.

Tabelle 42: Substitution von Kupfererzkonzentrat durch Kupferschrott bei der Primärkupfererzeugung

		Abbau-Kupfererz (Konz.)	spezifische Einspa- rung	absolute Einsparung 2007 durch Substitu- tion von 1.484.580 Mg Kupfererzkonzentrat
Kumulierter Rohstoff-	aufwand	32,004 Mg/Mg	32,004 Mg/Mg	47,512 Mio. Mg
Kumulierter Energie-	aufwand	21.846 MJ/Mg	21.846 MJ/Mg	32,43 PJ

Durch den Einsatz sekundärer Vorstoffe in der Kupferraffination wurden im Jahr 2007 47,512 Mio. Mg an Rohstoffen und 32,43 PJ an Energieaufwand eingespart.

Durch die Herstellung von Sekundärkupfer durch den direkten Einsatz von Kupferschrott und sekundären Vorstoffen wird die Herstellung von Primärkupfer substituiert. Im Jahr 2007 wurden insgesamt 530.000 Mg Kupfer auf diese Weise erzeugt.

Tabelle 43 zeigt die Effekte der Substitution der Primärkupfererzeugung durch die Sekundärkupfererzeugung.

Tabelle 43: Substitution der Primärkupfererzeugung durch die Sekundärkupfererzeugung

	Kupfer-DE-Primär-2010	Kupfer-DE-Sekundär-2010	spezifische Einsparung	absolute Einsparung 2007 bei 530.000 Mg Sekundärkupfer-Erzeugung
Kumulierter Rohstoffaufwand	62,204 Mg/Mg	0,718 Mg/Mg	61,486 Mg/Mg	32,588 Mio. Mg
Kumulierter Energieaufwand	69.973 MJ/Mg	26.472 MJ/Mg	43.501 MJ/Mg	23,05 PJ

Zusätzlich ist dabei der Substitutionseffekt zu berücksichtigen, welcher sich aus dem Kupferschrottanteil in Höhe von 0,57 Mg/Mg Primärkupfer ergibt, welcher im Rahmen des GEMIS-Szenarios auch in der Primärproduktion Verwendung findet. Wie oben bereits erläutert, beträgt der Substitutionsfaktor Kupferschrott zu Kupfererzkonzentrat 3,87. Demnach wären für die Herstellung von 530.000 Mg an substituiertem Primärkupfer 302.100 Mg Kupferschrott bilanziert, welcher 1.169.127 Mg Kupfererzkonzentrat substituiert, die zusätzlich zu bewerten sind. Tabelle 44 zeigt den sich daraus ergebenden Substitutionseffekt.

Tabelle 44: Substitution von Kupfererzkonzentrat durch Kupferschrott bei der durch die Sekundärkupfererzeugung vermiedenen Primärkupfererzeugung

	Abbau-Kupfererz (Konzentrat)	spezifische Einsparung	absolute Einsparung 2007 durch Substitution von 1.169.127 Mg Kupfererzkonzentrat in der vermiedenen Primärkupfererzeugung
Kumulierter Rohstoffaufwand	32,004 Mg/Mg	32,004 Mg/Mg	37,417 Mio. Mg
Kumulierter Energieaufwand	21.846 MJ/Mg	21.846 MJ/Mg	25,54 PJ

Durch die Herstellung von Sekundärkupfer aus Kupferschrott und sekundären Vorstoffen wurden im Jahr 2007 70,005 Mio. Mg an Rohstoffen und 48,59 PJ an Energieaufwand eingespart.

Insgesamt wurden im Jahr 2007 durch das Kupferrecycling und die damit verbundene Verwertung sekundärer Vorstoffe in der Kupferraffination bzw. durch den Einsatz von Kupferschrott 117,517 Mio. Mg Rohstoffe und 81,02 PJ an Energieaufwand eingespart.

Wie bei Eisen und Stahl resultiert aus der Exportabhängigkeit der deutschen Wirtschaft bei Kupfer ein erheblicher Anteil an Einsparungen im Ausland. Wie bereits erläutert, werden beim Einsatz von 1 Mg Kupferschrott 3,87 Mg Kupfererzkonzentrat substituiert. Durch den Einsatz sekundärer Vorstoffe und Schrotte in Höhe von 894.000 Mg im Jahr 2007 wurden demzufolge 3.459.780 Mg wasserfreies Kupferkonzentrat substituiert. Damit ergeben sich die in Tabelle 45 dargestellten Substitutionswirkungen.

Tabelle 45: Substitutionseffekte beim Import von wasserfreiem Kupferkonzentrat

	Abbau-Kupfererz (Konzentrat)	spezifische Einspa- rung	absolute Einsparung 2007 bezogen auf 3.459.780 Mg vermie- dene Kupferkonzen- trat-Importe
Kumulierter Rohstoff- aufwand	32,004 Mg/Mg	32,004 Mg/Mg	110,727 Mio. Mg
Kumulierter Energie- aufwand	21.846 MJ/Mg	21.846 MJ/Mg	75,58 PJ

Die durch den Einsatz von sekundären Vorstoffen und Kupferschrott vermiedenen Importe an Kupferkonzentrat führen zu Einsparungen von 110,727 Mio. Mg an Rohstoffen und 75,58 PJ an Energieaufwand in den Herkunftsländern.

Demzufolge entfallen 94 % der eingesparten Rohstoffe und 93 % der eingesparten Primärenergieträger auf die Kupfererzkonzentratgewinnung in den Herkunftsländern sowie auf die mit deren Einfuhr verbundenen Transporte.

6.2.3 Verwertung von Gold

Gold wird in Deutschland auf zwei Wegen recycelt. Die Aurubis AG gewinnt Gold im Rahmen des Recyclings von Elektronik- und Kupferschrott, indem die aus zerkleinerten Elektroaltgeräten hergestellten Fraktionen pyrometallurgischen Prozessen zugeführt, die Edelmetalle im Kupfer aufkonzentriert und dann mittels Elektrolyse vom Kupfer abgetrennt werden. Durch weitere Raffinationsschritte wird das Gold gewonnen. Der zweite Weg des Goldrecyclings ist der über Goldscheideanlagen, in denen insbesondere Schmuckgold, Dentalgold u. a. Materialien mit hohem Goldanteil verwertet werden und das Gold auf elektrolytischem Wege zu Reinstgold aufkonzentriert wird.

Wie aus Abschnitt 5.3 hervor geht, wurden in Deutschland im Jahr 2007 insgesamt 80,4 Mg Gold recycelt.

Es liegen allerdings keine Daten zum kumulierten Rohstoffaufwand bzw. zum kumulierten Energieaufwand des Goldrecycling vor.

Das Umweltbundesamt [59] gibt für die weltweite Goldförderung basierend auf Daten aus dem Jahr 2007 die folgenden Werte an:

KRA: 740.317.694 kg/Mg

KEA: 261.210.200 MJ/Mg

Es kann davon ausgegangen werden, dass dieser kumulierte Rohstoffaufwand nahezu vollständig eingespart wird, da das Recycling von Gold überwiegend aus hochkonzentrierten Ausgangsmaterialien erfolgt. Die energetischen Rohstoffaufwendungen, die bei der Primärgewinnung 1% der gesamten Rohstoffaufwendungen verursachen, dürften auch beim Goldrecycling in ähnlichen Größenordnungen liegen.

Hinsichtlich des Energieaufwandes liegen jedoch keine expliziten Angaben vor. In den Verfahren der Aurubis AG ist Gold ein Koppelprodukt der Kupfer-Elektrolyse. Am Standort Hamburg werden 1,63 MWh/Mg Kupfer, umgerechnet 5.868 MJ/Mg Kupfer im Rahmen des Verfahrens benötigt. Der reine Recyclinganteil im Inputmaterial ist mit ca. 7 % eher gering. Im Verhältnis zum eingesetzten Kupfererzkonzentrat in Höhe von 1,087 Mio. Mg werden 80.000 Mg Recyclingmaterialien (Altkupfer, Raffiniermaterial) eingesetzt. Ebenso beläuft sich der Anteil des erzeugten Goldes mit 32 Mg in Hamburg im Vergleich zu 381.600 Mg an Kupfer nur auf 0,008 %. Wird von einer massebasierten Allokation ausgegangen, ist der Energieaufwand, welcher anteilig für die Elektrolyse des Goldes aufgewendet wird, eher von untergeordneter Bedeutung, kann allerdings nicht genau beziffert werden [101, 102].

Anders dürfte es sich bei Goldscheideanlagen verhalten, bei denen die Rückgewinnung und Aufkonzentration von Gold einen wesentlicheren Bestandteil des Verfahrens ausmacht. Allerdings liegen hier keine Angaben zu den Energie- und Rohstoffaufwendungen vor.

Aus diesem Grund wird an dieser Stelle eine vollständige Vermeidung der durch die bergbauliche Goldgewinnung verursachten Energie- und Rohstoffaufwendungen durch das Recycling angenommen und gleichwohl damit die obere Schranke des Potenzials aufgezeigt.

Tabelle 46: Substitutionseffekte beim Import von Gold und beim Goldrecycling

		Gewinnung-Gold	spezifische Einsparung	absolute Einsparung 2007 bezogen auf 80,4 Mg vermiedene Gold-Importe
Kumulierter Rohstoffaufwand		740.317,694 Mg/Mg	740.317,694 Mg/Mg	59,522 Mio. Mg
Kumulierter Energieaufwand		261.210.200 MJ/Mg	261.210.200 MJ/Mg	21,00 PJ

Die durch das Recycling von Gold vermiedenen Goldimporte im Jahr 2007 sind mit Einsparungen von bis zu 59,522 Mio. Mg an Rohstoffen sowie bis zu 21,00 PJ an Energie verbunden. Diese Einsparungen betreffen zu nahezu 100 % die Herkunftsländer, in denen auch die Aufbereitung des goldhaltigen Gesteins erfolgt.

6.2.4 Verwertung von thermoplastischen Kunststoffen am Beispiel von HD-/LDPE, PET und PVC

Die Verwertungsverfahren für die hier betrachteten thermoplastischen Kunststoffe unterscheiden sich zumeist nicht wesentlich voneinander (hochwertige werkstoffliche Verwertung) bzw. im Falle der Verwertung als Mischkunststoffe sind sie sogar identisch. Vor diesem Hintergrund erfolgt für die betrachteten thermoplastischen Kunststoffe eine gemeinsame Darstellung der verwendeten Grundlagendaten. Außerdem werden Ergebnisse vergleichend nebeneinander gestellt. Auf Besonderheiten einzelner Kunststoffe wird im jeweiligen Abschnitt eingegangen.

Wie bei der Darstellung der Methodik unter Abschnitt 6.1 (siehe auch Abbildung 39, S. 75) angegeben, werden nachfolgend die werkstofflichen, rohstofflichen und energetischen Verwertungswege für Kunststoffabfälle betrachtet.

a) Werkstoffliche Verwertung

Die hier betrachteten Kunststoffe sind Thermoplasten. So besteht die Möglichkeit eine Formänderung dieser Kunststoffe auch bei wiederholtem Einschmelzen herbeizuführen, wodurch die Grundlage zur Herstellung neuer Produkte aus gereinigten Altkunststoffen gegeben ist. Je nach Trennbarkeit und Qualität der Kunststoffabfälle erfolgt die werkstoffliche Verwertung durch

- Granulatherstellung von sortenrein vorliegenden Kunststoffen mit dem Ziel, Primärkunststoffe zu substituieren, oder
- thermoplastische Verformung von gemischten Kunststoffabfällen zur Herstellung von Produkten, welche insbesondere Holz oder Beton substituieren.

Die Materialstromdaten der werkstofflich verwerteten Kunststoffe sind bereits um die Sortierreste aus den Sortieranlagen und der Aufbereitung bereinigt (siehe Kapitel 4.2, „Materialströme der Kunststoffe“). Die in Müllverbrennungsanlagen verbrachten Sortierreste sind bei den energetisch verwerteten Mengen mit berücksichtigt [68]. So liegen bereits sortenreine

Kunststoffe zur stofflichen Verwertung vor, welche bei der hochwertigen stofflichen Verwertung nur noch um die im Extruder abgeschiedenen leichtflüchtigen Inhaltsstoffe bereinigt werden müssen. Der Sortier- und Aufbereitungsaufwand wurde nur den stofflich verwerteten Mengen zugeschlagen, da für die energetische Verwertung der Sortierreste in MVA kein Aufbereitungsaufwand notwendig ist.

Werkstoffliche Verwertung durch hochwertiges Recycling von sortenrein vorliegenden Kunststoffen

Das hochwertige Recycling von Kunststoffen ist nicht unbegrenzt möglich. Durch die beigemischten Additive und die Materialalterung ist jeder Recyclingdurchgang mit einem Qualitätsverlust der Kunststoffe verbunden. Die meisten Kunststoffe lassen sich etwa 3 bis 5 mal recyceln. Bei einzelnen Produkten kann auch von einer größeren Anzahl von Recycling-Zyklen ausgegangen werden, so lassen sich PVC-Fenster etwa 7 mal recyceln.

Der ökobilanzielle Vergleich von Primärkunststoffen mit Sekundärkunststoffen erfolgt bis einschließlich zur Gewinnung des Granulats bzw. Regranulats. So wird das gleiche Produkt betrachtet, bei dem von gleichen Materialeigenschaften auszugehen ist. Nutzungsart und die Verwertung nach Nutzungsende sollten sich folglich nicht unterscheiden und werden deshalb nicht mit bilanziert.

Mit einem Anteil von über 80 % dominieren die gebrauchten Verkaufsverpackungen bei der Menge der stofflich verwerteten Kunststoffe in Deutschland [5]. Im Folgenden werden deshalb überwiegend Ökobilanzbetrachtungen für das werkstoffliche Recycling von Verpackungskunststoffen betrachtet.

Um hochwertiges Recyclingmaterial zu gewinnen, sind entsprechend hohe Reinheiten der Kunststofffraktionen notwendig. Da einige Kunststoffe nicht oder nur bedingt miteinander verträglich sind, besteht die Notwendigkeit, dass die aufzubereitenden Kunststoffe möglichst nach Arten getrennt vorliegen. Für diese Form des werkstofflichen Recyclings eignen sich besonders sortenrein und relativ unverschmutzt anfallende Kunststoffabfälle, wie beispielsweise Produktionsabfälle und Transportverpackungen. Bei getrennt gesammelten Kunststoffabfällen aus Haushalten besteht ein größerer Reinigungs- und Sortieraufwand.

Die Trennung nach Kunststoffarten erfolgt bei den Kunststoff-Verkaufsverpackungen in LVP-Sortieranlagen. Nach der Abtrennung von Nicht-Kunststoffen erfolgt die Kunststoffartentrennung i. d. R. mittels Nahinfrarotspektroskopie. Für die getrennten Verkaufsverpackungen liegen Spezifikationen vor, welche von den Sortieranlagen einzuhalten sind. Der Energieaufwand ist abhängig vom eingesetzten Sortierverfahren und von der Verpackungskunststoffart. Nach HPT und IFEU [69] liegt der Energieverbrauch (bezogen auf den Input) zwischen 70 kWh/Mg für die einfache Sortierung von Kunststoffflaschen und 120 kWh für die optimierte Sortierung von Kunststoffflaschen. Für Kunststoffbecher liegt der Aufwand bei beiden Verfahren etwa bei 100 kWh/Mg. Bezogen auf den Output liegt der Energieverbrauch pro Mg stofflich verwertbarem Kunststoff zwischen ~300 MJ/Mg und 510 MJ/Mg. An dieser Stelle werden nur die sortenreinen Kunststoffe zur hochwertigen stofflichen Verwertung betrachtet, die werkstofflich und rohstofflich verwerteten Mischkunststoffe werden in den folgenden Abschnitten (s. Seite 92 ff und 94 ff) behandelt.

Die weitere Aufbereitung inklusive Granulatherstellung aus den sortierten, nun sortenrein vorliegenden Verpackungskunststoffen (Anteil Fremdkunststoffe und Störstoffe <5 %) erfolgt durch:

- Metallabscheidung,
- Zerkleinerung (Mühle),
- Reinigung und Abscheidung von Störstoffen/Fremdkunststoffen (Schwimm-Sink-Becken (geschlossener Wasserkreislauf, ca. 100 Umläufe)),
- mechanische Entwässerung,
- Resttrocknung mittels Warmlufttrockner,

- Aufschmelzen im Extruder (Restfeuchte abgesaugt, Entgasungszone mit Abzug leichtflüchtiger Inhaltsstoffe),
- ggf. Stabilisierung und Konditionierung der Kunststoffschmelze durch Zuschlagstoffe und
- Regranulatherstellung über Granulierkopf mit Heißabschlag.

Für sortenreine HD- und LDPE-Kunststoffe erfolgt die Granulatherstellung zumeist wie hier beschrieben, so dass die aufbereiteten Kunststoffe letztendlich in Granulatform vorliegen. Sortenreine PET-Flaschen, welche den Reinigungsschritt „Aufschmelzen im Extruder“ nicht benötigen, liegen nach der Aufbereitung meist als PET-Flakes vor [92].

Für die hier dargestellte Aufbereitung bereits sortenrein vorliegender Kunststoffe besteht nach Fehring und Brunner [92] ein Energiebedarf von 0,63 MWh/Mg eingesetztem Kunststoffabfall. Das entspricht etwa 2.700 MJ/Mg erzeugtem Kunststoffgranulat (~85 % des Inputs). HTP und IFEU weisen einen Energieverbrauch für die Aufbereitung von Flaschen von 750 kWh/Mg und für Folien von 1.000 kWh/Mg aus [69]. Da etwa 20 bis 25 % des Inputs als Störstoffe abgeschieden werden, liegt der Energieaufwand für die Aufbereitung hier zwischen 3.340 MJ/Mg und 4.800 MJ/Mg. Für PET-Kunststoffe fällt der Energiebedarf der Aufbereitung ohne Einschmelzen im Extruder geringer aus und liegt bei 100 kWh/Mg [69] Input bzw. 460 MJ/Mg PET-Mahlgut (~22 % Sortierreste [69]).

Den gesamten Energieaufwand zur werkstofflichen Verwertung (Sammlung, maschinelle Trennung, Nachreinigung und Einschmelzen) von getrennt erfassten Kunststoffabfällen quantifiziert der BUND [93] mit 9.000 MJ/Mg Recyclingkunststoff. Den kumulierten Energieaufwand für die Polymererzeugung aus Sekundärrohstoffen (LDPE und PVC) weist Fricke [94] mit bis zu 15.000 MJ/Mg aus. Nach Fricke ist dieser Wert vor allem abhängig von den materialbedingten Energieverlusten, welche durch nicht erfasste Kunststoffe in Sortieranlagen und qualitativ minderwertige Kunststofffraktionen im Output der Sortier- und Konfektionierungsanlagen verursacht werden.

Für die überwiegend als Verpackungskunststoffe auftretenden HD- und LDPE-Kunststoffe erscheint bei Betrachtung der Einzelangaben für Sortierung und Aufbereitung der Energieaufwand für getrennt erfasste Kunststoffabfälle von 9.000 MJ/Mg nach BUND [93] als plausibel. Durch den geringeren Aufbereitungsaufwand für PET (460 MJ/Mg statt 3.340 MJ/Mg bis 4.800 MJ/Mg [69]) wird der Energieaufwand von BUND, welcher das Einschmelzen der sortenrein erfassten Kunststoffabfälle mit berücksichtigt, um etwa 3.600 MJ/Mg¹⁰ reduziert (siehe Tabelle 51). Da PVC nur einen sehr geringen Anteil der Verpackungskunststoffe ausmacht (<5 % [5]) und überwiegend in anderen Einsatzbereichen (z. B. Baubereich) Verwendung findet, wird hier der KEA für PVC-Kunststoffe nach Fricke [94] mit 15.000 MJ/Mg angesetzt (siehe Tabelle 52).

Die Ermittlung der KRA-Werte erfolgt hier für die hochwertig werkstofflich verwerteten Kunststoffe sowie in den folgenden Abschnitten für die werkstofflich und rohstofflich verwerteten Mischkunststoffe über die jeweiligen KEA in Verbindung mit entsprechenden rohstofflichen Daten für Strom und Diesel. Vom KEA wird dafür ein getrennter Aufwand für die Sammlung und den Transport der Kunststoffabfälle ausgewiesen. Dieser liegt bei den hochwertig werkstofflich verwerteten Kunststoffen etwa bei 1.000 MJ/Mg und wird in Form von Diesel bereitgestellt. Die Differenz zum KEA wird dem elektrischen Energieverbrauch zugeschrieben. Entsprechend wurden die auf ein MJ Energieeinheit bezogenen KRA des deutschen Strommixes und Diesels herangezogen und mit den Energiedaten der Kunststoffe verknüpft. Die aus den GEMIS-Daten [16] berechneten KRA für Diesel und den deutschen Strommix sowie der jeweils angesetzte Energiebedarf zur Herstellung einzelner Sekundärkunststoffe sind in der folgenden Tabelle dargestellt. Entsprechend der nachfolgenden Formel erfolgte hier die Berechnung des KRA für das Kunststoffrecycling.

¹⁰ Differenz des Aufbereitungsaufwands für PET von 460 MJ/Mg und dem mittleren Aufbereitungsaufwand für die anderen Verpackungskunststoffe

Tabelle 47: Kumulierter Rohstoffaufwand für Diesel und deutschen Strommix sowie spezifischer Energiebedarf für das Kunststoffrecycling

	Netz-el-DE-lokal-HH/KV-2005	Tankstelle\Diesel-DE-2000
Kumulierter Rohstoffaufwand*	0,000073 Mg/MJ elektrische Energie	0,000027 Mg/MJ Diesel
Energiebedarf	8.000 MJ/Mg PE-Kunststoff 4.400 MJ/Mg PET-Kunststoff 14.000 MJ/Mg PVC-Kunststoff	~1.000 MJ/Mg Kunststoff**

* Eigene Berechnung des KRA in Anlehnung an die Daten aus GEMIS 4.6 [16]

** Eigene Berechnung über die Transportentfernung nach HTP und IFEU [69] und den Energiebedarf pro km nach GEMIS [16]

$$KRA_{Rec} [Mg/Mg] = KRA_{Strom} * Energiebedarf_{Strom} + KRA_{Diesel} * Energiebedarf_{Diesel}$$

(1.5)

Die Daten der KEA- und KRA-Werte der substituierten Primärkunststoffe sowie angesetzte Substitutionsfaktoren für die zu verwendende Granulatmenge sind in Tabelle 48 angegeben.

Tabelle 48: Material- und Energieintensitäten zur Primärkunststoffherzeugung

Produkt:	Chem-Orgl HDPE-DE-2000	Chem-Orgl LDPE-DE-2000	Chem-Orgl PET-DE-2000	Chem-Orgl PVC-mix-DE-2000
KRA [Mg/Mg] *	1,969	2,040	2,585	1,814
KEA [MJ/Mg] **	76.650	81.160	98.100	53.820
Substitutionsfaktor ***	1	1	1	1

* Eigene Berechnung des KRA in Anlehnung an die Daten aus GEMIS 4.6 [16]

** GEMIS 4.6 [16]

*** Consultic 2002 [84]

Bei einem Substitutionsfaktor von 1 wird davon ausgegangen, dass sich beim Einsatz von Granulat aus Kunststoffabfällen die gleiche Menge an Primärkunststoffen substituieren lässt [84].

Tabelle 49: Substitution des HDPE-Primärkunststoffprozesses durch die Herstellung von Sekundärkunststoff

	Chem-Orgl HDPE-DE-2000	HDPE- Regranulat	spezifische Einsparung (Substitutions- faktor =1)	absolute Einspa- rung 2007 bei 63.748 Mg HDPE- Granulaterzeugung
Kumulierter Rohstoffaufwand	1,969 Mg/Mg	0,611 Mg/Mg	1,357 Mg/Mg	86.538 Mg
Kumulierter Energieaufwand	76.650 MJ/Mg	9.000 MJ/Mg	67.650 MJ/Mg	4,31 PJ

Durch den Einsatz von 63.748 Mg hochwertig stofflich verwerteten HDPE-Kunststoffabfall kommt es zur Einsparung von 4,31 PJ Energie und von 86.538 Mg Rohstoffen.

Tabelle 50: Substitution des LDPE-Primärkunststoffprozesses durch die Herstellung von Sekundärkunststoff

	Chem-Org/ LDPE-DE-2000	LDPE- Regranulat	spezifische Einsparung (Substitutions- faktor =1)	absolute Einspa- rung 2007 bei 105.282 Mg LDPE- Granulaterzeugung
Kumulierter Roh- stoffaufwand	2,040 Mg/Mg	0,611 Mg/Mg	1,429 Mg/Mg	150.406 Mg
Kumulierter Ener- gieaufwand	81.160 MJ/Mg	9.000 MJ/Mg	72.160 MJ/Mg	7,60 PJ

Durch den Einsatz von 105.282 Mg hochwertig stofflich verwerteten LDPE-Kunststoffabfall kommt es zur Einsparung von 7,60 PJ Energie und von 150.406 Mg Rohstoffen.

Tabelle 51: Substitution des PET-Primärkunststoffprozesses durch die Herstellung von Sekundärkunststoff

	Chem-Org/ PET-DE-2000	PET- Regranulat	spezifische Einsparung (Substitutions- faktor =1)	absolute Einspa- rung 2007 bei 60.491 Mg PET- Granulaterzeugung
Kumulierter Roh- stoffaufwand	2,585 Mg/Mg	0,349 Mg/Mg	2,236 Mg/Mg	135.273 Mg
Kumulierter Ener- gieaufwand	98.100 MJ/Mg	5.400 MJ/Mg	92.700 MJ/Mg	5,61 PJ

Durch den Einsatz von 60.491 Mg hochwertig stofflich verwerteten PET-Kunststoffabfall kommt es zur Einsparung von 5,61 PJ Energie und 135.273 Mg an Rohstoffen.

Tabelle 52: Substitution des PVC-Primärkunststoffprozesses durch die Herstellung von Sekundärkunststoff

	Chem-Org/ PVC-mix-DE- 2000	PVC- Regranulat	spezifische Einsparung (Substitutions- faktor =1)	absolute Einspa- rung 2007 bei 169.507 Mg PVC- Granulaterzeugung
Kumulierter Roh- stoffaufwand	1,814 Mg/Mg	1,049 Mg/Mg	0,765 Mg/Mg	129.715 Mg
Kumulierter Ener- gieaufwand	53.820 MJ/Mg	15.000 MJ/Mg	38.820 MJ/Mg	6,58 PJ

Durch den Einsatz von 169.507 Mg hochwertig stofflich verwerteten PVC-Kunststoffabfall kommt es zur Einsparung von 6,58 PJ Energie und von 129.715 Mg Rohstoffen.

Eine zusammenfassende Darstellung der für HD-/LDPE, PET und PVC ermittelten absoluten Einsparungen an Rohstoffen und Energie zeigt Abbildung 40.

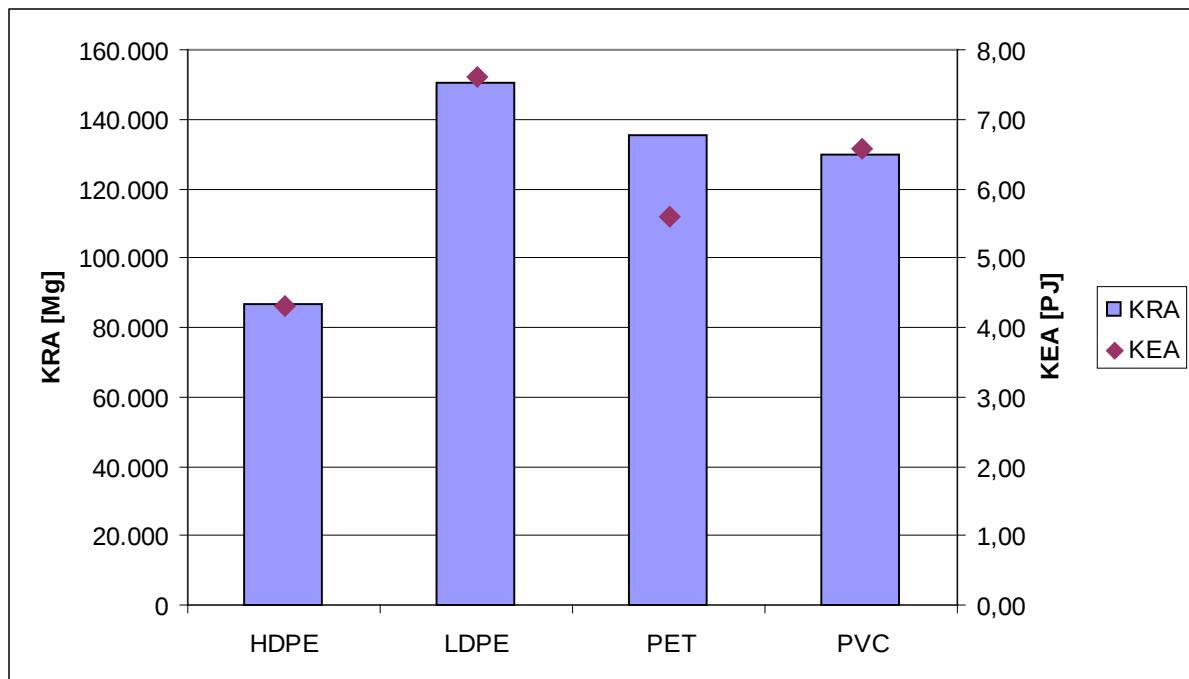


Abbildung 40: Absolute Einsparung durch die hochwertige werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen

Durch die hochwertige werkstoffliche Verwertung der in dieser Studie betrachteten thermoplastischen Kunststoffe wurden im Jahr 2007 insgesamt 501.977 Mg Rohstoffe und 24,1 PJ Energie eingespart.

Werkstoffliche Verwertung durch thermoplastische Verformung von Mischkunststoffen

Aus gemischten Kunststoffabfällen (Verbunde, Mischkunststoffe) lassen sich Produkte durch Zerkleinerung und anschließendes Einschmelzen im Extruder herstellen. Dafür ist eine Reinigung und Auftrennung des Kunststoffgemisches nicht notwendig, allerdings sollte der Polyolefinanteil bei über 50 % liegen, so dass Fremdkunststoffe und Verschmutzungen als Füllstoffe dienen [97]. Da diese Kunststoffarten vor allem den Verpackungsbereich dominieren, sollte diese Voraussetzung gegeben sein. Beim werkstofflichen Verwerten von Mischkunststoffen erfolgt zumeist in einem Arbeitsgang mit der Aufbereitung auch die Produktherstellung (dickwandige Platten/Profile). Dafür wird das Agglomerat oder Mahlgut in einem Plastifizierextruder plastifiziert, in Produktformen extrudiert, gepresst und abgekühlt. Die erzeugten Produkte werden für Produkte ohne hochwertige Anforderungen wie Klappboxen, Parkbänke, Bakenfüße, Blumenkübel, etc. eingesetzt. Damit werden Materialien wie Holz und Beton substituiert.

Mischkunststoffe fallen zumeist als eigenständige Fraktion neben sortenreinen Kunststoffen und Störstoffen bei der Kunststoffsortierung an. Den Energieverbrauch zur Aufbereitung von Mischkunststoffen quantifiziert HPT/IFEU [69] mit 350 kWh/Mg [69] Kunststoffabfall. Pro Mg erzeugtes Mischkunststoffprodukt entspricht das rund 1.500 MJ/Mg (abgeschiedener Störstoffanteil etwa 15 %). Im Vergleich zu den hochwertig werkstofflich verwerteten Kunststoffen ist der Aufbereitungsaufwand folglich um etwa 2.600 MJ/Mg reduziert. Zum kumulierten Energieaufwand von thermoplastisch verformtem Mischkunststoff liegen keine Angaben vor. Aufgrund der Verwertungsschritte Sammlung und Transport sowie Vorsortierung, welche identisch zur hochwertigen werkstofflichen Verwertung sind, und dem separat ausgewiesenen Aufbereitungsunterschied, wird der für die hochwertig werkstofflich verwerteten Kunststoffe angepasste KEA von 6.400 MJ/Mg für die werkstofflich verwerteten Mischkunststoffe angesetzt. Durch die Mischkunststoffe werden Rohstoffe wie Holz- und Betonprodukte substituiert. KEA- und KRA-Werte für Holz- und Betonprodukte sind der GEMIS-Datenbank

[16] entnommen und in Tabelle 53 mit Substitutionsfaktoren nach HTP und IFEU [69] dargestellt.

Tabelle 53: Material- und Energieintensitäten zur Holz- und Betonprodukterzeugung

Produkt:	HolzWirtschaft\ Sperrholz-Fichte	HolzWirtschaft\ Weichfaserplatte	Steine-Erden\ Porenton- Leichtbetonstein	Steine-Erden\ Zement-DE-2010
KRA [Mg/Mg] *	0,559	0,319	1,162	1,732
KEA [MJ/Mg] **	34.000	12.100	3.500	4.800
Substitutions- faktor *** (Produkt Palisade)	~ 0,75	~ 0,75	2,6	2,6
Substitutions- faktor *** (Produkt Bauzaunfuß)			5,6	5,6

* Eigene Berechnung des KRA in Anlehnung an die Daten aus GEMIS 4.6 [16]

** GEMIS 4.6 [16]

*** HPT und IFEU [69]

Da mit den dickwandigen Produkten aus Mischkunststoffen keine Kunststoffe sondern andere Materialien substituiert werden, ist die Vergleichbarkeit der Produkte nur auf den funktionalen Einsatz beschränkt. Die anderen Produkteigenschaften (beispielsweise Dichte und Produktlebensdauer) weichen insbesondere bei Beton voneinander ab. Auch Unterschiede bei der Produktverarbeitung und Entsorgung müssten mit betrachtet werden.

Substitutionsfaktoren, basierend auf der Materialeinsatzmenge, geben HTP und IFEU zum Vergleich Beton : Mischkunststoff für das Produkt Palisade in Höhe von 2,6 : 1 und für Bauzaunfüße sogar von 5,6 : 1 an. Die längere Lebensdauer der Mischkunststoffprodukte im Vergleich zu Beton beim Produkt Bauzaunfuß quantifizieren Heyde und Kremer [98] zusätzlich mit dem Faktor vier.

Hinterlegt man die Daten der GEMIS-Datenbank mit den Ansätzen zu Substitutionsfaktoren nach HTP und IFEU [69], so ermitteln sich ein KEA für Betonprodukte zwischen 9.100 MJ/Mg und 26.880 MJ/Mg sowie für Holzprodukte zwischen 9.075 MJ/Mg und 25.500 MJ/Mg.

In einer groben Abschätzung kann hier aus den Einzelangaben für unterschiedliche Holz- und Betonprodukte ein mittlerer KEA von 17.639 MJ/Mg und ein mittlerer KRA von 3,345 Mg/Mg ermittelt werden. Bei der Vielzahl der zu betrachtenden Produkte mit unterschiedlichen Produkteigenschaften lässt sich kein genauer KEA und KRA für die durch Mischkunststoffe substituierten Produkte bestimmen. In Tabelle 54 sind die Ansätze für die Ermittlung der Substitutionswirkung der als Mischkunststoff verwerteten Kunststoffe aufgeführt. Tabelle 55 fasst die absoluten Einsparungen durch die werkstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen zusammen, in Abbildung 41 sind diese grafisch dargestellt.

Tabelle 54: Substitution von Holz und Beton durch den Einsatz von werkstofflich verwerteten Mischkunststoffen

	Substituiertes Holz-/Beton-Produkt	Mischkunststoffprodukt	spezifische Einsparung (Substitutionsfaktor bereits im KEA/KRA der subst. Holz-/Beton-Produkte enthalten)
Kumulierter Rohstoffaufwand	3,345 Mg/Mg	0,421 Mg/Mg	2,923 Mg/Mg
Kumulierter Energieaufwand	17.639 MJ/Mg	6.400 MJ/Mg	11.239 MJ/Mg

Tabelle 55: Absolute Einsparung durch werkstofflich verwertete Mischkunststoffe

	absolute Einsparung 2007 bei 19.868 Mg HDPE als Mischkunststoff	absolute Einsparung 2007 bei 39.689 Mg LDPE als Mischkunststoff	absolute Einsparung 2007 bei 60.567 Mg PET als Mischkunststoff	absolute Einsparung 2007 bei 56.182 Mg PVC als Mischkunststoff
Kumulierter Rohstoffaufwand	58.080 Mg	116.022 Mg	177.054 Mg	164.235 Mg
Kumulierter Energieaufwand	0,22 PJ	0,45 PJ	0,68 PJ	0,63 PJ

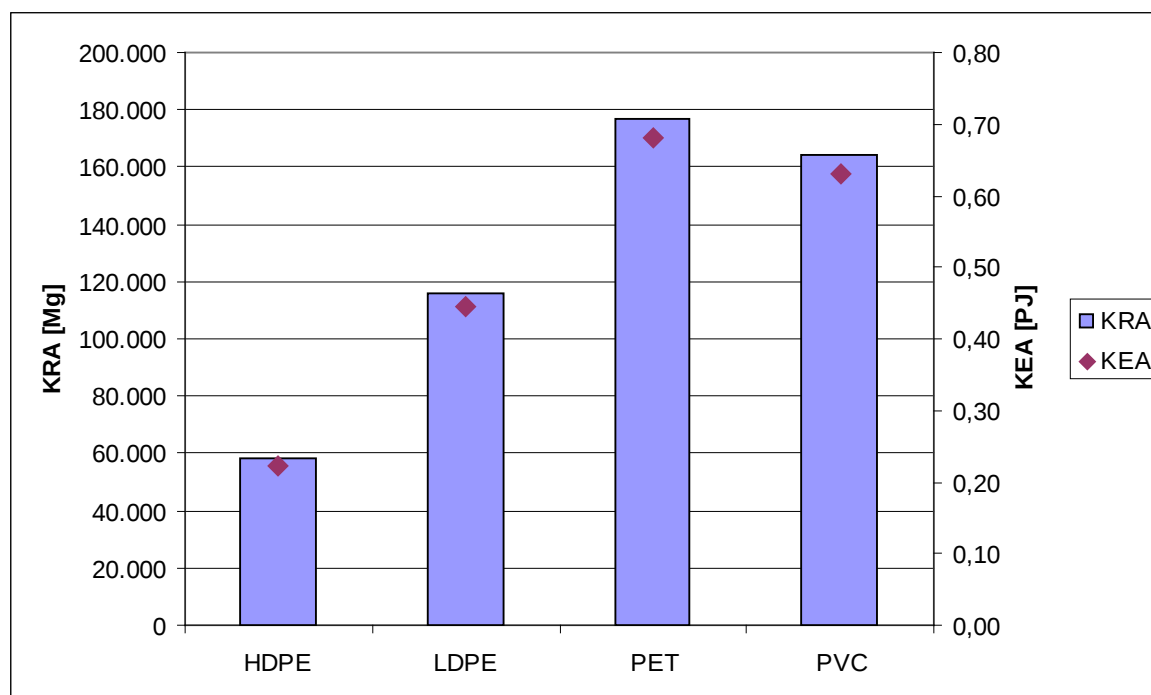


Abbildung 41: Absolute Einsparung durch die werkstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen (anteilig für einzelne Kunststoffarten)

Durch die werkstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen wurden im Jahr 2007 insgesamt 515.391 Mg Rohstoffe und 1,98 PJ Energie eingespart.

b) Rohstoffliche Verwertung

Die rohstoffliche Verwertung wird hier für die Kunststoffmischfraktion aus LVP-Sortieranlagen betrachtet [99]. Die hauptsächlich für die Erstellung der Materialstromdaten der Kunststoffe

genutzte Studie der Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH [5] weist eine rohstofflich verwertete Menge an Kunststoffverkaufsverpackungen aus, die als Reduktionsmittel in Hochöfen eingesetzt wird. Entsprechend der Datengrundlage für die Stoffströme wird somit für die rohstofflich verwerteten Verpackungskunststoffe der Hochofenprozess zur Ermittlung der Energie- und Rohstoffsubstitution betrachtet. Durch die Nutzung von Kunststoffen als Reduktionsmittel im Hochofen wird Schweröl substituiert.

