

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3712 93 312

Abfallwirtschaft

## **Stoffstromorientierte Lösungsansätze für eine hochwertige Verwertung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen**

von

Iswing Dehne, Rüdiger Oetjen-Dehne, Nadine Siegmund  
Oetjen-Dehne & Partner Umwelt- und Energie-Consult GmbH  
Levetzowstraße 10 A  
10555 Berlin

unter Mitarbeit von

Günter Dehoust, Alexandra Möck  
Öko-Institut e.V. Büro Berlin  
Schicklerstraße 5-7  
10179 Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Oktober 2014

## Berichtskennblatt

Berichtsnummer	UBA-FB 00
Titel des Berichts	Stoffstromorientierte Lösungsansätze für eine hochwertige Verwertung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen
Autor(en) (Name, Vorname)	Dehne, Iswing Oetjen-Dehne, Rüdiger Siegmond, Nadine Dehoust, Günter Möck, Alexandra
Durchführende Institution (Name, Anschrift)	Oetjen-Dehne & Partner Umwelt- und Energie-Consult GmbH Levetzowstraße 10 A 10555 Berlin Öko-Institut e.V. Büro Berlin Schicklerstraße 5-7 10179 Berlin
Fördernde Institution	Umweltbundesamt Postfach 14 06 06813 Dessau-Roßlau
Abschlussjahr	2014
Forschungskennzahl (FKZ)	3712 93 312
Seitenzahl des Berichts	274
Zusätzliche Angaben	
Schlagwörter	Gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle, Abfallzusammensetzung, hochwertige Verwertung, Sortieranlagen, ökobilanzielle Bewertung, Instrumente

## Report Cover Sheet

Report No.	UBA-FB 00
Report Title	Material flow oriented approaches for high-quality recycling of mixed commercial solid waste
Author(s) (Family Name, First Name)	Dehne, Iswing Oetjen-Dehne, Rüdiger Siegmund, Nadine Dehoust, Günter Möck, Alexandra
Performing Organisation (Name, Address)	Oetjen-Dehne & Partner Umwelt- und Energie-Consult GmbH Levetzowstraße 10 A 10555 Berlin Öko-Institut e.V. Büro Berlin Schicklerstraße 5-7 10179 Berlin
Funding Agency	Umweltbundesamt Postfach 14 06 06813 Dessau-Roßlau
Report Date (Year)	2014
Project No. (FKZ)	3712 93 312
No. of Pages	274
Supplementary Notes	
Keywords	mixed commercial solid waste, waste composition, high-quality recycling, sorting plants, life cycle assessment, instruments

## Kurzbeschreibung

Das Projekt untersucht mittels ökobilanzieller Methoden, wie sich eine stärker an der Abfallhierarchie des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ausgerichtete Entsorgung von ca. 6 Mio. Mg/a gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle auf verschiedene umweltbezogene Wirkungskategorien auswirkt. Auf der Grundlage von durchgeführten Sortieranlagenbilanzierungen werden drei Untersuchungsvarianten erstellt, bei denen die aussortierten Wertstoffmengen und der damit verbundene Aufbereitungsaufwand ansteigt. Für jede Untersuchungsvariante werden Wirkungsabschätzungen zum Treibhauseffekt, zur Schonung/Verbrauch energetischer Ressourcen, zur Versauerung und zur Eutrophierung vorgenommen; Quecksilberemissionen werden qualitativ betrachtet. Eine Verifizierung der Untersuchungen erfolgt anhand von neun Sensitivitätsanalysen.

Ziele und Maßnahmen für eine hochwertige Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle werden untersucht und Instrumente zur Stoffstromlenkung und Ausschöpfung des ermittelten ökologischen Optimierungspotentials aufgezeigt.

## Abstract

This research project is using methods derived from life cycle assessment to investigate how waste disposal (ca. 6 million Mg/a of mixed commercial solid waste) that is geared to the waste hierarchy included in the Waste Management Act (KrWG) affects various environment related impact categories. Based on already existing sorting plant assessments, three examination options are established in which the separated amounts of recycled materials and the subsequent treatment effort increase. For each investigation option, the impact is estimated with regard to the greenhouse gas effect, preservation/usage of energetic resources, acidification, and eutrophication. Mercury emissions are qualitatively examined. A verification of the examinations is done through nine sensitivity analyses.

Goals and measures for high quality processing of mixed commercial solid waste are investigated and instrument are presented to steer material flows and exploit the determined ecologic optimization potential.

## Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung .....	25
2	Summary .....	36
3	Einleitung .....	47
4	Untersuchungsgegenstand .....	49
5	Aufkommen gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle.....	50
6	Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle in Deutschland 2010.....	53
7	Zusammensetzung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle.....	57
7.1	Branchenspezifische Zusammensetzung .....	58
7.2	Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle einer Umschlaganlage.....	59
7.3	Anlagenbilanzen von Sortieranlagen .....	60
7.4	Grundlagen für die Detailangaben und die Stoffstrommodellierung in Variante 2 .....	65
7.5	Abschließende Einschätzung zur Datenlage.....	68
8	Variantenbetrachtung für eine hochwertige Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle.....	70
9	Modellierung der Basisvariante: Derzeitige Behandlung der Abfallströme .....	71
9.1	Erstbehandlung in Sortieranlagen - Ermittlung der Abfallströme anhand statistischer Angaben .....	74
9.2	Erstbehandlung in Sortieranlagen - Ermittlung der Abfallströme anhand der durchgeführten Anlagenbilanzierungen.....	81
9.2.1	Output der Sortieranlagen .....	82
9.2.2	Zusammensetzung „brennbarer Abfälle“ im Output untersuchten Sortieranlagen.....	86
9.2.3	Ausbeute der Stofffraktionen der Anlagenbilanzierungen .....	92
9.2.4	Selektivität der Stofffraktionen der Anlagenbilanzierungen .....	93
9.2.5	Reinheit der aussortierten Stofffraktionen der Anlagenbilanzierungen .....	94
9.3	Erstbehandlung in Ersatzbrennstoffaufbereitungsanlagen (EBS-Aufbereitungsanlagen) .....	102
9.4	Erstbehandlung in Mechanisch – Biologischen Aufbereitungsanlagen (MBA-Anlagen) .....	105
9.5	Erstbehandlung in Thermischen Abfallbehandlungsanlagen (MVA).....	108
9.6	Erstbehandlung in Feuerungsanlagen.....	110

9.7	Zusammenfassender Überblick über die Outputströme der Erstbehandlungsanlagen.....	111
9.8	Zweit- und Drittbehandlung .....	111
10	Modellierung der Variante 1: Vorbehandlungspflicht für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle .....	113
11	Modellierung der Variante 2: Vorbehandlungspflicht und Steigerung der aussortierten recycelbaren Stoffströme.....	115
11.1	Output der Modellanlage.....	117
11.2	„brennbare Abfälle“ im Output der Modellanlage .....	122
11.3	Ausbeute der Stofffraktionen der Modellanlage .....	125
11.4	Selektivität der Stofffraktionen der Modellanlage .....	125
11.5	Reinheit der aussortierten Stofffraktionen der Modellanlage .....	128
12	Ökobilanzielle Bewertung .....	130
12.1	Methodik .....	130
12.1.1	Grundlagen .....	130
12.1.2	Systemgrenzen.....	131
12.1.3	Sachbilanz .....	132
12.1.4	Wirkungsabschätzung.....	132
12.2	Bilanz .....	135
12.2.1	Transporte .....	135
12.2.2	Sortieranlagen .....	136
12.2.3	MBA.....	137
12.2.4	Recycling .....	138
12.2.5	Energetische Verwertung.....	147
12.2.6	Co-Verbrennung .....	149
12.3	Ergebnisse .....	149
12.3.1	Treibhauseffekt (GWP).....	149
12.3.2	Schonung/Verbrauch fossiler energetischer Ressourcen (KEA).....	157
12.3.3	Versauerung (AP) .....	160
12.3.4	Eutrophierung (EP).....	163
12.3.5	Quecksilberemissionen.....	167
12.3.6	Quecksilbergehalte in den Brennstoffen .....	169
12.3.7	Sensitivitätsanalysen.....	176

13	Einflussfaktoren auf eine hochwertige Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle .....	190
13.1	Wirtschaftlichkeit der Abfallvorbehandlung .....	190
13.2	Technische Einflussfaktoren .....	196
13.3	Stoffqualität .....	199
13.3.1	Qualität der aussortierten PPK-Fraktion .....	199
13.3.2	Qualität der aussortierten Kunststofffraktion .....	201
13.3.3	Qualität der „brennbaren Abfälle“ .....	204
13.3.4	Grenzen der Sortierung .....	205
14	Ziele und Maßnahmen für eine hochwertige Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle .....	210
14.1	Stärkung der innerbetrieblichen getrennten Erfassung von Wertstoffen .....	212
14.2	Steigerung des Recyclings gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle .....	213
14.3	Steigerung einer hochwertigen energetischen Verwertung der „brennbaren Abfälle“/Sortierreste .....	214
14.4	Energetische Verwertung verbleibender „brennbarer Abfälle“/Sortierreste .....	215
14.5	Weitere flankierende Maßnahmen .....	215
15	Instrumente zur Erzielung einer hochwertigen Verwertung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen .....	216
15.1	Implementierung einer Vorbehandlungs-/Sortierpflicht bei der Novelle der Gewerbeabfallverordnung .....	217
15.1.1	Vorbehandlungspflicht und Stand der Technik .....	218
15.1.2	Vorbehandlungspflicht und qualitative Quotierung .....	218
15.1.3	Vorbehandlungspflicht und zeitlich differenzierte massenbezogene Quoten .....	220
15.1.4	Vorbehandlungspflicht und massenbezogene selbstlernende Quoten .....	221
15.2	Steigerung der Nachfrage nach hochwertigen Lösungen .....	225
15.3	Fiskalische Instrumente .....	226
15.3.1	Mehrwertsteuersatz für Recyclingprodukte aus Sortieranlagen senken .....	227
15.3.2	Fördermaßnahmen .....	227
15.4	Kooperationen und informatorische Instrumente .....	227
16	Anhang .....	229
17	Quellenverzeichnis .....	265

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Verbleib der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (Summe aus AS 20030102 und AS 15010600) auf die Entsorgungswege im Jahr 2010 .....	26
Abbildung 2:	Mittlere Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle auf der Basis von vier Anlagenbilanzen 2013 .....	26
Abbildung 3:	In- und Output fester Massenströme der Erstbehandlungsanlagen gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (Basisvariante) .....	28
Abbildung 4:	In- und Output fester Massenströme der Sortieranlagen von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen (Variante 1) .....	29
Abbildung 5:	In- und Output fester Massenströme der Variante 2 für das Jahr 2010 .....	30
Abbildung 6:	Vergleich der drei Varianten der Standardbilanz (GWP) .....	31
Abbildung 7:	Hg-Emissionen durch SBS-Verbrennung. Gegenüberstellung der Frachten bei der Verbrennung im Zementwerk und in der MVA unter Angabe von Schwankungsbreiten.....	32
Abbildung 8:	Vorbehandlungspflicht und zeitlich differenzierte massenbezogene Quoten .....	35
Abbildung 9:	Mögliche Sortierquoten für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle.....	35
Abbildung 11:	Entwicklung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (AS 20030102) und der gemischten Verpackungen (AS 15010600) in den Jahren 2005 bis 2010 [eigene Berechnungen auf der Grundlage von STBA 2005-2011] .....	52
Abbildung 12:	Verteilung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle auf die Entsorgungsanlagen in den Jahren 2007 bis 2010 [eigene Berechnungen auf der Grundlage von STBA 2007-2010] .....	54
Abbildung 13:	Verteilung der Verpackungsgemische auf die Entsorgungsanlagen in den Jahren 2007 bis 2010 [eigene Berechnungen auf der Grundlage von STBA 2007-2010] .....	55
Abbildung 14:	Verbleib der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (Summe aus AS 20030102 und AS 15010600) auf die Entsorgungswege im Jahr 2010 [eigene Berechnungen auf der Grundlage von STBA 2012a] .....	56
Abbildung 15:	Abschätzung der Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle für die Jahre 2007/2008 (Angaben in Ma.-%) [Dehne et al. 2011] .....	58
Abbildung 16:	Mittelwert und Streubreite der Zusammensetzung von Gewerbeabfällen (n=5 Branchen, ungewichteter Mittelwert) [Helftewes 2012, eigene Berechnung] .....	59
Abbildung 17:	Zusammensetzung von gemischten Gewerbeabfällen (n=1) [LfU Bayern 2013] ...	60

Abbildung 18: Mittelwert und Streubreite der Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle 2013 (n=5).....	64
Abbildung 19: Gegenüberstellung des ungewichteten branchenspezifischen Mittelwertes, der Einzelanalyse aus Bayern und der Ergebnisse der Anlagenbilanzierungen [Heltewes 2012, LfU Bayern 2013, eigene Berechnungen].....	65
Abbildung 20: Mittlere Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (34 Sortierfraktionen) auf der Basis von Anlagenbilanzen 2013 (n=4) .....	66
Abbildung 21: Mittlere Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle als Grundlage für die ökobilanzielle Betrachtung 2013 (n=4) .....	67
Abbildung 22: Differenzen zwischen der Zusammensetzung auf der Basis von 5 Sortierungen und der Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle als Grundlage für die ökobilanzielle Betrachtung 2013 .....	67
Abbildung 23: Abschätzung des in gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen enthaltenen Sekundärrohstoffmengenpotentials (n=4) .....	68
Abbildung 24: Übersicht über die Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle mit den resultierenden Stoffströmen für die ökobilanzielle Betrachtung .....	73
Abbildung 25: Informationen zum In- und Output aller statistisch erfassten bundesdeutschen Abfallsortieranlagen im Jahr 2010 (eigene Berechnung auf Basis der Daten von [STBA 2012a]) .....	76
Abbildung 26: Bereinigter Output der Sortieranlagen 2010 auf Basis statistischer Angaben .....	80
Abbildung 27: Mittelwert und Streubreite der Zusammensetzung des Outputs von Sortieranlagen 2013 (n=5).....	83
Abbildung 28: Mittlere Zusammensetzung des Outputs von Sortieranlagen 2007 [Dehne et al. 2011].....	84
Abbildung 29: Gegenüberstellung der in Sortieranlagen aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen abgetrennten Mengen an Sekundärrohstoffen in den Jahren 2007 und 2013 .....	84
Abbildung 30: Output von Vorbehandlungsanlagen für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle und gemischte Bau- und Abbruchabfälle Berlin 2010 und 2012 [IFEU 2012, IFEU 2013] .....	85
Abbildung 31: Mittlere Zusammensetzung der „brennbaren Abfälle“ im Output von Sortieranlagen 2013 (n=5).....	87
Abbildung 32: Gegenüberstellung der Inputzusammensetzung und der Zusammensetzung der erzeugten „brennbaren Abfälle“ der einzelnen Anlagenbilanzen 2013 .....	88

Abbildung 33: Mittlere Zusammensetzung der „brennbaren Abfälle“ im Output in Bayern 2010/2011 (n=3) [LfU Bayern 2013] .....	89
Abbildung 34: Gegenüberstellung des Mittelwertes der bayerischen Untersuchung und der Ergebnisse der Anlagenbilanzierungen für „brennbare Abfälle“ [LfU Bayern 2013, eigene Berechnungen] .....	90
Abbildung 35: Beispiele „brennbarer Abfälle“ 2013 [Fotos u.e.c. Berlin] .....	92
Abbildung 36: Verbleib der Fe-Metalle in den Outputfraktionen (n=4) .....	93
Abbildung 37: Verteilung der Stofffraktionen NE-Metalle, PPK, Kunststoffe und Holz auf die Outputfraktionen (n=4) .....	94
Abbildung 38: Zusammensetzung der mechanisch erzeugten Fe- und NE-Metalloutputfraktionen (n=4) .....	95
Abbildung 39: Beispiele aussortierter Fe- und NE-Metalle [Fotos u.e.c. Berlin] .....	96
Abbildung 40: Zusammensetzung der PPK-Outputfraktion (n=3) .....	98
Abbildung 41: Beispiele aussortierter PPK-Fraktionen [Fotos u.e.c. Berlin] .....	98
Abbildung 42: Zusammensetzung der Kunststoffoutputfraktion (n=3) .....	99
Abbildung 43: Beispiele aussortierter Kunststofffraktionen [Fotos u.e.c. Berlin] .....	100
Abbildung 44: Zusammensetzung der Holz-Outputfraktion (n=4) .....	101
Abbildung 45: Beispiele aussortierte Holzfraktionen [Fotos u.e.c. Berlin] .....	102
Abbildung 46: Outputzusammensetzung von EBS-Anlagen für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle [eigene Abschätzung] .....	104
Abbildung 47: Zusammensetzung der NE-Metallfraktion aus MBA-Anlagen [SATURN 2012] .....	108
Abbildung 48: In- und Output fester Massenströme der Erstbehandlungsanlagen gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (Basisvariante) .....	111
Abbildung 49: In- und Output fester Massenströme der Sortieranlagen von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen (Variante 1) .....	113
Abbildung 50: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild der Modellanlage für die vermehrte Ausbeute und Selektivität von Wertstoffen (Variante 2) .....	117
Abbildung 51: Sankey-Diagramm der Modellanlage (Variante 2) .....	118
Abbildung 52: Stoffströme der Modellanlage .....	119
Abbildung 53 Überblick über die Verteilung der Stofffraktionen auf die Stoffströme der Modellanlage (Variante 2) .....	120
Abbildung 54: In- und Output fester Massenströme der Variante 2 für das Jahr 2010 .....	122

Abbildung 55: Zusammensetzung der „brennbaren Abfälle“ der einzelnen Verfahrenslinien der Modellanlage (Variante 2) .....	123
Abbildung 56: Mittlere Zusammensetzung der „brennbaren Abfälle“ der Modellanlage (Variante 2).....	124
Abbildung 57: Verteilung der Stofffraktionen Metalle und Holz auf die Outputfraktionen der Modellanlage (Variante 2).....	126
Abbildung 58: Verteilung der Stofffraktionen PPK und Kunststoffe auf die Outputfraktionen der Modellanlage (Variante 2) .....	127
Abbildung 59: Verbleib des Kunststoffpotentials in der Modellanlage (Variante 2) .....	128
Abbildung 60: Bilanzrahmen der Bilanzierung zusätzlich erfasster Mengen Altpapier im Vergleich zur Verbrennung in der MVA [Öko-Institut 2008] .....	142
Abbildung 61: Asymmetrische Systemgrenzen der Vergleichsszenarien ohne Berücksichtigung der Holznutzung [nach Dinkel 2000, Dinkel 2006] .....	142
Abbildung 62: Symmetrische Systemgrenzen der Vergleichsszenarien mit Berücksichtigung der Holznutzung [nach Dinkel 2000, Dinkel 2006] .....	143
Abbildung 63: Ergebnisse für GWP für die Basisvariante in der Standardbilanz .....	153
Abbildung 64: Ergebnisse für GWP für die Variante 1 in der Standardbilanz .....	154
Abbildung 65: Ergebnisse für GWP für die Variante 2 in der Standardbilanz .....	155
Abbildung 66: Vergleich der drei Varianten der Standardbilanz (GWP) .....	156
Abbildung 67: Ergebnisse für KEA für die Basisvariante in der Standardbilanz.....	158
Abbildung 68: Ergebnisse für KEA für die Variante 1 in der Standardbilanz.....	158
Abbildung 69: Ergebnisse für KEA für die Variante 2 in der Standardbilanz.....	159
Abbildung 70: Vergleich der drei Varianten der Standardbilanz (KEA) .....	160
Abbildung 71: Ergebnisse für AP für die Basisvariante in der Standardbilanz .....	161
Abbildung 72: Ergebnisse für AP für die Variante 1 in der Standardbilanz .....	161
Abbildung 73: Ergebnisse für AP für die Variante 2 in der Standardbilanz .....	162
Abbildung 74: Vergleich der drei Varianten der Standardbilanz (AP) .....	163
Abbildung 75: Ergebnisse für EP für die Basisvariante in der Standardbilanz.....	164
Abbildung 76: Ergebnisse für EP für die Variante 1 in der Standardbilanz.....	165
Abbildung 77: Ergebnisse für EP für die Variante 2 in der Standardbilanz.....	166
Abbildung 78: Vergleich der drei Varianten der Standardbilanz (EP) .....	167

Abbildung 79: Übersicht über mittlere energiebezogene Hg-Gehalte in Brennstoffen .....	173
Abbildung 80: Hg-Emissionen durch SBS-Verbrennung im Zementwerk. Gegenüberstellung der Frachten in den Inputströmen und Emissionen bei unterschiedlichen Emissionsfaktoren .....	174
Abbildung 81: Hg-Emissionen durch SBS-Verbrennung. Gegenüberstellung der Frachten bei der Verbrennung im Zementwerk und in der MVA unter Angabe von Schwankungsbreiten.....	175
Abbildung 82: Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen im Überblick für die Varianten mit Holzschonung.....	189
Abbildung 83: Erlöse (-)/Kosten (+)der Abfallvorbehandlung (Angaben in €/Mg Input) [Dehne et al. 2011], ohne Wagnis und Gewinnzuschläge.....	193
Abbildung 84: Gesamtkosten von Sortieranlagen mit 15 Ma.-% Wertstoffausbeute im Vergleich zu Kosten der Müllverbrennung in Abhängigkeit von Verbrennungspreisen für „brennbare Abfälle“ und Wertstoff Erlösen .....	194
Abbildung 85: Gesamtkosten von Sortieranlagen mit 40 Ma.-% Wertstoffausbeute in Abhängigkeit von Verbrennungspreisen und Erlössituation .....	195
Abbildung 86: Grenzkosten der händischen Sortierung bzw. automatischen Ausbringung mittels NIR von Wertstoffen [nach Helftwes 2012] .....	196
Abbildung 87: Gegenüberstellung des Verbleibs des PPK-Potentials der Anlagenbilanzen 2013 und der Modellanlage .....	201
Abbildung 88: Zusammensetzung der Fraktion Kunststoffe der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (n=4) .....	202
Abbildung 89: Gegenüberstellung des Verbleibs des Kunststoff-Potentials der Anlagenbilanzen 2013 und der Modellanlage.....	203
Abbildung 90: Beispiele aussortierter Kunststofffraktionen [Fotos u.e.c. Berlin] .....	203
Abbildung 91: Einfluss des Kunststoffanteils auf den Heizwert von Ersatzbrennstoffen [Seeger 2009] .....	204
Abbildung 92: Heizwerte und Kunststoffmassenanteile der „brennbaren Abfälle“ der Modellanlage (Variante 2).....	205
Abbildung 93: Einzelne Siebfraktionen von Feinfraktionen gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle und eines vorsortierten Material aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen und gemischten Bau- und Abbruchabfällen [Krause 2010] .....	207
Abbildung 94: Einzelne Siebfraktionen einer Feinfraktionen gemischter Bau- und Abbruchabfällen [Krause 2010] .....	208

Abbildung 95: Heizwerte von Feinfraktionen gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (GEW), eines vorsortierten Material aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen und gemischten Bau- und Abbruchabfällen (VA) sowie gemischten Bau- und Abbruchabfällen (BM) (Einzelfraktionen und unklassierte Proben) [Krause 2010].....	209
Abbildung 96: Beispiele für die Berechnung der Bewertungsquote für eine hochwertige und schadlose Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle .....	220
Abbildung 97: Wirksamkeit verschiedener Instrumente, um umweltfreundliches Handeln der Unternehmen zu bewirken (Mehrfachnennungen möglich) [Grabowska 2013]...	228

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Aufkommen gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt) im Jahr 2010 (berechnet) [STBA 2012a] .....	51
Tabelle 2:	Aufkommen von gewerblichen Verpackungsgemischen im Jahr 2010 [STBA 2012a] .....	51
Tabelle 3:	Sortierkatalog der Anlagenbilanzierungen .....	61
Tabelle 4:	Zusammensetzung des Störstoffanteils bei der Altglassortierung [eigene Abschätzung].....	77
Tabelle 5:	Zusammensetzung des Outputs der LVP-Sortieranlagen [Öko-Institut/HTP 2012] .....	78
Tabelle 6:	Zusammensetzung des Störstoffanteils bei der Aufbereitung mineralischer Abfälle .....	78
Tabelle 7:	Zusammensetzung des Outputs aus der Aufbereitung gemischter Bau- und Abbruchabfälle [eigene Abschätzung].....	79
Tabelle 8:	Zusammensetzung des Outputs der Sperrmüllaufbereitung [IFEU 2012, Öko-Institut 2008].....	79
Tabelle 9:	Erläuterndes Beispiel für Ausbeute, Selektivität und Reinheit einer Stofffraktion .....	82
Tabelle 10:	Stoffströme der Sortieranlagen im Jahr 2010.....	86
Tabelle 11:	Berechnung des mittleren Heizwertes der „brennbaren Abfälle“ der Anlagenbilanzierung 2013 [Helftwes 2012, Öko-Institut/HTP 2012, Löschau 2006, IAA / Intecus 2011] .....	91
Tabelle 12:	Ausbeuten der Stofffraktionen .....	92
Tabelle 13:	Beispielhafte Input-Anforderungen von EBS-Kraftwerken [Dehne et al. 2011] ...	103
Tabelle 14:	Stoffströme der EBS-Aufbereitungsanlagen für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle.....	105
Tabelle 15:	Ausgewählte Outputströme der MBA [STBA 2007-2010].....	106
Tabelle 16:	Stoffströme der MBA [eigene Abschätzung], bezogen auf gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle .....	107
Tabelle 17:	feste Output-Ströme der MVA, bezogen auf gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle.....	110