Vor der rohstofflichen Verwertung von Kunststoffen im Hochofen ist eine Sortierung und Aufbereitung der Kunststoffabfälle notwendig, die abgeschiedenen Störstoffe werden entsprechend den Angaben der Consultic-Studie [84] in MVA verwertet. Pro Mg eingesetztem Mischkunststoff kann von einer substituierten Schwerölmenge von 0,966 Mg ausgegangen werden [84]. Nachfolgend wird ein über den Heizwert der Kunststoffe im Vergleich zu Schweröl berechneter Substitutionsfaktor für die einzelnen Kunststoffarten (anteilig als Mischkunststoffbestandteil) verwendet.

Tabelle 56 zeigt den Energiebedarf bei der Aufbereitung von Nichtverpackungskunststoffen zur Erzeugung einer im Hochofen verwertbaren Fraktion.

Tabelle 56: Energiebedarf zur Aufbereitung von Nichtverpackungskunststoffen zur rohstofflichen Verwertung

Herkunftsbereich der Kunststoffe	Energiebedarf	Verluste	Quelle
KS-Fraktion aus dem Restabfall der Haushalte	2.000 MJ/Mg Output	41 % d. Input	eigene Berechnungen nach UBA/VKE
KS-Fraktion aus Shredder	2.100 MJ/Mg Output	75 % d. Input	eigene Berechnungen nach UBA/VKE

Der Bedarf an Primärenergie für die Restabfallaufbereitung von 2.000 MJ pro Mg im Hochofen verwertbarer Mischkunststoffe wird nachfolgend den Kunststoffen als Energieverbrauch angerechnet. Die Berechnung des KRA erfolgt wie bei den werkstofflich verwerteten Mischkunststoffen über den KEA. Nachfolgend sind in Tabelle 57, Tabelle 58, Tabelle 59 sowie Tabelle 60 die Daten der rohstofflichen Kunststoffverwertung, anteilig für die einzelnen Kunststoffarten als Mischkunststoffbestandteile, zusammengefasst.

Tabelle 57: Material- und Energieintensitäten für Schweröl und Mischkunststoffe zur rohstofflichen Verwertung, anteilig HDPE

	RaffinerieÖl-schwer-DE-2010	rohstoffl. verw. Mischkunststoff HDPE	spezifische Einsparung (Substitutionsfaktor: 1,09)	absolute Einsparung 2007 bei 13.546 Mg HDPE als Mischkunststoff
Kumulierter Rohstoffaufwand	1,072 Mg/Mg *	0,632 Mg/Mg	0,536 Mg/Mg	7.267 Mg
Kumulierter Energieaufwand	44.633 MJ/Mg **	2.000 MJ/Mg	46.650 MJ/Mg	0,63 PJ

* Eigene Berechnung des KRA in Anlehnung an die Daten aus GEMIS 4.6 [16]

** GEMIS 4.6 [16]

Tabelle 58: Material- und Energieintensitäten für Schweröl und Mischkunststoffe zur rohstofflichen Verwertung, anteilig LDPE

	RaffinerieÖl- schwer-DE- 2010	rohstoffl. verw. Misch- kunststoff LDPE	spezifische Einsparung (Substitutions- faktor: 1,09)	absolute Einsparung 2007 bei 26.988 Mg LDPE als Misch- kunststoff
Kumulierter Rohstoffaufwand	1,072 Mg/Mg *	0,632 Mg/Mg	0,536 Mg/Mg	14.479 Mg
Kumulierter Energieaufwand	44.633 MJ/Mg **	2.000 MJ/Mg	46.650 MJ/Mg	1,26 PJ

* Eigene Berechnung des KRA in Anlehnung an die Daten aus GEMIS 4.6 [16]

** GEMIS 4.6 [16]

Tabelle 59: Material- und Energieintensitäten für Schweröl und Mischkunststoffe zur rohstofflichen Verwertung, anteilig PET

	RaffinerieÖl- schwer-DE- 2010	rohstoffl. verw. Misch- kunststoff PET	spezifische Einsparung (Substitutions- faktor: 0,78)	absolute Einsparung 2007 bei 11.042 Mg PET als Mischkunst- stoff
Kumulierter Rohstoffaufwand	1,072 Mg/Mg *	0,632 Mg/Mg	0,204 Mg/Mg	2.254 Mg
Kumulierter Energieaufwand	44.633 MJ/Mg **	2.000 MJ/Mg	32.814 MJ/Mg	0,36 PJ

* Eigene Berechnung des KRA in Anlehnung an die Daten aus GEMIS 4.6 [16]

** GEMIS 4.6 [16]

Tabelle 60: Material- und Energieintensitäten für Schweröl und Mischkunststoffe zur rohstofflichen Verwertung, anteilig PVC

	RaffinerieÖl- schwer-DE- 2010	rohstoffl. verw. Misch- kunststoff PVC	spezifische Einsparung (Substitutions- faktor: 0,51)	absolute Einsparung 2007 bei 2.952 Mg PVC als Mischkunst- stoff
Kumulierter Rohstoffaufwand	1,072 Mg/Mg *	0,632 Mg/Mg	-0,085 Mg/Mg	- 252 Mg
Kumulierter Energieaufwand	44.633 MJ/Mg **	2.000 MJ/Mg	20.763 MJ/Mg	0,06 PJ

* Eigene Berechnung des KRA in Anlehnung an die Daten aus GEMIS 4.6 [16]

** GEMIS 4.6 [16]

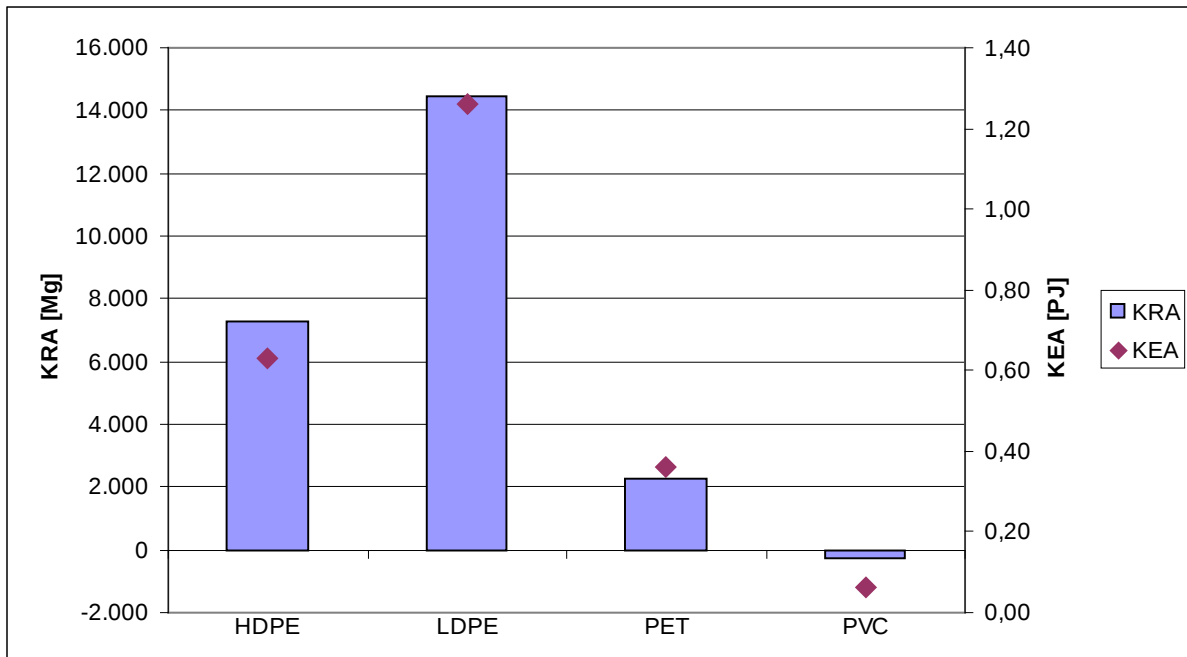


Abbildung 42: Absolute Einsparung durch die rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen (anteilig für einzelne Kunststoffarten)

Die absoluten Einsparungen an Rohstoffen und Energie durch die rohstoffliche Mischkunststoffverwertung zeigt Abbildung 42 anteilig für die einzelnen betrachteten Kunststoffarten. Insgesamt wurden durch die rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen im Jahr 2007 23.748 Mg Rohstoffe sowie 2,31 PJ Energie eingespart.

c) Energetische Verwertung

Entsprechend der Daten der Materialstrombetrachtung, nach der etwa 82 % der thermisch verwerteten Kunststoffe in MVA, 12 % in EBS-Kraftwerken und 6 % in Zementkraftwerken verwertet werden (siehe auch Kapitel 5.4), erfolgt eine getrennte Betrachtung dieser energetischen Verwertungsverfahren.

Einsatz von Kunststoffabfällen in Müllverbrennungsanlagen

Der Prozess der Behandlung von Kunststoffen in Müllverbrennungsanlagen beinhaltet im Wesentlichen nur die Schritte der Erfassung der Kunststoffabfälle mit dem Transport zur MVA, gefolgt von der Verbrennung in der MVA. Für die Verbrennung der Kunststoffabfälle ist eine Aufbereitung nicht notwendig. Die ausgekoppelte Nutzenergie wird der Substitution des deutschen Strommixes und Fernwärmemixes gegenüber gestellt.

Der durchschnittliche Netto-Wirkungsgrad deutscher Müllverbrennungsanlagen lag im Jahr 2007 bei 10,4 % elektrischer und 27,8 % thermischer Energie [96].

Typische Heizwerte für die hier betrachteten Kunststoffe sind:

- PE: 43.000 MJ/Mg [92], [93]
- PET: 31.000 MJ/Mg [93]
- PVC hart: 18.000 MJ/Mg [92], [93]
- PVC weich: 23.000 MJ/Mg [92]

Mittels des durchschnittlichen Wirkungsgrades deutscher Müllverbrennungsanlagen in Verbindung mit den Heizwerten der betrachteten Kunststoffe, lässt sich eine spezifische erzeugte Strom- und Wärmemenge durch energetische Verwertung in MVA bestimmen (siehe Tabelle 61). Der Aufwand des Transports der Kunststoffabfälle zur MVA von 300 MJ/Mg [84] wurde den erzeugten Strom- und Wärmemengen anteilig gegen gerechnet.

Tabelle 61: Durch Verbrennung in der MVA erzielbare spezifische Energiemengen einzelner Kunststoffe

[MJ/Mg]	HDPE	LDPE	PET	PVC
Heizwert	43.000	43.000	31.000	20.000
Bereitstellung elektrischer Energie	4.390	4.390	3.142	1.998
Bereitstellung thermischer Energie	11.736	11.736	8.400	5.342

Unter Berücksichtigung der in Müllverbrennungsanlagen energetisch verwerteten Kunststoffmengen wurden im Jahr 2007 die in Tabelle 62 dargestellten Gesamtenergiemengen bereitgestellt.

Tabelle 62: Absolute Energieerzeugung im Jahr 2007 durch die in MVA verbrannten Kunststoffe

	HDPE	LDPE	PET	PVC
In MVA energetisch verwertete Kunststoffe	232.234 Mg	516.504 Mg	152.331 Mg	285.330 Mg
Bereitstellung elektrischer Energie	1,02 PJ	2,27 PJ	0,48 PJ	0,57 PJ
Bereitstellung thermischer Energie	2,73 PJ	6,06 PJ	1,28 PJ	1,52 PJ

Durch die Kunststoffverbrennung in Müllverbrennungsanlagen werden Strom und Wärme bereitgestellt, wodurch Energie- und Rohstoffaufwendungen des deutschen Strom- und Fernwärmemixes substituiert werden. Energiemengenspezifische KRA und KEA für Strom und Fernwärme sind in der folgenden Tabelle 63 aufgeführt.

Tabelle 63: Material- und Energieintensitäten des Energie- und Fernwärmemixes Deutschland

Produkt:	Netz\Fernwärme-DE-2010/en	Netz-el-DE-Verbund-HS-2010
KRA [kg/MJ] *	0,029	0,065
KEA [MJ/MJ] **	1,14	2,75

* Eigene Berechnung des KRA in Anlehnung an die Daten aus GEMIS 4.6 [16]

** GEMIS 4.6 [16]

Die absolut eingesparten Stoff- und Energieaufwendungen wurden entsprechend der im Methodikteil separat ausgewiesenen Formel 1.2 berechnet. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 64 zusammengefasst.

Tabelle 64: Rohstoff- und Energieeinsparungen durch die energetische Kunststoffverwertung in der MVA

	HDPE	LDPE	PET	PVC
Rohstoffeinsparung	145.310 Mg	323.179 Mg	68.220 Mg	81.622 Mg
Energieeinsparung	5,91 PJ	13,15 PJ	2,78 PJ	3,31 PJ

Bei der thermischen Verwertung der hier betrachteten Kunststoffarten in MVA wurden durch LDPE aufgrund des hohen Heizwertes und der großen thermisch verwerteten Abfallmenge die größten Energie- und Rohstoffeinsparungen im Jahr 2007 erzielt.

Insgesamt wurden durch die thermische Verwertung von Mischkunststoffen in MVA im Jahr 2007 618.331 Mg Rohstoffe sowie 25,15 PJ Energie eingespart.

Einsatz von Kunststoffabfällen in EBS-Kraftwerken

Wie bei der Ermittlung der Stoff- und Energieeinsparungen durch die energetische Verwertung von Kunststoffen in MVA, wird auch bei der Ermittlung des Beitrages der energetischen Kunststoffverwertung in EBS-Kraftwerken vorgegangen. Aufwendungen für den Transport und die Vorkonditionierung von Kunststoffen zur Nutzung als Brennstoff von 2.800 MJ/Mg, wie sie im folgenden Abschnitt für den Einsatz in Zementkraftwerken berücksichtigt wurden, sind auch hier für die EBS-Aufbereitung angesetzt worden.

Der durchschnittliche Netto-Wirkungsgrad deutscher EBS-Kraftwerke lag nach [96] im Jahr 2007 bei 18,5 % (elektrischer Wirkungsgrad) und 20,5 % (thermischer Wirkungsgrad).

In Tabelle 65 sind die spezifischen Energiemengen, welche sich durch die Verbrennung von Kunststoffen in EBS-Kraftwerken erzielen lassen, zusammengefasst.

Tabelle 65: Durch Verbrennung in EBS-Kraftwerken erzielbare spezifische Energiemengen einzelner Kunststoffe

[MJ/Mg]	HDPE	LDPE	PET
Heizwert	43.000	43.000	31.000
Bereitstellung elektrischer Energie	6.627	6.627	4.407
Bereitstellung thermischer Energie	7.343	7.343	4.883

Unter Berücksichtigung der in EBS-Kraftwerken energetisch verwerteten Kunststoffmengen lassen sich die folgenden Gesamtenergiemengen (elektrisch und thermisch) bereitstellen (Tabelle 66).

Tabelle 66: Absolute Energieerzeugung im Jahr 2007 durch in EBS-Kraftwerken verbrannte Kunststoffe

	HDPE	LDPE	PET
In EBS-KW energetisch verwertete Kunststoffe	33.986 Mg	75.586 Mg	22.292 Mg
Bereitstellung elektrischer Energie	0,23 PJ	0,50 PJ	0,10 PJ
Bereitstellung thermischer Energie	0,25 PJ	0,56 PJ	0,11 PJ

Da entsprechend dem Vorgehen bei der energetischen Verwertung in der MVA von einer Gutschrift des deutschen Strom- und Wärmemixes ausgegangen werden kann, ermitteln sich die in Tabelle 67 angegebenen absoluten Einsparungen an Rohstoff- und Energieaufwendungen. Auch der im vorhergehenden Abschnitt beschriebene Rechenweg wurde hier verwendet.

Tabelle 67: Material- und Energieeinsparungen durch die energetische Kunststoffverwertung in EBS-Kraftwerken

	HDPE	LDPE	PET
Rohstoffeinsparung	21.877 Mg	48.654 Mg	9.542 Mg
Energieeinsparung	0,90 PJ	2,01 PJ	0,39 PJ

Wie bei der Verwertung in MVA werden auch bei der energetischen Verwertung in EBS-Kraftwerken die größten Energie- und Rohstoffeinsparungen durch den Kunststoff LDPE erzielt.

Insgesamt wurden im Jahr 2007 durch die energetische Mischkunststoffverwertung in EBS-Kraftwerken 80.073 Mg Rohstoffe und 3,3 PJ Energie eingespart.

Einsatz von Kunststoffabfällen in Zementwerken

Für die Verwertung von Kunststoffen in Zementwerken ist im Gegensatz zur Verwertung in der MVA eine Aufbereitung der Kunststoffabfälle notwendig. Der Sammlung und dem Transport der Kunststoffabfälle folgt die Sortierung zur Störstoffabtrennung, eine Konditionierung der Brennstoffe und letztendlich die Verbrennung im Zementofen, wodurch Brennstoffe substituiert werden. Beim Vergleich der Einsparung durch den Einsatz der Kunststoffabfälle wird hier die Substitution von Steinkohle betrachtet.

Für den Vergleich mit dem substituierten Brennstoff Steinkohle bleibt der Wirkungsgrad des Zementwerkes unberücksichtigt. Stattdessen wird der KEA- und KRA-Wert für die substituierte Steinkohlemenge berücksichtigt.

Nach Abfrageergebnissen von Heyde und Kremer [95] ist für die Aufbereitung von DSD-Kunststoffen und Sortierresten zum Einsatz in Zementwerken ein Energiebedarf (inkl. Sammlung und Transport) von ca. 2.800 MJ/Mg Kunststoff notwendig. Der Primärenergieaufwand für die Bereitstellung der Steinkohle (inkl. Vorkette) liegt bei etwa 47.877 MJ/Mg [16]. Die Berechnung des KRA der im Zementkraftwerk verwerteten Mischkunststoffe erfolgt wie bei den werk- und rohstofflich verwerteten Mengen über GEMIS-Daten [16] für Diesel und den deutschen Strommix.

Außerdem wurde ein kunststoffspezifischer Substitutionsfaktor der einzelnen Kunststoffe als Teil der Mischkunststoffe berücksichtigt, welcher sich über den jeweiligen Heizwert der Kunststoffe im Verhältnis zum Heizwert von Steinkohle (hier 28.700 MJ/Mg) bestimmt. Die Substitutionsfaktoren sowie die spezifischen und absoluten Einsparungen durch den Einsatz von Mischkunststoffen im Zementwerk sind in Tabelle 68, Tabelle 69, Tabelle 70 und Tabelle 71 für die einzelnen Kunststoffarten aufgeführt.

Tabelle 68: Substitution von Steinkohle durch den Einsatz von energetisch verwertetem HDPE im Zementkraftwerk

	Fabrik Steinkohle-Koks-DE-2010	Misch-kunststoff	spezifische Einsparung (Substitutionsfaktor 1,50)	absolute Einsparung 2007 bei 16.993 Mg HDPE als Misch-kunststoff
Kumulierter Rohstoffaufwand	1,498 Mg/Mg *	0,190 Mg/Mg	2,055 Mg/Mg	34.915 Mg
Kumulierter Energieaufwand	47.877 MJ/Mg **	2.800 MJ/Mg	68.932 MJ/Mg	1,17 PJ

* Eigene Berechnung des KRA in Anlehnung an die Daten aus GEMIS 4.6 [16]

** GEMIS 4.6 [16]

Tabelle 69: Substitution von Steinkohle durch den Einsatz von energetisch verwertetem LDPE im Zementkraftwerk

	Fabrik Steinkohle-Koks-DE-2010	Misch-kunststoff	spezifische Einsparung (Substitutionsfaktor 1,50)	absolute Einsparung 2007 bei 37.793 Mg LDPE als Misch-kunststoff
Kumulierter Rohstoffaufwand	1,498 Mg/Mg *	0,190 Mg/Mg	2,055 Mg/Mg	77.652 Mg
Kumulierter Energieaufwand	47.877 MJ/Mg **	2.800 MJ/Mg	68.932 MJ/Mg	2,61 PJ

* Eigene Berechnung des KRA in Anlehnung an die Daten aus GEMIS 4.6 [16]

** GEMIS 4.6 [16]

Tabelle 70: Substitution von Steinkohle durch den Einsatz von energetisch verwertetem PET im Zementkraftwerk

	Fabrik Steinkohle-Koks-DE-2010	Misch-kunststoff	spezifische Einsparung (Substitutionsfaktor 1,08)	absolute Einsparung 2007 bei 11.146 Mg PET als Mischkunststoff
Kumulierter Rohstoffaufwand	1,498 Mg/Mg *	0,190 Mg/Mg	1,428 Mg/Mg	15.918 Mg
Kumulierter Energieaufwand	47.877 MJ/Mg **	2.800 MJ/Mg	48.914 MJ/Mg	0,55 PJ

* Eigene Berechnung des KRA in Anlehnung an die Daten aus GEMIS 4.6 [16]

** GEMIS 4.6 [16]

Tabelle 71: Substitution von Steinkohle durch den Einsatz von energetisch verwertetem PVC im Zementkraftwerk

	Fabrik Steinkohle-Koks-DE-2010	Misch-kunststoff	spezifische Einsparung (Substitutionsfaktor 0,70)	absolute Einsparung 2007 bei 18.213 Mg PVC als Mischkunststoff
Kumulierter Rohstoffaufwand	1,498 Mg/Mg *	0,190 Mg/Mg	0,854 Mg/Mg	15.551 Mg
Kumulierter Energieaufwand	47.877 MJ/Mg **	2.800 MJ/Mg	30.564 MJ/Mg	0,56 PJ

* Eigene Berechnung des KRA in Anlehnung an die Daten aus GEMIS 4.6 [16]

** GEMIS 4.6 [16]

Insgesamt wurden durch die energetische Verwertung von Mischkunststoffen in Zementkraftwerken im Jahr 2007 144.036 Mg Rohstoffe sowie 4,89 PJ Energie eingespart.

d) Zusammenfassung der Rohstoff- und Energieeinsparungen durch die Verwertung der thermoplastischen Kunststoffe HD-/LDPE, PET und PVC

In Tabelle 72 sind die ermittelten Rohstoff- und Energieeinsparungen durch die werkstoffliche, rohstoffliche und energetische Verwertung der betrachteten Kunststoffe zusammengefasst.

Die Hochrechnung der einzelnen rohstofflichen und energetischen Substitutionseffekte bei der Kunststoffverwertung zeigt insgesamt die größten Energie- und Rohstoffeinsparungen beim LDPE. Hier ist maßgeblich die große verwertete Menge dieser Kunststoffart entscheidend. Mit einer wesentlich geringeren verwerteten Menge, aber dafür einen entscheidenden Vorteil bei der Aufbereitung, sticht PET vor allem mit den Substitutionseffekten bei der werkstofflichen Verwertung heraus. Durch den geringen Energiegehalt und die Zusatzaufwendungen bei der Aufbereitung zeigt PVC nur geringe spezifische Substitutionseffekte, wodurch die gesamte Rohstoff- und Energieeinsparung trotz der relativ großen verwerteten Menge eher gering ausfällt. Hier ist zu beachten, dass gerade beim Haupteinsatzbereich von PVC, dem Baubereich, der Aufbereitungsaufwand unterschiedlicher Bauabfälle aus PVC (z. B. Fenster oder Dachbahnen) sehr verschieden ausfällt und separat betrachtet werden müsste. Hier besteht noch weiterer Bedarf an einer entsprechend detaillierteren Datengrundlage.

Tabelle 72: Gesamtrohstoff- und Energieeinsparungen durch die Verwertung der thermoplastischen Kunststoffe HD-/LDPE sowie PET und PVC im Jahr 2007

	HDPE	LDPE	PET	PVC
Gesamt verwertete Menge	380.376 Mg	801.842 Mg	317.868 Mg	532.184 Mg
Kumulierter Rohstoffaufwand durch die werkstoffliche Verwertung	144.617 Mg	266.427 Mg	312.372 Mg	293.950 Mg
Kumulierter Rohstoffaufwand durch die rohstoffliche Verwertung	7.267 Mg	14.479 Mg	2.254 Mg	-252 Mg
Kumulierter Rohstoffaufwand durch die energetische Verwertung	202.101 Mg	449.485 Mg	93.681 Mg	96.813 Mg
Kumulierter Rohstoffaufwand, gesamt	353.986 Mg	730.391 Mg	408.307 Mg	390.511 Mg
Kumulierter Energieaufwand durch die werkstoffliche Verwertung	4,54 PJ	8,04 PJ	6,29 PJ	7,21 PJ
Kumulierter Energieaufwand durch die rohstoffliche Verwertung	0,63 PJ	1,26 PJ	0,36 PJ	0,06 PJ
Kumulierter Energieaufwand durch die energetische Verwertung	7,99 PJ	17,76 PJ	3,71 PJ	3,86 PJ
Kumulierter Energieaufwand, gesamt	13,15 PJ	27,06 PJ	10,37 PJ	11,14 PJ

Insgesamt wurde durch die Verwertung der in dieser Studie betrachteten thermoplastischen Kunststoffe im Jahr 2007 1,88 Mio. Mg Rohstoffe sowie 61,72 PJ Energie eingespart.

6.3 Wirtschaftliche Bedeutung von Recycling

Die Grundlagen der wirtschaftlichen Bewertung wurden bereits im Abschnitt 6.1.3 erläutert. Nachfolgend wird auf die im Einzelnen betrachteten Materialströme eingegangen.

6.3.1 Bruttokosteneffekte der Verwertung von Eisen und Stahl

Die Stahlschrottpreise werden monatlich für ausgewählte Sorten im EuWid [12] veröffentlicht.

Preise für Rohstahl oder bspw. Walzstahl dürfen aus kartellschutzrechtlichen Gründen nicht veröffentlicht werden und stehen lediglich indiziert zur Verfügung.

Für Warmbreitband, welches das Ausgangsprodukt bspw. für Fahrzeugkarosserien ist, erfolgt eine Veröffentlichung der durchschnittlichen europäischen Preise durch MEPS (International) LTD [19]. Diese europäischen Preise unterscheiden sich nur geringfügig von den deutschen Preisen der Wirtschaftsvereinigung Stahl [20]. Auf der Basis von Indizes, welche durch das Stahlzentrum zur Verfügung gestellt wurden, ist eine überschlägige Berechnung der Preise für benannte Produktgruppe möglich.

In der folgenden Abbildung sind die Stahlschrottpreise frei Stahlwerk (für mengenrelevante Schrottsorten mit großer Preisspanne), Kupolofenschrottpreise frei Gießerei (nur bis September 2008 veröffentlicht) sowie die Preise für Warmbreitband gegenübergestellt. Weiterhin ist der Preisverlauf mit den jährlichen Produktionsmengen und dem entsprechenden Stahlschrottverbrauch hinterlegt.

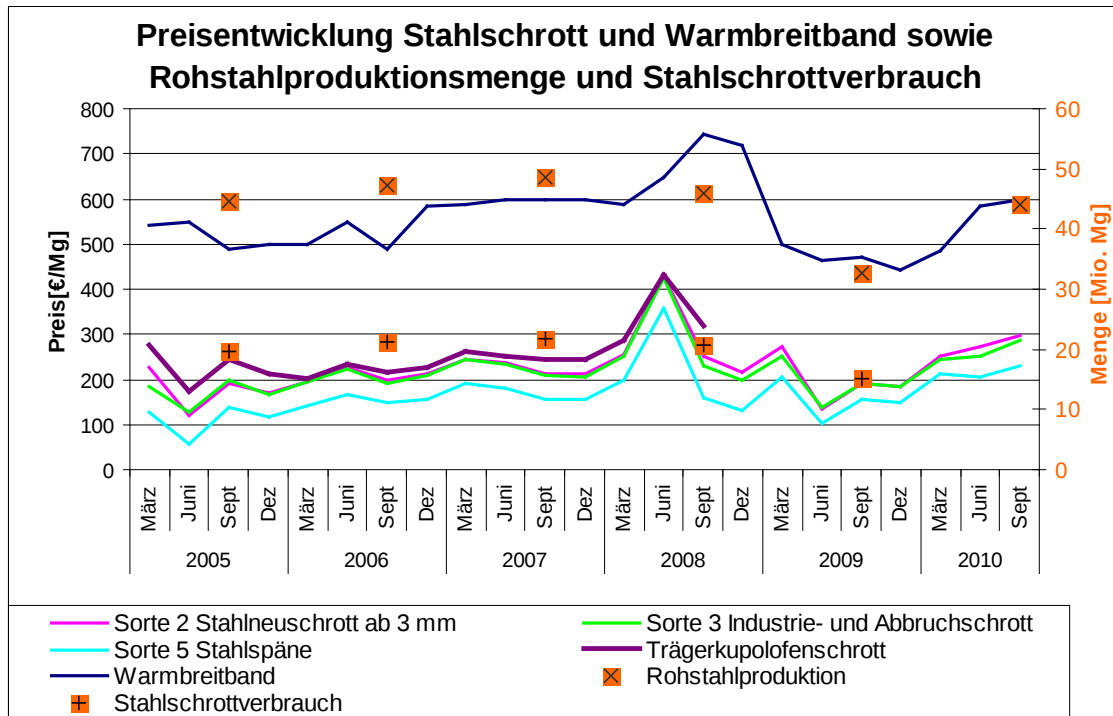


Abbildung 43: Preisentwicklung für Stahlschrott sowie Warmbreitband sowie Produktionsmengen und Stahlschrottverbrauch von 2005 bis 2010 [12, 21]

Der Preis für Warmbreitband liegt durchschnittlich 60 % über dem Schrottpreis für Industrie- und Abbruchschrott. Der Preisunterschied ist, verglichen bspw. mit der Differenz zwischen Kupferschrott- und Rohkupferpreis, deshalb so hoch, da Warmbreitband bereits als Zwischenprodukt zu werten ist und nicht als Ausgangsmaterial für die Produktion. Ein direkter Vergleich zwischen Stahlschrottpreisen und Rohstahlpreisen an einer vergleichbaren Schnittstelle ist nicht möglich.

Die einzelnen Stahlschrottpreise zeigen einen vergleichbaren Verlauf. Vor dem Hintergrund des Einsatzes in die Stahlproduktion unterscheiden sich die Schrottpreise in Abhängigkeit von der Qualität des Schrotts. Stahlspäne liegen im unteren Preissegment, für Trägerkupofofenschrott werden dagegen höhere Preise gezahlt.

Die Auswirkungen der Wirtschaftskrise auf die Stahlproduktion sind im Rückgang der Produktionsmengen von 2008 zu 2009 um ca. 29 % offensichtlich. Entsprechend war auch eine rückläufige Tendenz im Stahlschrottverbrauch um ca. 27 % zu verzeichnen.

Im Jahr 2010 zeigte sich eine Erholung der Branche, so konnte ein Anstieg der Rohstahlproduktion von Januar bis Oktober 2010 im Vergleich zum gleichen Zeitraum des Vorjahres von 41 % registriert werden [21]. Mit dieser Produktionssteigerung verbunden sind der steigende Einsatz von Stahlschrott und die der Nachfrage entsprechende Preisentwicklung.

Für die Betrachtung der wirtschaftlichen Effekte der Stahlschrottverwertung wurden für das Bezugsjahr 2007 die monatlichen durchschnittlichen Schrottpreise (veröffentlicht im EuWid [12]) als jeweiliger Mittelwert einzelner Schrottsorten dem jeweiligen monatlichen Roheisenpreis gegenüber gestellt.

In Bezug auf die Produktionskette, können Stahlschrott und Roheisen in etwa gleich gestellt werden. Eine vollständige Substitution des Roheisens durch Stahlschrott ist allerdings aufgrund bestimmter Qualitätsanforderungen nicht möglich. Die Abbildung 44 stellt die Preisentwicklung verschiedener Stahlschrottsorten denen des Roheisens gegenüber.

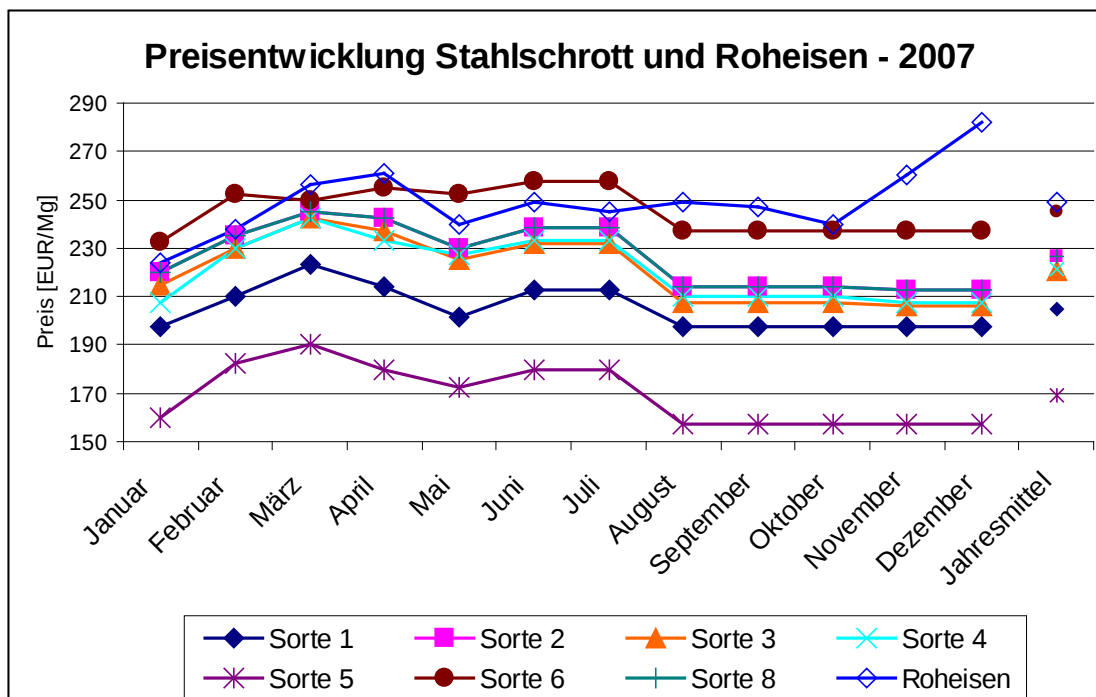


Abbildung 44: Preisentwicklung Stahlschrott und Roheisen 2007

Für den Vergleich wurden Roheisen-Exportpreise (ab russischem Seehafen) [91] herangezogen. Diese Preise lagen im Jahresdurchschnitt ca. 15 % unter den chinesischen Exportpreisen für Roheisen. Innerdeutsche Roheisen-Handelspreise konnten nicht umfassend für das Betrachtungsjahr ermittelt werden.

Die Roheisenpreise bewegten sich bis einschließlich Oktober 2007 im Bereich der Preise für Stahlschrott der Sorte 6 (neuer, leichter Stahlblechschrott). Danach war ein starker Anstieg der Roheisenpreise zu verzeichnen, welcher sich nicht in der Preisentwicklung des Stahlschrotts abzeichnete.

Ausgehend von durchschnittlichen Einsatzmengen einzelner Stahlschrottsorten in der deutschen Stahlindustrie [17] wurde ein gewichteter Durchschnittspreis für Stahlschrott (Sorten, zu denen Preise bekannt sind [12]) ermittelt. Dieser gewichtete Stahlschrottpreis liegt mit 218 €/Mg um 31 € unter dem durchschnittlichen Roheisenpreis des Jahres 2007 von 249 €/Mg (Export vom russischen Hafen).

Durch die 21,74 Mio. Mg Stahlschrott, welche für die Elektrostahl- und Oxygenstahlherstellung im Jahr 2007 in Deutschland eingesetzt wurden, wird nach diesem Ansatz eine theoretische Kostenersparnis durch die Einsparung der Primärrohstoffe von 674 Mio. € erreicht.

Der Gesamtwert der Einsatzstoffe (Roheisen und Stahlschrott) der deutschen Stahlproduktion, bestimmt über die Produktionsmengen und bewertet mit Marktpreisen, lag im Jahr 2007 bei etwa 12,3 Mrd. €. Mit einem Marktwert des Stahlschrotts von 4,74 Mrd. € macht dieser knapp 39 % des Gesamtwerts aus. Ohne den Einsatz des Stahlschrotts würde der theoretische Gesamtwert der Stahlproduktion etwa 5,5 % höher liegen.

Entsprechend den Angaben der Wirtschaftsvereinigung Stahl [133] lagen die Gesamtumsatzerlöse der deutschen Stahlindustrie 2007 bei 48,4 Mrd. €.

6.3.2 Bruttokosteneffekte der Verwertung von Kupfer

Nach dem Einbruch der Preise gegen Ende 2008, ist ein nahezu kontinuierlicher Anstieg der Kupferpreise zu verzeichnen. Die Kupfer- und Kupferschrottpreise zeigen eine vergleichbare Entwicklung.