Tabelle 18.	feste Outputströme von Feuerungsanlagen für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle.....	110
Tabelle 19.	Anforderungen an die Sortierung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle....	115
Tabelle 20.	Stoffströme der Variante 2 für das Jahr 2010.....	121
Tabelle 21.	Gegenüberstellung der Massenanteile der ausgebrachten Wertstofffraktionen und des berechneten Heizwertes der Modellanlage (Variante 2) und der Anlagenbilanzierungen 2013 .....	124
Tabelle 22.	Ausbeuten der Stofffraktionen der Modellanlage (Variante 2).....	125
Tabelle 23.	Bilanzierung .....	131
Tabelle 24	Treibhauspotential der wichtigsten Treibhausgase .....	133
Tabelle 25.	Fossile Energieressourcen und deren Energieinhalt .....	134
Tabelle 26.	Wirkfaktoren für die Versauerung .....	134
Tabelle 27.	Wirkfaktoren für die Eutrophierung.....	134
Tabelle 28.	Mittlere Transportentfernungen .....	136
Tabelle 29.	Verbrauchs- und Emissionsdaten Lkw je Strecke (voll beladen, inkl. Rückfahrt leer) .....	136
Tabelle 30.	Aufwendungen der Sortier- und EBS-Aufbereitungsanlagen.....	137
Tabelle 31.	Energiedaten der „durchschnittlichen“ MBA [Öko-Institut/IFEU 2010].....	137
Tabelle 32.	Bruttomengen zum Recycling und zur energetischen Verwertung, Störstoffe und Feuchteverluste sowie daraus abgeleitete Nettomengen.....	139
Tabelle 33.	Spezifische Emissionsfaktoren für die Aufwendungen und Gutschriften der einzelnen Recyclingfraktionen .....	140
Tabelle 34.	Spannweite von Rohdichten von darr trockenem Holz (0 % Feuchte) nach [GDH 2013, Dornbach 2013].....	145
Tabelle 35.	Dichte von verarbeiteten Mischkunststoffen, Beton und verschiedenen Hölzern und daraus abgeleitete Substitutionsfaktoren bei gleicher Nutzungsdauer [GDH 2013, ].....	145
Tabelle 36.	Unterer Bereich des durchschnittlichen Emissionsfaktors für den Ersatz von Produkten aus dickwandigen Kunststoffen (20 %), Holz und Beton (je 40 %) ....	146
Tabelle 37.	Oberer Bereich des durchschnittlichen Emissionsfaktors für den Ersatz von Produkten aus dickwandigen Kunststoffen, Holz und Beton (je ein Drittel).....	147
Tabelle 38.	Wirkungsgrade der Anlagen zur energetischen Verwertung .....	148

Tabelle 39.	Emissionsfaktoren für Strom und Wärme .....	149
Tabelle 40.	Ergebnisse für GWP in der Standardbilanz mit Angabe der zugrunde gelegten Mengen und Emissionsfaktoren .....	151
Tabelle 41.	Gegenüberstellung von mittleren Hg-Gehalten und Heizwerten von Restmüll, SBS, Steinkohle, Braunkohle und Petrolkoks (Quellenangaben im Text) .....	172
Tabelle 42.	Hg-Emissionen bei der Verbrennung des SBS in der MVA bei unterschiedlichen Reingaskonzentrationen .....	174
Tabelle 43.	Untersuchte Sensitivitäten.....	176
Tabelle 44.	Sensitivität 1 - Obere und untere Werte der Gutschriften für Mischkunststoffe, die Produkte aus Holz, Beton und dickwandigen Kunststoffen ersetzen (MKS_uW, MKS_oW).....	177
Tabelle 45.	Sensitivität 2 - MKS wird zu 100 % PO-Regranulat aufgearbeitet, kein Ersatz von Produkten aus Holz, Beton und dickwandigen Kunststoffen (MKS_100-Reg) .....	179
Tabelle 46.	Der Bilanz zugrunde gelegter Mix aus Primär- und Sekundärbrennstoffen und deren Energiegehalt .....	180
Tabelle 47.	Sensitivität 3 - SBS-Brennstoffmix im Zementwerk statt Steinkohle als Gutschrift (ZW_SBS) .....	181
Tabelle 48.	Sensitivität 4 - Reduktion des Strommixes - [UBA 2013] statt [ecoinvent V3 2013] (Strom_601).....	182
Tabelle 49.	Sensitivität 5 - Holz aus Holzschonung durch PPK-Recycling verbleibt im Wald statt energetischer Nutzung (Holz_Wald) .....	183
Tabelle 50.	Sensitivität 6 - Höherer Nettowirkungsgrad für Wärme von 0,32 statt 0,16 (EBS_WG_0,32).....	184
Tabelle 51.	Sensitivität 7 – Gesamter Abfall geht in MVA (MVA_100).....	185
Tabelle 52.	Sensitivität 8 – Fossiler Verdrängungsmix als Stromgutschrift (fos_StromM)....	186
Tabelle 53.	Sensitivität 9 – Veränderte Abfallzusammensetzung (+25% und -25%).....	187
Tabelle 54.	Erlöse (-)/Kosten (+) für verschiedene Wertstofffraktionen und „brennbare Abfälle“ bzw. unvorbehandelte gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle (Stand 2013) [EUWID, Henkes 2013].....	192
Tabelle 55.	Installierte Fe-Metallabscheider und die gemessenen verfahrenstechnischen Kennzahlen Ausbeute, Selektivität und Reinheit der Fe-Metalle .....	197
Tabelle 56.	Definitionen von Altpapiersorten [Altpapier 2000] .....	200

Tabelle 57.	Zielvorgaben für massenbezogene Wertstoffausbringung .....	214
Tabelle 58.	Ausgewählte Instrumente zur Optimierung der Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle [Oetjen-Dehne et al. 2008, überarbeitet) .....	216
Tabelle 59.	Vergleich der Verwertungsquoten für LVP und der Verwertungsquoten für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle [Öko-Institut/HTP 2012] .....	224

## Anhangsverzeichnis

Anhang 1:	Kurzprotokoll der 1. Fachbeiratssitzung am 18.02.2013 .....	231
Anhang 2:	Kurzprotokoll der 2. Fachbeiratssitzung am 29.11.2013 .....	233
Anhang 3:	Kurzprotokoll des abschließenden Fachgespräches am 01.04.2014 .....	234
Anhang 4:	Abfallentsorgung 2010 [STBA 2012a] und daraus resultierende Neuberechnung des AS 20030102 .....	238
Anhang 5:	Neuberechnung der Anlagenanzahl 2010.....	242
Anhang 6:	Übersicht über die eingesetzte Anlagentechnik der untersuchten Sortieranlagen .....	243
Anhang 7:	Theoretisches Wertstoffpotential der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle für ökobilanziellen Betrachtung im Jahr 2010 .....	244
Anhang 8:	Verteilung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (AS 20030102) und der Verpackungsgemische (AS 15010600) auf die Entsorgungsanlagen in den Jahren 2007 bis 2010 [STBA 2007-2010] .....	245
Anhang 9:	Branchenspezifische Zusammensetzung von Gewerbeabfällen [Helftewes 2013] .....	246
Anhang 10:	Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (Ergebnis der Anlagenbilanzierungen + eine weitere Analyse) (Angaben in Ma.-%) .....	247
Anhang 11:	Input in die Sortieranlagen 2010 [STBA 2012a] .....	249
Anhang 12:	Output der Sortieranlagen 2010 [STBA 2012a] .....	250
Anhang 13:	Geschätzter Output verschiedener „Mono-Sortieranlagen“ 2010.....	251
Anhang 14:	Bereinigter Output der Sortieranlagen 2010.....	252
Anhang 15:	Vereinfachter Verfahrensablauf einer MBA.....	253
Anhang 16:	Herleitung der Outputstoffströme der MVA.....	254
Anhang 17:	Herleitung der Outputstoffströme der EBS-Rostfeuerungsanlagen .....	254
Anhang 18:	Feste Outputströme der Erstbehandlungsanlagen (Basisvariante).....	255
Anhang 19:	Feste Outputströme der Sortieranlagen (Variante 1).....	256
Anhang 20:	Aufteilung des Inputs auf die Outputfraktionen der Modellanlage im Ergebnis des Rechenmodells zur Stoffstrommodellierung (Daten zum Sankey-Diagramm).....	257
Anhang 21:	Feste Outputströme der Modellanlage (Variante 2) .....	259

Anhang 22:	Zusammensetzung und Heizwerte der „brennbaren Abfälle“ der Modellanlage (Variante 2).....	260
Anhang 23:	Selektivitäten der Stofffraktionen der Modellanlage (Variante 2) .....	262
Anhang 24:	Gegenüberstellung des Verbleibs des PPK-Potentials der Anlagenbilanzen 2013 und der Modellanlage .....	263
Anhang 25:	Gegenüberstellung des Verbleibs des Kunststoff-Potentials der Anlagenbilanzen 2013 und der Modellanlage.....	264
Anhang 26:	Heizwert, Gehalt $C_{gesamt}$ und Anteil $C_{fossil}$ .....	264

## Abkürzungen, Maßeinheiten

„brennbare Abfälle“	„Brennbare Abfälle“ subsumieren die von den Anlagenbetreibern verwendeten Abfallschlüssel AS 191210 (brennbare Abfälle) und AS 191212 (Sonstige Abfälle).
€	Euro
∑	Summe
a	Jahr
a.n.g.	anderweitig nicht genannt
AP	Acidification Potential = Versauerung
APME	Association of Plastics Manufacturers in Europe (europäischer Verband der Kunststoffherzeuger)
AS	Abfallschlüssel
AS 15010600	gemischte Verpackungen nicht differenzierbar
AS 15010601	Leichtverpackungen (LVP)
AS 20030100	gemischte Siedlungsabfälle nicht differenzierbar
AS 20030101	Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle <u>gemeinsam</u> über die öffentliche Müllabfuhr eingesammelt
AS 20030102	Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, <u>getrennt</u> vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt
AS 200399	Siedlungsabfälle a.n.g.
AVV	Abfallverzeichnisverordnung
B	Beton
BDE	Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V.
Bf	Bewertungsfaktor
BREF	Best Available Techniques Reference Documents

bvse	Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V.
C	Kohlenstoff
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
DKR	Deutsche Gesellschaft für Kreislaufwirtschaft und Rohstoffe mbH
dw	Dickwandig
EBS	Ersatzbrennstoffe = mittelkalorische „brennbare Abfälle“
EEG	Erneuerbare Energien-Gesetz
EF	Emissionsfaktor
EP	Eutrophierungspotential
EUA	European Union Allowances (EU Emissionsberechtigungen)
Fe	Eisen
FEFCO	The European Federation of Corrugated Board Manufacturers
FKN	Flüssigkeitskartonage
FM	Feuchtmasse
GDA	Gesamtverband der Aluminiumindustrie e.V.
GewAbfV	Gewerbeabfallverordnung
ggf.	gegebenenfalls
GWP	Global Warming Potential (Treibhauseffekt)
GWP	Global Warming Potential = Treibhauseffekt
H	Holz
HDPE	Polyethylen mit hoher Dichte (High Density Polyethylen)
HKW	Heizkraftwerk

Hu	unterer Heizwert
ITAD	Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen Deutschland e.V.
KEA <sub>fossil</sub>	Kumulierter fossiler Energieaufwand
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KS	Kunststoffe
KW	Kalenderwoche
kWh	Kilowattstunde
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LDPE	Polyethylen mit geringer Dichte (Low Density Polyethylen)
lutro	lufttrocken
LVP	Leichtverpackung(en)
m	Masse
MA	Mechanische Aufbereitungsanlage
Ma.-%	Massenprozent = Gewichtsprozent
MBA	Mechanisch-biologische Aufbereitungsanlage
MBS	Mechanisch-biologische Stabilisierungsanlage
Mg	Megagramm (10 <sup>6</sup> g oder 1.000 kg, umgangssprachlich „Tonne“, t)
MJ	Megajoule
MKS	Mischkunststoffe
MPS	Mechanisch-physikalische Stabilisierungsanlage

MVA	Müllverbrennungsanlage = thermische Abfallbehandlungsanlagen
MWh	Megawattstunde
n	Stichprobenanzahl
NAWARO	nachwachsende Rohstoffe
NE	Nichteisen
NH <sub>3</sub>	Ammoniak
NIR	Nahinfrarotspektroskopie
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
örE	öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger
oW	oberer Wert
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PO	Polyolefine (mit PE und PP als wichtigste Vertreter)
PO <sub>4</sub>	Phosphat
PP	Polypropylen
PPK	Papier, Pappe, Kartonagen
reg	regenerativ
Reg	Regranulat
SBS	Sekundärbrennstoffe = hochkalorische „brennbare Abfälle“
Sens	Sensitivität
SF	Substitutionsfaktor
SO <sub>2</sub>	Schwefeldioxid

SO <sub>4</sub>	Sulfat
Störstoffe	Störstoffe subsumiert die Abfallfraktionen, die die aussortierten Wertstofffraktionen verunreinigen (z.B. Feinkornanteile, die der aussortierten Wertstofffraktion anhaften).
TEHG	Treibausgas-Emissionshandelsgesetzes
TS	Trockensubstanz
UBA	Umweltbundesamt
uW	unterer Wert
VKS	Verband kommunale Abfallwirtschaft und Stadtreinigung im VKU
VKU	Verband kommunaler Unternehmen e. V.