Die Preise für drei ausgewählte Kupferschrotte sowie Rohkupfer sind im monatlichen Verlauf von 2005 bis 2010 in Abbildung 43 dargestellt. Hierfür wurden die Mittelwerte der im EuWid [12] veröffentlichten Preisspannen herangezogen.

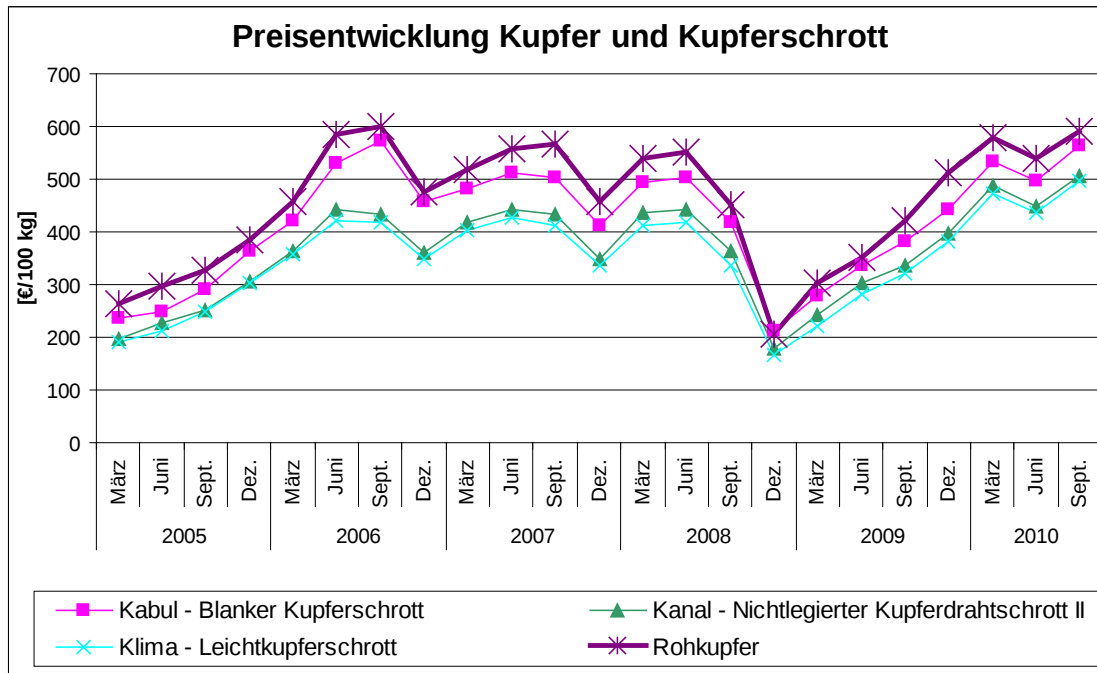


Abbildung 45: Preisentwicklung Kupfer und Kupferschrott 2005 bis 2010 [12]

Blanker Kupferschrott ist aufgrund seiner relativ hohen Qualität den Kupferrohstoffpreisen am nächsten (Durchschnitt im Betrachtungszeitraum: ca. 92 % des Rohstoffpreises).

Vor dem Hintergrund der zunehmenden Technisierung und dem damit verbundenen steigenden Kupferbedarf sowie der Verknappung auf dem Rohstoffmarkt, ist mit einem weiterhin hohen Preis für Kupfer und Kupferschrott zu rechnen. Wobei der Sekundärhandel meldet, dass aufgrund der hohen Preise der Handel mit Kupferschrott eher schleppend erfolgt [60].

Durch den Vergleich der Marktpreise für Kupfer und Kupferschrott in Verbindung mit den Kupfermengen lässt sich die monetäre Einsparung durch den Einsatz von Kupferschrott ableiten.

Im Finanzsektor werden die Preise für Kupferschrott klassifiziert für verschiedene Qualitäten angegeben. Hierbei wird zwischen 13 Qualitäten unterschieden.

Im EuWid werden wöchentlich die Großhandelsankaufpreise frei Lager für sieben Kupferqualitäten in Preisspannen veröffentlicht [12].

Im Jahr 2007 unterlagen die Kupferschrottpreise starken Schwankungen. Abbildung 46 stellt für das Jahr 2007 den Preisverlauf für ausgewählte Kupferschrotte im Vergleich zum Kupferpreis dar.

In Abhängigkeit von den Qualitäten differieren die mittleren Preise um durchschnittlich ca. 840 €/Mg.

Eine Projizierung der Mengenverteilung auf die verschiedenen Kupferqualitäten und -preise ist nicht möglich, da diesbezügliche Angaben nicht veröffentlicht sind. Aus diesem Grund musste vom Durchschnittspreis der obigen Sortenpreise bei der Berechnung der Kosteneinsparung ausgegangen werden. Im Jahresdurchschnitt lag der Marktwert für Kupferschrott bei 4.315,00 €/Mg. Dieser steht dem mittleren Jahrespreis für Kupfer von 5.241,87 €/Mg gegenüber. Die Preisdifferenz beträgt 926,87 €/Mg. Bezogen auf die Sekundärkupfer- und Kupferschrottmenge von 894.000 Mg, welche im Jahr 2007 eingesetzt wurde, ergibt sich eine finanzielle Einsparung von 828 Mio. €.

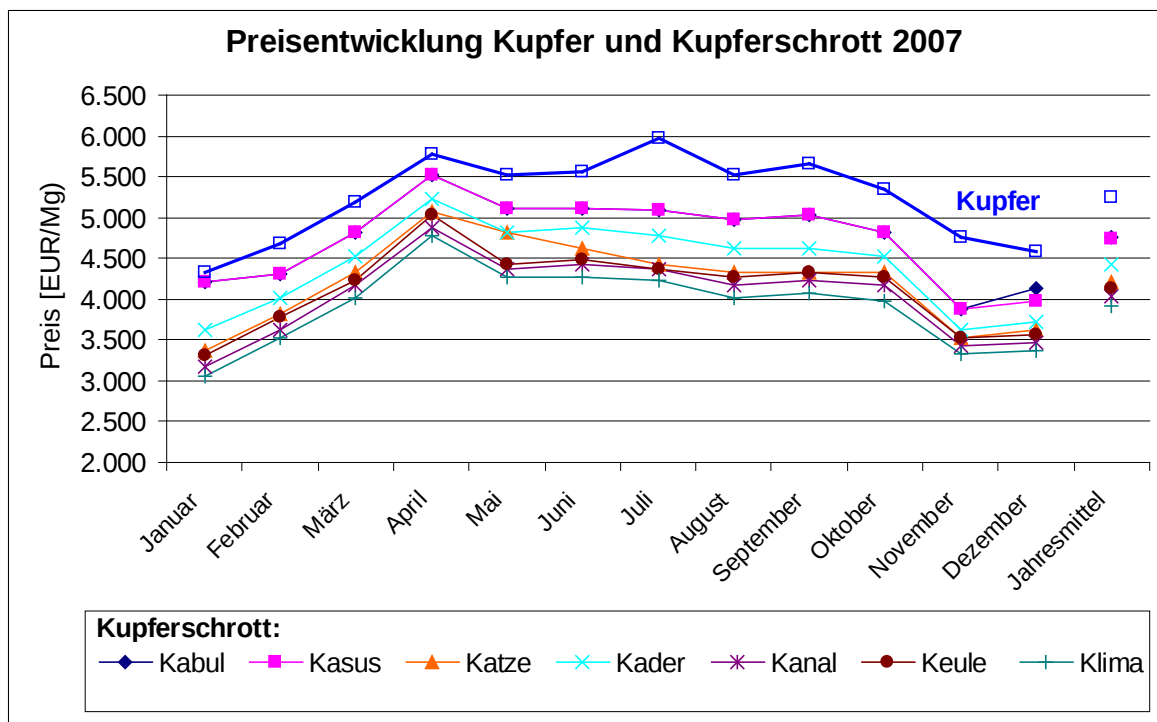


Abbildung 46: Preisentwicklung Kupfer und Kupferschrott 2007

Der Gesamtwert des im Jahr 2007 hergestellten Kupfers lässt sich über die Stoffstromdaten und die hier dargestellten Marktpreise bestimmen. Mit den Kupfermengen, wie unter Abschnitt 6.2.2 aufgeführt, ergibt sich ein Gesamtwert von ~9,4 Mrd. €. Die Kupferschrottmenge macht mit 3,86 Mrd. € einen Anteil von 41 % aus. Ohne den Einsatz des Kupferschrotts würde der theoretische Gesamtwert des Kupfereinsatzes etwa 8,8 % höher liegen.

Nach Angabe der Wirtschaftsvereinigung Metalle [3] lag der Gesamtumsatz der deutschen Kupferindustrie, bezogen auf die Erzeugung und die erste Verarbeitung des Metalls, im Jahr 2007 bei 14,7 Mrd. €.

6.3.3 Wirtschaftliche Bewertung der Verwertung von Gold

Der Goldpreis ist stark von Angebot und Nachfrage abhängig, wobei letztere in enger Beziehung zur Prognose der weltweiten Konjunkturentwicklung steht. Die Entwicklung des Industriepreises für Gold im Laufe des Jahres 2007 [12] zeigt Abbildung 47. Der über die stark schwankenden Monatsmittelwerte ermittelte Goldpreis für das Jahr 2007 liegt bei ~17.000 €/kg und für verarbeitetes Gold bei ~18.000 €/kg¹¹.

Die Industriepreise liegen noch über den Goldankaufspreisen der Banken oder Scheideanstalten. Es erfolgt keine getrennte Darstellung der Preise für Primär- und Sekundärgold, wie es auch keine Angaben über ein Mengenverhältnis dieser Rohstoffe gibt.

Eine Berechnung der Bruttokosteneffekte nach der Methodik aus Abschnitt 6.1.3 ist auf dieser Basis nicht möglich. Bei einer Bewertung der 80,4 Mg durch das Recycling bereitgestellten Goldmenge im Jahr 2007 mit dem mittleren Industriepreis ergibt sich ein Gesamtvolumen von 1,367 Mrd. €. Zu den Industriepreisen aus dem September 2011 [12] sind dies sogar bis zu 3,75 Mrd. €. Ohne die inländische Recyclinginfrastruktur würde ein Großteil der damit verbundenen Wertschöpfung im Ausland stattfinden.

¹¹ Goldpreis zum 15.09.2011 [12]: Gold: 44.520 €/kg; Gold, verarbeitet: 46.640 €/kg

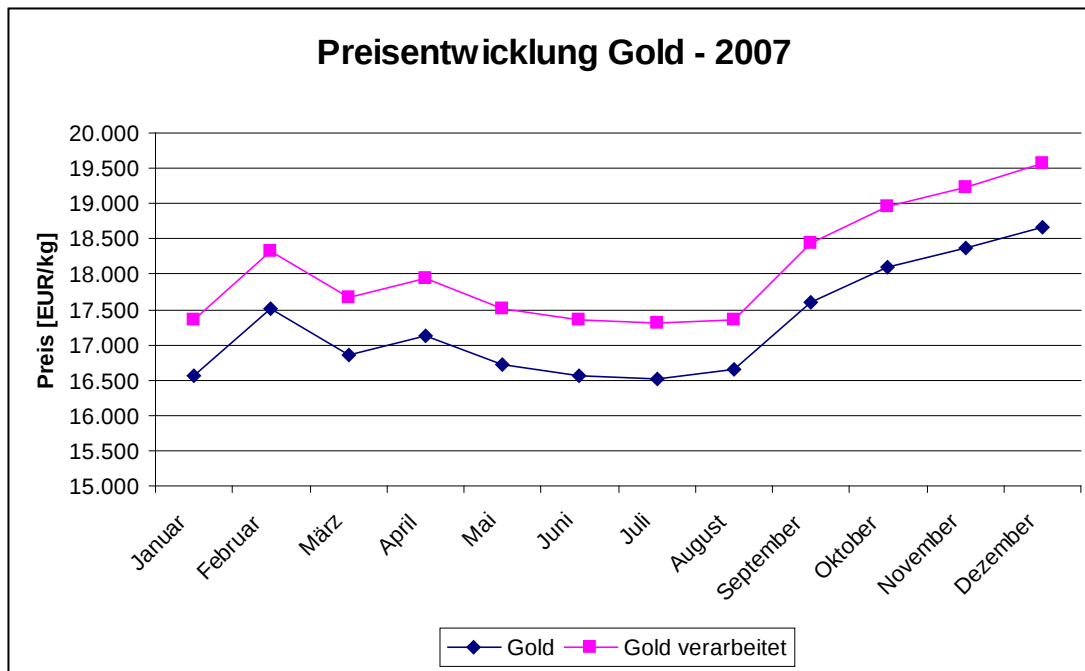


Abbildung 47: Preisentwicklung Gold 2007

6.3.4 Bruttokosteneffekte der Verwertung von thermoplastischen Kunststoffen am Beispiel von HD-/LDPE, PET und PVC

a) Werkstoffliche Verwertung

Nachfolgend soll ein erster Überblick zum Verhalten der Marktpreise von Primär- und Sekundärkunststoffen der hier betrachteten Kunststoffarten gegeben werden. Aus den Marktberichten des Europäischen Wirtschaftsdienstes [88] wurden quartalsweise Marktpreise von 2005 bis 2010 ermittelt. Bei den Sekundärkunststoffen ist eine Differenzierung zwischen Produktions- und Post-Consumer-Abfällen möglich. Neben dieser Auswertung sind auch die von Plasticker [89] veröffentlichten Marktpreise für die Kunststoffarten je nach Behandlungsstufe (Granulat, Mahlgut und Ballenware) aufgeführt. Aufgrund der Datenverfügbarkeit sind die durch die Plasticker-Rohstoffbörse [89] veröffentlichten Marktpreise erst ab Mitte 2007 dargestellt (Abbildung 49, Abbildung 51, Abbildung 53 und Abbildung 55). Für die Kunststoffabfälle nach EuWid [88] sind die Verbringungsarten durch B für Ballenware und M für Mahlgut mit aufgeführt.

Marktpreis HDPE

Der Kunststoff HDPE wird überwiegend für Hohlkörper im Verpackungsbereich eingesetzt. In Abbildung 48 sind Marktpreise für formstabile Primär- und Sekundärwaren aus HDPE zusammengefasst.

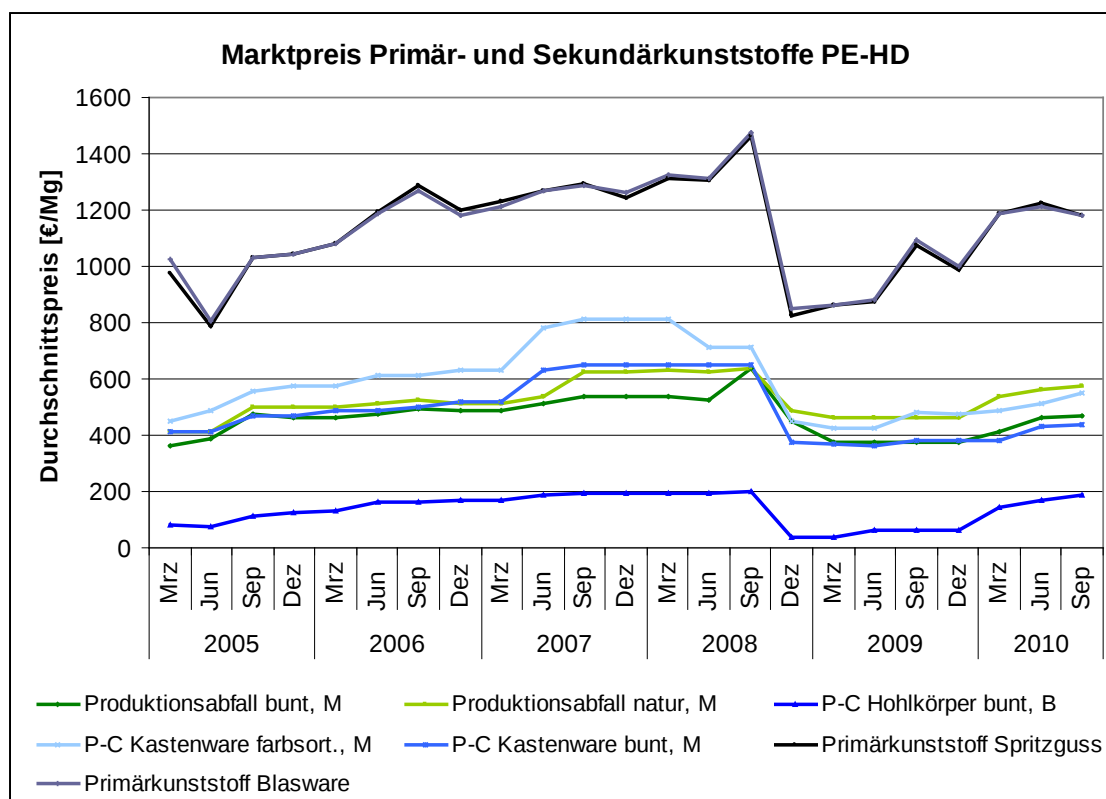


Abbildung 48: Marktpreise für HDPE Primär- und Sekundärkunststoffe nach [88]

Für HDPE-Primärkunststoffe sind in den Marktberichten des EuWid [88] Angaben für Spritzguss und Blasware angeführt. Beide unterscheiden sich kaum voneinander. Wie sich zeigt, verhalten sich die Preise für Produktionsabfall und Kastenware ähnlich. Den geringsten Marktpreis erzielen bunte Hohlkörper als Post-Consumer-Abfälle. Preise für HDPE-Sekundärkunststoffe in Form von Ballenware, Mahlgut und Granulat zeigt Abbildung 49. Die Preisschwankungen zeigen hier einen insgesamt leicht ansteigenden Trend.

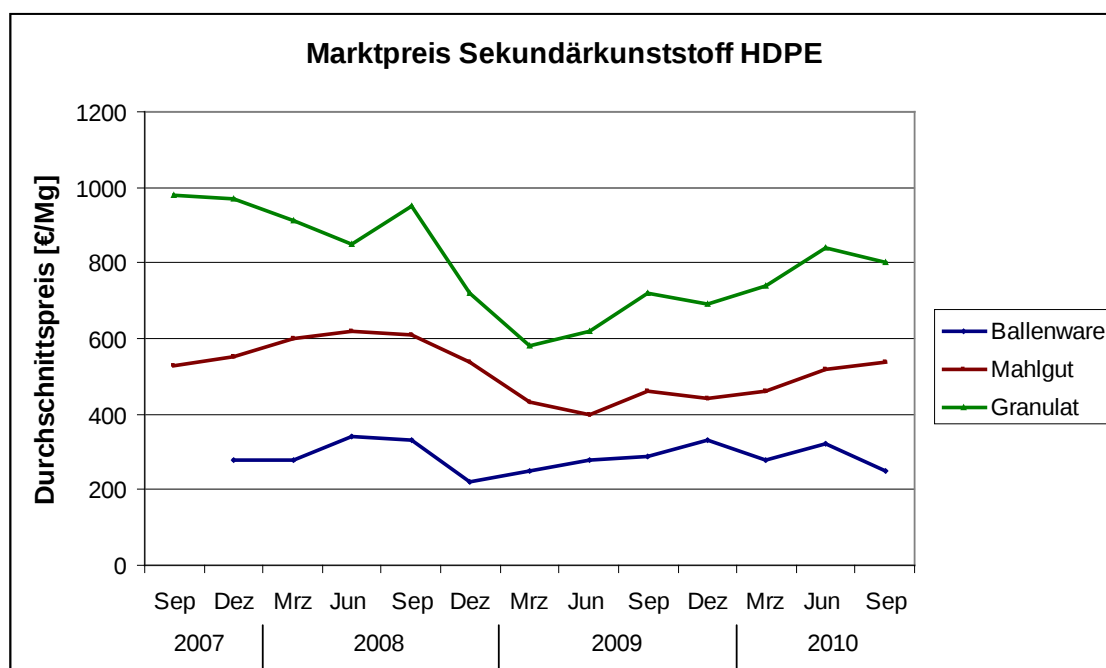


Abbildung 49: Marktpreise für HDPE Sekundärkunststoffe nach [89]

Marktpreis LDPE

Für LDPE wurden Marktpreise für den Haupteinsatzzweck, die Folien, in Form von Primärware sowie Produktions- und Post-Consumer-Abfall betrachtet. Die Datengrundlage der Marktpreise für formstabile LDPE-Kunststoffe war für eine Darstellung nicht ausreichend. Als Marktpreise für Post-Consumer-Abfälle wurden Angaben zu LDPE-Schrumpfhäuben herangezogen. Abbildung 50 zeigt die Marktpreise für unterschiedliche LDPE-Kunststoffe. Die Sekundärkunststoffe des LDPE unterscheiden sich weniger nach Produktions- und Post-Consumer-Abfall, als vielmehr nach farblosem und farbigem Material. Die Unterschiede der Primärkunststoffpreise für LD und LLD-Folie sind eher gering.

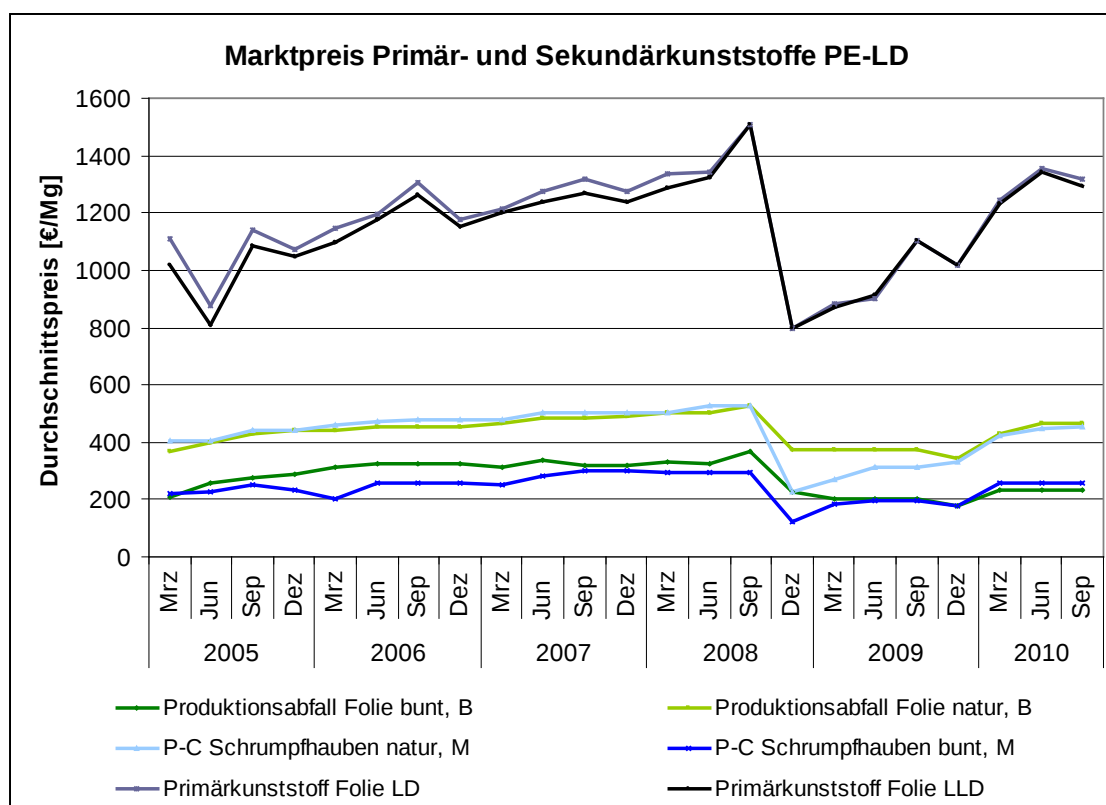


Abbildung 50: Marktpreise für PE-LD Primär- und Sekundärkunststoffe nach [88]

Abbildung 51 stellt die Abhängigkeit der Sekundärkunststoffpreise vom Aufbereitungszustand des Materials dar.

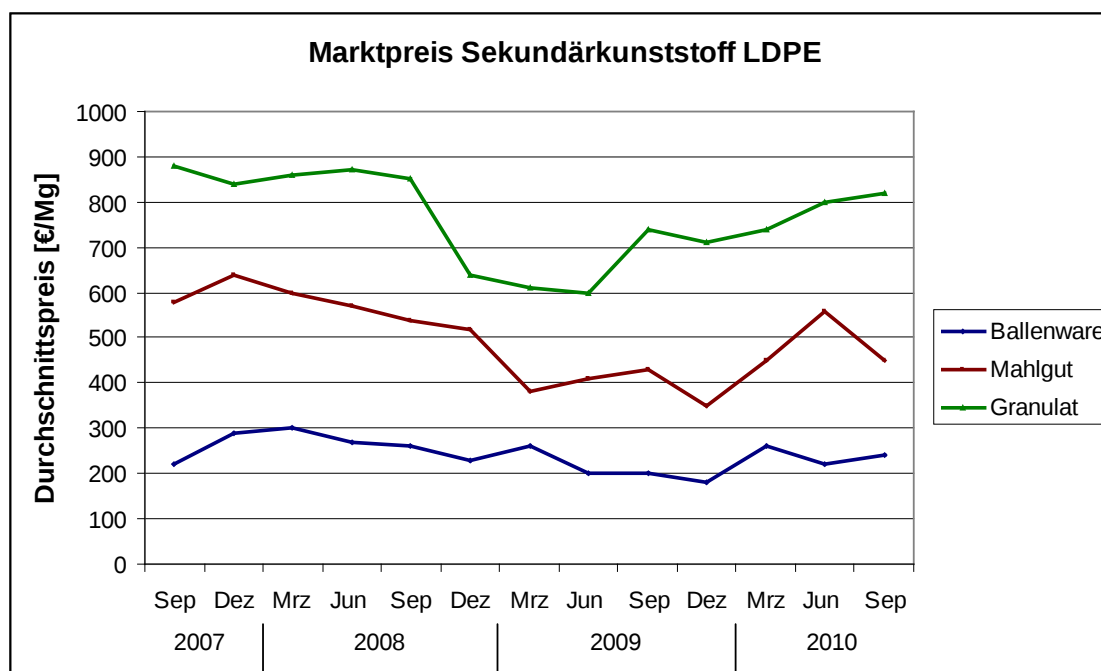


Abbildung 51: Marktpreise für LDPE-Sekundärkunststoffe nach [89]

Marktpreis PET

Die Marktpreise für PET-Kunststoffe sind im EuWid [88] gesondert aufgeführt. Für Produktionsabfälle liegen keine Marktpreise vor. Der Preisunterschied für Primär- und Sekundärwaren, wie auch für klare und bunte PET-Einwegflaschen zeigt sich für den betrachteten Zeitraum relativ konstant (Abbildung 52).

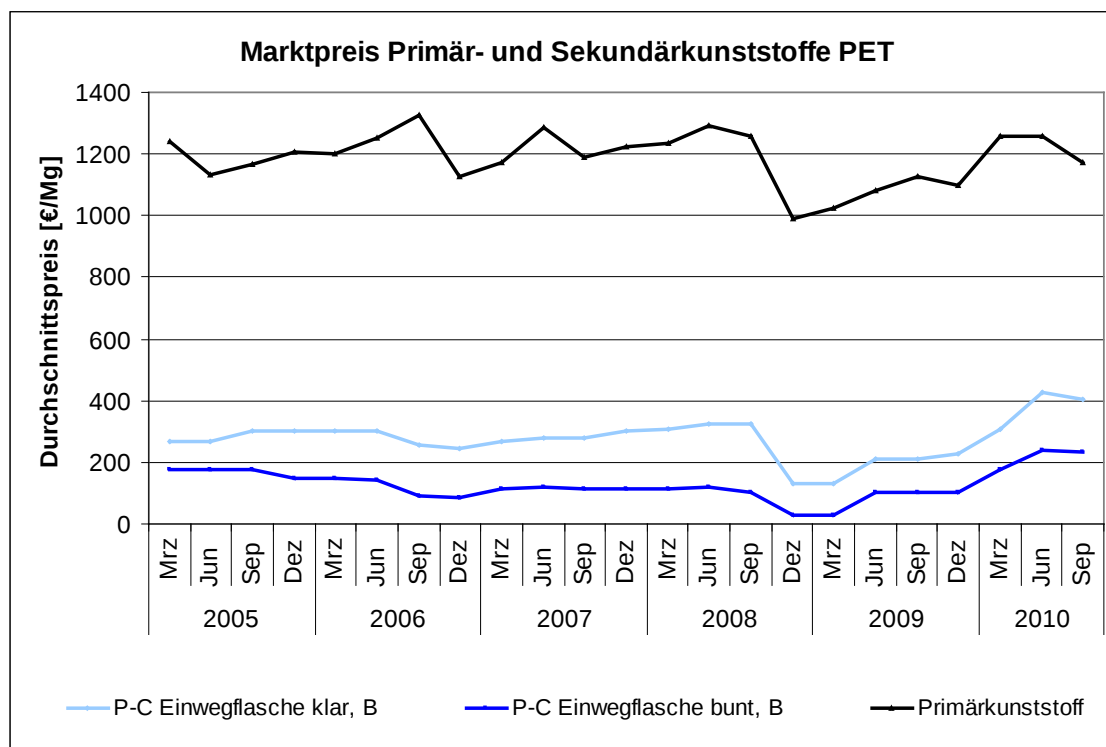


Abbildung 52: Marktpreise für PET Primär- und Sekundärkunststoffe nach [88]

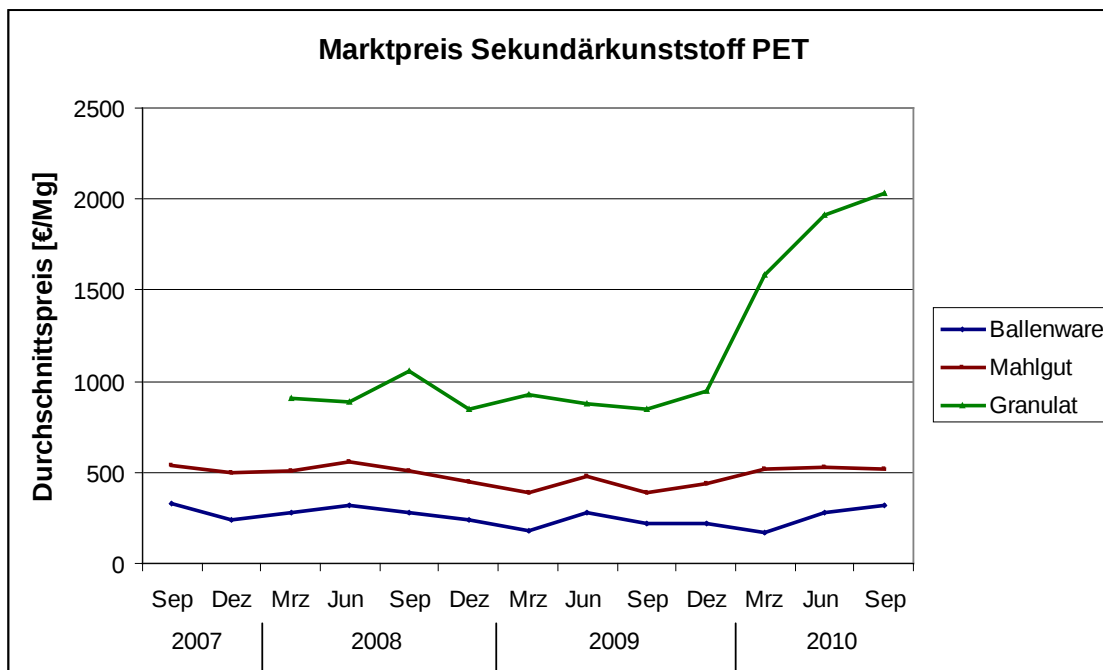


Abbildung 53: Marktpreise für PET Sekundärkunststoffe nach [89]

Abbildung 53 zeigt ab dem Jahr 2010 einen Preisanstieg für PET-Granulat um 50 %, der sich ab Mitte 2010 rasant fortsetzt. Die Marktpreise für PET-Granulat sind somit im September 2010 fast doppelt so hoch wie im Vorjahresmonat. Diese Entwicklung hängt damit zusammen, dass PET 2010 in Europa sehr knapp war [90].

Marktpreis PVC

Der Kunststoff PVC wird überwiegend im Baubereich eingesetzt. Dort wird PVC zu einem großen Anteil zu Fenstern und Rohren verarbeitet. Nachfolgend sind die Marktpreise für unterschiedliche Primär- und Sekundärkunststoffe aus Hart- und Weich-PVC aufgeführt.

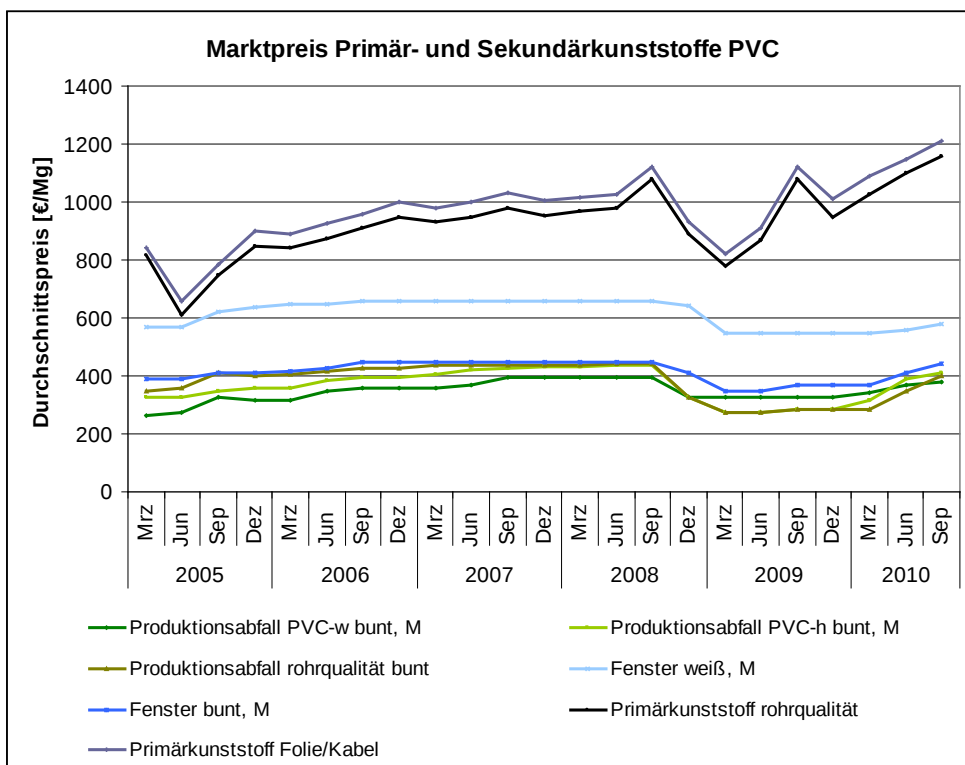


Abbildung 54: Marktpreise für PVC Primär- und Sekundärkunststoffe nach [88]

Die Abbildung 54 zeigt, dass weißes Material, wie das der Fenster, als hochwertiger Sekundärkunststoff einen höheren Marktwert hat als bunte Produktions- und Post-Consumer-Abfälle.

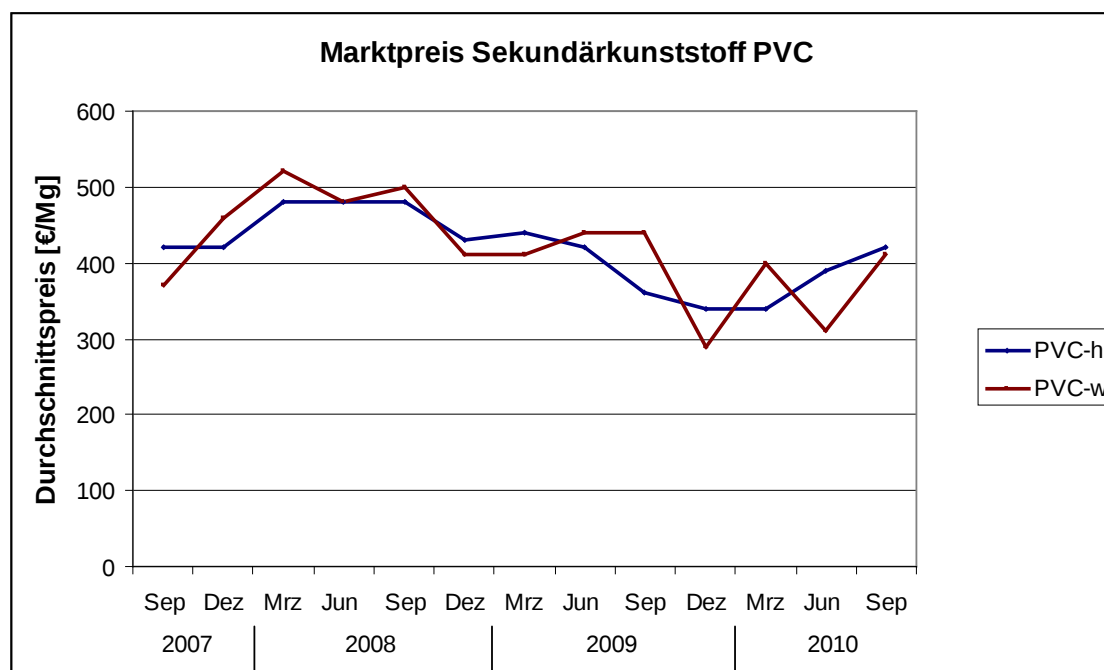


Abbildung 55: Marktpreise für PVC Sekundärkunststoffe nach [89]

Abbildung 55 zufolge liegen die Marktpreise für Hart- und Weich-PVC etwa in einer Größenordnung.