# 1 Zusammenfassung

## 1.1 Einleitung

Gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle enthalten ein erhebliches Sekundärrohstoffpotential, von dem derzeit nur ein geringer Anteil zum Recycling gelangt. Das Forschungsvorhaben untersucht mittels ökobilanzieller Methoden, wie sich eine stärker an der Abfallhierarchie des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ausgerichtete Entsorgung dieser Abfälle auf verschiedene umweltbezogene Wirkungskategorien auswirkt. Im Focus steht dabei die Frage, ob, und wenn ja, welcher Nutzen mit einem intensivierten Recycling einhergeht und mit welchen Maßnahmen und Instrumenten dieses Potential zur Umweltentlastung aktiviert werden kann. Wesentliche Teilziele des Projektes sind

- ▶ die Datenaktualisierung zum Aufkommen und zur Zusammensetzung der Abfälle,
- ▶ die Identifizierung und Analyse der Entsorgungswege und Stoffströme,
- ▶ die Durchführung der ökobilanziellen Betrachtung anhand verschiedener Szenarien für unterschiedliche Entsorgungswege und Stoffstromverteilungen,
- ▶ die Bewertung der Analyseergebnisse und Benennung vorrangig anzustrebender Entsorgungswege sowie
- ▶ die Identifizierung von Maßnahmen und Instrumenten für eine Potentialausschöpfung und die Erarbeitung von Handlungsansätzen für eine Stoffstromlenkung.

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zusammenfassend dargestellt.

## 1.2 Untersuchungsgegenstand

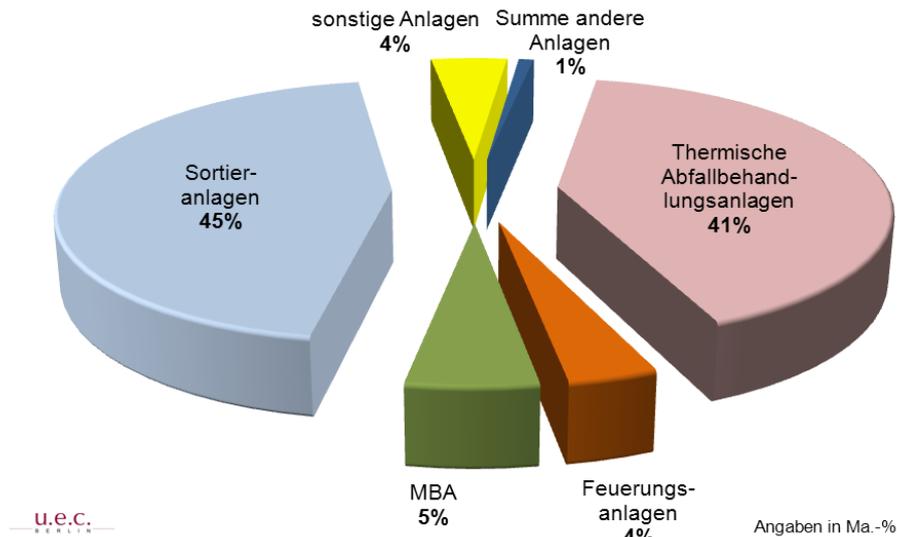
Untersuchungsgegenstand sind gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle, die in Gewerbebetrieben entstehen können. Hierzu gehören Abfälle mit dem Abfallschlüssel 20030102 (gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle). Da nach Hinweisen aus der Entsorgungswirtschaft gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle auch als Verpackungsgemische unter dem Abfallschlüssel 15010600 entsorgt werden, werden diese Mengen in die Betrachtungen einbezogen. Die in Gewerbebetrieben getrennt erfassten Wertstoffe werden im Rahmen des Projektes nicht betrachtet. Bezugsjahr für die ökobilanziellen Betrachtungen ist das Jahr 2010.

## 1.3 Aufkommen und Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle

Im Jahr 2010 sind in innerdeutschen Anlagen rund 3,45 Mio. Mg gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle und rund 2,39 Mio. Mg Verpackungsgemische entsorgt worden. Wird im Folgenden von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen gesprochen, handelt es sich immer um die Summe aus diesen beiden Abfallarten mit einem Gesamtaufkommen von rund 5,8 Mio. Mg.

Vom diesem Gesamtaufkommen wurden rund 2,87 Mio. Mg/a in Sortieranlagen/ sonstigen Behandlungsanlagen (EBS-Aufbereitungsanlagen) aufbereitet und 2,6 Mio. Mg/a in thermischen Abfallbehandlungsanlagen/ Feuerungsanlagen verbrannt (Abbildung 1).

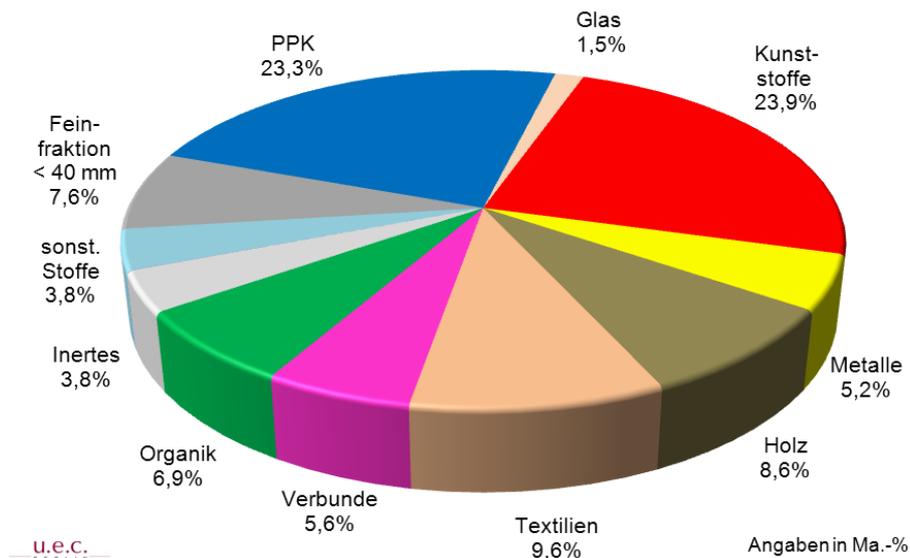
Abbildung 1: Verbleib der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (Summe aus AS 20030102 und AS 15010600) auf die Entsorgungswege<sup>1</sup> im Jahr 2010



#### 1.4 Zusammensetzung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle

Repräsentative Daten zur Abfallzusammensetzung liegen nicht vor. Im Rahmen dieser Untersuchung konnte jedoch aktuelles, wenngleich nicht repräsentatives Datenmaterial aus vier Sortieranlagenbilanzierungen ausgewertet werden.

Abbildung 2: Mittlere Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle auf der Basis von vier Anlagenbilanzen 2013



<sup>1</sup> Andere Anlagen sind u.a. Deponien, biologische Behandlungsanlagen, Shredderanlagen, Bauschuttzubereitungsanlagen.

Anhand der mittleren Zusammensetzung der vier Anlagenbilanzierungen lässt sich die theoretische Sekundärrohstoffmenge für die bundesweit im Jahr 2010 entsorgten gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle berechnen. Für die Hauptfraktionen ergeben sich folgende Potentiale:

PPK – Potential (23,3 Ma.-%):	1,35 Mio. Mg/a
Kunststoff – Potential (23,9 Ma.-%):	1,38 Mio. Mg/a
Metall – Potential (5,2 Ma.-%):	0,3 Mio. Mg/a
Holz – Potential (8,6 Ma.-%):	0,49 Mio. Mg/a.

## 1.5 Variantenbetrachtung für eine hochwertige Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle

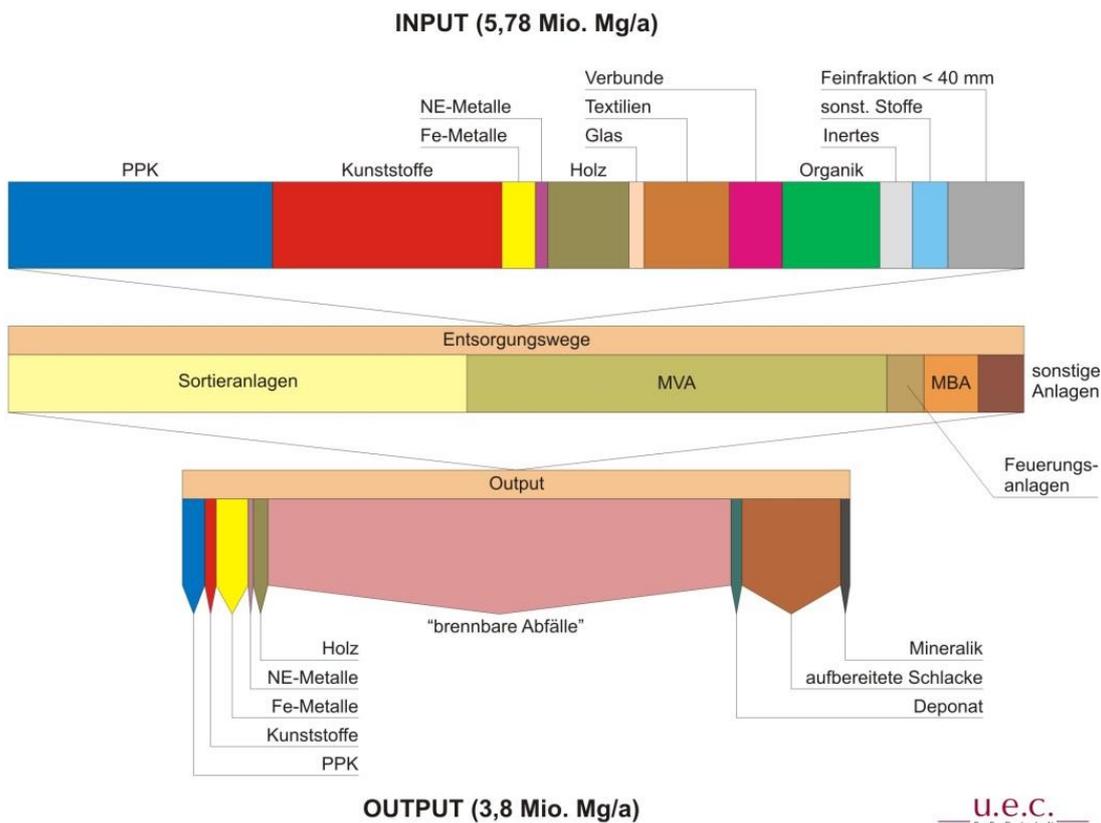
Um beantworten zu können, ob die bei der Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle auftretenden Umweltwirkungen durch eine engere Ausrichtung an der Abfallhierarchie des Abfallwirtschaftsgesetzes verringert werden können, werden drei verschiedene Varianten untersucht. Die jeweiligen Mengenströme werden unter Zuhilfenahme statistischer Daten, Ergebnisse der durchgeführten Anlagenbilanzierungen, Literaturangaben und Erfahrungswerten modelliert.

### **Basisvariante**

Die Basisvariante umfasst die derzeitigen Behandlungswege und Herleitung der Abfallströme für die gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle. In den unterschiedlichen Entsorgungsanlagen werden verschiedene Wertstoffe aussortiert/abgetrennt. So z.B.

- ▶ werden in den untersuchten Sortieranlagen 16,6 Ma.-% des Inputs (ca. 0,43 Mio. Mg/a) als Sekundärrohstoffe (Fe- Metalle, NE-Metalle, PPK, Kunststoffe, Holz und Mineralik) aussortiert und 83,4 Ma.-% „brennbare Abfälle“ in unterschiedlichen Qualitäten erzeugt.
- ▶ separieren die Verbrennungsanlagen ca. 0,09 Mio. Mg/a Metalle aus der Schlacke. Hinzu kommen ca. 0,56 Mio. Mg/a verwertbare aufbereitete Schlacke.