Bruttokosteneffekte durch hochwertiges Kunststoffrecycling

Um den monetären Gewinn des hochwertigen Kunststoffrecyclings darzustellen, wurden Marktpreise für Primär- und Sekundärkunststoffe verglichen. Dabei wurde vorrangig Material mit Kunststoffrohstoffqualität betrachtet, was bedeutet, dass bei den Sekundärkunststoffen Marktpreise für aufbereitetes Granulat (HD- und LDPE) sowie Mahlgut (PET und PVC) betrachtet wurden. Marktpreise für Regranulat und Mahlgut werden durch die Plasticker-Rohstoffbörse [89] veröffentlicht. Der daraus berechnete Preisspiegel wird monatlich in den bvse-Marktberichten veröffentlicht [89]. Darin enthalten ist auch der Preisspiegel für Primärkunststoffe, welcher auf Daten der Quelle EuWid [88] basiert. Für die weiteren Betrachtungen wurden die im bvse-Marktbericht veröffentlichten Marktpreise durch Plasticker für Sekundärkunststoffe und durch EuWid für Primärkunststoffe verwendet.

Entsprechend dem Bezugsjahr 2007 wurden die Marktberichte für die einzelnen Monate ausgewertet. Für die Sekundärkunststoffe lagen nicht für jeden Monat Preisangaben der betrachteten Materialqualitäten HD- und LDPE-Granulat, PET-Mahlgut sowie weich- und hart-PVC-Mahlgut vor. So wurde der Jahresdurchschnittspreis für HD- und LDPE-Kunststoffe jeweils über 9 Monatsmittelwerte und für PET und PVC jeweils über 7 Monatsmittelwerte bestimmt. Da sich die Preisangaben für weich- und hart-PVC kaum unterschieden (weich-PVC 410,00 €/Mg Mahlgut, hart-PVC 408,57 €/Mg Mahlgut) und keine getrennte Materialstrombetrachtung für diese beiden PVC-Kunststoffarten erfolgt ist, wurde hier ein mittlerer Wert von 409 €/Mg PVC-Mahlgut verwendet.

Für die Primärkunststoffe sind im ausgewerteten Marktbericht Preise für Kunststoffe unterschiedlicher Qualität enthalten. Für HDPE liegen Angaben für Spritzguss und Blasware vor, für LDPE für LD- und LLD-Folien, für PVC für Rohrqualität, sowie Folien und Kabel. Für PET-Kunststoffe liegen nur Angaben für Verpackungs-PET vor. Für die einzelnen Monate sind jeweils Preisspannen angegeben. Daraus wurden Monatsmittelwerte (ungewichtet) gebildet und zu Jahresmittelwerten hochgerechnet. Es lagen Angaben für alle Monate vor. Da keine

Angaben zum Einsatz der einzelnen Kunststoffqualitäten ausgewertet wurden, wurden mittlere Werte aus den einzelnen Preisangaben für eine Kunststoffart ermittelt.

In der folgenden Tabelle 73 sind die Marktpreise für Primär- und Sekundärkunststoffe und die monetären Einsparungen bei der hochwertigen werkstofflichen Verwertung von Kunststoffabfällen für einzelne Kunststoffarten dargestellt.

Tabelle 73: Monetärer Effekt durch den Einsatz von hochwertig verwerteten Sekundärkunststoffen zur Primärkunststoffsubstitution

	HDPE	LDPE	PET	PVC
substituierter Primärkunststoffpreis	1.252 €/Mg	1.247 €/Mg	1.270 €/Mg	976 €/Mg
Sekundärkunststoffpreis	931 €/Mg	827 €/Mg	516 €/Mg	409 €/Mg
spezifische Einsparung	321 €/Mg	420 €/Mg	754 €/Mg	567 €/Mg
Sekundärkunststoffmenge	63.748 Mg	105.282 Mg	60.491 Mg	169.507 Mg
absolute Einsparung	20,463 Mio. €	44,218 Mio. €	45,610 Mio. €	96,111 Mio. €

In Auswertung der Tabelle zeigt sich, dass die höchsten spezifischen Einsparungen beim PET vorliegen. Auch beim PVC wurden hohe Einsparungen basierend auf der Auswertung von Mahlgutpreisen ermittelt. Als Mahlgüter werden zumeist Produktionsabfälle gehandelt, welche einen Großteil der hochwertig stofflich verwerteten PVC-Abfälle ausmachen. Wird dagegen Mahlgut zu Regranulat weiter aufbereitet, steigen auch die Sekundärkunststoffpreise. Erfahrungswerte aus einer Expertenbefragung zu den rein „technischen Kosten“ für diesen zusätzlichen Aufbereitungsschritt liegen zwischen 100 und 150 €/Mg. Des Weiteren sind hier noch betriebswirtschaftlich bedingte Aufschläge zu berücksichtigen. Damit würden sich spezifische und absolute Einsparung entsprechend verringern.

Eine separate Betrachtung der als Mahlgut bzw. Regranulat stofflich genutzten Kunststoffe ist mit der verfügbaren Datenbasis nicht möglich. Bei einer getrennten Darstellung der Mengen durch die Stoffstromdaten, sind die entsprechenden Sekundärkunststoffmengen auch getrennt zu bewerten. Für alle betrachteten Kunststoffarten wurden unter Maßgabe der vorstehend dargestellten Abschätzungen im Jahr 2007 monetäre Einsparungen von insgesamt 206,402 Mio. € erzielt.

Für die einzelnen Kunststoffe lässt sich der theoretische Gesamtwert der verarbeiteten Kunststoffe über die zurückfließenden Sekundärkunststoffmengen in Differenz zur verarbeiteten Menge und die entsprechende Bewertung durch die Marktpreise bestimmen.

Für HDPE ergibt sich so beispielsweise bei einer verarbeiteten Menge von 1.380.000 Mg, in die 63.748 Mg sekundäres HDPE einfließen, ein Gesamtwert von ~1,71 Mrd. €. Der Anteil der HDPE-Sekundärkunststoffe liegt bei knapp 4 %. Ohne die Einsparung durch den Einsatz der Sekundärkunststoffe würde ein wirtschaftlicher Mehraufwand von 1,2 % höher liegen.

Beim LDPE liegt der Gesamtwert bei 2,26 Mrd. € und der Anteil der LDPE-Sekundärkunststoffe macht knapp 4 % aus. Ohne die Sekundärkunststoffe würde der Gesamtwert knapp 2 % höher liegen.

Der Gesamtwert der verarbeiteten PET-Kunststoffe liegt bei 0,59 Mrd. € mit einem Anteil der PET-Sekundärkunststoffe von über 5 %. Ohne die Einsparung durch die Sekundärkunststoffe würde der Gesamtwert um 7,7 % steigen.

Ein Gesamtwert von 1,72 Mrd. € ergibt sich für die in Deutschland verarbeiteten PVC-Kunststoffe. Davon macht der Anteil der Sekundärkunststoffe 4 % aus, ohne die Einsparung durch die Sekundärkunststoffe würde der theoretische Gesamtwert 5,6 % höher liegen.

Nach Plastics Europe betrug der Umsatz der gesamten Kunststoffindustrie im Jahr 2007 im Inland 9,3 Mrd. € [134].

Bruttokosteneffekte durch die werkstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen

Für die Abgabe von Mischkunststoffen zur werkstofflichen Verwertung lässt sich nicht wie bei den sortenreinen Kunststoffen ein Erlös erzielen. Hier sind Zuzahlungen notwendig, welche allerdings durch die Abfallgebühr bzw. die Verwertungsgebühr über den „grünen Punkt“, die der Bürger zahlt, bereits beglichen sein sollten. Damit ist hier rein der Marktwert für die substituierten Beton- und Holzprodukte zu betrachten.

Für eine Abschätzung des wirtschaftlichen Effekts der werkstofflichen Verwertung von Mischkunststoffen wurden Preislisten unterschiedlicher Unternehmen für Beton unterschiedlicher Qualität ausgewertet. Hier zeigten sich Preisunterschiede zwischen 50 und 60 €/Mg Betonrohware. Preise für unterschiedliche Bauholzarten für den Außenbereich liegen derzeit etwa zwischen 60 und 90 €/Mg. In Verbindung mit den Substitutionsfaktoren der Kunststoffe 2,6 bis 5,6 für Betonprodukte und von 0,75 für Holz ergeben sich für substituierte Betonprodukte Einsparungen zwischen 143 und 308 €/Mg Mischkunststoff bzw. für substituierte Holzprodukte von etwa 55 €/Mg Mischkunststoff. Da wie bei der Ermittlung der Rohstoff- und Energieeinsparungen durch die werkstofflich verwerteten Mischkunststoffen keine Angaben zur substituierten Materialart (substituierte Menge Holz oder Beton) gemacht werden können, wird nachfolgend mit einem mittleren spezifischen monetären Substitutionswert für die Mischkunststoffverwertung von 140 €/Mg gerechnet.

In Tabelle 74 sind die absoluten Substitutionseffekte der werkstofflich verwerteten Mischkunststoffe zusammenfassend aufgeführt. Insgesamt ergeben sich durch die werkstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen im Jahr 2007 Einsparungen in Höhe von 24,682 Mio. €.

Tabelle 74: Absolute monetäre Einsparung durch werkstofflich verwertete Mischkunststoffe

	absolute Einsparung 2007 bei 19.868 Mg HDPE als Mischkunststoff	absolute Einsparung 2007 bei 39.689 Mg LDPE als Mischkunststoff	absolute Einsparung 2007 bei 60.567 Mg PET als Mischkunststoff	absolute Einsparung 2007 bei 56.182 Mg PVC als Mischkunststoff
Einsparung	2,782 Mio. €	5,556 Mio. €	8,479 Mio. €	7,865 Mio. €

b) Rohstoffliche Verwertung

Wie bei der werkstofflichen Verwertung von Mischkunststoffen ist auch für die rohstoffliche Verwertung der Mischkunststoffe eine Zuzahlung notwendig. Ebenfalls wie bei den werkstofflich verwerteten Mischkunststoffen wird hier nur der Marktwert des substituierten Produkts (hier Schweröl) betrachtet.

Eine Auswertung der Statistiken des Statistischen Bundesamtes Deutschland [107] zu den Erzeugerpreisen für schweres Heizöl für das Jahr 2007 zeigt, abhängig von der Art der Lieferung, Preise zwischen 276,26 €/Mg und 288,64 €/Mg. Für die weitere Betrachtung zu den wirtschaftlichen Substitutionseffekten durch die Kunststoffverwertung wird mit einem mittleren Preis von 282,46 €/Mg gerechnet.

Die durch die Kunststoffe substituierte Energiemenge, welche nicht durch Schweröl aufgebracht werden muss, lässt sich durch einen Heizwertvergleich der einzelnen Kunststoffarten mit Schweröl ermitteln. Als spezifische Substitutionsfaktoren wurde, wie im Abschnitt zu den rohstofflichen und energetischen Substitutionseffekten der rohstofflichen Verwertung, 1,14 für PE, 0,82 für PET und 0,53 für PVC angesetzt. Damit ermittelt sich eine spezifische Einsparung durch PE von 322,00 €/Mg, für PET von 231,62 €/Mg und für PVC von 149,70 €/Mg.

Die folgende Tabelle zeigt, über das substituierte Schweröl ermittelt, die absoluten Substitutionseffekte für die im Hochofen rohstofflich verwerteten Mischkunststoffe, anteilig für die einzelnen Kunststoffarten.

Tabelle 75: Absolute monetäre Einsparung durch rohstofflich verwertete Mischkunststoffe

	absolute Einsparung 2007 bei 13.546 Mg HDPE als Mischkunststoff	absolute Einsparung 2007 bei 26.988 Mg LDPE als Mischkunststoff	absolute Einsparung 2007 bei 11.042 Mg PET als Mischkunststoff	absolute Einsparung 2007 bei 2.952 Mg PVC als Mischkunststoff
Einsparung	4,362 Mio. €	8,690 Mio. €	2,558 Mio. €	0,442 Mio. €

Insgesamt wurden im Jahr 2007 durch die rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen Einsparungen in Höhe von 16,052 Mio. € erzielt.

c) Energetische Verwertung

Wie in Abschnitt 4.1 zu den rohstofflichen und energetischen Substitutionswirkungen der energetisch verwerteten Kunststoffe, erfolgt hier die getrennte Betrachtung der in MVA, EBS-Kraftwerken und Zementkraftwerken verwerteten Kunststoffmengen.

Bruttokosteneffekte durch die energetische Verwertung von Kunststoffen in MVA

Durch die energetische Verwertung von Kunststoffen in MVA lassen sich elektrische und thermische Energie gewinnen, durch welche Strom und Fernwärme substituiert wird. Über die Heizwerte der Kunststoffe und die Wirkungsgrade deutscher Müllverbrennungsanlagen lässt sich die durch Verbrennung in MVA erzielbare spezifische Energiemenge der einzelnen Kunststoffe ermitteln (siehe Tabelle 61, S. 98). Mit dieser spezifischen Energiemenge und der Menge der in MVA eingesetzten Kunststoffe lässt sich die durch Kunststoffverbrennung in MVA im Jahr 2007 absolute erzeugte Energiemenge bestimmen (siehe Tabelle 62, S. 98).

Die durch VDEW [108] angegebenen Nettostrompreise nach VEA (Bundesverband für Energie-Abnehmer) für Deutschland liegen für Haushalte (Jahresverbrauch 3.500 kWh) bei 121,80 €/MWh und für die Industrie (Abnahme von 100 kW/1.600 h bis 4.000 kW/5.000 h) von 92,90 €/MWh. Werden diesen Preisen die angegebenen Steuerangaben zugeschlagen, liegen die so bestimmten Gesamtstrompreise in der Größenordnung der Strompreiserhebungen (inkl. Steuer) des Statistischen Bundesamtes [109]. Im Folgenden werden die Nettostrompreise des VDEW verwendet. Nach den von der BWK [110] veröffentlichten Daten zum Endenergieverbrauch in Deutschland (Stand 2007), verbrauchen Haushalte etwa 26 % der Endenergie, die restlichen 74 % entfallen auf Industrie, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Verkehr. Entsprechend dieser Aufteilung nach Haushalten und industriellen Abnehmern ergibt sich ein mittlerer Strompreis von 100,41 €/MWh bzw. 0,0279 €/MJ.

Als Preisangabe für Fernwärme wurde aus der Fernwärme-Preisübersicht des AGFW [111] der Netto-Mischpreis für Deutschland (2007) von 59,50 €/MWh (Abnahmefall 160 kW in 1.800 h/a) herangezogen. Das entspricht einem Fernwärmepreis von 0,0165 €/MJ.

In Verbindung dieser spezifischen Preisangaben mit den Energiemengen nach Tabelle 62 ergeben sich die in Tabelle 76 dargestellten monetären Einsparungen durch die Kunststoffverwertung in MVA.

Tabelle 76: Absolute monetäre Einsparung durch die energetische Mischkunststoffverwertung in der MVA

	HDPE	LDPE	PET	PVC
Einsparung durch bereitgestellte elektrische Energie	28,458 Mio. €	63,333 Mio. €	13,392 Mio. €	15,903 Mio. €
Einsparung durch bereitgestellte thermische Energie	45,045 Mio. €	99,990 Mio. €	21,120 Mio. €	25,080 Mio. €
Gesamteinsparung	73,503 Mio. €	163,323 Mio. €	34,512 Mio. €	40,983 Mio. €

Bei der thermischen Verwertung der hier betrachteten Kunststoffe in MVA wurde durch LDPE aufgrund des hohen Heizwertes und der großen thermisch verwerteten Abfallmenge die größte wirtschaftliche Einsparung im Jahr 2007 erzielt. Insgesamt betrug die Einsparung im Jahr 2007 312,321 Mio. €.

Bruttokosteneffekte durch die energetische Verwertung von Kunststoffen in EBS-Kraftwerken

Da wie bei der energetischen Verwertung in MVA, auch durch die Kunststoffverwertung in EBS-Kraftwerken Strom und Wärme substituiert wird, werden die Preise für Strom und Fernwärme wie im vorhergehenden Abschnitt, auch hier herangezogen.

Ausgehend von den in Tabelle 65 (S. 99) über den Kunststoffheizwert und den Wirkungsgrad deutscher EBS-Kraftwerke bestimmten spezifischen Energiemengen und über die eingesetzten Kunststoffmengen, ermittelt sich die in Tabelle 66 (S. 99) angegebene absolute Menge elektrischer/thermischer Energie.

Unter Verwendung dieser Angaben wurde die wirtschaftliche Einsparung der Kunststoffverwertung in EBS-Kraftwerken wie in Tabelle 77 bestimmt.

Tabelle 77: Absolute monetäre Einsparung durch die energetische Mischkunststoffverwertung in EBS-Kraftwerken

	HDPE	LDPE	PET
Einsparung durch bereitgestellte elektrische Energie	6,417 Mio. €	13,950 Mio. €	2,790 Mio. €
Einsparung durch bereitgestellte thermische Energie	4,125 Mio. €	9,240 Mio. €	1,815 Mio. €
Gesamteinsparung	10,542 Mio. €	23,190 Mio. €	4,605 Mio. €

Die erzielten Einsparungen belaufen sich in diesem Fall für das Jahr 2007 auf 38,337 Mio. €.

Bruttokosteneffekte durch die energetische Verwertung von Kunststoffen in Zementwerken

Durch die Kunststoffverwertung in Zementwerken erfolgt die Substitution von Steinkohle. Ein Abgleich der substituierten Energie erfolgt über den Heizwert der Kunststoffe und der Steinkohle. So ergeben sich ein Substitutionsfaktor für PE von 1,50, für PET von 1,08 und für PVC von 0,70 (siehe hier auch unter Kapitel 4.1 den Abschnitt zur energetischen Verwertung von Kunststoffen in Zementwerken).

Durch den Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft [112] werden Energiepreise als Grenzübergangswerte (ohne Steuern und sonstigen Abgaben) erhoben. Für das Jahr 2007 liegen hier mittlere Angaben für Kraftwerkskohle von 68,07 €/Mg SKE vor. Die Preise für Drittlandskohle (Steinkohle aus Nicht-EU-25-Ländern) lagen 2007 bei 57,26 €/Mg [112]. Das entscheidende Qualitätskriterium, welches zu diesem Preisunterschied führt, ist der Heizwert der Steinkohle. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes [113] kostet Steinkohle mit einem Heizwert von etwa 30.000 MJ/Mg über 100 €/Mg, preiswerte Drittlandssteinkohle mit einem Heizwert unter 25.000 MJ/Mg weniger als 60 €/Mg. Bei dem hier verwendeten Heizwert der Steinkohle (28.700 MJ/Mg) ist von einer besseren Qualität auszugehen, deshalb wird der Preis für Kraftwerkskohle von 68,07 €/Mg im Folgenden verwendet.

In Verbindung mit den spezifischen Substitutionsfaktoren ergeben sich spezifische Einsparungen von 102,11 €/Mg für PE, 73,52 €/Mg für PET und 47,65 €/Mg für PVC.

Die folgende Tabelle zeigt die absoluten Substitutionseffekte für die im Zementwerk energetisch verwerteten Mischkunststoffe, anteilig für die einzelnen Kunststoffarten.

Tabelle 78: Absolute monetäre Einsparung durch die energetische Mischkunststoffverwertung in Zementwerken

	absolute Einsparung 2007 bei 16.993 Mg HDPE als Mischkunststoff	absolute Einsparung 2007 bei 37.793 Mg LDPE als Mischkunststoff	absolute Einsparung 2007 bei 11.146 Mg PET als Mischkunststoff	absolute Einsparung 2007 bei 18.213 Mg PVC als Mischkunststoff
Einsparung	1,735 Mio. €	3,859 Mio. €	0,820 Mio. €	0,868 Mio. €

Durch den Einsatz von Mischkunststoffen in Zementwerken wurden im Jahr 2007 insgesamt 8,282 Mio. € eingespart.

d) Zusammenfassung der Bruttokosteneffekte durch die Verwertung der thermoplastischen Kunststoffe HD-/LDPE, PET und PVC

In Tabelle 79 sind die ermittelten monetären Einsparungen durch die werkstoffliche, rohstoffliche und energetische Verwertung der betrachteten Kunststoffe zusammengefasst.

Wie bei der Ermittlung der rohstofflichen und energetischen Substitutionseffekte der Kunststoffverwertung, zeigt LDPE auch bei den wirtschaftlichen Substitutionseffekten die größten Einsparungen. Entscheidend dafür ist die große Einsparung durch die energetisch verwertete Menge dieser Kunststoffart und für die hier betrachteten rohstofflichen und energetischen Abfallverwertungsverfahren auch der hohe Heizwert dieses Kunststoffs. Die hochwertige werkstoffliche Verwertung bringt für PE-Kunststoffe durch die aufwendige Aufbereitung bis zum Regranulat nur geringe Einsparungen.

Durch die große Menge der werkstofflich verwerteten Produktionsabfälle und die relativ hohen spezifischen Einsparungen zeigen sich besonders für die hochwertige werkstoffliche Verwertung große Einsparungen beim PVC. Dagegen sind die Effekte bei der rohstofflichen und energetischen Verwertung des PVC, bedingt durch den für die hier betrachteten Kunststoffe verhältnismäßig geringen Heizwert, eher gering. Die große spezifische Einsparung der hochwertig werkstofflich verwerteten PVC-Kunststoffe resultiert aus der mangelnden Datengrundlage für die bis zum Regranulat aufbereiteten PVC-Post-Consumer-Abfälle. Für die gesamte stofflich verwertete Menge wurden Marktpreise für PVC-Mahlgut verwendet. Hier besteht ein weiterer Bedarf an Marktpreiserhebungen für PVC-Regranulat.

Tabelle 79: Gesamteinsparungen der Wirtschaft durch die Verwertung der thermoplastischen Kunststoffe HD-/LDPE sowie PET und PVC im Jahr 2007

	HDPE	LDPE	PET	PVC
Gesamt verwertete Menge	380.376 Mg	801.842 Mg	317.868 Mg	532.184 Mg
Monetäre Einsparung durch die werkstoffliche Verwertung	23,245 Mio. €	49,774 Mio. €	54,089 Mio. €	103,976 Mio. €
Monetäre Einsparung durch die rohstoffliche Verwertung	4,362 Mio. €	8,690 Mio. €	2,558 Mio. €	0,442 Mio. €
Monetäre Einsparung durch die energetische Verwertung	85,780 Mio. €	190,372 Mio. €	39,937 Mio. €	41,851 Mio. €
Monetäre Einsparung, gesamt	113,387 Mio. €	248,836 Mio. €	96,584 Mio. €	146,269 Mio. €

In Abbildung 56 sind die Ergebnisse der Tabelle 79 grafisch dargestellt. Insgesamt wurden im Jahr 2007 durch die Verwertung der betrachteten thermoplastischen Kunststoffe Einsparungen in Höhe von 605,076 Mio. € erzielt.

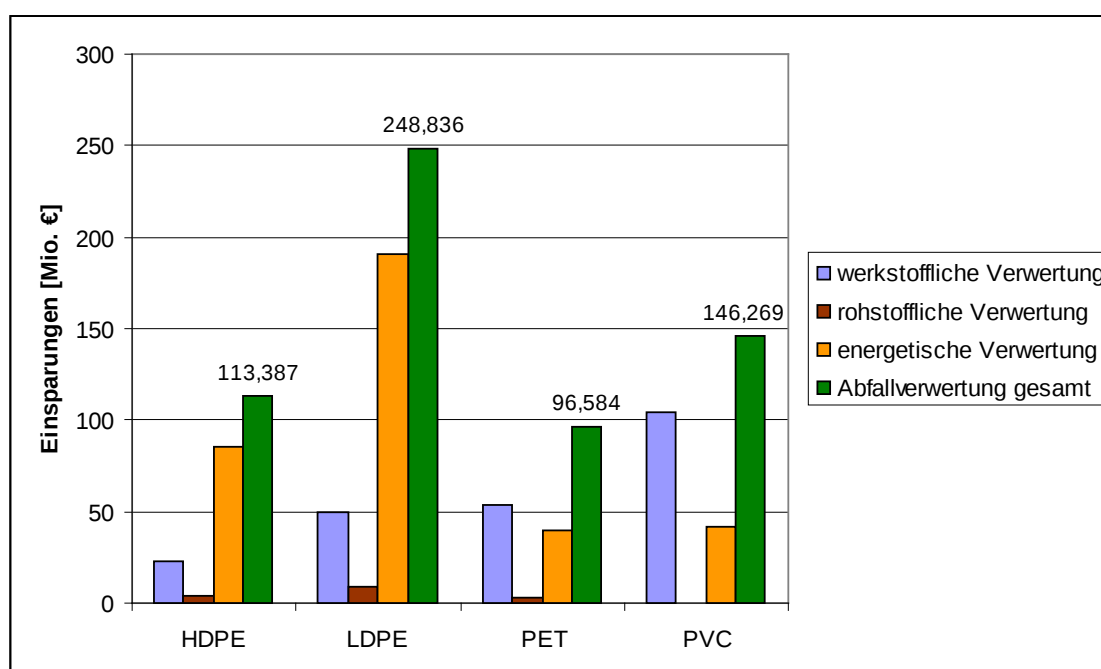


Abbildung 56: Wirtschaftlicher Effekt der Kunststoffverwertung

6.4 Materielle Effekte der Abfallwirtschaft hinsichtlich der Ressourcenproduktivität

6.4.1 Zusammenfassende Darstellung der Recyclingeffekte in Bezug auf die betrachteten Materialströme

Im Rahmen dieser Betrachtungen sollen die rohstofflichen und energetischen Effekte der Abfallverwertung mit der Inanspruchnahme von Rohstoffen in Beziehung gesetzt werden, die im Rohstoffproduktivitätsindikator der Nachhaltigkeitsstrategie erfasst werden.

Die Rohstoffproduktivität setzt das Bruttoinlandsprodukt mit physischen Einheiten, dem abiotischen direkten Materialeinsatz (DMI), ins Verhältnis. Der DMI im Nenner des Indikators wird in Gewichtseinheiten erfasst und enthält sowohl die inländisch entnommenen Rohstoffe als auch die Importe an Rohstoffen, Halb- und Fertigwaren. Um auch verwertete Rucksackflüsse zu erfassen, wird der *DMI in Rohstoffäquivalenten*¹² gemessen. Anhand dieses Indikators werden alle Güter mit ihren indirekten, wirtschaftlich genutzten Rohstoffflüssen abgebildet, die zu deren Herstellung notwendig, jedoch nicht Bestandteil der Güter selbst sind [136].

Folglich wird beispielsweise der Import einer Tonne Kupfererzkonzentrat mit 32,004 Mg an Rohstoffen bilanziert, die die originären Aufwendungen an Erzen und Energieträgern berücksichtigen. Auf diese Weise kann der verwertete Rohstoffeinsatz inklusive der Rucksackflüsse richtungssicher aufgezeigt werden.

Die bislang berechneten kumulierten Rohstoff- und Energieaufwendungen passen sich daher in die Systematik des DMI in Rohstoffäquivalenten (RMI) ein. Ohne die Vorketten im Ausland können die direkten Effekte des Sekundärrohstoffeinsatzes, d. h. die vermiedenen Importe und die inländisch gewonnenen abiotischen Rohstoffe, auf den DMI anhand des DERec (siehe 6.1.4) quantifiziert werden.

¹² Dieser Indikator wird dann als RMI (Raw Material Input) bezeichnet.

Die Tabellen für die Berechnung der spezifischen Energiemenge nach Primärenergieträgern für die Rohstoffäquivalente der einzelnen betrachteten Rohstoffe sind in Anlage 2 aufgeführt. Bei der dabei eingesetzten Energiemenge sind erneuerbare Energien und Fernwärme nicht berücksichtigt.

6.4.2 Metalle

Eisen und Stahl

Wie im Abschnitt 6.2.1 beschrieben, wird durch den Einsatz von Eisen- und Stahlschrott Roheisen im Faktor 1,12 substituiert. Damit werden durch den Einsatz von 21,744 Mio. Mg Schrott im Jahr 2007 insgesamt 24,353 Mio. Mg Roheisen ersetzt. Zur Herstellung dieses Roheisens ist eine Menge an Eisenerzkonzentrat mit dem Faktor 1,6 erforderlich also insgesamt 38,965 Mio. Mg. Dieser eingesparten Menge stehen eine importierte Eisenerzmenge von 46,268 Mio. Mg sowie eine im Inland produzierte Eisenerzmenge von 0,434 Mio. Mg gegenüber. Somit wurden insgesamt 45 % einer potenziell benötigten Eisenerzmenge von 85,667 Mio. Mg eingespart.

Der Energieverbrauch zur Herstellung von Roheisen, Stahl und Ferrolegierungen betrug im Jahr 2007 in Deutschland insgesamt 745,40 PJ [123]. Dem Energieverbrauch steht eine durch das Recycling von Eisen- und Stahlschrott eingesparte Energiemenge im Inland von 156,02 PJ gegenüber. Damit beläuft sich die Energieersparnis durch den Einsatz von Schrott auf 17 % der potenziell benötigten inländischen Gesamtenergiemenge von 901,42 PJ.

Ein $DERec_{Fe}$ für Eisen- und Stahlschrott lässt sich auf Basis der folgenden Rechnung näherungsweise bestimmen:

$DERec_{Fe} =$

eingesparte Eisenerzmenge = 38,965 Mio. Mg

+

eingesparte inländische Energiemenge (156,02 PJ) * Rohstoffäquivalent (0,031 Mio. Mg/PJ)¹³ = 4,837 Mio. Mg.

In Summe ergibt sich aus der eingesparten Eisenerzmenge von 38,965 Mio. Mg und der eingesparten inländischen Energierohstoffmenge von 4,837 Mio. Mg ein $DERec_{Fe}$ von 43,802 Mio. Mg. Dies stellt allerdings nur einen Näherungswert dar, da u. a. keine inländischen Hilfs- und Zusatzstoffe bilanziert sind.

Kupfer

Die Substitution von Kupfererzkonzentrat durch Kupferschrott erfolgt, wie im Abschnitt 6.2.2 dargestellt, mit einem Faktor von 3,87. Damit werden durch die Herstellung von 364.000 Mg Raffinadekupfer aus sekundären Vorstoffen 1,485 Mio. Mg Kupfererzkonzentrat substituiert, unter der Berücksichtigung, dass aus 1 Mg Kupferschrott 0,95 Mg Raffinadekupfer entstehen. Zudem werden 530.000 Mg Kupfer durch den direkten Einsatz von Kupferschrott erzeugt, welche 2,159 Mio. Mg Kupfererzkonzentrat ersetzen. Somit werden insgesamt 3,644 Mio. Mg Kupfererzkonzentrat substituiert. Demgegenüber wurden im Jahr 2007 insgesamt 1,316 Mio. Mg Kupfererzkonzentrat eingeführt. Somit beläuft sich die prozentuale Einsparung durch den Sekundärrohstoffeinsatz auf 73 %. Eine spezifische Energiemenge zur Herstellung von Kupfer ist im Datensatz der UGR nicht ausgewiesen. Ausgewiesen ist lediglich der Energieverbrauch zur Herstellung von NE-Metallen und Halbzeugen daraus in Höhe von 86,75 PJ [123]. Dem steht eine Energieeinsparung im Inland durch die Erzeugung von Sekundärkupfer in Höhe von 5,44 PJ gegenüber. Eine prozentuale Einsparung lässt sich hier nicht bestimmen, da dafür auch die Effekte durch den Sekundärrohstoffeinsatz in anderen NE-Metallbereichen berücksichtigt werden müssten.

¹³ Eigene Berechnung aus Energieeinsatz zur Herstellung von Roheisen, Stahl u. Ferrolegierungen nach Tabelle 3.2.3.5 UGR bewertet mit Heizwerten.

Ein $DERec_{Cu}$ für Kupferschrott lässt sich auf Basis der folgenden Rechnung näherungsweise bestimmen:

$DERec_{Cu} =$

eingesparte Kupfererzkonzentratmenge = 3,644 Mio. Mg

+

eingesparte inländische Energiemenge (5,44 PJ) * Rohstoffäquivalent (0,024 Mio. Mg/PJ)¹⁴ = 0,131 Mio. Mg.

In Summe ergibt sich aus der eingesparten Kupfererzkonzentratmenge von 3,644 Mio. Mg und der eingesparten inländischen Energierohstoffmenge von 0,131 Mio. Mg ein $DERec_{Cu}$ von 3,775 Mio. Mg. Dies stellt allerdings nur einen Näherungswert dar, da u. a. keine inländischen Hilfs- und Zusatzstoffe bilanziert sind.

Gold

Im Abschnitt 6.2.3 wird beschrieben, dass im Jahr 2007 insgesamt 80,4 Mg Gold in Deutschland recycelt worden sind. Da Gold am Ort der Gewinnung aufbereitet wird und bereits in Form von Reingold importiert wird, kann davon ausgegangen werden, dass der $DERec_{Au}$ für das Recycling von Gold mit diesem Wert gleichzusetzen ist und demzufolge 80,4 Mg beträgt, also die Menge an Gold, deren Import durch das Recycling vermieden wurde.

Während die energetischen Aufwendungen für die Herstellung von Gold erheblich sind, aber nahezu ausschließlich im Ausland erfolgen, wird der Energieaufwand für das Recycling von Gold im Inland getätigt. Diese sind aber, wie bereits im Abschnitt 6.2.3 erläutert, im Einzelnen nicht bekannt bzw. zu vernachlässigen. Auf jeden Fall ist durch das Recycling von Gold keine Energieeinsparung im Inland zu bilanzieren sondern ein zusätzlicher Energieaufwand im Vergleich zum Import, dessen Höhe auf Basis der vorliegenden Daten nicht zu beziffern ist.

6.4.3 Kunststoffe

Die Einsparungen durch das Kunststoffrecycling ergeben sich, wie bereits im Abschnitt 6.2.4 erläutert, auf der Ebene der hochwertigen werkstofflichen Verwertung, der werkstofflichen Verwertung von Mischkunststoff, der rohstofflichen Verwertung sowie der energetischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen, EBS-Kraftwerken sowie in Zementwerken.

Hochwertige werkstoffliche Verwertung (HwV)

Bei der hochwertigen werkstofflichen Verwertung werden Primärkunststoffe im Verhältnis von 1:1 durch Kunststoffgranulat ersetzt, welches aus Sekundärmaterialien erzeugt wurde. Als $DERec_{HwV}$ sind dabei insbesondere die eingesparten Erdölimporte und sonstige abiotische Rohstoffe sowie die im Inland eingesparte Energiemenge.

Die eingesparte Erdölmenge und die der sonstigen Rohstoffe werden aus den einschlägigen GEMIS-Daten [16] errechnet, die eingesparte Energiemenge wird über den Energiemix aus der UGR berechnet.

Die nachfolgende Tabelle 80 zeigt die mit der spezifischen Rohstoffeinsatzmenge bewertete Verwertungsmenge und die damit eingesparte Rohstoffmenge für die einzelnen betrachteten Kunststoffarten. In Summe werden 0,61 Mio. Mg Rohstoffe eingespart.

¹⁴ eigene Berechnung aus Energieeinsatz zur Herstellung von Roheisen, Stahl u. Ferrolegierungen nach Tabelle 3.2.3.5 UGR bewertet mit Heizwerten

Tabelle 80: Berechnung der eingesparten Rohstoffmengen für die einzelnen Kunststoffarten (nach GEMIS [16])

	Verwertete Menge [Mg]	Spezifische Rohstoffeinsatzmenge [Mg/Mg]	Eingesparte Rohstoffmenge [Mg]
HDPE	63.748	1,633	104.100
LDPE	105.282	1,640	172.662
PET	60.491	1,751	105.920
PVC	169.507	1,339	226.970
Summe			609.653

$DERec_{HwV} =$

eingesparte Menge an Erdölimporten und sonstigen abiotischen Rohstoffen = 0,610 Mio. Mg

+

eingesparte inländische Energiemenge (2,33 PJ) * Rohstoffäquivalent (0,023 Mio. Mg/PJ)¹⁵ = 0,054 Mio. Mg

In Summe ergibt sich aus der eingesparten Erdölimportmenge sowie der Menge an weiteren Rohstoffen von 0,610 Mio. Mg und der eingesparten inländischen Energierohstoffmenge von 0,054 Mio. Mg ein $DERec_{HwV}$ von 0,664 Mio. Mg.

Werkstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen (WVM)

Wie im Abschnitt 6.2.4 erläutert, substituiert die Verwertung von Mischkunststoffen durch thermoplastische Verformung andere Materialien wie Holz und Beton. Insgesamt wurden im Jahr 2007 176.306 Mg Mischkunststoffe werkstofflich verwertet. Es ist nicht bekannt, inwieweit Holz oder Beton bzw. andere Materialien substituiert werden. Insofern wird vereinfachend angenommen, dass 50 % Holz und 50 % Beton ersetzt werden. Holz wird als nachwachsender Rohstoff nicht bilanziert. Der Substitutionsfaktor für Beton schwankt bezüglich der häufigsten Anwendungen zwischen 2,6 (Palisade) und 5,6 (Bauzaunfuß). Da die Einsatzmenge für die einzelnen Anwendungen ebenfalls unbekannt ist, wird mit dem Mittelwert (4,1) dieser beiden Werte gerechnet.

Im Jahr 2007 wurden demzufolge 361.427 Mg Beton durch Mischkunststoffe ersetzt. Nach GEMIS ist eine Tonne Beton mit einer Rohstoffentnahme von 1,034 Mg verbunden, die im Regelfall im Inland erfolgt. Demzufolge wurde durch den Einsatz von Mischkunststoffen eine inländische Entnahme von 0,374 Mio. Mg an Rohstoffen vermieden.

Die gesamte Energieeinsparung wurde im Abschnitt 6.2.4 mit 1,98 PJ bilanziert, welche sich nach den gewählten Annahmen zu je 50 % auf die Erzeugung von Holz und Beton aufteilen, welche nachfolgend mit dem spezifischen Energiemix für die Erzeugung von Produkten der Forstwirtschaft (0,023 Mio. Mg/PJ) bzw. der Verarbeitung von Steinen und Erden (0,03 Mio. Mg/PJ) bewertet werden.

Somit ergeben sich für jeweils 0,99 PJ Energieeinsparung 0,023 Mio. Mg Rohstoffeinsparung für Holz und 0,030 Mio. Mg Rohstoffeinsparung für Beton.

In Summe kann unter Maßgabe der o. a. Annahmen für die Verwertung von Mischkunststoffen ein $DERec_{WVM}$ von 0,427 Mio. Mg bilanziert werden.

Rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen (RVM)

Die rohstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen erfolgt als Reduktionsmittel im Hochofenprozess. Dabei wird Schweröl substituiert. In Abschnitt 6.2.4 wurde errechnet, dass insgesamt 2,31 PJ Schweröl substituiert werden. Bewertet mit einem Heizwert von

¹⁵ eigene Berechnung aus Energieeinsatz zur Herstellung von Kunststoffwaren nach Tabelle 3.2.3.5 UGR bewertet mit Heizwerten

39,5 GJ/Mg für Schweröl ergibt dies eine Menge von 58.481 Mg Schweröl, die durch den Einsatz von Kunststoffen als Reduktionsmittel im Hochofenprozess substituiert werden.

Der Rohstoffaufwand für den Import von Rohöl beträgt umgerechnet nach GEMIS [16] (Pipeline\Öl-roh-DE-2010) 1,059 Mg pro Mg Rohöl, dichtegewichtet 0,935 Mg/m³ Rohöl (bei 0,883 Mg/m³ Rohöl). Der Rohstoffaufwand für die Herstellung von Schweröl beläuft sich nach GEMIS [16] (Raffinerie\Öl-schwer_DE-2010) umgerechnet auf 1,073 Mg pro Mg Schweröl, dichtegewichtet 1,062 Mg/m³ (bei 0,990 Mg/m³). Danach ergibt sich ein Rohstoffaufwand im Inland von 0,127 Mg/m³ bzw. 0,128 Mg/Mg Schweröl. Insofern beträgt für das Jahr 2007 der inländische Rohstoffaufwand der für die Herstellung des substituierten Schweröls eingespart wurde, 7.486 Mg.

Insgesamt berechnet sich demnach der $DERec_{RVM}$ für die Substitution von Schweröl im Hochofenprozess durch den Einsatz von Kunststoffen als Reduktionsmittel aus 58.481 Mg substituiertem Schweröl sowie aus 7.486 Mg eingesparter sonstiger Rohstoffe auf zusammen 65.967 Mg.

Energetische Verwertung von Mischkunststoffen (EVM)

Die Energetische Verwertung von Mischkunststoffen erfolgt zum einen in Müllverbrennungsanlagen (MVA), in EBS-Kraftwerken sowie in Zementkraftwerken.

a) Strom- und Wärmeerzeugung in MVA und EBS-Kraftwerken

In MVA und EBS-Kraftwerken werden elektrische Energie und Wärmeenergie erzeugt, welche mit dem jeweiligen Energiemix unter Beachtung des jeweiligen Wirkungsgrades zu bewerten sind.

Der jeweilige $DERec$ ist zu berechnen über die eingesparte Energiemenge (siehe Abschnitt 6.2.4), welche über den Strom- bzw. Wärmemix gewichtet wird. Von den dabei errechneten Energiequellen ist der Importanteil zu ermitteln, welcher nur mit den importierten Energieträgermengen in den $DERec$ eingeht. Für die im Inland erzeugten Energieträger ist der jeweilige Rohstoffaufwand zu ermitteln, was über Daten aus der GEMIS-Datenbank [16] erfolgt. Nachfolgend ist der Berechnungsmodus für die einzelnen Verwertungswege dargestellt (Tabelle 81, Tabelle 82, Tabelle 83 und Tabelle 84).

Tabelle 81: Berechnung des $DERec_{EVM-SMVA}$ für die Stromerzeugung in MVA

Strommix:	Anteil 2007 [130]	Einsatzmenge [PJ]	Heizwert [GJ/Mg] (1)	Einsatzmenge [Mio. Mg]
Braunkohle	24,30%	1,055	22,000	0,048
Kernenergie	22,10%	0,959	388,89	0,000
Steinkohle	22,30%	0,968	28,700	0,034
Erdgas	11,90%	0,516	38,000	0,014
Mineralöl	1,50%	0,065	42,800	0,002
Erneuerbare	13,70%	0,595		
Sonstige	4,20%	0,182		
Gesamt MVA		4,340		0,097

(1) Ausnahme: Kernenergie, dort kg/TJ

	spezifischer DMI	Anteil in- und ausländische Herkunft [131]	anteilige Einsatzmenge aus In- und Ausland	$DERec_{EVM-SMVA}$
Braunkohle:				
Inland	1,228 Mg/Mg	100%	0,048 Mio. Mg	0,059 Mio. Mg
Ausland	1 Mg/Mg	0%	0,000 Mio. Mg	0,000 Mio. Mg
Kernenergie:				
Inland		0%	0,000 Mio. Mg	0,000 Mio. Mg
Ausland	388,89 kg/TJ	100%	0,000 Mio. Mg	0,145 Mio. Mg
Steinkohle:				
Inland	1,498 Mg/Mg	33,30%	0,011 Mio. Mg	0,017 Mio. Mg
Ausland	1 Mg/Mg	66,70%	0,022 Mio. Mg	0,022 Mio. Mg
Erdgas:				
Inland	1,141 Mg/Mg	20,90%	0,003 Mio. Mg	0,003 Mio. Mg
Ausland	1 Mg/Mg	79,10%	0,011 Mio. Mg	0,011 Mio. Mg
Mineralöl:				
Inland	1,084 Mg/Mg	3,80%	0,000 Mio. Mg	0,000 Mio. Mg
Ausland	1 Mg/Mg	96,20%	0,001 Mio. Mg	0,001 Mio. Mg
Gesamt				0,259 Mio. Mg

Der $DERec_{EVM-SMVA}$ für die Stromerzeugung in Müllverbrennungsanlagen bezogen auf das Jahr 2007 beträgt 0,259 Mio. Mg.

Tabelle 82: Berechnung des $DERec_{EVM-SEBS}$ für die Stromerzeugung in EBS-Kraftwerken

Strommix:	Anteil 2007 [130]	Einsatzmenge [PJ]	Heizwert [GJ/Mg] (1)	Einsatzmenge [Mio. Mg]
Braunkohle	24,30%	0,202	22,000	0,009
Kernenergie	22,10%	0,183	388,89	0,000
Steinkohle	22,30%	0,185	28,700	0,006
Erdgas	11,90%	0,099	38,000	0,003
Mineralöl	1,50%	0,012	42,800	0,000
Erneuerbare	13,70%	0,114		
Sonstige	4,20%	0,035		
Gesamt EBS		0,830		0,019

(1) Ausnahme: Kernenergie, dort kg/TJ

	spezifischer DMI	Anteil in- und ausländische Herkunft [131]	anteilige Einsatzmenge aus In- und Ausland	$DERec_{EVM-SEBS}$
Braunkohle:				
Inland	1,228 Mg/Mg	100%	0,009 Mio. Mg	0,011 Mio. Mg
Ausland	1 Mg/Mg	0%	0,000 Mio. Mg	0,000 Mio. Mg
Kernenergie:				
Inland		0%	0,000 Mio. Mg	0,000 Mio. Mg
Ausland	388,89 kg/TJ	100%	0,000 Mio. Mg	0,028 Mio. Mg
Steinkohle:				
Inland	1,498 Mg/Mg	33,30%	0,002 Mio. Mg	0,003 Mio. Mg
Ausland	1 Mg/Mg	66,70%	0,004 Mio. Mg	0,004 Mio. Mg
Erdgas:				
Inland	1,141 Mg/Mg	20,90%	0,001 Mio. Mg	0,001 Mio. Mg
Ausland	1 Mg/Mg	79,10%	0,002 Mio. Mg	0,002 Mio. Mg
Mineralöl:				
Inland	1,084 Mg/Mg	3,80%	0,000 Mio. Mg	0,000 Mio. Mg
Ausland	1 Mg/Mg	96,20%	0,000 Mio. Mg	0,000 Mio. Mg
Gesamt				0,049 Mio. Mg

Der $DERec_{EVM-SEBS}$ beträgt für die Stromerzeugung in EBS-Kraftwerken bezogen auf das Jahr 2007 0,049 Mio. Mg.

Tabelle 83: Berechnung des $DERec_{EVM-WMVA}$ für die Wärmeerzeugung in MVA

Wärmemix:	Anteil 2009 [132]	Einsatzmenge [PJ]	Heizwert [GJ/Mg] (1)	Einsatzmenge [Mio. Mg]
Braunkohle	1,00%	0,116	22,000	0,005
Steinkohle	6,00%	0,695	28,700	0,024
Erdgas	67,00%	7,765	38,000	0,204
Mineralöl	7,00%	0,811	42,800	0,019
Erneuerbare	2,00%	0,232		
Sonstige	17,00%	1,970		
Gesamt MVA	100,00%	11,590		0,253

(1) Ausnahme: Kernenergie, dort kg/TJ

	spezifischer DMI		Anteil in- und ausländische Herkunft [131]	anteilige Einsatzmenge aus In- und Ausland	$DERec_{EVM-WMVA}$
Braunkohle:					
Inland	1,228	Mg/Mg	100%	0,005 Mio. Mg	0,006 Mio. Mg
Ausland	1	Mg/Mg	0%	0,000 Mio. Mg	0,000 Mio. Mg
Steinkohle:					
Inland	1,498	Mg/Mg	33,30%	0,008 Mio. Mg	0,012 Mio. Mg
Ausland	1	Mg/Mg	66,70%	0,016 Mio. Mg	0,016 Mio. Mg
Erdgas:					
Inland	1,141	Mg/Mg	20,90%	0,043 Mio. Mg	0,049 Mio. Mg
Ausland	1	Mg/Mg	79,10%	0,162 Mio. Mg	0,162 Mio. Mg
Mineralöl:					
Inland	1,084	Mg/Mg	3,80%	0,001 Mio. Mg	0,001 Mio. Mg
Ausland	1	Mg/Mg	96,20%	0,018 Mio. Mg	0,018 Mio. Mg
Gesamt					0,264 Mio. Mg

Der $DERec_{EVM-WMVA}$ beträgt für die Wärmeerzeugung in Müllverbrennungsanlagen bezogen auf das Jahr 2007 0,264 Mio. Mg.

Tabelle 84: Berechnung des $DERec_{EVM-WEBS}$ für die Wärmeerzeugung in EBS-Kraftwerken

Wärmemix:	Anteil 2009 [132]	Einsatzmenge [PJ]	Heizwert [GJ/Mg] (1)	Einsatzmenge [Mio. Mg]
Braunkohle	1,00%	0,009	22,000	0,000
Steinkohle	6,00%	0,055	28,700	0,002
Erdgas	67,00%	0,616	38,000	0,016
Mineralöl	7,00%	0,064	42,800	0,002
Erneuerbare	2,00%	0,018		
Sonstige	17,00%	0,156		
Gesamt EBS	100,00%	0,920		0,020

(1) Ausnahme: Kernenergie, dort kg/TJ

	spezifischer DMI		Anteil in- und ausländische Herkunft [131]	anteilige Einsatzmenge aus In- und Ausland	$DERec_{EVM-WEBS}$
Braunkohle:					
Inland	1,228	Mg/Mg	100%	0,000 Mio. Mg	0,001 Mio. Mg
Ausland	1	Mg/Mg	0%	0,000 Mio. Mg	0,000 Mio. Mg
Steinkohle:					
Inland	1,498	Mg/Mg	33,30%	0,001 Mio. Mg	0,001 Mio. Mg
Ausland	1	Mg/Mg	66,70%	0,001 Mio. Mg	0,001 Mio. Mg
Erdgas:					
Inland	1,141	Mg/Mg	20,90%	0,003 Mio. Mg	0,004 Mio. Mg
Ausland	1	Mg/Mg	79,10%	0,013 Mio. Mg	0,013 Mio. Mg
Mineralöl:					
Inland	1,084	Mg/Mg	3,80%	0,000 Mio. Mg	0,000 Mio. Mg
Ausland	1	Mg/Mg	96,20%	0,001 Mio. Mg	0,001 Mio. Mg
Gesamt					0,021 Mio. Mg

Der $DERec_{EVM-WEBS}$ beträgt für die Wärmeerzeugung in EBS-Kraftwerken bezogen auf das Jahr 2007 0,021 Mio. Mg.

b) Substitution von Steinkohlenkoks in Zementkraftwerken

In Zementkraftwerken wird Steinkohlenkoks substituiert. Im Abschnitt 6.2.4 wurde ermittelt, dass im Jahr 2007 eine Energiemenge von insgesamt 4,89 PJ durch den Einsatz von Kunststoffen in den Zementwerksprozess eingebracht wurde. Bewertet mit dem Heizwert für Steinkohlenkoks von 28,7 GJ/Mg errechnet sich, dass somit 170.383 Mg Steinkohlenkoks substituiert worden sind.

Umgerechnet nach GEMIS [16] berechnet sich für die inländische Steinkohlenkoksproduktion ein Rohstoffaufwand von 1,498 Mg/Mg Steinkohlenkoks. Im Jahr 2007 wurden 67,2 % des Steinkohlebedarfs in Deutschland importiert [124]. Aus diesem Grund werden 32,8 % der eingesparten Steinkohlenkoksmenge mit dem Rohstoffaufwand für die inländische Steinkohlenkokserzeugung bewertet. 67,2 % werden lediglich als importierte Menge für den $DERec_{EVM-Z}$ berücksichtigt.

Demzufolge berechnet sich der $DERec_{EVM-Z}$ für die Steinkohlenkokssubstitution durch den Kunststoffeinsatz in Zementwerken aus

$67,2 \% \cdot 170.383 \text{ Mg (substituierte Steinkohlenkoksmenge)}$

+

$32,8 \% \cdot 170.383 \text{ Mg (substituierte Steinkohlenkoksmenge)} \cdot 1,498 \text{ Mg/Mg (Rohstoffaufwand für inländische Produktion)}$

Insgesamt beträgt der $DERec_{EVM-Z}$ für die Substitution von Steinkohlenkoks in Zementwerken für das Jahr 2007 198.214 Mg.

6.4.4 Zusammenfassende Darstellung des direkten Effekts des Recyclings ($DERec$) auf den DMI

In der nachfolgenden Tabelle 85 sind die für die verschiedenen Materialströme errechneten $DERec_i$ zusammengestellt.

Tabelle 85: DERec_i der einzelnen Materialströme

Materialstrom		DERec _i 2007 [Mio. Mg]
Eisen und Stahl	- stofflich	38,965
	- energetisch	4,837
	Summe	43,802
Kupfer	- stofflich	3,644
	- energetisch	0,131
	Summe	3,775
Gold	- stofflich	0,0000804
	- energetisch	-
	Summe	0,0000804
Kunststoffe	- werkstofflich hochwertig	0,664
	- werkstofflich Mischkunststoffe	0,427
	- rohstofflich	0,066
	- energetisch MVA	0,523
	- energetisch EBS	0,070
	- energetisch Zementwerke	0,198
	Summe	1,948
Gesamtsumme		49,525

Insgesamt werden durch die Verwertung der betrachteten Stoffströme 49,525 Mio. Mg eingespart, welche andernfalls zur Bereitstellung der substituierten Rohstoffe und Energieträger importiert oder inländisch gewonnen werden müssten und den DMI gleichermaßen erhöhen würden.

Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes lag die Gesamtmenge der inländischen Entnahme und Einfuhr abiotischer Rohstoffe im Jahr 2007 bei 1,35 Mrd. Mg [135]. Damit entspricht der hier ermittelte **DERec** etwa **3,7 % des DMI**.

7 Zusammenfassung

Die Materialstrombetrachtungen von Abfällen mit Relevanz für die Rohstoffproduktivität bilden in der vorliegenden Studie die Grundlage, um einen Überblick über Abfallmengen und Verwertungswege gemäß der Abfallhierarchie zu geben. Hier zeigen vor allem recycelte Bauabfälle wie Bauschutt und Straßenaufbruch eine große Mengenrelevanz. Ebenfalls mengenmäßig stark vertreten sind die biogenen Abfälle. Die Mengenerhebungen haben ergeben, dass über 15 Mio. Mg Papier und 2,1 Mio. Mg Holz stofflich verwertet sowie etwa 5,1 Mio. Mg Kompost aus biogenen Abfällen hergestellt werden. Vom anfallenden Klärschlamm (~2 Mio. Mg TS) werden knapp 50 % außerhalb der Abfallwirtschaft in der Landwirtschaft und im Landschaftsbau eingesetzt.

Mengenmäßig etwas weniger bedeutend, aber durch ihre intrinsische Zugehörigkeit zu den abiotischen Rohstoffen und ihre teilweise hohen spezifischen Preise sind Metalle und Kunststoffe in dieser Studie von besonderer Relevanz. Basierend auf den Erhebungen zu Metallgehalten in Abfällen und Abfallmengen, wie sie durch die Fachserie 19 veröffentlicht werden, fielen im Jahr 2007 **11,56 Mio. Mg Fe-Abfälle** und **3,89 Mio. Mg NE-Abfälle** an. Über diese Erhebung wurden stofflich verwertete Mengen von **9,2 Mio. Mg Fe-Abfällen** und **1,08 Mio. Mg NE-Abfällen** ermittelt. Die eigentlich in Deutschland eingesetzten Schrottmengen sind allerdings größer, als die über die abfallwirtschaftliche Statistik bestimmten. So werden auch Mengen aus anderen Quellen zugekauft oder importiert.

Für die **Kunststoffabfälle** wird entsprechend der Erhebung über Kunststoffanteile in Abfällen und die abfallwirtschaftliche Statistik eine **stofflich verwertete Menge** von **1,6 Mio. Mg** aufgezeigt. Die Gegenüberstellung der Kunststoffmaterialströme der Consultic Marketing und Industrieberatung GmbH, welche 2,2 Mio. Mg stofflich verwertete Kunststoffe ausweist, zeigt eine abweichende Zuordnung beispielsweise von sonstigen Verwertungsverfahren.

Durch spezifischere Materialstrombetrachtungen anhand einzelner Metalle und Kunststoffe sollte in dieser Studie die Erhebung anhand der Abfallstatistik überprüft und verifiziert werden. Dafür wurden die Metalle Eisen/Stahl, Kupfer und Gold sowie die Kunststoffe HD- und LDPE, PET und PVC näher betrachtet. Für diese Untersuchungen wurden vor allem Daten verschiedener Interessensvertreter und Verbände herangezogen, welche eigene Erhebungen zu spezifischen Materialströmen durchführen.

Die detaillierte Erhebung der Eisen- und Stahlschrottmengen zeigt, dass zu den 9,2 Mio. Mg aus der stofflichen Verwertung aus Abfallbehandlungsanlagen noch Mengen aus dem Zukauf aus anderen Quellen, dem Eigenentfall der Stahlwerke und dem Import zu berücksichtigen sind. So lag im Jahr 2007 ein **Stahlschrottaufkommen** von **30,24 Mio. Mg** vor.

Das bilanzierte **Kupferschrottaufkommen** von **1,8 Mio. Mg** stammt neben dem Anfall als Abfall aus Abfallbehandlungsanlagen auch aus dem Zukauf aus anderen Quellen, Altschrottmengen und dem Import. Insgesamt wurden 2007 **0,89 Mio. Mg** Kupferschrott **stofflich** in Deutschland **verwertet**, der Rest wird exportiert.

Zum Materialstrom Gold war keine gute Datengrundlage verfügbar, mitunter auch dadurch, dass sich Goldstoffströme überwiegend außerhalb der abfallwirtschaftlichen Statistik bewegen. Die ermittelten Recyclingmengen dieses sehr hochwertigen Edelmetalls sind zwar gering, aber doch von hoher Wertigkeit. Für das Jahr 2007 wurde eine **Recyclingmenge** in Deutschland von **80,4 Mg Gold** ermittelt. Nach Expertenmeinung sollte jedoch die Mengenerhebung für den stark gehandelten Rohstoff Gold besser länderübergreifend erfolgen. So ist auch die Ermittlung der Recyclingmenge bedingt durch die geringe Anzahl an Abfallbehandlungsanlagen mit besonderen Schwierigkeiten verbunden. Weitere Betrachtungen zur Substitutionswirkung des Goldrecyclings, wie die Materialstrombetrachtungen, haben große Lücken aufgezeigt. Detaillierte Angaben zu vorliegenden Datenlücken sind in Kapitel 9 zusammengefasst.

Für die in dieser Studie betrachteten thermoplastischen Kunststoffe bildet die aller zwei Jahre veröffentlichte Studie der Consultic Marketing und Industrieberatung GmbH eine gute Grundlage. Hier werden einzelne Kunststoffarten von der Produktion bis hin zum Abfallanfall

spezifisch betrachtet. So lassen sich unter Berücksichtigung der Post-Consumer- und Produktionsabfälle **0,4 Mio. Mg HDPE-, 0,83 Mio. Mg LDPE-, 0,32 Mio. Mg PET- und 0,55 Mio. Mg PVC-Abfälle** ausweisen. Die Betrachtung der weiteren Verwertungswege ist aufgrund des Einsatzes der Kunststoffe in unterschiedlichsten Produkten und der Verwertung als Mischkunststoffe nur schwer möglich. Zudem unterscheiden sich einzelne Verwertungsverfahren erheblich voneinander. In dieser Studie sind überschlägige Erhebungen der werkstofflichen Verwertung von sortenrein vorliegenden Kunststoffen wie auch der werkstofflich verwerteten Mischkunststoffe, sowie der rohstofflich und energetisch (MVA, EBA- und Zementkraftwerk) verwerteten Mischkunststoffe erfolgt und über entsprechende Mischkunststoffanteile für die einzelnen Kunststoffarten spezifisch ausgewertet.

Über die erhobenen spezifischen Materialstromdaten zu unterschiedlichen abfallwirtschaftlichen Verwertungsverfahren wurden rohstoffliche, energetische und wirtschaftliche Substitutionseffekte ermittelt. Bei den betrachteten Metallen wurden diese Effekte für die recycelten Schrotte und Altmetalle ermittelt. Die erzielte Substitutionseffekte liegen in der entsprechenden Einsparung primärer Metallrohstoffe in Verbindung mit dem Aufwand für den Abbau und die Aufbereitung. Durch den Einsatz von **Stahlschrott**, zum einen zur Substitution von Roheisen im Oxygenstahlprozess und zum anderen bei der Herstellung von Elektro Stahl unter Berücksichtigung der dadurch eingesparten Roheisenmengen durch die vermiedene Oxygenstahlerzeugung, wurden insgesamt **63,4 Mio. Mg Rohstoffe** und **230,45 PJ Energieaufwand** eingespart. Durch die Substitution von Kupfererzkonzentrat durch **Kupferschrott** bei der Primärkupfererzeugung sowie die Einsparung des gesamten Primärkupferprozesses inklusive der Kupfererzkonzentrate durch die Sekundärkupfererzeugung wurden insgesamt im Jahr 2007 **117,5 Mio. Mg Rohstoffe** und ein **Energieaufwand von 81,02 PJ** eingespart. Für das **Goldrecycling** wurden im Rahmen dieser Studie Substitutionseffekte durch **vermiedene Goldimporte** ermittelt, wodurch **59,5 Mio. Mg an Rohstoffen** sowie **21,00 PJ an Energie** fast vollständig in Herkunftsländern eingespart wurden, welche goldhaltiges Gestein abbauen und aufbereiten.

Die Kunststoffe werden aufgrund ihrer Materialeigenschaften und Einsatzformen verschiedenen Verwertungsverfahren zugeführt, wodurch unterschiedliche Rohstoffe substituiert werden. Neben der Substitution von Primärkunststoffen durch die hochwertige werkstoffliche Verwertung, kann bei der werkstofflichen Verwertung der Mischkunststoffe vor allem von der Substitution von Holz- und Betonprodukten ausgegangen werden. Des Weiteren wurden die Substitutionseffekte durch die rohstoffliche Verwertung im Hochofen mit der Substitution von Steinkohle sowie die energetische Verwertung in MVA und EBS-Kraftwerken mit der Substitution des deutschen Strom- und Wärmemixes sowie in Zementkraftwerken mit der Substitution von Steinkohle bilanziert. **Insgesamt** wurde durch die **Verwertung von HD-/LDPE, PET und PVC 1,88 Mio. Mg Rohstoffe** und **61,72 PJ Energie** eingespart.

Die **wirtschaftlichen Brutto-Einsparungen** durch den Einsatz von **Stahlschrott** statt Roheisen liegen etwa bei **674 Mio. €**. Der Marktwert des Stahlschrotts im Vergleich zum Gesamtwert der eingesetzten Stahlrohstoffe liegt bei knapp 39 %. **Ohne** den Einsatz des **Stahlschrotts** würde der **theoretische Gesamtwert der Stahlproduktion etwa 5,5 % höher** liegen. Die mengenspezifische Einsparung durch den Einsatz von **Kupferschrott** ist wegen des hohen Marktwertes dieses Metalls höher als bei Eisen und Stahl. Insgesamt wurden im Jahr 2007 brutto **828 Mio. €** durch den Kupferschrotteinsatz eingespart. **Ohne** den Einsatz des **Kupferschrotts** würde der **theoretische Gesamtwert des Kupfereinsatzes etwa 8,8 % höher** liegen. Für **Gold** liegen Industriepreise vor, allerdings nicht getrennt für den Primär- und Sekundärrohstoff Gold. Eine Berechnung der Bruttokosteneffekte ist auf dieser Basis nicht möglich. Die durch Recycling bereitgestellte Goldmenge hat einen Marktwert von **1,367 Mrd. €**. Durch die Verwertung der betrachteten **thermoplastischen Kunststoffe** wurden Brutto-Einsparungen in Höhe von **605 Mio. €** erzielt. Allein durch die hochwertige werkstoffliche Verwertung lag die Einsparung etwa bei 206 Mio. €.

In einem letzten Schritt wurden die rohstofflichen und energetischen Substitutionseffekte der Verwertung mit der Inanspruchnahme von Primärmaterialien der deutschen Volkswirtschaft in Beziehung gesetzt. Um hierbei die Systemgrenzen des DMI im Indikator Rohstoffprodukti-

vität der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie einzuhalten, wurden die ermittelten kumulierten Rohstoff- und Energieaufwendungen ohne die Vorketten im Ausland bilanziert. Anhand der **Kenngroße DERec (Direct Effect of Recovery)** wurden die eingesparten Rohstoffe und Energieträger durch den Sekundärrohstoffeinsatz und damit die direkten Effekte des Recyclings bzw. der energetischen Verwertung ermittelt.

Für die **recycelten Stahlschrottmengen** ergab sich in Summe über die eingesparte Eisen-erzmenge von 38,964 Mio. Mg und die eingesparte inländische Energierohstoffmenge von 4,837 Mio. Mg ein **DERec_{Fe} von 43,802 Mio. Mg** als Näherungswert ohne inländische Hilfs- und Zusatzstoffe. Über die **eingesparte Kupfererzkonzentratmenge** und die inländische Energierohstoffmenge ermittelt sich wie für Eisen und Stahl ein **DERec_{Cu}**, der hier bei **3,775 Mio. Mg** liegt. Der Beitrag des Goldrecycling ist mit einem **DERec_{Au} von 80,4 Mg** äußerst gering, was auf den hohen Verarbeitungsgrad des importierten Goldes zurückzuführen ist. Dieser Wert ist zudem noch um die energetischen Aufwendungen für das Goldrecycling zu mindern, die allerdings auf Basis der vorliegenden Daten nicht zu beziffern sind.

Durch die unterschiedlichen Formen der **Kunststoffverwertung** mit entsprechenden eingesparten Rohstoff- und Energiemengen ergibt sich insgesamt ein **DERec_{Poly} von 1,948 Mio. Mg**. Der **Gesamt-DERec**, bestimmt über alle hier betrachteten Stoffströme in Höhe von **49,525 Mio. Mg**, quantifiziert die Menge an Rohstoffen und weiteren Gütern, die entweder inländisch gewonnen oder importiert werden müssten. Diese wären ohne das Recycling und die energetische Verwertung zur Erzeugung der substituierten Rohstoffe und Energieträger zusätzlich aufzubringen und würden zu einer erheblichen Steigerung des Materialinputs in die Volkswirtschaft führen. Der hier lediglich für die drei Metalle **Eisen/Stahl, Kupfer, Gold** und die Kunststoffe **HDPE, LDPE, PET und PVC** ermittelte **DERec** entspricht bereits **3,7 % des DMI**, der sich nach Angaben des Statistischen Bundesamtes im Jahr 2007 durch eine Gesamtmenge der inländischen Entnahme und Einfuhr abiotischer Rohstoffe von 1,35 Mrd. Mg [135] darstellt. Dies unterstreicht die **außerordentliche Bedeutung der Sekundärrohstoffwirtschaft für die Ressourcenschonungsziele der Bundesrepublik**.

8 Ausblick

Im Rahmen dieser Studie wurden intensive Recherchen zu Materialstrommengen für unterschiedliche Stoffarten sowie einzelne Metalle und Kunststoffe inklusive der Substitutionseffekte durch deren Verwertung durchgeführt. Hier zeigen sich mitunter noch Lücken auf bzw. fehlt es an fortschreibbaren Daten. Diese Defizite der Datengrundlage sollen nachfolgend offen gelegt werden, um den Handlungsbedarf aufzuzeigen.

Die Erarbeitung der Studie hat deutlich gemacht, dass die derzeit bestehende statistische Erfassung von Abfallströmen nicht den Anforderungen an ein Monitoring von Stoffströmen vor dem Hintergrund der Ressourcenschonung genügt. Durch eine stoffstromspezifische Gliederung, statt der derzeit üblichen herkunftsbezogenen Aufteilung, ist eine ganzheitlichere Darstellung der Abfallwege und die eigentliche Hochwertigkeit der Abfallverwertung mit den entsprechenden Sekundärrohstoffmengen besser darstellbar, was zu aussagekräftigeren Ergebnissen führt, als nur die erste Stufe der Abfallbehandlung zu betrachten. Auftretende Überschneidungen, durch einzelne in mehreren Abfallbehandlungsanlagen behandelte Abfälle, können durch eine stoffstromspezifische Art der Erfassung vermieden werden.

Insbesondere mangelt es an einer deutschlandweiten Analyse der Zusammensetzung der Siedlungsabfallströme, wie sie zuletzt in den 1980er Jahren durchgeführt wurde. Daten zu Siedlungsabfallströmen müssen derzeit aufwändig aus vorliegenden Einzelanalysen zusammengefasst werden, welche zum einen nicht umfassend verfügbar und zum anderen teilweise methodisch nicht kongruent sind.

Gleiches gilt für die Zusammensetzung der Einzelabfallarten. Hier liegt mit der Abfallanaly-sendatenbank ABANDA des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen ein geeignetes Instrument vor, welches allerdings teilweise nur über dürftige Datenbestände verfügt und fortlaufend aktualisiert werden sollte.

Relevante Ergebnisse, welche im Rahmen dieser Studie ermittelt worden sind, wurden in einem durch das Umweltbundesamt organisierten Expertengespräch vorgestellt. In einer großen Expertenrunde (Verbände, Statistisches Bundesamt, UBA, BMU) wurden die Ergebnisse diskutiert. Für die Fortschreibung dieser Erhebungen relevante Diskussionspunkte und Hinweise sollen im Folgenden als Grundlage für eine Verbesserung der Datenbasis aufgeführt werden.

Im Allgemeinen hat sich bereits bei der Erhebung der abfallwirtschaftlichen Materialströme im Rahmen dieser Studie gezeigt, dass die abfallwirtschaftliche Statistik noch intensiver mit den Daten der Verbände abzugleichen ist.

Für eine bessere Erhebung der Lagermengen, vor allem im Bereich der Elektro- und Elektronikgeräte liegen beim VDE Datensätze zur jährlich in Deutschland verkauften Elektronik und deren Zusammensetzung vor. In Verbindung mit der Lebensdauer könnten neben Lagermenge auch Abfallmengen und deren stoffliche Zusammensetzung berechnet werden.

Hinsichtlich der Erfassung anfallender Abfallmengen ist eine weitere Differenzierung dahingehend angebracht, dass sich Post-Consumer-Abfall und Produktionsabfall in der anfallenden Qualität stark unterscheiden. Die Produktionsabfälle der Kunststoffverarbeitung sind fast so hochwertig wie Primärkunststoffe, da die genaue Rezeptur den Herstellern bekannt ist. Dies ist bei den Post-Consumer-Abfällen nicht der Fall, wodurch der Einsatz der Recyclingkunststoffe durch die mitunter unbekannten Zuschlagsstoffe und Additive beeinflusst ist. Entsprechend der differenzierten Betrachtung der Gesamtabfallmengen hinsichtlich Post-Consumer- und Produktionsabfall sind auch die den unterschiedlichen Verwertungsverfahren zukommenden Abfallmengen getrennt zu bewerten.

Mit der Konzeption des DERec im Rahmen dieser Studie konnte ein aussagekräftiger Indikator mit Anschlussfähigkeit an den DMI ermittelt werden, um direkte Substitutionseffekte von Sekundärrohstoffen zu erfassen. Dieser sollte zukünftig auch für weitere relevante Sekundärrohstoffe ermittelt und fortgeschrieben werden. Obgleich biotische Rohstoffe nicht

in den DMI zur Ermittlung der Rohstoffproduktivität innerhalb der Nachhaltigkeitsstrategie einfließen, sollten auch diese anhand des DERec bilanziert werden.

Nicht weiter verfolgt werden konnte im Rahmen dieser Studie der Ansatz, den Indikator DERec, vergleichbar zum Indikator der Rohstoffproduktivität, mit einem Indikator der Wertschöpfung zu verknüpfen. Auf Basis der vorhandenen Daten war es nicht möglich, die aus dem Recycling resultierende Wertschöpfung im Sinne eines Beitrags zum Bruttoinlandsprodukt zu ermitteln. Problematisch war zum einen, die umfangreiche Prozesskette des Recycling vom Einsammeln über verschiedene Behandlungsprozesse mit der damit verbundenen Aufteilung von Stoffströmen bis hin zum eigentlichen Verwertungsschritt. Des Weiteren problematisch in der Bewertung waren die teilweise negativen monetären Werte für bestimmte Recyclingmaterialien. Insofern wurde hilfsweise zur Bemessung der Wertschöpfung auf Basis der jeweiligen Marktpreise die Bruttokosteneinsparung ermittelt, welche beim Einsatz von Sekundärrohstoffen durch die Substitution von Sekundärrohstoffen entsteht.

Da sich eine unmittelbare Modifikation des bestehenden Indikators der Rohstoffproduktivität als nicht praktikabel erwies, müssen zukünftig weitere Indikatoren etabliert werden, um die Auswirkungen der Sekundärrohstoffwirtschaft auf die volkswirtschaftlichen Rohstoffflüsse und die Fortentwicklung der Kreislaufwirtschaft mit starkem Augenmerk auf tatsächliche Verwertungs- und Rückführungsqualitäten adäquat abzubilden. Hierzu soll mit der vorliegenden Arbeit ein Beitrag geleistet werden.

9 Defizite der Datengrundlage

9.1 Eisen und Stahl

Der Materialstrom Eisen und Stahl ist relativ umfassend mit Daten dokumentiert und überwiegend fortschreibbar. Allerdings ist speziell die abfallwirtschaftliche Statistik in ihrer derzeitigen Form nicht geeignet, den Materialstrom des Recyclings für Eisen und Stahl vollumfänglich zu erfassen. Ein erheblicher Anteil des Materialstroms bewegt sich außerhalb der abfallwirtschaftlichen Statistik. Dieser Effekt wird sich mit der neuen EU-Verordnung Nr. 333/2011 [51] noch verstärken. Mit der Möglichkeit, Eisen-, Stahl- und Aluminiumschrott aus der Abfalleigenschaft zu entlassen, werden diese auch der Erfassung durch die abfallwirtschaftliche Statistik entzogen. Die Problematik wird verschärft insbesondere dadurch, dass die Möglichkeit für einen Teil der Stoffströme genutzt wird und für einen anderen Teil nicht. Mit dem gegenwärtigen statistischen Instrumentarium wird also keine einheitliche Erfassung insbesondere der für die Rohstoffproduktivität bedeutsamen Stoffströme mehr möglich sein. Geplant ist, auch Abfalleneigenschaften für weitere Materialien, bspw. Kupfer, Papier, Glas und Kompost zu definieren.

Bislang zeigen sich Lücken hauptsächlich bei den Lagermengen. Hier fehlt es bislang an einer detaillierten Analyse, was sicherlich auch dem Aspekt geschuldet ist, dass Eisen und Stahl in den unterschiedlichsten Bereichen Einsatz finden. Zur Darstellung der Lagermengen bedarf es einer umfassenden Recherche, welche alle Einsatzmöglichkeiten beleuchtet. Eine kontinuierliche Fortschreibung der Lagermengen ist ebenfalls mit einem großen Rechercheaufwand verbunden.

Für die Ermittlung der Substitutionseffekte fehlt es bei Eisen und Stahl vor allem an innerdeutschen Roheisen-Handelspreisen, welche für das Basisjahr nicht umfassend ermittelt werden konnten.

9.2 Kupfer

Als Ergebnis intensiver Recherchen zum Materialstrom Kupfer geht hervor, dass insbesondere bei einzelnen Lager- und Abfallmengen eine unsichere Datengrundlage vorliegt. Nachfolgend sind entsprechende lückenhafte Angaben der Datengrundlage stichpunktartig aufgeführt.

- Teilweise Lagermengen wie Kupfer in Kabeln und Gebäuden, in Fahrzeugen, elektrischen Leitungen, Münzen, Schmuck, Einrichtungsgegenständen, Werkzeugen, Sportgeräten usw.
- Die Kupfermenge in exportierten Waren
- Kupfermengen aus dem Recycling von Fahrzeugen des Schienen-, Schiffs- und Flugverkehrs sowie des Maschinenbaus
- Kupfermengen aus dem Recycling von Elektroaltgeräten, die an der Abfallwirtschaft vorbei gehen
- Die Kupferrückgewinnung aus der Schlackeaufbereitung

In den Betrachtungen enthaltene, aber unsichere Angaben sind weiter zu verifizieren (vor allem die getroffenen Annahmen bestimmter Randbedingungen). Diese sind im Folgenden dargestellt.

- Wie bei Eisen und Stahl würde auch für Kupferabfälle eine Verbesserung und Erweiterung der verwendeten Datenbank ABANDA die Datengrundlage der Materialstromdaten für Kupferabfälle verbessern.
- Bei den Kabelabfällen können Überschneidungen von Mengen aus Sortier-, Shredder und sonstigen Behandlungsanlagen vorliegen. Hier kann die Umsetzung einer eindeu-

tigen Abfalldeklaration beim Output von Abfallbehandlungsanlagen zu einer Verbesserung der Daten führen.

- Kupfergehalte von Elektroaltgeräten der Kategorie 6 und 7 sind bislang nicht dokumentiert. Es wurde ein überschlägiger Kupfergehalt aller Elektroaltgeräte für die Auswertung herangezogen.
- Bei den Bauabfällen kann eine Überschneidung von Abfallmengen durch die Vergabe von Inputschlüsselnummern an Outputströme in Verbindung mit dem neuerlichen Einsatz in eine weitere Behandlungsstufe auftreten. Auch hier kann eine eindeutige Deklaration des Outputs von Abfallbehandlungsanlagen die Daten verbessern.
- Die Kupferrecyclingmenge aus dem Altfahrzeugrecycling ist hier über die Metallrecyclingquote berechnet.
- Zur Ermittlung der aus Bauabfall recycelten Kupfermengen wurde bisher nur die Abfallschlüsselnummer 170401 betrachtet, inwieweit aus anderen Schlüsselnummern auch Kupfer rückgewonnen wurde, ohne 170401 zu tangieren, konnte nicht ermittelt werden.
- Kupfermenge in Elektro- und Elektronikaltgeräten über entsprechende Lagermengen sind derzeit nur beispielhaft für ausgewählte Geräte darstellbar. Hier sind voraussichtlich vorliegende Erhebungen der EAR über jährliche Verkaufszahlen bestimmter Produktgruppen, deren Zusammensetzung und Lebensdauer in weiteren Betrachtungen zu berücksichtigen.
- Für eine spezifischere Betrachtung der exportierten Elektronikschrottmengen ist eine Unterteilung in Alt- und Nutzgeräte von Vorteil.
- Für die bessere Darstellung der wirtschaftlichen Substitutionseffekte ist eine differenziertere Darstellung der verwerteten Kupferschrottarten notwendig, um diese mit den entsprechenden Marktpreisangaben bewerten zu können.
- Bei der wirtschaftlichen Betrachtung war eine Projizierung der Mengenverteilung auf die verschiedenen Kupferschrottqualitäten und -preise nicht möglich, da diesbezügliche Angaben nicht veröffentlicht sind. Aus diesem Grund musste vom Durchschnittspreis der Sortenpreise ausgegangen werden.

9.3 Gold

Gold als Material, welches nicht nur als Rohstoff in der Produktion, sondern in vielfältiger Weise z. B. als Schmuck, Wertanlage oder im Dentalbereich eingesetzt wird, ist mengenmäßig schwer zu erheben. Vor allem für die Lagermengen als Schmuck, welcher beispielsweise auch über Generationen weiter gegeben werden kann, sind keine Wege offensichtlich, die dieses Lager transparent und fortschreibbar machen könnten.

Für den Bereich des anthropogenen Lagers an Gold in im Umlauf befindlichen Elektro- und Elektronikgeräten sind Berechnungen auf der Basis von Marktanalysen zum Verkauf von entsprechenden Geräten und deren Goldanteilen möglich. Die Gesellschaft für Konsumforschung GfK Retail and Technologie Germany erhebt kontinuierlich Abverkaufsdaten aus dem Handel. Jedoch wurden diese bisher nicht in Richtung des anthropogenen Goldlagers ausgewertet.

Weiterhin existieren für das Jahr 2007 Bestandsinformationen der GfK zu bestimmten Gerätegruppen. Über deren Aufschlüsselung auf die relevanten Geräte in Verbindung mit den entsprechenden Goldgehalten wäre eine Berechnung des Lagers für 2007 möglich.

Zum Goldeinsatz im Fahrzeugbau sind ebenfalls entsprechende Recherchen in der Automobilbranche erforderlich. Über regelmäßige Statistiken zum Fahrzeugbestand können die entsprechenden Lagermengen ermittelt werden.

Neben dem überwiegend durch die Aurubis AG durchgeführten Recycling des Goldes aus Elektro(nik)altgeräten, wird Gold in Scheideanstalten u. a. aus Schmuck und dem Dentalbereich zurückgewonnen. Die diesbezüglichen Mengen lassen sich nicht einzeln quantifizieren. Anfragen bei Scheideanstalten ergaben, dass sich diese bezüglich detaillierter Mengenangaben sehr bedeckt halten. Das Recycling von Gold aus anderen goldhaltigen Abfällen mit dem Ziel der Rückgewinnung des Goldes ist nicht umfassend darzustellen. Es wird davon ausgegangen, dass innerbetriebliche Kreisläufe das Goldrecycling im Rahmen der Produktion aufgrund der herrschenden Marktpreise intensiv beeinflussen. Abfälle mit bestimmten Goldgehalten werden in speziellen Recyclinganlagen (z. B. Saxonia Edelmetall GmbH) behandelt. Die Rückgewinnungsrate dieser ist nicht bekannt.

Die Mengen an Gold, welche über den Export von Elektro(nik)altgeräten Deutschland verlassen, ist nicht vollständig zu quantifizieren. Eine eindeutige Deklaration der Mengen, welche beispielsweise über die Hamburger Seehäfen exportiert werden, ist hierfür erforderlich. Auch Gold als Bestandteil anderer nicht notifizierungspflichtiger Abfallarten verlässt Deutschland in unbekannter Höhe. In diesem Bereich wäre eine Darstellung der Abfälle hinter den Zollcodenummern nach Abfallverzeichnisverordnung AVV erforderlich.

Es liegen keine Daten zum kumulierten Rohstoffaufwand bzw. zum kumulierten Energieaufwand für die einzelnen Varianten des Goldrecyclings vor.

9.4 Thermoplastische Kunststoffe HD-/LDPE, PET und PVC

Für alle hier betrachteten Kunststoffe ist es wünschenswert, dass die Materialstromdaten spezifischer darstellbar sind und damit auch die Ergebnisse konkreter werden können. So könnten beispielsweise Mengen von Hart- und Weich-PVC getrennt dargestellt werden. Von besonderer Relevanz sind dabei die Verwertungswege der einzelnen Kunststoffarten. Hier fehlt es bislang an Daten für die einzelnen Kunststoffabfälle zu den hochwertig werkstofflich verwerten Mengen bzw. den werkstofflich verwerteten Mischkunststoffanteilen. Auch der Mischkunststoffanteil der einzelnen Kunststoffarten und die Mischkunststoffmenge zur rohstofflichen Verwertung (evtl. weitere Differenzierung nach unterschiedlichen Verfahren) sowie zu unterschiedlichen energetischen Verwertungsverfahren sollte dargestellt werden.

Weitere für die Materialströme der Kunststoffe relevante zu erhebende Daten sind:

- Getrennte Ausweisung der (Re-)Granulate aus Primär- und Sekundärkunststoffen für die im- und exportierte Mengen als Gesamtmenge „Abfälle, Schnitzel und Bruch von Kunststoffen“ im Kapitel 39 „Kunststoffe und Waren daraus“ des Warenverzeichnisses des Statistischen Bundesamtes.
- Aus der Statistik für Im- und Export von nicht notifizierungspflichtigen Abfällen [2] eine getrennte Ausweisung für HD- und LDPE-Kunststoffabfälle sowie separater Zollcode für PET-Abfälle, welche momentan gemeinsam mit anderen Kunststoffen als „Kunststoffe a. n. g.“ erfasst werden.
- Mengenmäßige Erfassung der durch die werkstoffliche Verwertung einzelner Kunststoffabfallarten gewonnenen Regranulatmengen.
- Evtl. eine separate Studie zur Bestimmung der anthropogenen Lagermengen der Kunststoffe, bislang liegen hier keine ganzheitlichen Betrachtungen vor.
- Daten zur Verwertung der Produktionsabfälle, möglichst so differenziert wie für die Post-Consumer-Abfälle.
- Aktuelle Datenbankdaten zum KEA und KRA für die verwerteten Kunststoffabfälle für alle Verwertungsverfahren werden benötigt. Für die hochwertig werkstofflich verwerteten Kunststoffe sind diese evtl. sogar nach Herkunftsbereich der Kunststoffabfälle differenziert zu betrachten, da beispielsweise Kunststoffabfälle aus dem Baubereich anders aufbereitet werden als Verpackungskunststoffe. Die hier verwendeten KEA beruhen auf Literaturrecherchen und sind für einzelne Kunststoffarten zumeist nicht spe-

zifisch. Die KRA wurden über die KEA in Verbindung mit entsprechenden rohstofflichen Daten für Strom und Diesel berechnet.

- Bei der Mischkunststoffverwertung sind für die substituierten Holz- und Betonprodukte weitere Erhebungen zu durchschnittlichen Verbrauchsmengen spezieller Holz- und Betonarten zu erheben um hier gewichtete Mittelwerte zu bestimmen.
- Differenzierte Betrachtung der zu Mahlgut bzw. Regranulat aufbereiteten Sekundärkunststoffe und entsprechende Berücksichtigung bei der Bestimmung der Substitutionswirkungen (insbesondere Marktpreise für PVC-Regranulat und der dazu aufbereiteten Menge).

Quellenverzeichnis

- [1] Statistisches Bundesamt (2009): Umwelt – Abfallentsorgung 2007, Fachserie 19, Reihe 1, Wiesbaden
- [2] Umweltbundesamt (Anlaufstelle Basler Übereinkommen): Import und Export von nicht notifizierungspflichtigen Abfällen nach Warengruppen [online]. Verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/abfallwirtschaft/abfallstatistik/index.htm>
- [3] Wirtschaftsvereinigung Metalle e.V. (WVM) (2008): Metallstatistik 2007
- [4] Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e.V. (BDSV): Stahlrecyclingbilanz 2007
- [5] CONSULTIC (2009): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2007, CONSULTIC Marketing & Industrieberatung GmbH, Alzenau
- [6] Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTB): Monitoring-Berichte Bauabfälle 1-5 (1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2007)
- [7] Statistisches Bundesamt (2008): Umwelt – Abfallentsorgung 2006, Fachserie 19, Reihe 1, Wiesbaden
- [8] Bioabfallverordnung – BioAbfV: Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden vom 21. September 1998 (BGBl. I S. 2955), die zuletzt durch Artikel 5 der Verordnung vom 20. Oktober 2006 (BGBl. I S. 2298) geändert worden ist
- [9] Mantau, U. u. Bilitewski, B. (2010): Stoffstrom-Modell-Holz; Rohstoffströme und CO₂-Speicherung in der Holzverwendung (bisher unveröffentlicht)
- [10] INTECUS/VDP (2009): Bundesweite Altpapierbilanzen seit 1994, erstellt im Auftrag des Verbandes deutscher Papierfabriken e.V. (VDP), erschienen in den Jahresbilanzen des VDP
- [11] RWI Essen/ISI/BGR (2007): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen, Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie
- [12] Europäischer Wirtschaftsdienst (EuWid), Recycling und Entsorgung, verschiedene Ausgaben 2005 bis 2011
- [13] Umweltbundesamt (2007): Seltene Metalle: Maßnahmen und Konzepte zur Lösung des Problems konfliktverschärfender Rohstoffausbeutung am Beispiel Coltan; UBA-Forschungsbericht 363 01 124,
- [14] IZT/Fraunhofer (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien - Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage, Forschungsprojekt Nr. I D 4 – 02 08 15 – 28/07 im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie Referat III A 5 – Mineralische Rohstoffe
- [15] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2007): Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe für Metall- und Nichtmetallrohstoffe. Bestandteil des Berichtes zur aktuellen rohstoffwirtschaftlichen Situation und zu möglichen rohstoffpolitischen Handlungsoptionen im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit
- [16] Öko-Institut e.V.: GEMIS 4.6, www.gemis.de
- [17] Hömann, R. (2010): Email vom 11.10.2010 Leiter Abteilung Energie und Verkehr, Betriebswirtschaft und Beschaffung Wirtschaftsvereinigung Stahl

- [18] Fraunhofer UMSICHT/INTERSEROH (2008): Recycling für den Klimaschutz – Studie von Fraunhofer UMSICHT und INTERSEROH zur CO₂-Einsparung durch den Einsatz von recycelten Rohstoffen im Auftrag der ALBA-Group, Berlin
- [19] MEPS (International) LTD - Independent Steel Industry Analysts, Consultants, Steel Prices, Reports and Publications (2011): EU carbon steel prices with individual product forecasts [online]. Verfügbar unter: <http://www.meps.co.uk/EU%20price.htm> [1.12.2010]
- [20] Wirtschaftsvereinigung Stahl (2010): Auskunft von Frau Latzel (Wirtschaftsvereinigung Stahl), Email vom 01.12.2010
- [21] Bundesverband Deutsche Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V. (BDSV): BDSV-Statistik: Marktdaten der Stahl- und Gießereiindustrie sowie der Stahlrecycling-industrie [online]. Verfügbar unter http://www.bdsv.org/info_bilanz.php?sid=113 [02.12.2010]
- [22] Kupferinstitut (2010): Wirtschaftliche Bedeutung der Kupferindustrie in Deutschland [online]. Verfügbar unter: http://www.kupfer-institut.de/front_frame/frameset.php3?idcat=34&client=1&idside=94&idcatside=109&lang=1&parent=1 [13.08.2020]
- [23] HMS Bergbau AG (2009): HMS Bergbau AG gründet neue Tochtergesellschaft - KGHM HMS Bergbau AG beginnt mit Aufsuchung von Kupfer in Sachsen; Presseinformation 23.06.2009
- [24] Umweltbundesamt (2007): Das Rohstoffsystem Kupfer – Status Quo, Perspektiven und Handlungsbedarf aus Sicht einer nachhaltigen Ressourcenpolitik; F + E-Vorhaben, bearbeitet durch das Wuppertal-Institut, im Rahmen des Umweltforschungsplanes – Förderkennzeichen: 206 93 100/01
- [25] Schäfer, T. (2004): Untersuchung zur Dispersion und ihren Auswirkungen beim Übergang aus der Nutzungsphase in das Recycling, Dissertation TH Aachen
- [26] Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung, (RWI Essen), Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, (ISI), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2006): Trends der Angebots- und Nachfragesituation bei mineralischen Rohstoffen, Forschungsprojekt Nr. 09/05 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi)
- [27] Hild, R. (2010): Kräftiges Plus der Pkw-Produktion in Deutschland zu erwarten; ifo-Schnelldienst 5/2010 Seite 44 ff.
- [28] Umweltbundesamt (2010): Export von Elektroaltgeräten – Fakten und Maßnahmen, aus der Schriftenreihe Hintergrund, Dessau-Roßlau
- [29] Umweltbundesamt (2010): Grenzüberschreitende Abfallverbringung – Baseler Übereinkommen [online]. Verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/abfallwirtschaft/abfallstatistik/index.htm>
- [30] Umweltbundesamt (2008): Verbleib der gelöschten Pkw in Deutschland 2006 [online]. Verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do;jsessionid=209121DBBD735942B9AE008C5AAF25E5?ident=15375> [26.08.2010]
- [31] Organisation Europäischer Hersteller von Kupfergusslegierungen (OECAM) (2010): Steigende Bedeutung des Recycling [online]. Verfügbar unter: <http://www.oecam.org/> [15.11.2010]
- [32] Deutsches Kupferinstitut (1997): Informationsdruck Kupfer – Vorkommen, Gewinnung, Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung; Düsseldorf

- [33] Universität Freiburg (2010): Vorlesungsscript Universität Freiburg Institut für anorganische und analytische Chemie [online]. Verfügbar unter: http://ruby.chemie.uni-freiburg.de/Vorlesung/metalle_8_2.html [15.11.2010]
- [34] Universität Paderborn (2010): Vorlesungsskript Allgemeine und anorganische Chemie – Technische Elektrolyseverfahren [online]. Verfügbar unter: http://groups.uni-paderborn.de/cc/lehrveranstaltungen/aac/vorles/skript/kap_11/kap11_3/kap11_34.html [16.11.2010]
- [35] Kuhn, M. (2010): Produzent ohne eigene Mine. In Recyclingmagazin - Sonderheft Metallrecycling 2010, Seite 6
- [36] Aurubis (2010): Konzern Zwischenlagebericht für das 1. Hj. 2009/2010
- [37] Metalle pro Klima - Eine Initiative der NE-Metallindustrie (2010): Best Practice: Kayser Recycling System (KRS) [online]. Verfügbar unter: <http://www.metalleproklima.de/bestpractice/elektronikschrott-recycling>, abgerufen am [28.10.2010]
- [38] Quadflieg, D.; Referent im Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) im VDE (2010): Email zu Stromkreislängen [26.08.2010]
- [39] Telefonische Anfrage bei Frau Marciniak vom Statistischen Landesamt Sachsen am 16.11.2010
- [40] Verband deutscher Metallhändler e. V. (VDM) (2007): Qualitätsgemeinschaft Kabelzerleger im Verband deutscher Metallhändler; Imagebroschüre
- [41] Schäfer, T. (2004): Untersuchung zur Dispersion und ihren Auswirkungen beim Übergang aus der Nutzungsphase in das Recycling, Dissertation TH Aachen
- [42] Ressourcen Management Agentur (RMA) (2006): Beitrag der Abfallwirtschaft zum Kupferhaushalt Österreichs, Projekt ABASG III – Kupfer, Wien
- [43] International Energy Agency (2009): Chemical and Petrochemical Sector, Potencial of best practice technology and other measures for improving energy efficiency; IEA information paper, September
- [44] Umweltbundesamt (2008): Kupfereffizienz – unerschlossene Potenziale, neue Perspektiven; F + E-Vorhaben, bearbeitet durch das Wuppertal-Institut, im Rahmen des Umweltforschungsplanes – Förderkennzeichen: 206 93 100/01
- [45] Hagelüken, C. (2009): Edelmetalle auf dem Weg ins NIRWANA, Umweltmagazin 06/2009, Seite 16
- [46] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA) (2009): Fahrzeugzulassungen, Außerbetriebsetzungen im Jahresverlauf seit 1970, Jahr 2008
- [47] Umweltbundesamt (2010): Verbleib der gelöschten PKW in Deutschland 2010 [online]. Verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/document/downloadImage.do;jsessionid=209121DBBD735942B9AE008C5AAF25E5?ident=15375> [26.08.2010]
- [48] Starke, T. (2009): Projektarbeit Altfahrzeugverwertung in Deutschland, Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten der TU Dresden
- [49] Schenk, M. (2000): Shredderleichtfraktion – Aufkommen und Entsorgung, Müll-Handbuch Kennzahl 8517.8, Lieferung 5/00, Erich Schmidt Verlag Berlin
- [50] Hagelüken, C. (2007): The challenge of open cycles – barriers to a closed loop economy (consumer electronics and cars). Präsentation. Umicore Precious Metals Refining. Vortrag vom 03.09.07 auf R'07 World Congress. Davos, Schweiz

- [51] EU-Verordnung Nr. 333/2011 des Rates vom 31. März 2011, mit Kriterien zur Festlegung, wann bestimmte Arten von Schrott gemäß der Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates nicht mehr als Abfall anzusehen sind
- [52] Chancerel, P.; Rotter, V. S. (2009): [Recycling-oriented characterization of small waste electric and electronic equipment](#). Waste Management 29 (8), 2009: 2336-2352
- [53] Kupferinstitut (2010): Internetauftritt des Deutschen Kupferinstituts; aufgerufen am 13.08.2020, http://www.kupfer-institut.de/front_frame/frameset.php3?idcat=34&client=1&idside=94&idcatside=109&lang=1&parent=1
- [54] Wittmer, D. (2006): Kupfer im regionalen Ressourcenhaushalt, Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 2006
- [55] Umweltbundesamt (2010): Ermittlung von Ressourcenschonungspotenzialen bei der Verwertung von Bauabfällen und Erarbeitung von Empfehlungen zu deren Nutzung; UBA-Forschungsbericht, Förderkennzeichen 3708 95 303, Dessau-Rosslau,
- [56] ABANDA (2010): Abfallanalysendatenbank des Landes Nordrhein-Westfalen [online] Verfügbar unter: <http://www.lanuv.nrw.de/abfall/bewertung/abanda.htm> [22.11.2010]
- [57] Krähling, H. (2010) : Die Zukunft der Kunststoffverwertung – Beitrag zur Ressourceneffizienz; Vortrag 19. Seminar "Kunststoffrecycling in Sachsen", HDK Dresden
- [58] Fremgen, B. (2004): Einsatz aufbereiteter MVA-Schlacke als Baustoff auf Deponien – noch möglich trotz DepVerwV; in Müll und Abfall Heft 08/2004, Seite 364 ff
- [59] Umweltbundesamt (Hg.) (2011): Indikatoren/Kennzahlen für den Rohstoffverbrauch im Rahmen der Nachhaltigkeitsdiskussion, FKZ 370593368, Dessau-Roßlau
- [60] Recycling Magazin (2010): Marktplätze: Volatil im Aufwind; Recyclingmagazin 19/2010, Seiten 35 ff
- [61] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) (2009): Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien Band XXXVIII, Bundesrepublik Deutschland – Rohstoffsituation 2008, Hannover
- [62] Hagelüken, Ch.; Buchert, M. und Stahl, H. (2005): Stoffströme der Platinmetallgruppe-Systemanalyse und Maßnahmen für eine nachhaltige Optimierung der Stoffströme der Platingruppenmetalle, GDBM-Fachausschuss Sondermetall
- [63] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2008): Elektro- und Elektronikgeräte in Deutschland: Daten 2007 und 2008 zur Erfassung, Behandlung und Wiederverwendung [online]. Verfügbar unter: http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/daten_elektrogeraete_2007_2008_bf.pdf [26.09.2011]
- [64] Landau, U. (2006): Steckverbinder im Automobilbau, 28. Ulmer Gespräche, Mai 2006
- [65] Krafftahrt-Bundesamt (2010): Bestandsstatistik 2007
- [66] SAXONIA Edelmetalle GmbH (2010): Darstellung zum Edelmetallrecycling [online]. Verfügbar unter: <http://www.saxonia.de/german/index.htm> [22.10.2010]
- [67] Aurubis AG (2011): Information der Aurubis AG (durch Herrn Broszio) per Email, 10.05.2011
- [68] Lindner, C. (2011), Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH, telefonische Auskunft am 16.02.2011
- [69] Umweltbundesamt (2001): Grundlagen für eine ökologisch und ökonomisch sinnvolle Verwertung von Verkaufsverpackungen; Umweltforschungsplan des BMU, Forschungsbericht 298 337 19, erstellt durch HTP und IFEU

- [70] Chancerel, P. (2010): Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment, Dissertation an der TU Berlin veröffentlicht in der ITU-Schriftenreihe Band 09/2010, Berlin
- [71] Sander, K.; Schilling, S. (2010): Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten/Elektroschrott; Ökopol GmbH, im Auftrag des Umweltbundesamtes, FKZ.: 3708 93 300, Hamburg
- [72] Hagelüken, Ch. (2007): Wertstoffpotenziale und Edelmetallgewinnung aus EAG – Vortrag im Rahmen der Tagung „Das ElektroG und die Praxis, Monitoring – Erstbehandlung – Technik“ an der TU Dresden, 29.03.2007
- [73] Umweltbundesamt (2010): Optimierung der Steuerung und Kontrolle grenzüberschreitender Stoffströme bei Elektroaltgeräten /Elektroschrott, UBA-Forschungsbericht, Förderkennzeichen 3708 93 300, Dessau-Rosslau
- [74] Hollstein, F.; Heidrich, K.; Hipke, N. (2008): Applikationsbeispiel zur sensorgestützten Qualitätskontrolle beim Recycling von Leichtverpackungen des DSD, Proc. 13. Freiburger Probenahmetagung, Vortrag 9, Freiberg 2008, ISBN 978-3-938390-04-7
- [75] PlasticsEurope (2010): Deutschland 2007, Kunststoffherzeugung im Überblick
- [76] Statistisches Bundesamt (2010): Warenverzeichnis für die Außenhandelsstatistik 2007, Kapitel 39 Kunststoffe und Waren daraus [online]. Verfügbar unter: http://www.destatis.de/jetspeed/portal/cms/Sites/destatis/Internet/DE/Content/Klassifikationen/Aussenhandel/Content75/warenverzeichnis_downloads.templateId=renderPrint.psml [11.11.2010]
- [77] Außenhandelsabteilung des Statistischen Bundesamtes, Telefonische Auskunft am 12.11.2010
- [78] Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (BVSE) (2010): PET-Recycler haben einen Schwierigen Stand, Überkapazitäten machen den Unternehmen zu schaffen, Interview mit Dr. Probst [online]. Verfügbar unter: http://www.bvse.de/2/3541/PET_Recycler_haben_einen_schwierigen_Stand [24.11.2010]
- [79] Europäischer Wirtschaftsdienst (EuWid), Recycling und Entsorgung (2010): Mehr PET-Flaschen in Europa gesammelt, Nr. 30/2010, Seite....
- [80] Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt e.V. (2010): PVC-Abfälle in Deutschland 2007
- [81] Statistisches Bundesamt: Gebäude und Wohnungen, 2009
- [82] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (1999): Bauprodukte und Inhaltsstoffe, Referat von Urs von Arx, VSA-Fachtagung
- [83] APPRICOD guide: Towards Sustainable Plastic Construction and Demolition Waste Management in Europe
- [84] Umweltbundesamt und VKE (2002): „Verwertungspotenziale von Kunststoffabfällen (Nicht-Verpackungen) aus Gewerbe und Privathaushalten“, erstellt von Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH, FKZ 200 33 327 2005, Teilbericht 1: Darstellung der Aufkommens- und Verwertungsmengen von Kunststoffabfällen sowie deren Entsorgungswege für den Bezugszeitraum 1999; Großostheim
- [85] Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH (2004): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2003; Großostheim
- [86] Bundesamt für Energie (2000): Ökoinventar der Entsorgungsprozesse von Baumaterialien, Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen von Gebäuden, Gabor Doka, Zürich
- [87] Vinyl 2010 (2010): Fortschrittsbericht 2008, Berichterstattung über die Tätigkeiten im Jahr 2007, Nachhaltigkeitsprogramm der europäischen PVC-Industrie

- [88] Europäischer Wirtschaftsdienst (EuWid) Recycling und Entsorgung: Preisspiegel für Altkunststoffe Deutschland und Preisspiegel für Standardkunststoffe in Deutschland, Ausgaben 2005 bis 2010
- [89] Plastiker (2010): Rohstoffe und Preise [online]. Verfügbar über: http://plasticker.de/preise/preise_monat.php [01.12.2010]
- [90] Plastiker (2010): PET-Report [online]. Verfügbar über: http://plasticker.de/preise/pet_report_detail.php?nr=11578, vom 18.06.2010 [03.12.2010]
- [91] Wirtschaftsvereinigung Stahl: Bericht zur Lage auf dem Stahlschrottmarkt, Februar 2011
- [92] Fehringer, R.; Brunner, P. H.(1997): Kunststoffflüsse und Möglichkeiten der Kunststoffverwertung in Österreich; Monographien Band 80; Umweltbundesamt Wien, ISBN: 3-85457-331-6; Wien
- [93] Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (2010): Wege zu einer nachhaltigen Abfallwirtschaft; BUND Positionen Nr. 49; Juni 2010
- [94] Fricke, K.; Bahr, T.; Thiel, T.; Kugelstadt, O. (2009): Stoffliche oder energetische Verwertung – Ressourceneffizientes Handeln in der Abfallwirtschaft, in: GGSC-Seminare, 11. Infoseminar, Berlin, 04./05.06.2009 [online]. Verfügbar unter: <http://www.ggsc-seminare.de/unterlagen.html> [18.11.2010]
- [95] Heyde, M.; Kremer, M.: Verwertung von Kunststoffabfällen aus Verkaufsverpackungen in der Zementindustrie; Ökologische Analyse nach dem LCA-Prinzip; Auftraggeber: Verein Deutscher Zementwerke, Freising, 1997
- [96] Umweltbundesamt (2010): Nutzung der Potenziale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung; erstellt von IAA (TU Dresden) und INTECUS GmbH, FKZ: 3707 33 303
- [97] Huber, J. et. al. (1994): Wirtschaftlichkeit und stofflich-ökologischer Nutzwert von werkstofflichen, rohstofflichen und energetischen Verfahren des Kunststoffrecyclings; Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
- [98] Heyde, M.; Kremer, M. (1998): Ökobilanzen zur Verwertung von Kunststoffabfällen aus Sammlungen des Dualen Systems -Analysen der in Deutschland diskutierten Verfahren; in IG KURIS, 7. Seminar Kunststoffrecycling in Sachsen Leipzig
- [99] Krähling, H., Technologieentwicklungs GmbH für ökoefiziente Polymerverwertung: Die Zukunft der Kunststoffverwertung – Beitrag zur Ressourceneffizienz; Vortrag im Rahmen des 19. Seminars „Kunststoffrecycling in Sachsen“ am 04.05.2010
- [100] Statistisches Bundesamt (2010): GENESIS-Online-Datenbank, Aus- und Einfuhr (Außenhandel): Deutschland, Jahre, Warenverzeichnis (6-/8-Steller). Abruf vom 17.02.2011
- [101] Aurubis AG (2009): Verantwortung zeigen. Nachhaltigkeitsbericht 2009
- [102] Aurubis AG (2009): Umweltschutz als Herausforderung. Umweltreport Aurubis 2009
- [103] Umrechnung nach http://www.stahl-online.de/forschung_und_technik/produktionsverfahren/Roheisen_und_Stahlerzeugung.aspx
- [104] BDSV (2008): Stahlschrottversorgung Deutschland [online]. Verfügbar unter: www.bdsv.org/downloads/stat_07_08.pdf [01.12.2010]
- [105] Merkel, Th. (2008): Statistik zur Erzeugung und Nutzung von Eisenhüttenschlacken 2007, Report 1/08 des Instituts für Baustoffforschung, Juli 2008, Seite 18 ff

- [106] Statistisches Bundesamt (2008): Produzierendes Gewerbe, Eisen und Stahl, Fachserie 4, Reihe 8.1
- [107] Statistisches Bundesamt (2011): Erzeugerpreise für schweres Heizöl: Deutschland, Monate, Art der Lieferung, Berichtsort bzw. Geltungsbereich, Wiesbaden 2011
- [108] Verband der Elektrizitätswirtschaft Baden-Württemberg e.V. (2007): Strompreise in Deutschland, Stand Februar 2007
- [109] Statistisches Bundesamt (2007): Energiepreise und Notierungen 2007, Wiesbaden 2008
- [110] Bund der Ingenieure für Wasserwirtschaft, Abfallwirtschaft und Kulturbau (2009): Energieverbrauch in Deutschland 2007, Stand 2007, Daten, Fakten, Kommentare, BWK Bd. 61 (2009) Nr. 6, Sindelfingen
- [111] AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK (2010): Fernwärme-Preisübersicht (Stichtag: 01.10.2010), Frankfurt am Main
- [112] VIK Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft (2007): VIK-Jahrespressekonferenz 2007, 24.10.2007, Berlin
- [113] Statistisches Bundesamt (2005): Steinkohle aus Nicht-EU-Ländern ist 22 % teurer geworden; Pressemitteilung Nr.399 vom 22.09.2005, Wiesbaden
- [114] Wirtschaftsvereinigung Stahl (2010): Stahlerzeugung in Deutschland, Düsseldorf
- [115] Ameling, D. (2008): Stahl für immer jung – Innovationen sichern die Zukunft, Entwicklung des technischen Wissens am Beispiel Stahl; Fachvortrag im Rahmen der acatech-Konferenz – Technisches Wissen. Entstehung – Methoden - Strukturen, Berlin
- [116] Kerkhoff, H. J. (2008): Structural Change on commodity and steel markets – consequences for the automotive industry; Fachbeitrag zur 16th Handelsblatt Annual Conference – The Automotive Industry, 16.12.2008 Frankfurt Main
- [117] Moeller, E. (2008): Handbuch Konstruktionswerkstoffe. Auswahl, Eigenschaften, Anwendungen, München
- [118] Ellermann, O. (2007): Handel im Wandel; Vortrag vor dem Bundesverband Deutscher Stahlhandel BDS, Martinsberg
- [119] Wirtschaftsvereinigung Stahl (2011): Information durch Frau Stramka (WV Stahl) per Email vom 05.04.2011
- [120] Kerkhoff, H. J.; Dahlömann, P. (2010): Präsentation des Stahlinstitutes VDEh und der Wirtschaftsvereinigung Stahl, 8.11.2010 Düsseldorf
- [121] Kerkhoff, H. J. (2009): Präsentation des Stahlinstitutes VDEh und der Wirtschaftsvereinigung Stahl vom 03.06.2009 Düsseldorf
- [122] INTECUS GmbH und TU Dresden: Potenzialstudie über Aufkommen und Behandlung biogener Abfälle im Freistaat Sachsen, im Auftrag des Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, noch unveröffentlicht
- [123] Statistisches Bundesamt (2010): Umweltnutzung und Wirtschaft, Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Teil 2: Energie, Rohstoffe, Tabelle 3.2.3.5, Ausgabe 2010
- [124] Umweltbundesamt (2008): Nettoimporte in % des Primärenergieverbrauchs [online]. Verfügbar über <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/document/downloadPrint.do;jsessionid=50A1F3F2AF0B5CF24D6243EF0BD80808?ident=16163>, [11.04.2011]

- [125] Faulstich, M.; Hamatschek, E.; Mocker, M.; Jung, R.; Quicker, P. (2008): Klärschlamm ein „nachwachsender“ Energierohstoff? TU München, ATZ Entwicklungszentrum Sulzbach-Rosenberg,
- [126] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2008): Klärschlamm – Statistik 2008 [online]. Verfügbar unter: <http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/statistiken/doc/3195.php> [09.05.2011]
- [127] Statistisches Bundesamt (2010): Umwelt – Abfallentsorgung 2008, Fachserie 19, Reihe 1, Wiesbaden
- [128] Umweltbundesamt (2007): Stoffstrommanagement von Biomasseabfällen mit dem Ziel der Optimierung der Verwertung organischer Abfälle (FKZ 205 33 313), erstellt durch Ifeu-Institut und Öko-Institut
- [129] Umweltbundesamt (2010): Aufwand und Nutzen einer optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und Ressourcenschutz (FKZ 3707 33 304), erstellt durch Witzenhausen-Institut
- [130] Umweltbundesamt, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit und Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser-, Rohstoffwirtschaft e.V.: Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft - Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz, (FKZ 3708 31 302), Darmstadt/Heidelberg/Berlin 2010
- [131] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (2011): Heimische Energiegewinnung und Importabhängigkeit – Deutschland, Energiedaten, Tabelle 3, Berlin
- [132] Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (2010): AGFW – Hauptbericht 2009, Frankfurt am Main
- [133] Wirtschaftsvereinigung Stahl (2011): Umsatzerlöse der Stahlindustrie in Deutschland, Düsseldorf 2011, [online]. Verfügbar unter: http://www.stahl-online.de/wirtschaft_und_politik/stahl_in_zahlen/Dokument/2010/Umsatz_Deutschland2010_komplett_mit_Exportquote.pdf [01.06.2011]
- [134] Plastics Europe (2010): Erzeugung von Kunststoff in Deutschland 2007 bis 2009, [online]. Verfügbar unter: <http://plasticseurope.cefic.org/documents/document/20100622164859-grafiken.pdf> [01.06.2011]
- [135] Statistisches Bundesamt (2010): Nachhaltige Entwicklung in Deutschland – Daten zum Indikatorenbericht 2010, Wiesbaden
- [136] Umweltbundesamt und Statistisches Bundesamt (2009): Verbesserung von Rohstoffproduktivität und Ressourcenschonung – Weiterentwicklung des direkten Materialinput-indikators; FKZ 206 93 100/02; Wiesbaden 2009
- [137] Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss, und den Ausschuss der Regionen (2005): Thematische Strategie für eine nachhaltige Nutzung natürlicher Ressourcen“, KOM(2005) 670 endgültig
- [138] Mitteilung der Kommission an den Rat, das Europäische Parlament, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss, und den Ausschuss der Regionen (2005): Weiterentwicklung der nachhaltigen Ressourcennutzung: Eine thematische Strategie für Abfallvermeidung und -recycling, KOM(2005) 666 endgültig
- [139] Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, Abl. L 312 vom 22.11.2008, S. 3

Anlage 1: Spezifische Gehalte der einzelnen Abfallarten an den zu betrachtenden Materialströmen

Nachfolgend sind für die einzelnen, im Abschnitt 3 analysierten Abfallarten die den Mengenströmen zugrunde liegenden Gehalte an zu betrachtenden Materialien sowie zugehörige Datenquellen dargestellt. Dazu folgende Erläuterungen:

e.A. = (eigene Annahmen) Eigene Annahmen wurden getroffen, wenn Sekundärdaten nicht vorliegen und aus dem Kontext der Abfallbezeichnung und aus Erfahrungswerten eine derartige Annahme getroffen werden konnte.

rot markierte Werte = Für die Ermittlung der Gehalte an Eisen- und Nichteisenmetallen wurden neben umfangreichen Sekundärliteraturdaten insbesondere die Daten der Abfallanalysendatenbank des Landes Nordrhein-Westfalen ausgewertet. Die Probenanzahlen, auf denen diese Daten beruhen, sind sehr unterschiedlich. Alle rot markierten Werte sind mit Daten von weniger als fünf Proben hinterlegt. Diese wurden zwar für die Materialstromanalyse verwendet, stehen allerdings unter dem Vorbehalt einer zukünftigen tieferen Untersetzung.

Berücksichtigte Abfälle für den Materialstrom „Biologisch abbaubare Abfälle“ und deren Gehalte an biologisch abbaubaren Abfällen in Abfallgemischen (B = sonst. biolog. abbaubare Abfälle, H = Holz)

ASN	Bezeichnung	Gehalt	Quelle
02 01 02	Abfälle aus tierischem Gewebe	B 100%	e.A.
02 01 03	Abfälle aus pflanzlichem Gewebe	B 100%	e.A.
02 01 06	tierische Ausscheidungen, Gülle/Jauche und Stallmist (einschließlich verdorbenes Stroh), Abwässer, getrennt gesammelt und extern behandelt	B 100%	e.A.
02 01 07	Abfälle aus der Forstwirtschaft	H 100%	[47]
02 02 01	Schlämme von Wasch- und Reinigungsvorgängen	B 33%	[1]
02 02 02	Abfälle aus tierischem Gewebe	B 100%	[1]
02 02 03	für Verzehr oder Verarbeitung ungeeignete Stoffe	B 100%	[1]
02 02 04	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung	B 33%	[1]
02 02 99	Abfälle a. n. g.	B 50%	[1]
02 03 01	Schlämme aus Wasch-, Reinigungs-, Schäl-, Zentrifugier- und Abtrennprozessen	B 33%	[1], e.A.
02 03 04	für Verzehr oder Verarbeitung ungeeignete Stoffe	B 100%	e.A.
02 03 05	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung	B 33%	[1], e.A.
02 03 99	Abfälle a. n. g.	B 50%	e.A.
02 05 01	für Verzehr oder Verarbeitung ungeeignete Stoffe	B 100%	e.A.
02 05 02	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung	B 33%	[1], e.A.
02 05 99	Abfälle a. n. g.	B 50%	e.A.
02 06 01	für Verzehr oder Verarbeitung ungeeignete Stoffe	B 100%	e.A.
02 06 03	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung	B 33%	[1], e.A.
02 06 99	Abfälle a. n. g.	B 50%	e.A.
02 07 01	Abfälle aus der Wäsche, Reinigung und mechanischen Zerkleinerung des Rohmaterials	B 33%	[1], e.A.