Abbildung 3: In- und Output<sup>2</sup> fester Massenströme der Erstbehandlungsanlagen gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (Basisvariante)

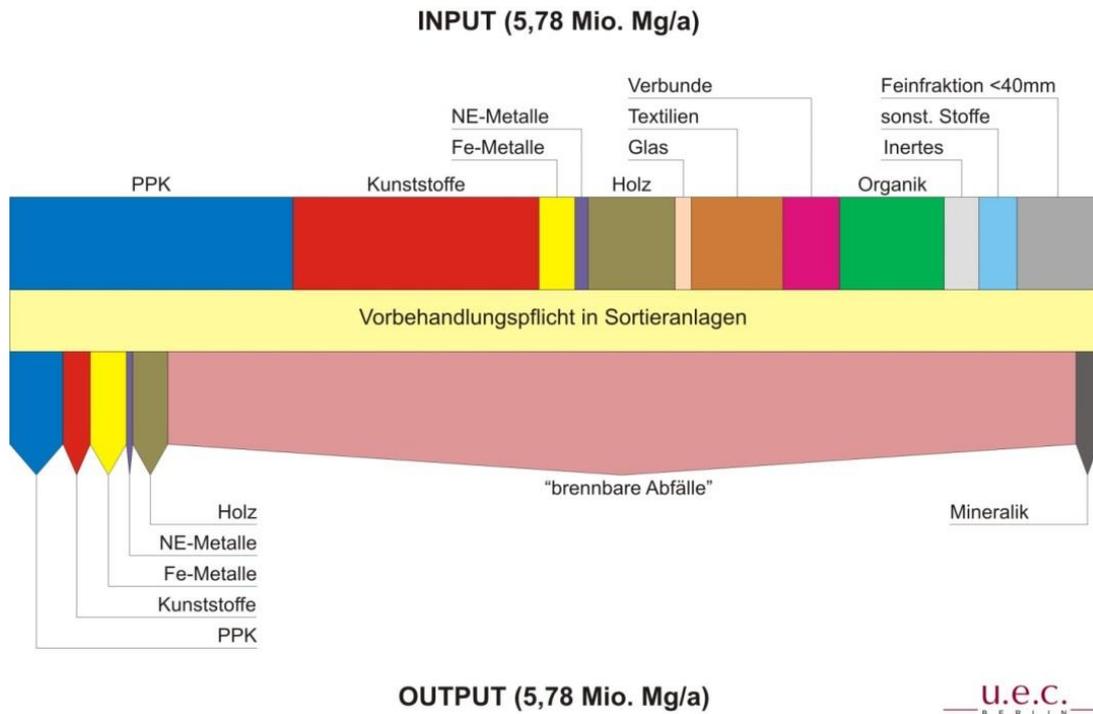


### Variante 1 - Vorbehandlungspflicht

In der Variante 1 werden die Auswirkungen einer „Vorbehandlungspflicht“ dargestellt, d.h. zur Stärkung der stofflichen Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle wird die unmittelbare Verbrennung dieser Gemische ausgeschlossen. Diese sind stattdessen für eine Vorbehandlung uneingeschränkt Sortieranlagen zuzuweisen. Durch diesen Ansatz würde sich bei unveränderten Modellierungs-Ansätzen die Wertstoffmenge auf rund 0,66 Mio. Mg/a für die Fraktionen Metalle, Kunststoffe und PPK erhöhen. Die Holzausbeute beträgt weitere knapp 0,2 Mio. Mg und die Menge der „brennbaren Abfälle“ knapp 5 Mio. Mg/a.

<sup>2</sup> Output incl. der Störstoffe aus der mechanischen Aufbereitung

Abbildung 4: In- und Output<sup>3</sup> fester Massenströme der Sortieranlagen von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen (Variante 1)

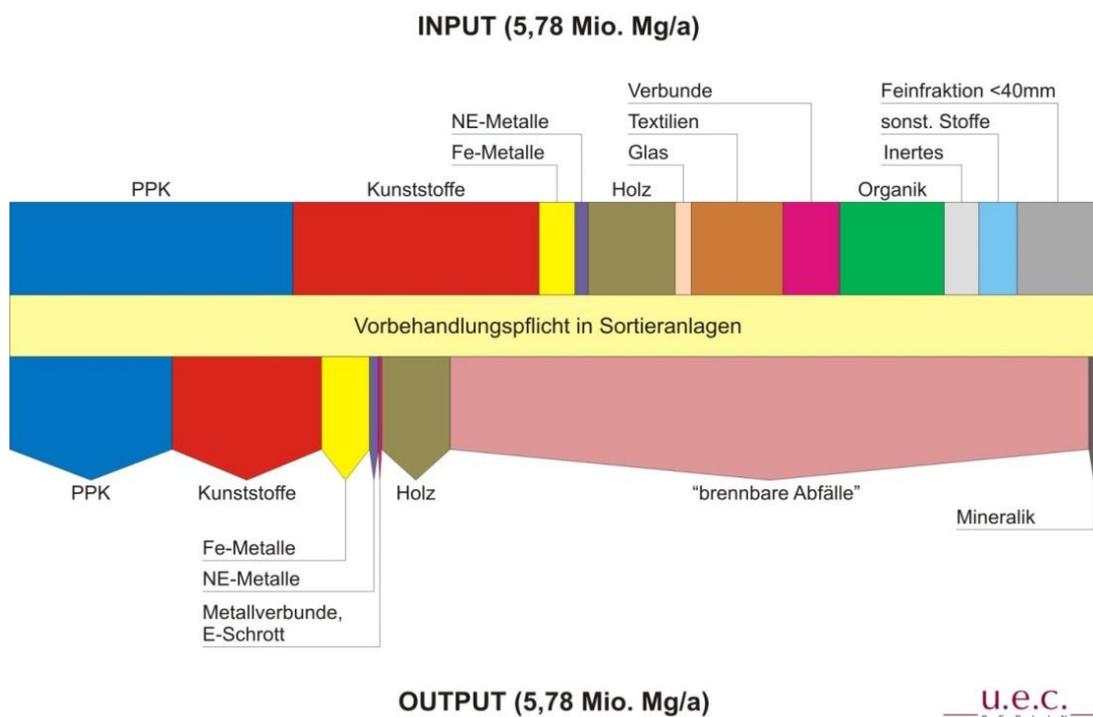


### Variante 2 - Vorbehandlungspflicht und Steigerung der recycelten Mengen

Variante 2 untersucht die Auswirkungen einer gesteigerten Ausbeute der Wertstoffe in Kombination mit der „Vorbehandlungspflicht“. Dabei werden die in Sortieranlagen erzeugbaren Stoffströme zur stofflichen und energetischen Verwertung in Hinblick auf Optimierungsansätze modelliert. Im Ergebnis werden rund 2,4 Mio. Mg/a Wertstoffe aussortiert. Die Menge der „brennbaren Abfälle“ beläuft sich auf rund 3,4 Mio. Mg/a.

<sup>3</sup> Output incl. der Störstoffe aus der mechanischen Aufbereitung

Abbildung 5: In- und Output<sup>4</sup> fester Massenströme der Variante 2 für das Jahr 2010



## 1.6 Ökobilanzielle Bewertung

In der Ökobilanz wurden die Belastungen aus der Behandlung und Entsorgung der Abfälle in den beschriebenen Szenarien den Gutschriften aus den durch Recycling gewonnenen Sekundärrohstoffen und der bereitgestellten Energie aus der energetischen Verwertung gegenübergestellt.

Für die Bewertung der Umweltauswirkungen wurden in der Wirkungsbilanz die Umweltkriterien

- ▶ Treibhauseffekt (Global Warming Potential - GWP),
- ▶ Schonung/Verbrauch energetischer Ressourcen,
- ▶ Schonung/Verbrauch fossiler energetischer Ressourcen (Kumulierter fossiler Energieaufwand - KEA<sub>fossil</sub>),
- ▶ Versauerung (Acidification Potential - AP) und
- ▶ Eutrophierung (Eutrophierungspotential – EP)

herangezogen, mit denen die wichtigsten Umweltaspekte der Abfallwirtschaft mittels allgemein anerkannter Bewertungsverfahren gut beschrieben werden können. Zusätzlich wurde die Frage der Schwermetallemissionen am Beispiel Quecksilber (Hg) halbquantitativ betrachtet.

Die für die Bilanz neben der oben beschriebenen Stoffstrombilanz benötigten Emissionsfaktoren für Aufwendungen aus Transporten, Abfallbehandlung, Recycling und thermischer Verwertung sowie der Substitutionsprozesse zur Ermittlung der Gutschriften für bereitgestellte Sekundärroh-

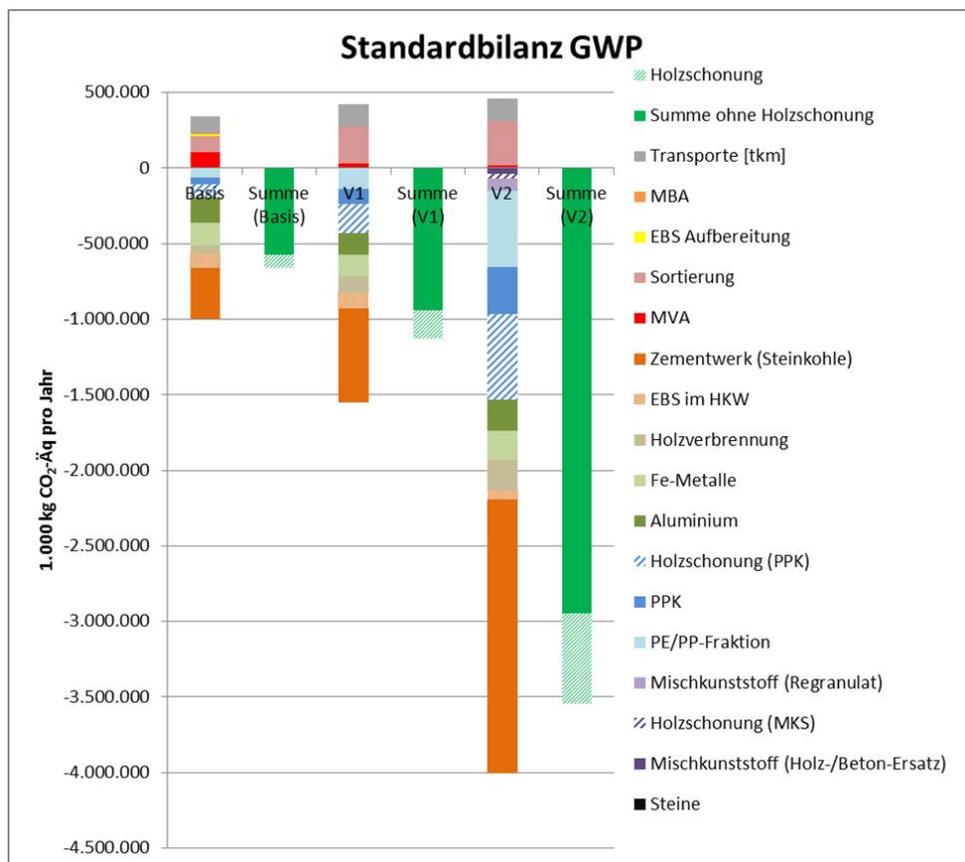
<sup>4</sup> Output incl. der Störstoffe aus der mechanischen Aufbereitung

stoffe und Energie wurden entweder im Rahmen der Studie erhoben und recherchiert oder der Datenbank ecoinvent V3 entnommen.

Wie bei Ökobilanzen in der Abfallwirtschaft üblich, erfolgt die Bilanzierung erst ab der Bereitstellung des Abfalls und schließt somit das Vorleben des Abfalls, wie beispielsweise die Herstellung oder Verwendung der zu Abfall gewordenen Güter aus. Für die bei der Aufbereitung und Verwertung des Abfalls eingesetzten Betriebsmittel und Energie wurde der gesamte Lebensweg berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen bei allen Wirkungskategorien eine Zunahme der Entlastungen infolge der gesteigerten Aussortierung von Wertstoffen und gezielter Stoffstromsteuerung der verbleibenden Sortierreste in der Variante 2, wenn auch für Versauerung, Eutrophierung und Schonung/Verbrauch fossiler energetischer Ressourcen weniger ausgeprägt als beim Treibhauseffekt (GWP). Der Beitrag zum Klimaschutz kann beispielsweise gegenüber dem Beitrag im Status Quo in Variante 2 um knapp 3 Mio. Mg CO<sub>2</sub> Äq mehr als fünffach gesteigert werden (Abbildung 6).

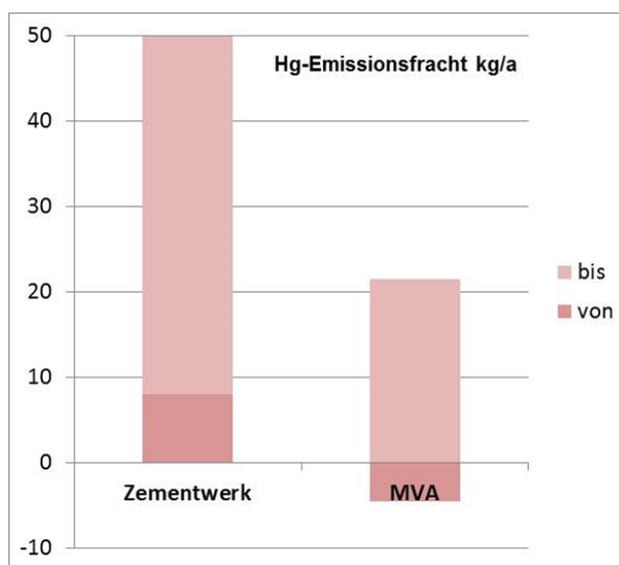
Abbildung 6: Vergleich der drei Varianten der Standardbilanz (GWP)



Die reine Vorbehandlungspflicht aller anfallender gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (Variante 1) ohne Verbesserung der derzeitigen Ausbeuten und Selektivitäten bezüglich der aussortierten Wertstoffe erreicht bei der die Wirkungskategorie Treibhauseffekt (GWP) bei weitem nicht die hohen Entlastungen wie die Variante 2. Für die Kategorien Schonung/Verbrauch fossiler energetischer Ressourcen (KEA) und Versauerung ist gegenüber dem Ist-Zustand ein geringer Rückgang der Entlastungen ermittelt worden, für die Wirkungskategorie Eutrophierung wird für den Pfad „Summe ohne Holzschonung“ im Endergebnis eine Belastung festgestellt.

Die Gegenüberstellung der Emissionen an Hg zeigt, dass die Umlenkung von Brennstoffen aus der MVA in die Mitverbrennung, je nachdem welcher Emissionsfaktor beim Zementwerk und welcher Wirkungsgrad in der Rauchgasreinigung in der MVA unterstellt wird, zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen kann. Abbildung 7 zeigt die Spannweiten der Emissionsfracht unter Zugrundelegung von Emissionsfaktoren für Hg im Zementwerk zwischen 8 und 50 % und Emissionskonzentrationen in der MVA zwischen  $0,003 \text{ mg/m}^3$  und  $0,0003 \text{ mg/m}^3$  (Faktor 10 bzw. 100 unterhalb des Grenzwertes der 17. BImSchV).

Abbildung 7: Hg-Emissionen durch SBS-Verbrennung. Gegenüberstellung der Frachten bei der Verbrennung im Zementwerk und in der MVA unter Angabe von Schwankungsbreiten



In neun Sensitivitätsanalysen wurde für die Wirkungskategorie Treibhauseffekt die Robustheit der Ergebnisse bei unterschiedlichen Annahmen zu beispielsweise der Abfallzusammensetzung, der Wirkungsgrade der thermischen Anlagen, der Höhe der Gutschriften für bereitgestelltem Strom oder eingesparten Brennstoff in der Mitverbrennung u.ä. geprüft. Die Ergebnisse waren demnach robust, da sich die Rangfolge der Varianten in keiner Sensitivität veränderte. Selbst bei der Gegenüberstellung der Sensitivität mit den günstigsten Ergebnissen für den Ist-Zustand mit der Sensitivität, die für Variante 2 die ungünstigsten Rahmenbedingungen darstellt, schneidet Variante 2 um Faktor 2 besser ab als der Status Quo.

## 1.7 Einflussfaktoren auf eine hochwertige Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle

Die in der Basisvariante dargelegte derzeitige Entsorgung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle weist hinsichtlich einer hochwertigen Verwertung dieser Abfälle, insbesondere bezüglich der Nutzung stofflicher Potentiale erhebliche Defizite auf. Folgende Einflussfaktoren behindern derzeit eine stärkere Nutzung der Entlastungspotentiale bei der Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle:

## **Wirtschaftlichkeit der Abfallvorbehandlung**

Der Preis ist in der abfallwirtschaftlichen Betriebspraxis der maßgebende Faktor für die Frage, ob gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle ohne Vorbehandlung energetisch oder nach einer Vorbehandlung recycelt und energetisch verwertet werden. Können durch die Vorbehandlung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen keine Preisvorteile gegenüber einer Verbrennung generiert werden, gelangt der Abfall in die energetische Verwertung, es sei denn, die gesetzlichen Rahmenbedingungen stehen dem entgegen.

## **Technische Einflussfaktoren**

Die Ursachen für unterschiedliche Selektivitäten aussortierter Stofffraktionen sind vielfältig und liegen in technischer Hinsicht weniger in der reinen Anzahl eingesetzter Aggregate, sondern u.a. auch im Verfahrensablauf der Anlage, im Vorhandensein der Aggregate, der individuellen Einstellung der installierten Technik, bei der Überfrachtung der Förder- und Sortierbänder, einem zu breit gewählten Kornspektrum oder dem Verzicht auf die Besetzung einer manuellen Nachsortierung einzelner Fraktion. Einer Optimierung dieser Faktoren stehen oft jedoch übergeordnete wirtschaftliche Überlegungen entgegen.

## **Stoffqualität**

Trotz Steigerungen der aussortierten Wertstoffmenge muss deren Qualität den Anforderungen der Abnehmer entsprechen.

## **1.8 Ziele und Maßnahmen für eine hochwertige Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle**

Maßnahmen für eine hochwertige zukünftige Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle sind die Stärkung der innerbetrieblichen getrennten Erfassung von Wertstoffen, die Steigerung des Recyclings gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle, die Steigerung einer hochwertigen energetischen Verwertung der „brennbaren Abfälle“/Sortierreste und die energetische Verwertung verbleibender „brennbarer Abfälle“/Sortierreste; verbunden mit einer Verbesserung der Stoffstromtransparenz und der Schaffung verlässlicher Investitionsbedingungen.

## **1.9 Instrumente zur Erzielung einer hochwertigen Verwertung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen**

### **Implementierung einer Vorbehandlungs-/Sortierpflicht bei der Novelle der Gewerbeabfallverordnung**

Die Erfahrungen mit der Umsetzung eines Deponierungsverbotes für unbehandelte Abfälle zeigt, dass eine klar formulierte rechtliche Regelung auch eine direkte und stoffstromlenkende Wirkung entfaltet. Um gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle stärker als bislang zu recyceln, ist es beispielsweise in diesem Kontext sinnvoll, die derzeit noch mögliche unmittelbare Verbrennung eines gemischten gewerblichen Siedlungsabfalls auszuschließen und stattdessen eine explizite Vorbehandlungs-/Sortierpflicht einzuführen (Streichung des § 6 GewAbfV).

Das Instrument einer Vorbehandlungs-/Sortierpflicht ist mit steigenden Entsorgungskosten verbunden. Dieses kann sowohl eine Stärkung der innerbetrieblichen Getrennthaltung als auch eine Erhöhung des Wertstoffausbringens aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen bewirken.

Allerdings wird eine Vorbehandlungspflicht im Sinne einer Sortierpflicht ohne zusätzliche Instrumente nur bedingt für eine Steigerung des Recyclings sorgen. Deshalb ist es unabdingbar, zur Stoffstromlenkung und Stärkung des Recyclings auch weitergehende Anforderungen an Vorbehandlungs-/Sortieranlagen zu definieren. Im Folgenden werden vier verschiedene denkbare Lösungsansätze vorgestellt.

### **Vorbehandlungspflicht und Stand der Technik**

Gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle werden nur solchen Vorbehandlungsanlagen zugewiesen, die einen noch festzulegenden technischen Mindeststandard aufweisen.

### **Vorbehandlungspflicht und qualitative Quotierung**

Bei diesem Modell wird die Vorbehandlungspflicht aller gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle mit einer Quotierung für die Fraktionen Kunststoffe, PPK, Metalle und Holz verknüpft. Der Output (Recyclingmengen für Kunststoffe, PPK, Metalle und Holz, hochkalorische „brennbare Abfälle“ (SBS) oder mittelkalorische „brennbare Abfälle“ (EBS)) wird mit verschiedenen Bewertungsfaktoren (Bf) belegt. Vor dem Hintergrund der heterogenen Zusammensetzung der Inputstoffe wird bei der Recyclingmenge nicht auf die einzelnen Wertstofffraktionen bezogen, sondern es wird der summarische Ansatz über die vier Wertstofffraktionen Kunststoffe, PPK, Metalle und Holz gewählt. Um Manipulationen bei dieser anlagenbezogenen Quotierung auszuschließen, sind auf einer Sortieranlage mitverarbeitete Monofraktionen im Output vollständig herauszurechnen. Die zu erreichende Bewertungsquote und die Bewertungsfaktoren sind so zu wählen, dass im Rahmen der Vorbehandlung die aussortierte Recyclingmenge gesteigert werden muss.

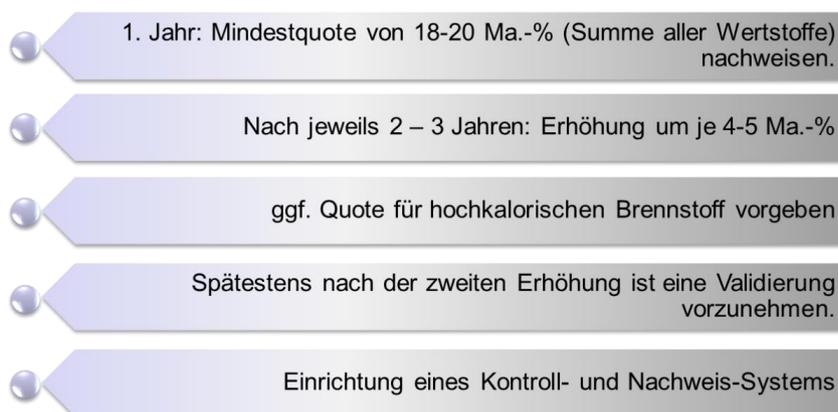
### **Vorbehandlungspflicht und zeitlich differenzierte massenbezogene Quoten**

Dieses Modell kombiniert die Vorbehandlungspflicht mit Sortier-/Recyclingquoten<sup>5</sup>, wie sie beispielsweise in der Verpackungsverordnung für die Sortierung von LVP-Wertstoffgemischen definiert sind. Im Vergleich zu LVP-Gemischen ist jedoch von einer höheren Variabilität des Inputmaterials auszugehen, entsprechend ist die Festlegung von Sortier-Quoten für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle schwieriger. Wenn zur Ergänzung der Vorbehandlungspflicht Quoten definiert werden, ist es aus unserer Sicht sinnvoll, diese in Stufen einzuführen und nach gegebener Zeit auch zu validieren. So könnte beispielsweise folgende Regelung implementiert werden:

---

<sup>5</sup> Die bislang gesetzlich definierten Quoten stellen immer auf den Output der ersten Anlage ab. Die danach noch auftretenden Aufbereitungsverluste, die den Anteil des dem Markt zur Verfügung gestellten Sekundärrohstoffes senken, werden nicht mitbilanziert.

Abbildung 8: Vorbehandlungspflicht und zeitlich differenzierte massenbezogene Quoten



**Vorbehandlungspflicht und massenbezogene selbstlernende Quoten**

Dieses Modell greift die von Öko-Institut und HTP im Jahr 2012 vorgeschlagenen Maßnahmen zur Optimierung der Stoffstromlenkung bei der LVP-Sortierung auf. Für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle kann folgendes Modell entwickelt werden.

Abbildung 9: Mögliche Sortierquoten für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle

Bezugsrahmen	• Aussortierte Masse in Bezug zur Inputmasse
Fe-Metalle	• 95 Ma.-%
NE-Metalle	• 60 Ma.-%
Kunststoffe	• 50 Ma.-%
PPK	• 60 Ma.-%
Holz	• 55 Ma.-%
Energetische Verwertung der Sortierreste	• 40 Ma.-% des Input sind hochwertig energetisch zu verwerten

Werden die o.g. Verwertungsquoten für die gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle zum Ansatz gebracht, würde rund 34 Ma.-% des Gesamtaufkommens dem Recycling zugeführt werden.

**Steigerung der Nachfrage nach hochwertigen Lösungen**

Während die zuvor andiskutierten ordnungsrechtlichen Modelle auf Push-Effekte setzen, setzen andere und teilweise ergänzende Instrumente auf eine Pull-Strategie. Ziel ist es, die Nachfrage durch geeignete Maßnahmen und Instrumente zu erhöhen bzw. zu aktivieren.

**Fiskalische Instrumente**

Fiskalische Instrumente stellen meist ein indirekt wirkendes Instrument dar, entsprechend liegt die Wirksamkeit unterhalb der der rechtlichen Instrumente. Möglich wären die Senkung des Mehrwertsteuersatzes für Recyclingprodukte aus Sortieranlagen oder Fördermaßnahmen für Investitionsrisiko bei der Anpassung bestehender Sortieranlagen an den Stand der Technik. Fiskalische Instrumente können allenfalls unterstützend wirken, eine Steigerung der Recyclingmengen muss sich jedoch nicht einstellen.