ASN	Bezeichnung	Gehalt	Quelle
02 07 02	Abfälle aus der Alkoholdestillation	B 100%	e.A.
02 07 04	für Verzehr oder Verarbeitung ungeeignete Stoffe	B 100%	e.A.
02 07 05	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung	B 33%	[1], e.A.
02 07 99	Abfälle a. n. g.	B 50%	e.A.
03 01 01	Rinden- und Korkabfälle	H 100%	[47]
03 01 04*	Sägemehl, Späne, Abschnitte, Holz, Spanplatten und Furniere, die gefährliche Stoffe enthalten	H 100%	[47]
03 01 05	Sägemehl, Späne, Abschnitte, Holz, Spanplatten und Furniere, die keine gefährlichen Stoffe enthalten	H 100%	[47]
03 01 99	Abfälle a. n. g.	H 100%	[47]
03 03 01	Rinden- und Holzabfälle	H 100%	[47]
03 03 05	De-inking-Schlämme aus dem Papierrecycling	B 25%	[1]
03 03 07	mechanisch abgetrennte Abfälle aus der Auflösung von Papier- und Pappabfällen	B 35%	[1]
03 03 08	Abfälle aus dem Sortieren von Papier und Pappe für das Recycling	B 50%	[1]
03 03 10	Faserabfälle, Faser-, Füller- und Überzugsschlämme aus der mechanischen Abtrennung	B 37,5%	[1]
03 03 11	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 03 03 10 fallen	B 32,5%	[1]
04 01 01	Fleischabschabungen und Häuteabfälle	B 100%	e.A.
04 01 02	geäschertes Leimleder	B 100%	e.A.
04 02 10	organische Stoffe aus Naturstoffen (z.B. Fette, Wachse)	B 100%	e.A.
04 02 21	Abfälle aus unbehandelten Textilfasern	B 34%	[2]
04 02 22	Abfälle aus verarbeiteten Textilfasern	B 34%	[2]
15 01 03	Verpackungen aus Holz	H 100%	[47]
15 01 06	Gemischte Verpackungen	H 15,3%	[46], [47]
15 01 10*	Verpackungen, die Rückstände gefährlicher Stoffe enthalten	H 15,3%	[46], [47]
17 02 01	Holz	H 100%	[47]
17 02 04*	Glas, Kunststoff und Holz, die gefährliche Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind	H 90%	[47]
17 09 03*	sonstige Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich gemischte Abfälle), die gefährliche Stoffe enthalten	H 22,2%	[42], [43], [47]
17 09 04	gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01, 17 09 02 und 17 09 03 fallen	H 22,2%	[42], [43], [47]
19 05 01	nicht kompostierte Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Abfällen	B 50%	[46], e.A.
19 05 02	nicht kompostierte Fraktion von tierischen und pflanzlichen Abfällen	B 100%	[46], e.A.
19 05 03	nicht spezifikationsgerechter Kompost	B 100%	[46], e.A.
19 05 99 01	Kompost (spezifikationsgerecht)	B 100%	[46], e.A.

ASN	Bezeichnung	Gehalt	Quelle
19 06 03	Flüssigkeiten aus der anaeroben Behandlung von Siedlungsabfällen	B 5%	[46], e.A.
19 06 04	Gärrückstand/-schlamm aus der anaeroben Behandlung von Siedlungsabfällen	B 25%	[46], e.A.
19 06 05	Flüssigkeiten aus der anaeroben Behandlung von tierischen und pflanzlichen Abfällen	B 5%	[46], e.A.
19 06 06	Gärrückstand/-schlamm aus der anaeroben Behandlung von tierischen und pflanzlichen Abfällen	B 25%	[46], e.A.
19 12 06*	Holz, das gefährliche Stoffe enthält	B 100%	e. A:
19 12 07	Holz mit Ausnahme desjenigen, das unter 19 12 06 fällt	B 100%	e.A.
20 01 08	biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle	B 100%	e.A.
20 01 25	Speiseöle und -fette	B 100%	e.A.
20 01 37*	Holz, das gefährliche Stoffe enthält	H 100%	[47]
20 01 38	Holz mit Ausnahme desjenigen, das unter 20 01 37* fällt	H 100%	[47]
20 02 01	biologisch abbaubare Abfälle	B 100%	e.A.
20 03 01 00	gemischte Siedlungsabfälle nicht differenzierbar	H 1,7%	[5], [6], [19], [30], [31], [47]
20 03 01 01	Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle gemeinsam über die öffentliche Müllabfuhr eingesammelt	H 1,7%	[5], [6], [19], [30], [31], [47]
20 03 01 02	Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt	H 9,3%	[6], [47]
22 03 01 04	Abfälle aus der Biotonne	B 90%	[6], [20]
20 03 02	Marktabfälle	B 91%	[21]
20 03 07	Sperrmüll	H 43,8%	[36], [37], [38], [39], [40], [41], [47]

Berücksichtigte Abfälle für den Materialstrom „Kunststoffe“ und deren Gehalte an Kunststoffen in Abfallgemischen (rot markiert sind Schätzungen)

ASN	Bezeichnung	Gehalt	Quelle
02 01 04	Kunststoffabfälle (ohne Verpackungen)	100%	e.A.
03 03 05	Deinking-Schlämme aus dem Papierrecycling	5%	[1]
03 03 07	mechanisch abgetrennte Abfälle aus der Auflösung von Papier- und Pappabfällen	5%	[1]
03 03 08	Abfälle aus dem Sortieren von Papier und Pappe für das Recycling	5%	[1]
03 03 10	Faserabfälle, Faser-, Füller- und Überzugsschlämme aus der mechanischen Abtrennung	5%	[1]
04 02 09	Abfälle aus Verbundmaterialien (imprägnierte Textilien, Elastomer, Plastomer)	100%	e.A.
04 02 21	Abfälle aus unbehandelten Textilfasern	66%	[2]
04 02 22	Abfälle aus verarbeiteten Textilfasern	66%	[2]

ASN	Bezeichnung	Gehalt	Quelle
07 02 13	Kunststoffabfälle	100%	e.A.
08 01 11*	Farb- und Lackabfälle, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten	33%	[1]
08 01 12	Farb- und Lackabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 01 11 fallen	55%	[1]
08 01 15*	wässrige Schlämme, die Farben oder Lacke mit organischen Lösemitteln oder anderen gefährlichen Stoffen enthalten	5%	[1]
08 01 16	wässrige Schlämme, die Farben oder Lacke enthalten, mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 01 15 fallen	5%	[1]
08 01 17*	Abfälle aus der Farb- oder Lackentfernung, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten	50%	e.A.
08 01 18	Abfälle aus der Farb- oder Lackentfernung mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 01 17 fallen	50%	e.A.
08 01 21*	Farb- oder Lackentfernerabfälle	50%	e.A.
08 04 09*	Klebstoff- und Dichtmassenabfälle, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten	33%	[1]
08 04 10	Klebstoff- und Dichtmassenabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 04 09 fallen	55%	[1]
08 04 13*	wässrige Schlämme, die Klebstoffe oder Dichtmassen mit organischen Lösemitteln oder anderen gefährlichen Stoffen enthalten	5%	[1]
08 04 14	wässrige Schlämme, die Klebstoffe oder Dichtmassen enthalten, mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 01 13 fallen	5%	[1]
09 01 10	Einwegkameras ohne Batterien	92%	[3]
09 01 11*	Einwegkameras mit Batterien, die unter 16 06 01, 16 06 02 oder 16 06 03 fallen	80%	[3]
09 01 12	Einwegkameras mit Batterien mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 91 11 fallen	80%	[3]
12 01 05	Kunststoffspäne und -drehspäne	100%	e.A.
15 01 02	Verpackungen aus Kunststoff	100%	e.A.
15 01 05	Verbundverpackungen	21%	[4]
15 01 06 00	gemischte Verpackungen nicht differenzierbar	32,30%	[46]
15 01 06 01	Leichtverpackungen (LVP)	43,40%	[6]
15 01 09	Verpackungen aus Textilien	50%	e.A.
15 01 10*	Verpackungen, die Rückstände gefährlicher Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind	32,30%	[46]
15 02 02*	Aufsaug- und Filtermaterialien (einschließlich ÖlfILTER a. n. g.), Wischtücher und Schutzkleidung, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind	50%	e.A.
15 02 03	Aufsaug- und Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung mit Ausnahme derjenigen, die unter 15 02 02 fallen	50%	e.A.
16 01 03	Altreifen	27%	[7]
16 01 04*	Altfahrzeuge	18%	[8], [9]
16 01 06	Altfahrzeuge, die weder Flüssigkeiten noch andere gefährliche Bestandteile enthalten	20%	[8], [9]

ASN	Bezeichnung	Gehalt	Quelle
16 01 19	Kunststoffe	100%	e.A.
16 01 22 00	Bauteile nicht differenzierbar	50%	e.A.
16 01 22 02	nicht metallische Bauteile / Ersatzteile	50%	e.A.
16 02 09*	Transformatoren und Kondensatoren, die PCB enthalten	25%	[10]
16 02 10*	gebrauchte Geräte, die PCB enthalten oder damit verunreinigt sind, mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 09 fallen	22%	[11], [12]
16 02 11*	gebrauchte Geräte, die teil- und vollhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe enthalten	22%	[11], [12]
16 02 12*	gebrauchte Geräte, die freies Asbest enthalten	22%	[11], [12]
16 02 13*	gefährliche Bestandteile 9) enthaltende gebrauchte Geräte mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 09 bis 16 02 12 fallen	22%	[11], [12]
16 02 14	gebrauchte Geräte mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 09 bis 16 02 13 fallen	22%	[11], [12]
16 02 15*	aus gebrauchten Geräten entfernte gefährliche Bestandteile	22%	[11], [12]
16 02 15 00*	aus gebrauchten Geräten entfernte gefährliche Bestandteile, nicht differenzierbar	22%	[11], [12]
16 02 15 01*	Quecksilberhaltige Abfälle	10%	[1]
16 02 15 02*	Leiterplatten	19%	[13]
16 02 15 03*	Tonerkatuschen	90%	e.A.
16 02 15 04*	Kunststoffe, die bromierte Flammschutzmittel enthalten	100%	e.A.
16 02 15 09*	Externe elektrische Leitungen	55%	[14]
16 02 16	aus gebrauchten Geräten entfernte Bestandteile mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 15 fallen	50%	e.A.
16 02 16 01	Externe elektrische Leitungen (einschließlich Kabel)	55%	[14]
16 06 01*	Bleibatterien	10%	[1], [11]
16 06 02*	Ni-Cd-Batterien	5%	[1], [11]
16 06 03*	Quecksilber enthaltende Batterien	14%	[1], [11]
16 06 04	Alkalibatterien (außer 16 06 03)	14%	[1], [15]
16 06 05	andere Batterien und Akkumulatoren	6%	[1]
17 02 03	Kunststoff	100%	e.A.
17 02 04*	Glas, Kunststoff und Holz, die gefährliche Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind	5,90%	e.A.
17 04 10*	Kabel, die Öl, Kohlenteer oder andere gefährliche Stoffe enthalten	43,10%	[16]
17 04 11	Kabel mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 04 10 fallen	43,10%	[16]
17 06 03*	anderes Dämmmaterial, das aus gefährlichen Stoffen besteht oder solche Stoffe enthält	10%	[1]
17 06 04	Dämmmaterial mit Ausnahme desjenigen, das unter 17 06 01 und 17 06 03 fällt	10%	[1]
17 09 01*	Bau- und Abbruchabfälle, die Quecksilber enthalten	3%	[16], [42], [43]
17 09 02*	Bau- und Abbruchabfälle, die PCB enthalten (z.B. PCB-haltige Dichtungsmassen, PCB-haltige Bodenbeläge auf Harzbasis, PCB-	3%	[16], [42], [43]

ASN	Bezeichnung	Gehalt	Quelle
	haltige Isolierverglasungen, PCB-haltige Kondensatoren)		
17 09 03*	sonstige Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich gemischte Abfälle), die gefährliche Stoffe enthalten	3%	[16], [42], [43]
17 09 04	gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01, 17 09 02 und 17 09 03 fallen	3%	[16], [42], [43]
18 01 03*	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht besondere Anforderungen gestellt werden	24%	[1]
18 01 04	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen gestellt werden (z.B. Wund- und Gipsverbände, Wäsche, Einwegkleidung, Windeln)	34,30%	[1], [46]
18 02 02*	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht besondere Anforderungen gestellt werden	24%	[1]
18 02 03	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht keine besonderen Anforderungen werden	24%	[1]
19 02 09*	feste brennbare Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten	34%	[1]
19 02 99 50	durch Abfallbehandlung entstandene Produkte	25%	e.A.
19 05 01	nicht kompostierte Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Abfällen	50%	e.A.
19 10 03*	Schredderleichtfraktionen und Staub, die gefährliche Stoffe enthalten	52,50%	[9], [17]
19 10 04	Schredderleichtfraktionen und Staub mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 10 03 fallen	52,50%	[9], [17]
19 12 04	Kunststoff und Gummi	100%	e.A.
19 12 08	Textilien	66%	[2]
19 12 10	brennbare Abfälle (Brennstoffe aus Abfällen)	43,90%	[44]
19 12 11*	sonstige Abfälle (einschließlich Materialmischungen) aus der mechanischen Behandlung von Abfällen, die gefährliche Stoffe enthalten	24,50%	[46]
19 12 12	sonstige Abfälle (einschließlich Materialmischungen) aus der mechanischen Behandlung von Abfällen mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 12 11 fallen	24,50%	[46]
20 01 10	Bekleidung	40%	[2]
20 01 11	Textilien	66%	[2]
20 01 21*	Leuchtstoffröhren und andere quecksilberhaltige Abfälle	16,7%	[13]
20 01 23*	gebrauchte Geräte, die Fluorchlorkohlenwasserstoffe enthalten	23%	[18]
20 01 35*	gebrauchte elektrische und elektronische Geräte, die gefährliche Bauteile 14) enthalten, mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 21 und 20 01 23 fallen	22%	[11], [12]
20 01 36	gebrauchte elektrische und elektronische Geräte mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 21, 20 01 23 und 20 01 35	22%	[11], [12]
20 01 39	Kunststoffe	100%	e.A.
20 03 01 00	gemischte Siedlungsabfälle nicht differenzierbar	18,5%	[5], [6], [19], [30], [31]
21 03 01 01	Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle gemeinsam über die	15%	[5], [6], [29],

ASN	Bezeichnung	Gehalt	Quelle
	öffentliche Müllabfuhr eingesammelt		[30], [31]
22 03 01 02	Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt	22%	[6], [19]
22 03 01 04	Abfälle aus der Biotonne	0,50%	[6], [20]
20 03 02	Marktabfälle	8,10%	[21]
20 03 07	Sperrmüll	17,80%	[6], [36], [37], [38], [39], [40], [41]

Berücksichtigte Abfälle für den Materialstrom „Metalle“ und deren Gehalte an Metallen in Abfallgemischen

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
01 03 06	Aufbereitungsrückstände mit Ausnahme derjenigen, die unter 01 03 04 und 01 03 05 fallen		0,50%	[15]
01 03 07*	andere, gefährliche Stoffe enthaltende Abfälle aus der physikalischen und chemischen Verarbeitung von metallhaltigen Bodenschätzen		0,3%	[22]
01 03 99	Abfälle a. n. g.	0,9%	0,83%	[22]
01 04 07*	gefährliche Stoffe enthaltende Abfälle aus der physikalischen und chemischen Weiterverarbeitung von nichtmetallhaltigen Bodenschätzen	4,75%	6,28%	[22]
01 04 09	Abfälle von Sand und Ton		0,75%	[22]
01 04 10	staubende und pulvrige Abfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 01 04 07 fallen		0,21%	[22]
01 04 13	Abfälle aus Steinmetz- und -sägearbeiten mit Ausnahme derjenigen, die unter 01 04 07 fallen		0,02%	[22]
01 05 04	Schlämme und Abfälle aus Süßwasserbohrungen		0,01%	[22]
01 05 07	barythaltige Bohrschlämme und -abfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 01 05 05 und 01 05 06 fallen		0,02%	[22]
01 05 08	chloridhaltige Bohrschlämme und -abfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 01 05 05 und 01 05 06 fallen		0,03%	[22]
02 01 01	Schlämme von Wasch- und Reinigungsvorgängen		0,07%	[22]
02 01 04	Kunststoffabfälle (ohne Verpackungen)		0,01%	[22]
02 01 10	Metallabfälle	90%	10%	[15]
02 01 99	Abfälle a. n. g.		0,06%	[22]
02 02 02	Abfälle aus tierischem Gewebe		6,07%	[22]
02 02 04	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung		2,4%	[22]
02 03 99	Abfälle a. n. g.		0,01%	[22]
03 01 01	Rinden und Korkabfälle		0,01%	[22]
03 01 05	Sägemehl, Späne, Abschnitte, Holz, Spanplatten und Furniere mit Ausnahme derjenigen, die unter 03 01		0,05%	[22]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
	04 fallen			
03 03 05	De-inking-Schlämme aus dem Papierrecycling	5,00%	8,08%	[1], [22]
03 03 07	mechanisch abgetrennte Abfälle aus der Auflösung von Papier- und Pappabfällen	5,00%	0,05%	[1], [22]
03 03 08	Abfälle aus dem Sortieren von Papier und Pappe für das Recycling	5,00%	0,04%	[1], [22]
03 03 09	Kalkschlammabfälle		0,01%	[1], [22]
03 03 10	Faserabfälle, Faser-, Füller- und Überzugsschlämme aus der mechanischen Abtrennung	0,13%	9,89%	[1], [22]
03 03 11	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 03 03 10 fallen		0,02%	[22]
04 01 06	chromhaltige Schlämme, insbesondere aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung		0,87%	[22]
04 02 09	Abfälle aus Verbundmaterialien (imprägnierte Textilien, Elastomer, Plastomer)	0,05%	0,13%	[22]
04 02 15	Abfälle aus dem Finish mit Ausnahme derjenigen, die unter 04 02 14 fallen		0,02%	[22]
04 02 19*	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten		0,06%	[22]
04 02 22	Abfälle aus verarbeiteten Textilfasern		0,05%	[22]
05 01 03*	Bodenschlämme aus Tanks		0,15%	[22]
05 01 04*	saure Alkylschlämme	0,04%	0,11%	[22]
05 01 06*	öhlhaltige Schlämme aus Betriebsvorgängen und Instandhaltung	0,91%	0,06%	[22]
05 01 07*	Säureteere		0,36%	[22]
05 01 10	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 05 01 09 fallen	23,18%	34,59%	[22]
05 01 15*	gebrauchte Filtertone		0,01%	[22]
05 01 99	Abfälle a. n. g.		0,44%	[22]
05 06 03*	andere Teere	0,5%	1%	[22]
05 06 99	Abfälle a. n. g.	6,79%	1,13%	[22]
05 07 99	Abfälle a. n. g.	1,46%	0,3%	[22]
06 01 01*	Schwefelsäure und schweflige Säure	0,28%	12,15%	[22]
06 02 01*	Calciumhydroxid		0,01%	[22]
06 02 03*	Ammoniumhydroxid		0,03%	[22]
06 02 99	Abfälle a. n. g.	0,01%	0,02%	[22]
06 03 11*	feste Salze und Lösungen, die Cyanid enthalten		2,31%	[22]
06 03 13*	feste Salze und Lösungen, die Schwermetalle enthalten	5,76%	13,72%	[22]
06 03 14	feste Salze und Lösungen mit Ausnahme derjenigen, die unter 06 03 11 und 06 03 13 fallen	0,1%	19,08%	[22]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
06 03 15*	Metalloxide, die Schwermetalle enthalten	14,00%	44,38%	[22]
06 03 16	Metalloxide mit Ausnahme derjenigen, die unter 06 03 15 fallen	14,00%	27,00%	[22]
06 04 03*	arsenhaltige Abfälle			[22]
06 04 04*	quecksilberhaltige Abfälle	2,12%	23,69%	[22]
06 04 05*	Abfälle, die andere Schwermetalle enthalten	16,49%	45,64%	[22]
06 04 99	Abfälle a. n. g.		3,16%	[22]
06 05 02*	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	11,11%	12%	[22]
06 05 03	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 06 05 02 fallen		3,44%	[22]
06 06 02*	Abfälle, die gefährliche Sulfide enthalten		1,75%	[22]
06 08 02*	gefährliche Chlorsinale enthaltende Abfälle		0,08%	[22]
06 08 99	Abfälle a. n. g.		0,01%	[22]
06 09 04	Reaktionsabfälle auf Kalziumbasis mit Ausnahme derjenigen, die unter 06 09 03 fallen		0,15%	[22]
06 11 99	Abfälle a. n. g.	6,81%	5,4%	[22]
06 13 02*	gebrauchte Aktivkohle (außer 06 07 02)		0,46%	[22]
06 13 03	Industrieruß		0,07%	[22]
06 13 99	Abfälle a. n. g.		0,01%	[22]
07 01 03*	halogenorganische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen		0,86%	[22]
07 01 04*	andere organische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen	0,05%	0,43%	[22]
07 01 07*	halogenierte Reaktions- und Destillationsrückstände		35,23%	[22]
07 01 08*	andere Reaktions- und Destillationsrückstände	14,32%	6,81%	[22]
07 01 09*	halogenierte Filterkuchen, gebrauchte Aufsaugmaterialien		4%	[22]
07 01 10*	andere Filterkuchen, gebrauchte Aufsaugmaterialien	0,50%	20,47%	[22]
07 01 11*	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	0,64%	2,90%	[22]
07 02 03*	halogenorganische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen	1,00%	4,05%	[22]
07 02 04*	andere organische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen		0,03%	[22]
07 02 07*	halogenierte Reaktions- und Destillationsrückstände		0,08%	[22]
07 02 08*	andere Reaktions- und Destillationsrückstände	11,36%	16,94%	[22]
07 02 09*	halogenierte Filterkuchen, gebrauchte Aufsaugmaterialien		0,00%	[22]
07 02 10*	andere Filterkuchen, gebrauchte Aufsaugmaterialien		0,11%	[22]
07 02 11*	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbe-	10,16%	7,95%	[22]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
	handlung, die gefährliche Stoffe enthalten			
07 02 12	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 07 02 11 fallen	0,80%	23,98%	[22]
07 02 13	Kunststoffabfälle		10,50%	[22]
07 02 99	Abfälle a. n. g.		0,07%	[22]
07 03 01*	wässrige Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen		0,03%	[22]
07 03 03*	halogenorganische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen		0,03%	[22]
07 03 04*	andere organische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen	0,01%	0,51%	[22]
07 03 08*	andere Reaktions- und Destillationsrückstände		1,86%	[22]
07 03 09*	halogenierte Filterkuchen, gebrauchte Aufsaugmaterialien		0,14%	[22]
07 03 10*	andere Filterkuchen, gebrauchte Aufsaugmaterialien	0,02%	0,05%	[22]
07 03 11*	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten		7,57%	[22]
07 03 99	Abfälle a. n. g.		0,02%	[22]
07 04 04*	andere organische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen		0,03%	[22]
07 04 99	Abfälle a. n. g.		1,61%	[22]
07 05 01*	wässrige Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen	0,01%		[22]
07 05 04*	andere organische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen		0,01%	[22]
07 05 07*	Halogenierte Reaktions- und Destillationsrückstände		0,01%	[22]
07 05 08*	andere Reaktions- und Destillationsrückstände		0,01%	[22]
07 05 10*	andere Filterkuchen, gebrauchte Aufsaugmaterialien		0,04%	[22]
07 05 12	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 07 05 11 fallen		0,02%	[22]
07 05 13*	feste Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten		0,18%	[22]
07 06 01*	wässrige Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen		0,02%	[22]
07 06 03*	halogenorganische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen		0,01%	[22]
07 06 04*	andere organische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen		0,01%	[22]
07 06 08*	andere Reaktions- und Destillationsrückstände	0,03%	8,25%	[22]
07 06 10*	andere Filterkuchen, gebrauchte Aufsaugmaterialien	1,81%	37,93%	[22]
07 06 11*	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	0,64%	18,88%	[22]
07 07 01*	wässrige Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen		0,49%	[22]
07 07 03*	halogenorganische Lösemittel, Waschflüssigkeiten und Mutterlaugen		0,50%	[22]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
07 07 07*	halogenierte Reaktions- und Destillationsrückstände		20,00%	[22]
07 07 08*	andere Reaktions- und Destillationsrückstände	31,90%	0,31%	[22]
07 07 10*	andere Filterkuchen, gebrauchte Aufsaugmaterialien	0,70%	10,61%	[22]
07 07 11*	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten		0,89%	[22]
08 01 11*	Farb- und Lackabfälle, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten	0,21%	2,53%	[22]
08 01 13*	Farb- und Lackschlämme, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten	4,83%	5,83%	[22]
08 01 15*	wässrige Schlämme, die Farben oder Lacke mit organischen Lösemitteln oder anderen gefährlichen Stoffen enthalten		0,23%	[22]
08 01 16	wässrige Schlämme, die Farben oder Lacke enthalten, mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 01 15 fallen		0,75%	[22]
08 01 17*	Abfälle aus der Farb- oder Lackentfernung, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten	0,16%	0,54%	[1], [22]
08 01 18	Abfälle aus der Farb- oder Lackentfernung mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 01 17 fallen	0,16%		[1]
08 01 19*	wässrige Suspensionen, die Farben oder Lacke mit organischen Lösemitteln oder anderen gefährlichen Stoffen enthalten		0,03%	[22]
08 01 20	wässrige Suspensionen, die Farben oder Lacke enthalten, mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 01 19 fallen		0,71%	[22]
08 01 21*	Farb- oder Lackentfernerabfälle		0,02%	[22]
08 02 01	Abfälle von Beschichtungspulver		2,54%	[22]
08 02 02	wässrige Schlämme, die keramische Werkstoffe enthalten		0,18%	[22]
08 03 08	wässrige flüssige Abfälle, die Druckfarben enthalten		0,04%	[22]
08 03 12*	Druckfarbenabfälle, die gefährliche Stoffe enthalten		0,18%	[22]
08 04 09*	Klebstoff- und Dichtmassenabfälle, die organische Lösemittel oder andere gefährliche Stoffe enthalten		0,25%	[22]
08 04 10	Klebstoff- und Dichtmassenabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 08 04 09 fallen		0,22%	[22]
09 01 01*	Entwickler und Aktivatorlösungen auf Wasserbasis		2,35%	[22]
09 01 06*	silberhaltige Abfälle aus der betriebseigenen Behandlung fotografischer Abfälle		20,63%	[15], [22]
09 01 07	Filme und fotografische Papiere, die Silber oder Silberverbindungen enthalten			[22]
09 01 08	Filme und fotografische Papiere, die kein Silber und keine Silberverbindungen enthalten		0,01%	[22]
09 01 10	Einwegkameras ohne Batterien	1,70%		[3]
09 01 11*	Einwegkameras mit Batterien, die unter 16 06 01, 16	4,50%	5%	[3]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
	06 02 oder 16 06 03 fallen			
09 01 12	Einwegkameras mit Batterien mit Ausnahme derjenigen, die unter 09 01 11 fallen	4,50%	5%	[3]
09 01 99	Abfälle a. n. g.			
10 01 01	Rost- und Kesselasche, Schlacken und Kesselstaub mit Ausnahme von Kesselstaub, der unter 10 01 04 fällt	2,20%	43,92%	[22]
10 01 02	Filterstäube aus Kohlefeuerung	3,57%	34,50%	[22]
10 01 03	Filterstäube aus Torffeuerung und Feuerung mit (unbehandeltem) Holz	1,70%	17,51%	[22]
10 01 04*	Filterstäube und Kesselstaub aus Ölfeuerung	0,22%	15,39%	[22]
10 01 05	Reaktionsabfälle auf Kalziumbasis aus der Rauchgasentschwefelung in fester Form	0,61%	30,02%	[22]
10 01 07	Reaktionsabfälle auf Kalziumbasis aus der Rauchgasentschwefelung in Form von Schlämmen	0,94%	34,80%	[22]
10 01 14*	Rost- und Kesselasche, Schlacken und Kesselstaub aus der Abfallmitverbrennung, die gefährliche Stoffe enthalten		0,83%	[22]
10 01 15	Rost- und Kesselasche, Schlacken und Kesselstaub aus der Abfallmitverbrennung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 01 14 fallen	3,49%	37,53%	[22]
10 01 16*	Filterstäube aus der Abfallmitverbrennung, die gefährliche Stoffe enthalten		1,27%	[22]
10 01 17	Filterstäube aus der Abfallmitverbrennung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 01 16 fallen		4,60%	[22]
10 01 18*	Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	0,10%	58,90%	[22]
10 01 19	Abfälle aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 01 05, 10 01 07 und 10 01 18 fallen	0,70%	13,92%	[22]
10 01 20*	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten		0,29%	[22]
10 01 21	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 01 20 fallen		1,35%	[22]
10 01 24	Sande aus der Wirbelschichtfeuerung		0,08%	[22]
10 02 01	Abfälle aus der Verarbeitung von Schlacke	25,50%	22%	[1], [15]
10 02 02	unbearbeitete Schlacke	15,62%	1,95%	
10 02 07*	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	19,81%	38,34%	[22]
10 02 08	Abfälle aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 02 07 fallen	50,77%	17,20%	[22]
10 02 10	Walzzunder	81,50%		[1], [15]
10 02 13*	Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	42,50%	24,25%	[1], [22]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
10 02 14	Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 02 13 fallen	42,50%	2,58%	[1], [22]
10 02 15	andere Schlämme und Filterkuchen		0,02%	[22]
10 02 99	Abfälle a. n. g.		1,12%	[22]
10 03 05	Aluminiumoxidabfälle	1,25%	0,49%	[22]
10 03 08*	Salzschlacken aus der Zweitschmelze	1,53%	6,43%	[22]
10 03 09*	schwarze Krätzen aus der Zweitschmelze	0,78%	7,68%	[22]
10 03 15*	Abschaum, der entzündlich ist oder in Kontakt mit Wasser entzündliche Gase in gefährlicher Menge abgibt	0,50%	11%	[22]
10 03 16	Abschaum mit Ausnahme desjenigen, der unter 10 03 15 fällt		45%	[15]
10 03 19*	Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	0,83%	47,97%	[22]
10 03 23*	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	0,74%	52,81%	[22]
10 03 24	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 03 23 fallen	0,74%	0,40%	[22]
10 03 25*	Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	0,97%	23,57%	[22]
10 04 01*	Schlacken (Erst- und Zweitschmelze)	2,56%	10,17%	[22]
10 04 02*	Krätzen und Abschaum (Erst- und Zweitschmelze)	0,01%	97,27%	[22]
10 04 05*	andere Teilchen und Staub	8,00%	68,34%	[22]
10 04 06*	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung	5,00%	30,68%	[22]
10 05 01	Schlacken (Erst- und Zweitschmelze)		3,90%	[22]
10 05 04	andere Teilchen und Staub			
10 05 05*	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung		2,88%	[22]
10 05 06*	Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung		66,44%	[22]
10 05 11	Krätzen und Abschaum mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 05 10 fallen		45%	[15]
10 06 01	Schlacken (Erst- und Zweitschmelze)	2,80%	5,36%	[22]
10 06 02	Krätzen und Abschaum (Erst- und Zweitschmelze)			
10 06 03*	Filterstaub	2,91%	72,28%	[22]
10 06 04	andere Teilchen und Staub	3%	65%	[15]
10 06 06*	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung		0,80%	[22]
10 06 07*	Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung	2,46%	60,04%	[22]
10 06 99	Abfälle a. n. g.			
10 07 01	Schlacken (Erst- und Zweitschmelze)		3%	[22]
10 07 02	Krätzen und Abschaum (Erst- und Zweitschmelze)			

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
10 07 03	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung			
10 07 04	andere Teilchen und Staub			
10 07 05	Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung			
10 07 99	Abfälle a. n. g.		100%	[15]
10 08 04	Teilchen und Staub		1,79%	[22]
10 08 08*	Salzschlacken (Erst- und Zweitschmelze)	0,80%	61,26%	[22]
10 08 09	andere Schlacken		0,50%	[15]
10 08 15*	Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	1,24%	15,48%	[22]
10 08 16	Filterstaub mit Ausnahme desjenigen, der unter 10 08 15 fällt		2,53%	[22]
10 08 17*	Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten		9,70%	[22]
10 09 03	Ofenschlacke	6,96%	0,05%	[1], [22]
10 09 05*	gefährliche Stoffe enthaltende Gießformen und -sande vor dem Gießen	5,70%	0,02%	[1], [22]
10 09 06	Gießformen und -sande vor dem Gießen mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 09 05 fallen	5,70%	2,27%	[1], [22]
10 09 07*	gefährliche Stoffe enthaltende Gießformen und -sande nach dem Gießen	2,32%	0,62%	[1], [22]
10 09 08	Gießformen und -sande nach dem Gießen mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 09 07 fallen	2,32%	0,91%	[1], [22], [23]
10 09 09*	Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	24,00%	7,68%	[1], [22]
10 09 10	Filterstaub mit Ausnahme desjenigen, der unter 10 09 09 fällt	24,00%	12,87%	[1], [22], [23]
10 10 03	Ofenschlacke		35%	[1], [22]
10 10 07*	gefährliche Stoffe enthaltende Gießformen und -sande nach dem Gießen	1,84%		[1]
10 10 08	Gießformen und -sande nach dem Gießen mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 10 07 fallen	1,84%	0,27%	[1], [22]
10 10 09*	Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	0,01%	6%	[1], [22]
10 10 10	Filterstaub mit Ausnahme desjenigen, der unter 10 10 09 fällt		50%	[1]
10 11 03	Glasfaserabfall		0,03%	[22]
10 11 09*	Gemengeabfall mit gefährlichen Stoffen vor dem Schmelzen	0,04%	0,11%	[22]
10 11 10	Gemengeabfall vor dem Schmelzen mit Ausnahme desjenigen, der unter 10 11 09 fällt		0,01%	[22]
10 11 11*	Glasabfall in kleinen Teilchen und Glasstaub, die Schwermetalle enthalten (z.B. aus Elektronenstrahlröhren)		7,83%	[22]
10 11 12	Glasabfall mit Ausnahme desjenigen, das unter 10 11 11 fällt		0,54%	[22]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
10 11 13*	Glaspolier- und Glasschleifschlämme, die gefährliche Stoffe enthalten	2,56	38,27%	[22]
10 11 14	Glaspolier- und Glasschleifschlämme mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 11 13 fallen	2,56	0,06%	[22]
10 11 15*	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten		25%	[22]
10 11 16	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 11 15 fallen		31%	[22]
10 11 17*	Schlämme und Filterkuchen aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten		29,42%	[22]
10 11 19*	feste Abfälle aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten		2,30%	[22]
10 12 01	Rohmischungen vor dem Brennen		2,86%	[22]
10 12 03	Teilchen und Staub		0,04%	[22]
10 12 06	verworfenen Formen		0,01%	[22]
10 12 09*	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten		0,01%	[22]
10 12 10	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 12 09 fallen		0,01%	[22]
10 12 11*	Glasurabfälle, die Schwermetalle enthalten		11,69%	[22]
10 13 06	Teilchen und Staub (außer 10 13 12 und 10 13 13)	0,02%	0,01%	[22]
10 13 11	Abfälle aus der Herstellung anderer Verbundstoffe auf Zementbasis mit Ausnahme derjenigen, die unter 10 13 09 und 10 13 10 fallen		0,03%	[22]
10 13 12*	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten		0,05%	[22]
10 14 01*	quecksilberhaltige Abfälle aus der Gasreinigung		0,17%	[22]
11 01 05*	saure Beizlösungen	10%	8,47%	[1], [22]
11 01 06*	Säuren a. n. g.	5%		[1]
11 01 07*	alkalische Beizlösungen	3%	23,6%	[1], [22]
11 01 08*	Phosphatierschlämme	16,77%	15,70%	[22]
11 01 09*	Schlämme und Filterkuchen, die gefährliche Stoffe enthalten	5,99%	34,81%	[1], [22]
11 01 10	Schlämme und Filterkuchen mit Ausnahme derjenigen, die unter 11 01 09 fallen	5%	0,03%	[1], [22]
11 01 11*	wässrige Spülflüssigkeiten, die gefährliche Stoffe enthalten		0,21%	[22]
11 01 13*	Abfälle aus der Entfettung, die gefährliche Stoffe enthalten	1,73%	0,89%	[1], [22]
11 01 15*	Eluate und Schlämme aus Membransystemen oder Ionenaustauschsystemen, die gefährliche Stoffe enthalten			
11 01 16*	gesättigte oder verbrauchte Ionenaustauscherharze		0,03%	[1], [22]
11 01 98*	andere Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten	6,47%	85,61%	[22]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
11 02 02*	Schlämme aus der Zink-Hydrometallurgie (einschließlich Jarosit, Goethit)	12,86%	18,94%	[22]
11 02 03	Abfälle aus der Herstellung von Anoden für wässrige elektrolytische Prozesse		0,87%	[22]
11 02 99	Abfälle a. n. g.		0,68%	[22]
11 05 01	Hartzink	7,50%		[15]
11 05 02	Zinkasche			
11 05 03*	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung	0,02%	8,55%	[22]
12 01 01	Eisenfeil- und -drehspäne	53,50%	0,62%	[22]
12 01 02	Eisenstaub und -teile	27,22%	4,18%	[22]
12 01 03	NE-Metallfeil- und -drehspäne	0,98%	10%	[22]
12 01 04	NE-Metallstaub und -teilchen	0,69%	20%	[22]
12 01 05	Kunststoffspäne und -drehspäne	0,68%	0,64%	[22]
12 01 06*	halogenhaltige Bearbeitungsöle auf Mineralölbasis (außer Emulsionen und Lösungen)	0,02%	0,02%	[22]
12 01 07*	halogenfreie Bearbeitungsöle auf Mineralölbasis (außer Emulsionen und Lösungen)		0,02%	[22]
12 01 09*	halogenfreie Bearbeitungsemulsionen und -lösungen		0,08%	[22]
12 01 10*	synthetische Bearbeitungsöle	24,73%	0,32%	[22]
12 01 12*	gebrauchte Wachse und Fette	0,01%	1,29%	[22]
12 01 13	Schweißabfälle		0,02%	[22]
12 01 14*	Bearbeitungsschlämme, die gefährliche Stoffe enthalten	13,31%	43%	[22]
12 01 15	Bearbeitungsschlämme mit Ausnahme derjenigen, die unter 12 01 14 fallen	13,31%	11%	[1], [15], [22]
12 01 16*	Strahlmittelabfälle, die gefährliche Stoffe enthalten	12,56%	33,86%	[22]
12 01 17	Strahlmittelabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 12 01 16 fallen	19,50%	13,80%	[22]
12 01 18*	öhlhaltige Metallschlämme (Schleif-, Hon- und Läppschlämme)	27,90%	50%	[22]
12 01 20*	gebrauchte Hon- und Schleifmittel, die gefährliche Stoffe enthalten	16,10%	42,22%	[22]
12 01 21	gebrauchte Hon- und Schleifmittel mit Ausnahme derjenigen, die unter 12 01 20 fallen		0,03%	[22]
12 01 99	Abfälle a. n. g.			
12 03 01*	wässrige Waschflüssigkeiten		0,01%	[22]
12 03 02*	Abfälle aus der Dampfentfettung		0,35%	[22]
13 01 05*	nichtchlorierte Emulsionen		0,01%	[22]
13 01 10*	nichtchlorierte Hydrauliköle auf Mineralölbasis		0,01%	[22]
13 02 04*	chlorierte Maschinen-, Getriebe- und Schmieröle auf Mineralölbasis		0,03%	[22]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
13 02 05*	nichtchlorierte Maschinen-, Getriebe- und Schmieröle auf Mineralölbasis	0,04%	0,21%	[22]
13 03 07*	nichtchlorierte Isolier- und Wärmeübertragungsöle auf Mineralölbasis		0,03%	[22]
13 05 01*	feste Abfälle aus Sandfanganlagen und Öl-/Wasserabscheidern		0,50%	[22]
13 05 02*	Schlämme aus Öl-/Wasserabscheidern	20,69%	1,24%	[22]
13 05 03*	Schlämme aus Einlaufschächten		0,30%	[22]
13 05 07*	öliges Wasser aus Öl-/Wasserabscheidern		0,13%	[22]
13 07 01*	Heizöl und Diesel		0,02%	[22]
13 07 02*	Benzin		0,19%	[22]
13 07 03*	andere Brennstoffe (einschließlich Gemische)		0,04%	[22]
13 08 02*	andere Emulsionen		0,03%	[22]
14 06 02*	andere halogenierte Lösemittel und Lösemittelgemische		0,05%	[22]
14 06 03*	andere Lösemittel und Lösemittelgemische		0,13%	[22]
14 06 04*	Schlämme oder feste Abfälle, die halogenierte Lösemittel enthalten	0,02%	10,30%	[22]
14 06 05*	Schlämme oder feste Abfälle, die andere Lösemittel enthalten		0,23%	[22]
15 01 01	Verpackungen aus Papier und Pappe		0,01%	[22]
15 01 04	Verpackungen aus Metall	80%	0,04%	[15], [22]
15 01 05	Verbundverpackungen		4%	[22]
15 01 06	gemischte Verpackungen	1,70%	0,44%	[22], [24], [46]
15 01 06 00	gemischte Verpackungen nicht differenzierbar	1,70%	0,40%	[46]
15 01 06 01	Leichtverpackungen (LVP)	13,50%	2,20%	[6]
15 01 07	Verpackungen aus Glas	0,30%	0,10%	[24]
15 01 10*	Verpackungen, die Rückstände gefährlicher Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind	1,70%	0,15%	[22], [46]
15 01 11*	Verpackungen aus Metall, die eine gefährliche feste poröse Matrix (z.B. Asbest) enthalten, einschließlich geleerter Druckbehälter			
15 02 02*	Aufsaug- und Filtermaterialien (einschließlich Ölfiler a. n. g.), Wischtücher und Schutzkleidung, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind	4,43%	15,32%	[22]
15 02 03	Aufsaug- und Filtermaterialien, Wischtücher und Schutzkleidung mit Ausnahme derjenigen, die unter 15 02 02 fallen	4,43%	0,08%	[22], [46]
16 01 03	Altreifen	16%		[7]
16 01 04*	Altfahrzeuge	53%	12%	[8], [9], [16]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
16 01 06	Altfahrzeuge, die weder Flüssigkeiten noch andere gefährliche Bestandteile enthalten	58%	13%	[8], [9], [16]
16 01 07*	ÖlfILTER	45%		[1], [25]
16 01 08*	quecksilberhaltige Bestandteile			
16 01 09*	Bestandteile, die PCB enthalten			
16 01 10*	explosive Bauteile (z.B. aus Airbags)			
16 01 11*	asbesthaltige Bremsbeläge		2,26%	[22]
16 01 12	Bremsbeläge mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 01 11 fallen			
16 01 14*	Frostschutzmittel, die gefährliche Stoffe enthalten		0,01%	[22]
16 01 15	Frostschutzmittel mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 01 14 fallen	0,21%		[22]
16 01 16	Flüssiggasbehälter	100%		[1]
16 01 17	Eisenmetalle	100%		[1], [15]
16 01 18	Nichteisenmetalle		100%	[1], [15]
16 01 21 00*	gefährliche Bauteile mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 01 07 bis 16 01 11, 16 01 13 und 16 01 14 fallen			
16 01 21 01*	gefährliche metallische Bauteile mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 01 07 bis 16 01 11, 16 01 13 und 16 01 14 fallen	100%		[1]
16 01 22 00	Bauteile nicht differenzierbar			
16 01 22 01	Bauteile a.n.g. (metallische Bauteile)		21%	[16]
16 01 22 02	nicht metallische Bauteile / Ersatzteile		9,80%	[16]
16 02 09*	Transformatoren und Kondensatoren, die PCB enthalten	6,40%	56,40%	[10]
16 02 10*	gebrauchte Geräte, die PCB enthalten oder damit verunreinigt sind, mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 09 fallen	47%	9%	[11], [12]
16 02 11*	gebrauchte Geräte, die teil- und vollhalogenierte Fluorchlorkohlenwasserstoffe enthalten	47%	9%	[11], [12]
16 02 12*	gebrauchte Geräte, die freies Asbest enthalten	47%	9%	[11], [12]
16 02 13*	gefährliche Bestandteile 9) enthaltende gebrauchte Geräte mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 09 bis 16 02 12 fallen	47%	9%	[11], [12]
16 02 14	gebrauchte Geräte mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 09 bis 16 02 13 fallen	47%	9%	[11], [12]
16 02 15*	aus gebrauchten Geräten entfernte gefährliche Bestandteile	47%	65%	[11], [12]
16 02 15 00*	aus gebrauchten Geräten entfernte gefährliche Bestandteile, nicht differenzierbar	47%	9%	[11], [12]
16 02 15 01*	Quecksilberhaltige Abfälle		10%	[1], [16]
16 02 15 02*	Leiterplatten	6%	22%	[13]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
16 02 15 05*	Asbesthaltige Bauteile		10%	[16]
16 02 15 06*	Kathodenstrahlröhren	13%	5%	[26]
16 02 15 07*	Gasentladungslampen	1,90%	5,00%	[13], [16]
16 02 15 08*	Flüssigkristallanzeigen	0,11%	1%	[16], [27]
16 02 15 09*	Externe elektrische Leitungen		52%	[16]
16 02 15 10*	Bauteile, die feuerfeste Keramikfasern enthalten		10%	[16]
16 02 15 11*	Elektrolyt -Kondensatoren		10%	[16]
16 02 15 12*	Cadmium-oder selenhaltige Fotoleitertrommeln		10%	[16]
16 02 16	aus gebrauchten Geräten entfernte Bestandteile mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 15 fallen		17%	[16]
16 02 16 00	aus gebrauchten Geräten entfernte Bestandteile mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 02 15 fallen nicht differenzierbar		17%	[16]
16 02 16 01	Externe elektrische Leitungen (einschließlich Kabel)		45,00%	[14]
16 04 01*	Munition	55%	14%	e.A.
16 04 02*	Feuerwerkskörperabfälle		0,04%	[22]
16 05 04*	gefährliche Stoffe enthaltende Gase in Druckbehältern (einschließlich Halonen)	100%		e.A.
16 05 05	Gase in Druckbehältern mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 05 04 fallen	100%		e.A.
16 05 07*	gebrauchte anorganische Chemikalien, die aus gefährlichen Stoffen bestehen oder solche enthalten	14,14%	47,21%	[22]
16 06 01*	Bleibatterien		78%	[22]
16 06 02*	Ni-Cd-Batterien	45%	35%	[11]
16 06 03*	Quecksilber enthaltende Batterien	42%	56,96%	[11], [22]
16 06 04	Alkalibatterien (außer 16 06 03)	41%	45%	[1], [15]
16 06 05	andere Batterien und Akkumulatoren	37,50%	25%	[1]
16 07 08*	ölhaltige Abfälle	7,05%	56,70%	[22]
16 07 09*	Abfälle, die sonstige gefährliche Stoffe enthalten	7,50%	5,72%	[22]
16 08 01	gebrauchte Katalysatoren, die Gold, Silber, Rhenium, Rhodium, Palladium, Iridium oder Platin enthalten (außer 16 08 07)	79%	0,1%	e.A.
16 08 02*	gebrauchte Katalysatoren, die gefährliche Übergangsmetalle 10) oder deren Verbindungen enthalten	1,16%	62,3%	[22]
16 08 03	gebrauchte Katalysatoren, die Übergangsmetalle oder deren Verbindungen enthalten, a. n. g.	79%	2,0%	e.A., [22]
16 08 04	gebrauchte Katalysatoren von Crackprozessen (außer 16 08 07)	79%	0,1%	e.A.
16 08 05*	gebrauchte Katalysatoren, die Phosphorsäure enthalten	79%	0,1%	e.A.
16 08 07*	gebrauchte Katalysatoren, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind	0,99%	46,0%	[22]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
16 10 01*	wässrige flüssige Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten	0,04%	1,84%	[22]
16 11 01*	Auskleidungen und feuerfeste Materialien auf Kohlenstoffbasis aus metallurgischen Prozessen, die gefährliche Stoffe enthalten		1,76%	[22]
16 11 03*	andere Auskleidungen und feuerfeste Materialien aus metallurgischen Prozessen, die gefährliche Stoffe enthalten	0,38%	3,18%	[22]
16 11 04	Auskleidungen und feuerfeste Materialien aus metallurgischen Prozessen mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 11 03 fallen	0,38%	0,14%	[22]
16 11 05*	Auskleidungen und feuerfeste Materialien aus nichtmetallurgischen Prozessen, die gefährliche Stoffe enthalten	5,89%	39,87%	[22]
16 11 06	Auskleidungen und feuerfeste Materialien aus nichtmetallurgischen Prozessen mit Ausnahme derjenigen, die unter 16 11 05 fallen	5,89%	0,10%	[22]
17 01 01	Beton	3,00 %	0,02%	[22], [48]
17 01 06*	Gemische aus oder getrennte Fraktionen von Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik, die gefährliche Stoffe enthalten	5,00%	13,97%	[22]
17 01 07	Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 01 06 fallen	1,31%	21,77%	[22]
17 02 01	Holz		0,10%	[22]
17 02 04*	Glas, Kunststoff und Holz, die gefährliche Stoffe enthalten oder durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind	0,07%	31,17%	[22]
17 03 01*	kohlenteerhaltige Bitumengemische		0,08%	[22]
17 03 02	Bitumengemische mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 03 01 fallen		0,06%	[22]
17 03 03*	Kohlenteer und teerhaltige Produkte		1%	[22]
17 04 01	Kupfer, Bronze, Messing		100%	[15]
17 04 02	Aluminium		100%	[15]
17 04 03	Blei		100%	[15]
17 04 04	Zink		100%	[15]
17 04 05	Eisen und Stahl	100%		[15]
17 04 06	Zinn		100%	[15]
17 04 07	gemischte Metalle		100%	[15]
17 04 09*	Metallabfälle, die durch gefährliche Stoffe verunreinigt sind		100%	e.A.
17 04 10*	Kabel, die Öl, Kohlenteer oder andere gefährliche Stoffe enthalten	3,70%		[16]
17 04 11	Kabel mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 04 10 fallen	3,70%		[16]
17 05 03*	Boden und Steine, die gefährliche Stoffe enthalten	2,39%	13,44%	[22]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
17 05 04	Boden und Steine mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 05 03 fallen	2,76%	0,14%	[22]
17 05 05*	Baggergut, das gefährliche Stoffe enthält		0,53%	[22]
17 05 06	Baggergut mit Ausnahme desjenigen, das unter 17 05 05 fällt		0,11%	[22]
17 05 07*	Gleisschotter, der gefährliche Stoffe enthält		0,08%	[22]
17 05 08	Gleisschotter mit Ausnahme desjenigen, der unter 17 05 07 fällt		0,12%	[22]
17 06 01*	Dämmmaterial, das Asbest enthält	1,80%	0,11%	[22]
17 06 03*	anderes Dämmmaterial, das aus gefährlichen Stoffen besteht oder solche Stoffe enthält		2,67%	[22]
17 06 04	Dämmmaterial mit Ausnahme desjenigen, das unter 17 06 01 und 17 06 03 fällt		0,06%	[22]
17 09 01*	Bau- und Abbruchabfälle, die Quecksilber enthalten	4,20%	2,05%	[42], [43]
17 09 02*	Bau- und Abbruchabfälle, die PCB enthalten (z.B. PCB-haltige Dichtungsmassen, PCB-haltige Bodenbeläge auf Harzbasis, PCB-haltige Isolierverglasungen, PCB-haltige Kondensatoren)	4,20%	0,12%	[22], [42], [43]
17 09 03*	sonstige Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich gemischte Abfälle), die gefährliche Stoffe enthalten	4,20%	0,35%	[22], [42], [43]
17 09 04	gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01, 17 09 02 und 17 09 03 fallen	4,20%	2,05%	[42], [43]
18 01 01	spitze oder scharfe Gegenstände (außer 18 01 03)	75%		[46]
18 01 03*	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht besondere Anforderungen gestellt werden			
18 01 10*	Amalgamabfälle aus der Zahnmedizin		100%	[1]
18 02 01	spitze oder scharfe Gegenstände mit Ausnahme derjenigen, die unter 18 02 02 fallen			
18 02 02*	Abfälle, an deren Sammlung und Entsorgung aus infektionspräventiver Sicht besondere Anforderungen gestellt werden		0,03%	[22]
19 01 02	Eisenteile, aus der Rost- und Kesselasche entfernt	100%		[1], [15]
19 01 05*	Filterkuchen aus der Abgasbehandlung	2,55%	29,08%	[22]
19 01 06*	wässrige flüssige Abfälle aus der Abgasbehandlung und andere wässrige flüssige Abfälle	0,15%	24,82%	[22]
19 01 07*	feste Abfälle aus der Abgasbehandlung	0,75%	42,19%	[22]
19 01 10*	gebrauchte Aktivkohle aus der Abgasbehandlung		0,21%	[22]
19 01 11*	Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken, die gefährliche Stoffe enthalten	1,40%	7,9%	[22]
19 01 12	Rost- und Kesselaschen sowie Schlacken mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 01 11 fallen	8,26%	39%	[22]
19 01 13*	Filterstaub, der gefährliche Stoffe enthält	3,46%	39,4%	[22]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
19 01 14	Filterstaub mit Ausnahme desjenigen, die unter 19 01 13 fällt	3,42%	0,82%	[22]
19 01 15*	Kesselstaub, der gefährliche Stoffe enthält	2,05%	36%	[22]
19 01 16	Kesselstaub mit Ausnahme desjenigen, der unter 19 01 15 fällt	2,05%		[22]
19 01 17*	Pyrolyseabfälle, die gefährliche Stoffe enthalten	1,00%	8,27%	[22]
19 01 18	Pyrolyseabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 01 17 fallen	1,00%		[22]
19 02 04*	vorgemischte Abfälle, die wenigstens einen gefährlichen Abfall enthalten	4,89%	6,65%	[22]
19 02 05*	Schlämme aus der physikalisch-chemischen Behandlung, die gefährliche Stoffe enthalten	8,52%	26%	[1], [22]
19 02 06	Schlämme aus der physikalisch-chemischen Behandlung mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 02 05 fallen	8,82%	16%	[1], [22]
19 02 07*	Öl und Konzentrate aus Abtrennprozessen		0,58%	[22]
19 02 08*	flüssige brennbare Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten		0,02%	[22]
19 02 09*	feste brennbare Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten		0,56%	[22]
19 02 11*	sonstige Abfälle, die gefährliche Stoffe enthalten	0,39%	1,12%	[22]
19 02 99	Abfälle a. n. g.			
19 02 99 00	Abfälle a. n. g. nicht differenzierbar			
19 02 99 50	durch Abfallbehandlung entstandene Produkte			
19 03 04*	als gefährlich eingestufte teilweise stabilisierte 13) Abfälle		0,24%	[22]
19 03 05	stabilisierte Abfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 03 04 fallen		1,94%	[22]
19 03 06*	als gefährlich eingestufte verfestigte Abfälle		3,67%	[22]
19 03 07	verfestigte Abfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 03 06 fallen		0,32%	[22]
19 05 01	nicht kompostierte Fraktion von Siedlungs- und ähnlichen Abfällen	24%	6%	e.A.
19 06 04	Gärrückstand/-schlamm aus der anaeroben Behandlung von Siedlungsabfällen		7,68%	[22]
19 06 06	Gärrückstand/-schlamm aus der anaeroben Behandlung von tierischen und pflanzlichen Abfällen		0,04%	[22]
19 07 02*	Deponiesickerwasser, das gefährliche Stoffe enthält		1,74%	[22]
19 07 03	Deponiesickerwasser mit Ausnahme desjenigen, das unter 19 07 02 fällt		0,02%	[22]
19 08 01	Sieb- und Rechenrückstände	10,00%	10,16%	[22]
19 08 02	Sandfangrückstände		0,09%	[22]
19 08 05	Schlämme aus der Behandlung von kommunalem Abwasser	4,06%	10,55%	[22]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
19 08 06*	gesättigte oder verbrauchte Ionenaustauscherharze		0,55%	[22]
19 08 08*	schwermetallhaltige Abfälle aus Membransystemen		0,02%	[22]
19 08 10*	Fett- und Ölmischungen aus Ölabscheidern mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 08 09 fallen		0,01%	[22]
19 08 11*	Schlämme aus der biologischen Behandlung von industriellem Abwasser, die gefährliche Stoffe enthalten	9,55%	16,33%	[22]
19 08 12	Schlämme aus der biologischen Behandlung von industriellem Abwasser mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 08 11 fallen	12,00%	0,80%	[22]
19 08 13*	Schlämme, die gefährliche Stoffe aus einer anderen Behandlung von industriellem Abwasser enthalten	6,42%	10%	[1], [22]
19 08 14	Schlämme aus einer anderen Behandlung von industriellem Abwasser mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 08 13 fallen	9,77%	10%	[1], [22]
19 09 01	feste Abfälle aus der Erstfiltration und Siebrückstände		0,47%	[22]
19 09 02	Schlämme aus der Wasserklärung	11,94%	0,33%	[22]
19 09 03	Schlämme aus der Dekarbonatisierung		0,02%	[22]
19 09 04	gebrauchte Aktivkohle		0,04%	[22]
19 09 05	gesättigte oder gebrauchte Ionenaustauscherharze		0,02%	[22]
19 10 01	Eisen und Stahlabfälle	100%		[15]
19 10 02	NE-Metall-Abfälle		100%	[15]
19 10 03*	Schredderleichtfraktionen und Staub, die gefährliche Stoffe enthalten	12,87%	41,00%	[17], [22]
19 10 04	Schredderleichtfraktionen und Staub mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 10 03 fallen	8%	4,00%	[17], [22]
19 10 05*	andere Fraktionen, die gefährliche Stoffe enthalten	18,40%	13,09%	[22]
19 11 01*	gebrauchte Filtertone		0,05%	[22]
19 11 02*	Säureteere		0,20%	[22]
19 11 05*	Schlämme aus der betriebseigenen Abwasserbehandlung, die gefährliche Stoffe enthalten		0,01%	[22]
19 12 01 00	Papier und Pappe „nicht differenzierbar“		0,02%	[22]
19 12 02	Eisenmetalle	100%		[15]
19 12 03	Nichteisenmetalle		100%	[15]
19 12 05	Glas		0,02%	[22]
19 12 06*	Holz, das gefährliche Stoffe enthält		0,05%	[22]
19 12 09	Mineralien (z.B. Sand, Steine)		0,03%	[22]
19 12 10	brennbare Abfälle (Brennstoffe aus Abfällen)	0,10%	0,14%	[22], [44]
19 12 11*	sonstige Abfälle (einschließlich Materialmischungen) aus der mechanischen Behandlung von Abfällen, die gefährliche Stoffe enthalten	1,36%	0,61%	[22], [46]
19 12 12	sonstige Abfälle (einschließlich Materialmischungen) aus der mechanischen Behandlung von Abfällen mit	1,36%	2,22%	[22], [46]

ASN	Bezeichnung	Fe-Gehalt	NE-Gehalt	Quelle
	Ausnahme derjenigen, die unter 19 12 11 fallen			
19 13 01*	feste Abfälle aus der Sanierung von Böden, die gefährliche Stoffe enthalten		0,51%	[22]
19 13 02	feste Abfälle aus der Sanierung von Böden mit Ausnahme derjenigen, die unter 19 13 01 fallen		0,01%	[22]
20 01 10	Bekleidung		0,11%	[22]
20 01 11	Textilien		0,07%	[22]
20 01 13*	Lösemittel	0,03%	0,08%	[22]
20 01 14*	Säuren		0,01%	[22]
20 01 15*	Laugen		0,03%	[22]
20 01 21*	Leuchtstoffröhren und andere quecksilberhaltige Abfälle	1,90%	0,62%	[13], [22]
20 01 23*	gebrauchte Geräte, die Fluorchlorkohlenwasserstoffe enthalten	60%	8%	[18]
20 01 27*	Farben, Druckfarben, Klebstoffe und Kunstharze, die gefährliche Stoffe enthalten		0,02%	[22]
20 01 33*	Batterien und Akkumulatoren, die unter 16 06 01, 16 06 02 oder 16 06 03 fallen, sowie gemischte Batterien und Akkumulatoren, die solche Batterien enthalten	23,30%	38,50%	[28]
20 01 34	Batterien und Akkumulatoren mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 33 fallen	23,30%	38,50%	[28]
20 01 35*	gebrauchte elektrische und elektronische Geräte, die gefährliche Bauteile 14) enthalten, mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 21 und 20 01 23 fallen	47%	9%	[11], [12]
20 01 36	gebrauchte elektrische und elektronische Geräte mit Ausnahme derjenigen, die unter 20 01 21, 20 01 23 und 20 01 35	47%	9%	[11], [12]
20 01 40	Metalle	80%	20%	[15], e.A.
20 02 01	biologisch abbaubare Abfälle		5,77%	[22]
20 03 01 00	gemischte Siedlungsabfälle nicht differenzierbar	4%	10,4%	[6], [22]
21 03 01 01	Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle gemeinsam über die öffentliche Müllabfuhr eingesammelt	4%	1%	[5], [6], [29], [39], [31]
22 03 01 02	Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt	4%	2,70%	[6], [19], [32], [33], [34], [35]
22 03 01 04	Abfälle aus der Biotonne	0,24%	0,06%	[6], [20]
20 03 03	Straßenkehricht		7,40%	[22]
20 03 06	Abfälle aus der Kanalreinigung		0,05%	[22]
20 03 07	Sperrmüll	11,80%	1,20%	[6], [36], [37], [38], [39], [40], [41]
20 03 99	Siedlungsabfälle a. n. g. i.	1,07%	4,30%	[22]

Anlage 2: Spezifischer Rohstoffbedarf durch Primärenergieträger**Berechnung der spezifischen Energiemenge nach Primärenergieträgern für die Eisen- und Stahlerzeugung**

Energieträger	Heizwert [GJ/Mg]	Einsatzmenge [PJ] [49]	Einsatzmenge [Mio. Mg]
Steinkohlen und Steinkohlenprodukte	28,7	455,836	15,883
Braunkohlen und Braunkohlenprodukte	22	0,339	0,015
Ottokraftstoffe	43,6	0,247	0,006
Dieselmkraftstoffe	42,6	1,235	0,029
Heizöl, leicht	42,6	0,539	0,013
Heizöl, schwer	39,5	23,309	0,590
sonst. Mineralöle, als Erdöl	42,8	0,764	0,018
Gase, als Erdgas	38	184,411	4,853
Elektroenergie	siehe untere Tabelle	78,181	1,750
Gesamt		744,861	23,156
Gesamt, spezifisch [Mio. Mg/PJ]			0,031
Strommix:	Anteil 2007 [50]	Einsatzmenge [PJ]	Einsatzmenge [Mio. Mg]
Braunkohle	24,30%	18,998	0,864
Kernenergie	22,10%	17,278	0,007
Steinkohle	22,30%	17,434	0,607
Erdgas	11,90%	9,304	0,245
Mineralöl	1,50%	1,173	0,027
Erneuerbare	13,70%	10,711	
Sonstige	4,20%	3,284	
Gesamt			1,750

Berechnung der spezifischen Energiemenge nach Primärenergieträgern für die Kupfererzeugung

Energieträger	Heizwert [GJ/Mg]	Einsatzmenge [PJ] [49]	Einsatzmenge [Mio. Mg]
Steinkohlen und Steinkohlenprodukte	28,7	1,069	0,037
Braunkohlen und Braunkohlenprodukte	22	0,266	0,012
Ottokraftstoffe	43,6	0,231	0,005
Dieselmkraftstoffe	42,6	1,124	0,026
Heizöl, leicht	42,6	0,917	0,022
Heizöl, schwer	39,5	0,953	0,024
sonst. Mineralöle, als Erdöl	42,8	0,220	0,005
Gase, als Erdgas	38	27,127	0,714
Elektroenergie	siehe untere Tabelle	54,104	1,211
Gesamt		86,011	2,057
Gesamt, spezifisch [Mio. Mg/PJ]			0,024
Strommix:	Anteil 2007 [50]	Einsatzmenge [PJ]	Einsatzmenge [Mio. Mg]
Braunkohle	24,30%	13,147	0,598
Kernenergie	22,10%	11,957	0,005
Steinkohle	22,30%	12,065	0,420
Erdgas	11,90%	6,438	0,169
Mineralöl	1,50%	0,812	0,019
Erneuerbare	13,70%	7,412	
Sonstige	4,20%	2,272	
Gesamt			1,211

Berechnung der spezifischen Energiemenge nach Primärenergieträgern für die Kunststoffherzeugung

Energieträger	Heizwert [GJ/Mg]	Einsatzmenge [PJ] [49]	Einsatzmenge [Mio. Mg]
Steinkohlen und Steinkohlenprodukte	28,7	0	0,000
Braunkohlen und Braunkohlenprodukte	22	0,226	0,010
Ottokraftstoffe	43,6	0,323	0,007
Dieselmkraftstoffe	42,6	1,577	0,037
Heizöl, leicht	42,6	3,602	0,085
Heizöl, schwer	39,5	0,283	0,007
sonst. Mineralöle, als Erdöl	42,8	0,319	0,007
Gase, als Erdgas	38	11,75	0,309
Elektroenergie	siehe untere Tabelle	46,927	1,050
Gesamt		65,007	1,513
Gesamt, spezifisch [Mio. Mg/PJ]			0,023
Strommix:	Anteil 2007 [50]	Einsatzmenge [PJ]	Einsatzmenge [Mio. Mg]
Braunkohle	24,30%	11,403	0,518
Kernenergie	22,10%	10,371	0,004
Steinkohle	22,30%	10,465	0,365
Erdgas	11,90%	5,584	0,147
Mineralöl	1,50%	0,704	0,016
Erneuerbare	13,70%	6,429	
Sonstige	4,20%	1,971	
Gesamt			1,050

Ermittlung des spezifischen Rohstoffbedarfs für die Energieerzeugung durch Primärenergieträger bei der Holzgewinnung

Energieträger	Heizwert [GJ/Mg]	Einsatzmenge [PJ] [49]	Einsatzmenge [Mio. Mg]
Steinkohlen und Steinkohlenprodukte	28,7	0	0,000
Braunkohlen und Braunkohlenprodukte	22	0	0,000
Ottokraftstoffe	43,6	0,11	0,003
Dieselmkraftstoffe	42,6	2,249	0,053
Heizöl, leicht	42,6	0,005	0,000
Heizöl, schwer	39,5	0	0,000
sonst. Mineralöle, als Erdöl	42,8	0,001	0,000
Gase, als Erdgas	38	0,006	0,000
Elektroenergie	siehe untere Tabelle	0,523	0,012
Gesamt		2,894	0,067
Gesamt, spezifisch [Mio. Mg/PJ]			0,023
Strommix:	Anteil 2007 [50]	Einsatzmenge [PJ]	Einsatzmenge [Mio. Mg]
Braunkohle	24,30%	0,127	0,006
Kernenergie	22,10%	0,116	0,000
Steinkohle	22,30%	0,117	0,004
Erdgas	11,90%	0,062	0,002
Mineralöl	1,50%	0,008	0,000
Erneuerbare	13,70%	0,072	
Sonstige	4,20%	0,022	
Gesamt			0,012

Ermittlung des spezifischen Rohstoffbedarfs für die Energieerzeugung durch Primärenergieträger bei der Betonerzeugung

Energieträger	Heizwert [GJ/Mg]	Einsatzmenge [PJ] [49]	Einsatzmenge [Mio. Mg]
Steinkohlen und Steinkohlenprodukte	28,7	23,146	0,806
Braunkohlen und Braunkohlenprodukte	22	42,849	1,948
Ottokraftstoffe	43,6	0,2	0,005
Diesekraftstoffe	42,6	1,14	0,027
Heizöl, leicht	42,6	10,108	0,237
Heizöl, schwer	39,5	5,714	0,145
sonst. Mineralöle, als Erdöl	42,8	14,003	0,327
Gase, als Erdgas	38	70,35	1,851
Elektroenergie	siehe untere Tabelle	40,404	0,904
Gesamt		207,914	6,250
Gesamt, spezifisch [Mio. Mg/PJ]			0,030
Strommix:	Anteil 2007 [50]	Einsatzmenge [PJ]	Einsatzmenge [Mio. Mg]
Braunkohle	24,30%	9,818	0,446
Kernenergie	22,10%	8,929	0,003
Steinkohle	22,30%	9,010	0,314
Erdgas	11,90%	4,808	0,127
Mineralöl	1,50%	0,606	0,014
Erneuerbare	13,70%	5,535	
Sonstige	4,20%	1,697	
Gesamt			0,904

Quellen

- [1] <http://www.abfallbewertung.org/repge.php?report=ipa>, Abruf am 19.03.2010
- [2] Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie: Gewerbeabfallstudie 2001, Dresden, 2004
- [3] Kodak GmbH Stuttgart: telefonische Auskunft zur Zusammensetzung von Einwegkameras
- [4] Fachverband Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel e.V. (FKN), Berlin: www.getraenkekarton.de
- [5] INTECUS: Eigene Analysen aus Baden-Württemberg, Brandenburg, Sachsen und Thüringen 2005-2007, unveröffentlicht
- [6] Umweltbundesamt: Nutzung der Potenziale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung; FKZ 3707 33 303, Dezember 2009 (bisher unveröffentlicht)
- [7] Verkehrs-Club der Schweiz: Altreifenentsorgung – Was ist ökologisch sinnvoll? (März 2003)
- [8] Verband Kunststoffherstellende Industrie e.V.: Kunststoffe im Automobil –Einsatz und Verwertung
- [9] Forschungszentrum Karlsruhe GmbH: Entsorgung von Shredderrückständen – ein aktueller Überblick; FZKA 6940; Karlsruhe 2004
- [10] Interessengemeinschaft exact, Fachgruppe Umwelt: Simplified LCA für Elektronikbauteile, November 2009
- [11] Umweltbundesamt: Best Practice Municipal Waste Management; 2009
- [12] Bundesverband der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V.: Kreislaufwirtschaft in der Praxis Nr. 1 –Elektrogeräte- Köln 1995
- [13] Stadt Wien, Magistratsabteilung 22: Technisch-naturwissenschaftliche Grundlagen für den Vergleich von Kompaktleuchtstofflampen mit herkömmlichen Glühlampen, Wien 2008
- [14] Kettler (BeHaRec): Altkabelzerlegung und PVC-Verarbeitung
- [15] <http://www.bundesabfallwirtschaftsplan.at/article/archive/14255>, Abruf am 19.03.2010
- [16] Schäfer, T.: Untersuchungen zur Dispersion und ihren Auswirkungen beim Übergang aus der Nutzungsphase in das Recycling, Dissertation Aachen 2004
- [17] Hofmann, G.: Charakterisierung und Verbrennung von Shredderleichtfraktionen in einer stationären Wirbelschichtverbrennungsanlage, Dissertation Dresden (unveröffentlicht)
- [18] ACRR: Empfehlenswerte Verfahren zum Recycling von Kunststoffabfall –Ein Wegweiser von und für regionale Behörden, 2004
- [19] Wuttke, J.: Bundesweite Gewerbeabfalluntersuchung, in Müll und Abfall 7/99
- [20] INTECUS GmbH: Bioabfallanalysen (unveröffentlicht)
- [21] Administration de l'Environnement Division des Déchets: Reorganisation der Marktabfallbewirtschaftung, März 2004
- [22] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW: Abfallanalysen-Datenbank ABANDA
- [23] Branchenkonzept Sächsische Gießereien 1999

- [24] Umweltbundesamt: Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2007; FKZ 3708 31 303; Dessau-Roßlau 2009
- [25] Müllhandbuch: Vermeidung und Verwertung von Ölfaltern aus dem Kfz-Bereich, A8522.4
- [26] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien: Verwertungsmöglichkeiten von Bildröhrenglas aus der Demontage von Elektroaltgeräten, Januar 2006
- [27] Silabetzschky, K.; Enge, R.: Beurteilung des Gefährdungspotenzials von LCD-Displays, umwelt- und abfallrechtlich gesetzeskonforme Wege zur Verwertung oder Beseitigung (unveröffentlicht)
- [28] Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien: Jahresbericht/Dokumentation 2008 –Erfolgskontrolle nach Batterieverordnung, Hamburg 2009
- [29] Bayrisches Landesamt für Umwelt: Untersuchung des Restabfalls aus Haushalten im Landkreis Schweinfurt, Oktober 2007
- [30] Eigenbetrieb Abfallwirtschaft: Analyse der Zusammensetzung von Restabfällen aus Haushalten für den Niederschlesischen Oberlausitzkreis im Jahr 2007, www.aw-nol.de
- [31] BIFA: Energetische Nutzung der Biomasseanteile in Abfälle, 1997
- [32] INTECUS: Eigene Analysen aus Rheinland Pfalz und Brandenburg, unveröffentlicht
- [33] Fruth, F.; Kranert, M.: Durchführung und Ergebnisse einer visuellen Klassifizierung von Gewerbeabfall, Sperrmüll und kommunalen Abfällen der Stadt Braunschweig, Müll und Abfall 1/1997
- [34] IFEU im Auftrag der Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen: Ökobilanz thermischer Entsorgungssysteme für brennbare Abfälle in Nordrhein-Westfalen, 2007
- [35] Wiemer, K.; Kern, M.: Abfallwirtschaft und Klimaschutz vor dem Hintergrund des Biomassepotenzials in Abfällen aus Industrie und Haushalten, 2002
- [36] INTECUS: Eigene Analysen aus Brandenburg, Nordrhein-Westfalen, Rheinland Pfalz und Sachsen, 1995-2007, unveröffentlicht
- [37] Landkreis Potsdam-Mittelmark: Fortschreibung des Abfallwirtschaftskonzept 2005
- [38] Baur, F.: Abfallwirtschaftliche Grundlagen im Saarland, Vortrag Regionales Abfallforum am 12. November 2003 Europäisches Bildungszentrum Otzenhausen
- [39] VKS: Empfehlung zur Sperrmüllsammlung II, VKS-Informationsschrift; 1999
- [40] Landwehr, K.: Einführung in die Abfallwirtschaft, 3. Auflage, 2002
- [41] Gallenkemper, B. et al.: Methodik der Abschätzung zukünftiger Restmüllmengen am Beispiel NRW unter Berücksichtigung des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und anderer neuerer gesetzlicher Regelungen; 1997
- [42] Zorn, L.: Bauabfallentsorgung aus Sicht der Abfallentsorger, Vortrag anlässlich der 18. Abfalltagung des LANU in Rendsburg am 16. November 2006
- [43] Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung: Unternehmenskooperation am Beispiel des Recyclings gemischter Bau- und Abbruchabfälle, November 2007
- [44] INTECUS: Eigene Analysen aus Baden-Württemberg, Brandenburg und Sachsen, 2005-2007, unveröffentlicht
- [45] Setzermann, U.: Verfahren zur Behandlung von Schlamm mit organischen Anteilen, insbesondere Klärschlamm, 2001

- [46] INTECUS Abfallanalysen 2009 (unveröffentlicht)
- [47] Mantau, U.; Bilitewski, B.: Stoffstrom-Modell-Holz; Rohstoffströme und CO₂-Speicherung in der Holzverwendung (bisher unveröffentlicht)
- [48] Rubli, St.: Controlling und Güterflussanalyse der Bauabfallentsorgung während des Rückbaus der Wohnsiedlung Bernerstrasse, im Auftrag des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich, 2005
- [49] Statistisches Bundesamt (2010): Umweltnutzung und Wirtschaft, Tabellen zu den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen, Teil 2: Energie, Rohstoffe, Tabelle 3.2.3.5, Ausgabe 2010
- [50] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (2010): Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2009, Berlin