## 2 Summary

### 2.1 Introduction

Mixed commercial solid waste has a significant potential as a secondary resource; however, only a share is currently being recycled. This research project is using methods derived from life cycle assessments to investigate how waste processing - which is geared to the waste hierarchy defined in the Waste Management Act (KrWG) - affects various environment related impact categories. The central focus of the study is whether intensified recycling can yield benefits. Should this be the case, the study seeks to find which measures and instruments are required to activate the potential for environmental relief. The main objectives of this project are:

- ▶ Updating the data on the origin and composition of waste
- ▶ Identifying and analyzing disposal routes and material flow
- ▶ Carrying out life cycle assessments using various scenarios for different disposal routes and resource flow distributions
- ▶ Evaluating the results of the analysis and identifying preferential disposal routes
- ▶ Identifying measures and instruments that help exploit the waste potential, in addition to preparing a practical approach to steer material flows

The following sections summarize the findings of the research project.

### 2.2 Object of examination

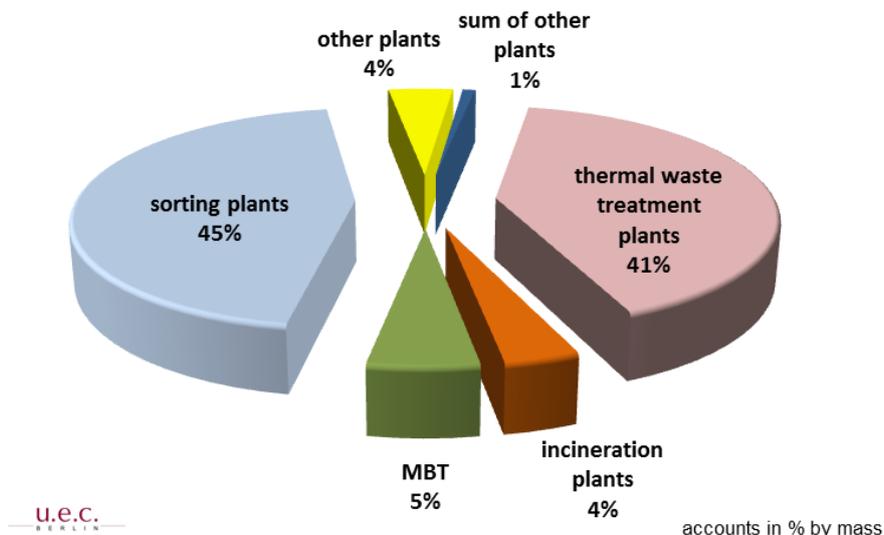
The object of examination is the mixed commercial solid waste that is produced in companies. This includes waste corresponding to the waste classification key 20030102 (mixed commercial solid waste). Because waste management companies have signaled that mixed commercial solid waste is also disposed of as mixed packaging under the waste classification key 15010600, packaging waste of this kind will also be considered. Separately collected recyclable materials from companies are not part of the examination. The reference year for the life cycle examination is 2010.

### 2.3 Emergence and disposal of mixed commercial solid waste

In 2010, 3.45 million Mg of mixed commercial solid waste and roughly 2.39 million Mg of mixed packaging have been disposed of in German plants. When mixed commercial solid waste is mentioned in this study, it always refers to the sum of the above mentioned types (i.e., 5.8 million Mg in total).

2.87 million Mg/a of the overall amount are processed in sorting plants/other treatment plants (Refuse-derived fuel-processing facilities) while 2.6 million Mg/a are burned in thermal waste treatment plants/incineration plants (see illustration 3-1).

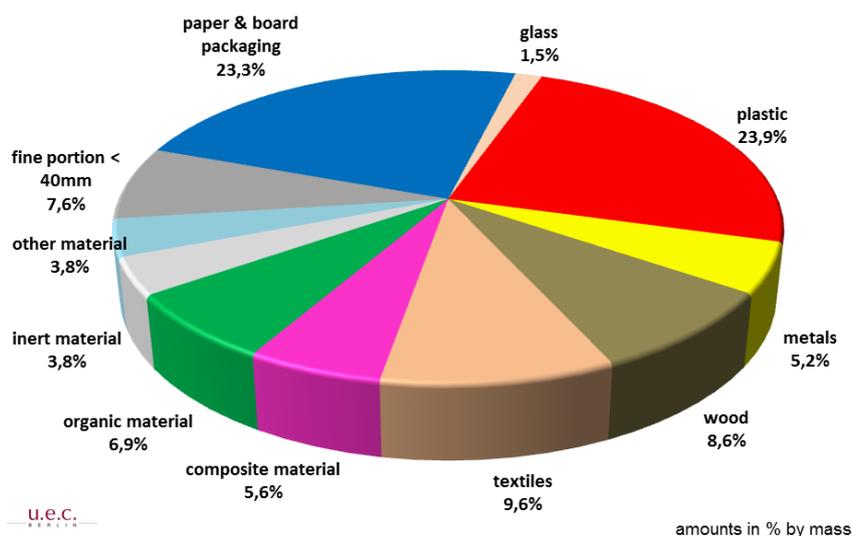
Illustration 1: Usage of mixed commercial solid waste (sum of AS 20030102 and AS 15010600) separated by disposal routes<sup>6</sup> in 2010



## 2.4 Composition of mixed commercial solid waste

Representative data of waste composition do not exist. In the framework of this study, current non-representative data material from four sorting plants was available for analysis.

Illustration 2: Average composition of mixed commercial solid waste based on waste assessments in four plants in 2013



Using the average composition measured in the waste assessment in four plants, the theoretical amount of secondary resources derived from mixed commercial solid waste disposed of in Ger-

<sup>6</sup> Other plants are landfills, biological treatment plants, shredding plants, construction rubble processing plants, etc.

many in 2010 can be calculated. With regard to the main components, the following secondary resource potentials could be salvaged:

Paper and board packaging potential (23.3 % by mass):	1.35 million Mg/a
Plastic potential (23.9 % by mass)	1.38 million Mg/a
Metal potential (5.2 % by mass)	0.3 million Mg/a
Wood potential (8.6 % by mass)	0.49 million Mg/a.

## 2.5 Analysis of options for high-quality recycling of mixed commercial solid waste

In order to be able to answer whether the environmental impact can be reduced by bringing the disposal of mixed commercial solid waste closer to the waste hierarchy included in the Waste Management Act (KrWG), three different options are being examined. The particular material flows and amounts will be modeled with the help of statistical data, results of plant waste assessment analyses, and information from literature and past experience.

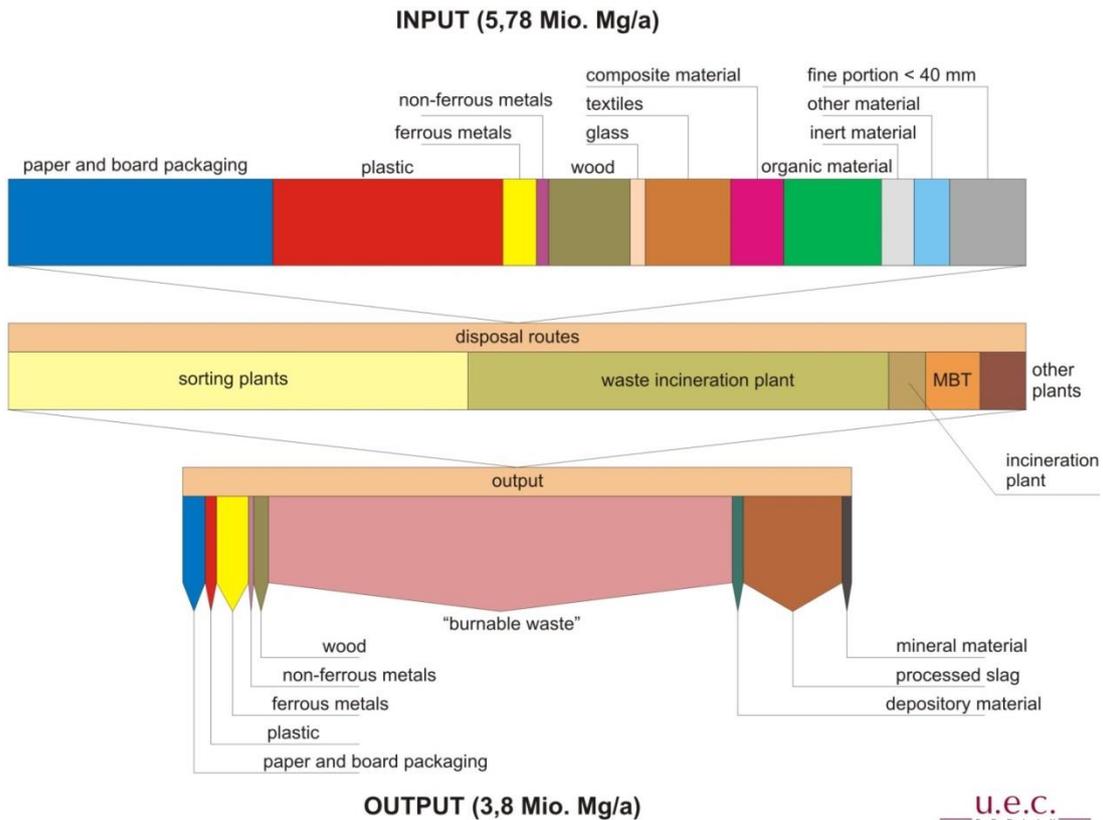
### **Base option**

The base option consists of the current treatment routes and the derivation of mixed commercial solid waste flows. Different waste disposal plants separate/sort various different recyclable materials, for instance:

The examined sorting plants separated 16.6 % by mass of input (ca. 0.43 million Mg/a) as secondary resources (ferrous metals, non-ferrous metals, paper and board packaging, plastics, wood and mineral material) and produced 83.4 % by mass of “burnable waste” of various qualities.

Incineration plants separate 0.09 million Mg/a of metal from slag. In addition, ca. 0.56 million Mg/a of usable processed slag is being produced.

Illustration 3: Input and output<sup>7</sup> of solid material flows of primary treatment plants for mixed commercial solid waste (base option)

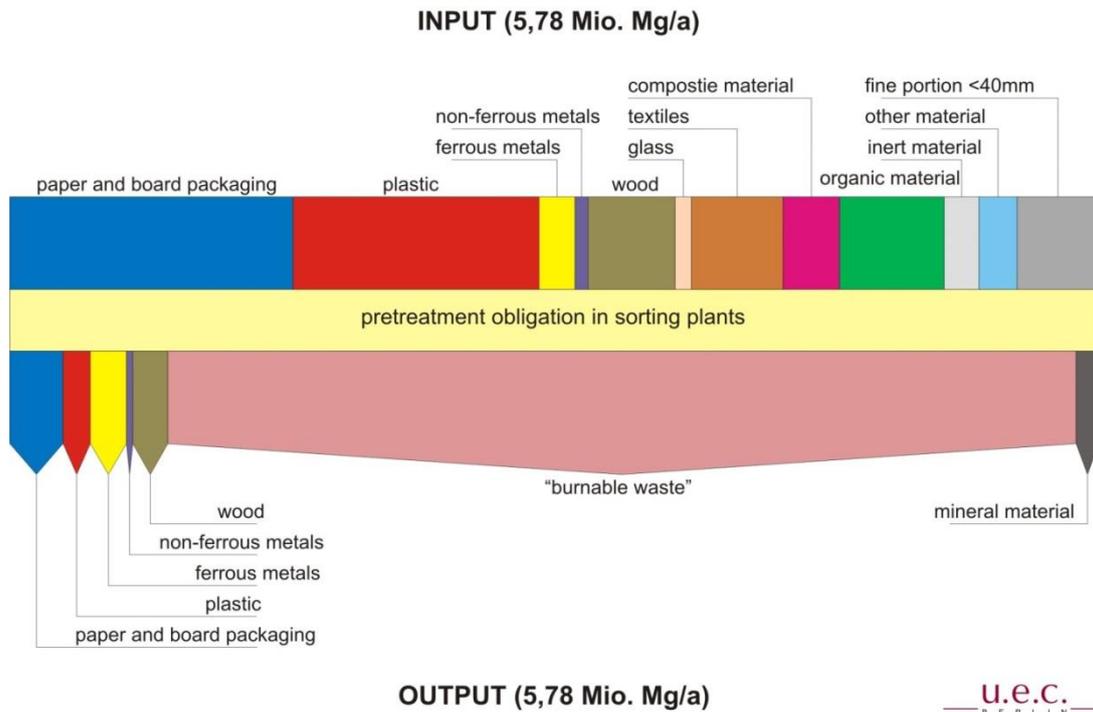


### Option 1 – pretreatment obligation

In option 1, the consequences of a “pretreatment obligation” are being presented, i.e. in order to strengthen material recycling of mixed commercial solid waste instead of immediate incineration of the latter. In this option, mixed commercial solid waste is to be pretreated in sorting facilities which would, given the same modeling approaches, increase the derived amount of secondary resources to about 0.66 million Mg/a for the share of metals, plastic, and paper and board packaging. The obtained amount of wood would increase to ca. 0.2 million Mg and the amount of “burnable waste” to ca. 5 million Mg/a.

<sup>7</sup> Output including contaminants from mechanical processing

Illustration 4: Input and output<sup>8</sup> of solid material flows of sorting plants for mixed commercial solid waste (option 1)

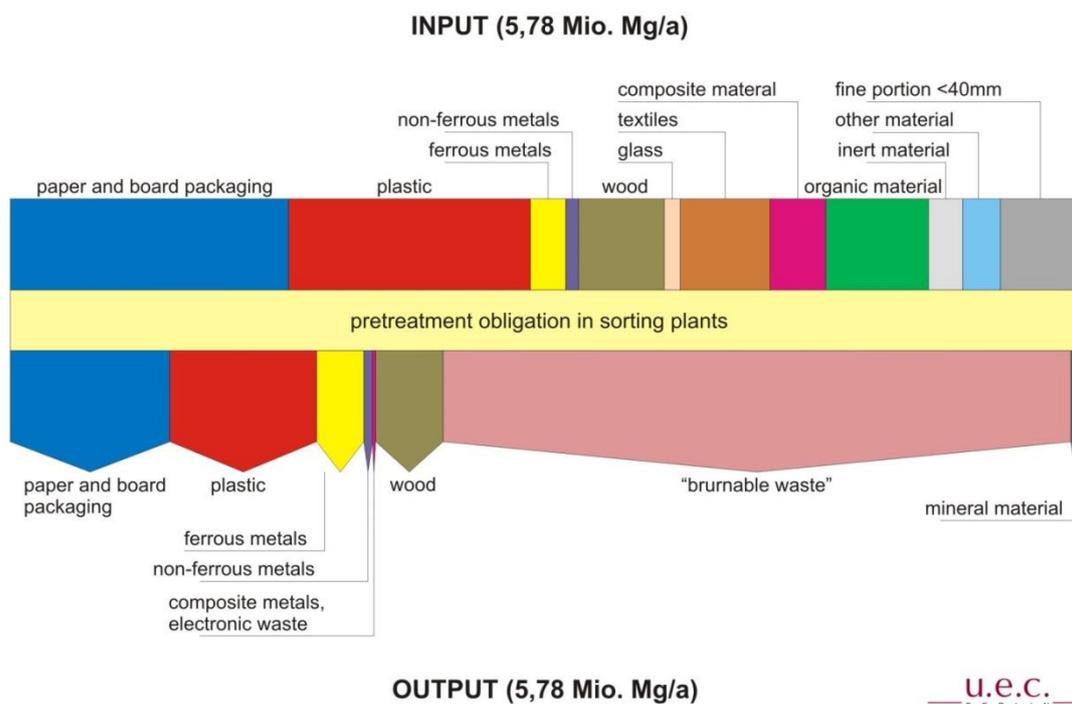


**Option 2 – pretreatment obligation and increase of recycled amounts**

Option 2 examines the consequences of increased yield from recyclable waste in combination with the „pretreatment obligation“. For this purpose, the flow of materials originating in sorting plants is being modeled according to material and energetic recycling optimization approaches. As a result, 2.4 million Mg/a can be recycled. The amount of “burnable waste” amounts to 3.4 million Mg/a.

<sup>8</sup> Output including contaminants from mechanical processing

Illustration 5: Input and output<sup>9</sup> of solid material flows of option 2 for 2010



## 2.6 Life cycle assessment

The life cycle assessment plots emissions caused by treatment and disposal of waste in the described scenarios against gains from secondary resource generation by material recycling and energy derived from energetic recycling.

In order to evaluate the environmental consequences, the following environmental variables were considered:

- ▶ Greenhouse effect (global warming potential GWP)
- ▶ Preservation/usage of energetic resources
- ▶ Preservation/usage of fossil energetic resources (cumulative fossil energy consumption - KEA<sub>fossil</sub>)
- ▶ Acidification (acidification potential - AP)
- ▶ Eutrophication (eutrophication potential - EP)

These variables are employed because they allow for a good description of the most important environmental aspects of waste management using commonly accepted evaluation methods. In addition, the question of heavy metal emissions exemplified by mercury (Hg) emissions was considered semi-quantitatively.

Aside from the above described material flow assessment, emission factors are needed to determine the life cycle assessment. Emission factors as a measure of emissions caused by transports,

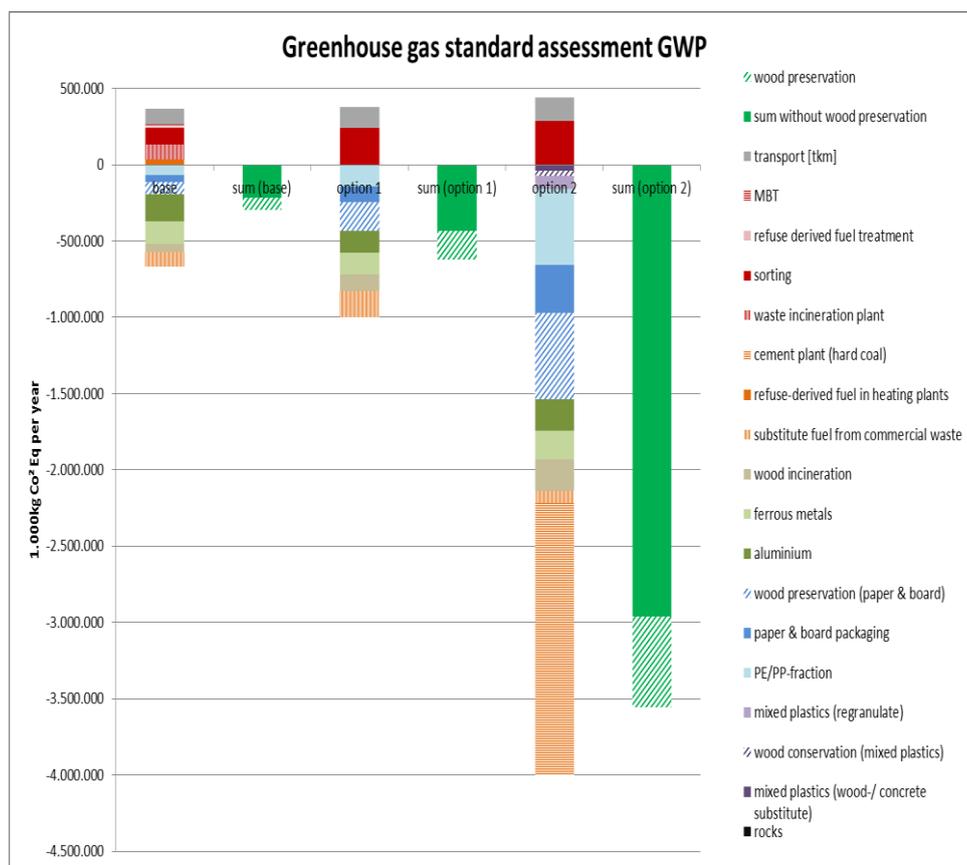
<sup>9</sup> Output including contaminants from mechanical processing

waste treatment, material recycling, and thermal utilization - as well as substitution processes to calculate the gains from generated secondary resources and energy - were either gathered and researched in the framework of this study or were taken from the ecoinvent V3 database.

As commonly done in life cycle assessments in waste management, the analysis begins once waste is created. That means it excludes the waste's previous life, i.e. production or usage of products that have become waste. Material and energy employed to treat and process waste is being considered along its entire lifecycle.

The results show an increase in environmental relief across all impact categories as a consequence of enhanced sorting of recyclable waste and targeted steering of the flow of residual material after sorting in option 2. However, the improvement is less pronounced regarding acidification, eutrophication, and fossil energetic resource consumption than compared to the greenhouse effect (GWP). The contribution to climate protection, for instance, can be increased more than fivefold by close to 3 million Mg of CO<sub>2</sub> Eq vis-à-vis the contribution to climate protection in the status quo in option 2 (see illustration 6-1).

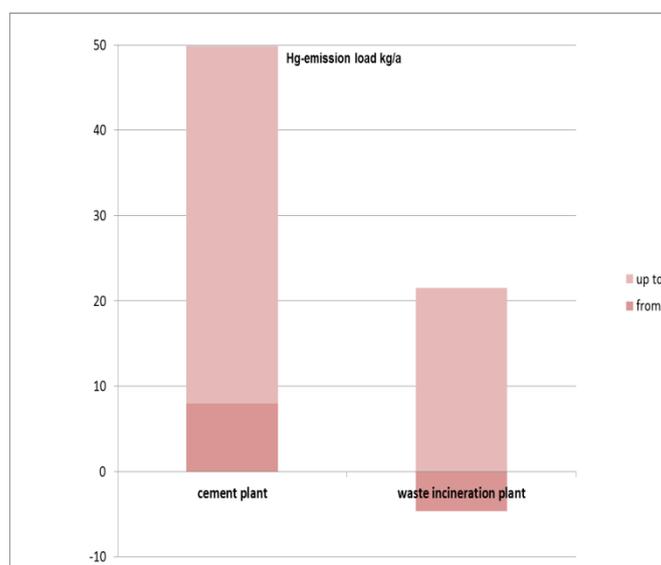
Illustration 6: Comparison of the three options of the standard assessment (GWP)



The obligation to pre-treat all occurring mixed commercial solid waste alone (option 1) without improvement of the current yield and selectivity regarding the sorted recyclable materials does not reach the significance of relief in option 2 in the impact category ‘greenhouse gas (GWP)’. A slight reduction in relief vis-à-vis the status quo has been found in the categories ‘preservation/consumption of fossil energetic resources (KEA)’ and ‘acidification’. In the impact category ‘eutrophication’ a net additional burden is found for the path ‘sum without wood preservation’.

The comparison of Hg emissions shows that the redirection of fuels from waste incineration plant to co-incineration can lead to very different results, depending on the emission factor in the cement plant and the degree of efficiency of exhaust gas purification in the waste incineration plant. Illustration 6-2 shows the range of emission loads given emission factors between 8 and 50% for Hg in cement plants and emission concentrations in the waste incineration plant between 0.003 mg/m<sup>3</sup> and 0.0003 mg/m<sup>3</sup> (a tenth or a hundredth respectively below the limit of the 17th Federal Immission Control Act (BImSchV)).

Illustration 7: Hg emissions due to secondary fuel combustion. Comparison of emission loads stemming from incineration in cement plants and from waste incineration plant including fluctuations



In nine sensitivity analyses, the robustness of results given varying assumptions, for instance the composition of waste, efficiency of thermal plants, the amount of benefits obtained from electric energy, or preserved fuel in co-incineration, was tested for the impact category 'greenhouse gas effect'. According to these tests, results proved to be robust because the rank of the variables did not change in any sensitivity bracket. Option 2 prevails over the status quo even if the sensitivity with the best results in the base option is compared to the sensitivity in option 2 with the worst framework conditions.

## 2.7 Influencing factors for high-quality recycling of mixed commercial solid waste

The current form of disposal of mixed commercial solid waste, as mapped out in the base option, is far from optimal regarding high-quality recycling of this kind of waste, especially with regard to the utilization of recycling potentials. The following influencing factors currently obstruct increased utilization of relief potentials in the disposal of mixed commercial solid waste.

### Profitability of waste pretreatment

In the day-to-day business of waste management, the price plays a crucial role in determining whether or not mixed commercial solid waste will be subject to pretreatment and recycling before being processed energetically. If pretreatment of mixed commercial solid waste does not produce

financial benefits over immediate incineration, waste is brought to energetic processing unless the legal framework says otherwise.

### **Technological influencing factors**

The causes for varying selectivities of sorted material fractions are diverse and, from a technological point of view, depend rather less on the pure number of employed aggregates. Instead, causes can be, among others, procedures in the plant, the supply of aggregates, the individual setup of utilized technology, overloading of conveyer and sorting belts, suboptimal large grain sizes, and the choice not to sort certain fractions manually at the end of the sorting-line. Optimizing those factors is, however, usually subject to economic considerations.

### **Quality of material**

Even if the amount of sorted recycled material has increased, it still has to correspond to the quality expectations in the market.

## **2.8 Goals and measures for high-quality disposal of mixed commercial solid waste**

Measures for high quality disposal of mixed commercial solid waste in the future depend on the following: the extent of separate collection of recyclable materials within companies; the increase of material recycling of mixed commercial solid waste; the enhancement of high-quality energetic processing of “burnable waste”/residual sorting waste; and the energetic processing of remaining “burnable waste”/residual sorting waste in conjunction with improved material flow transparency and the creation of reliable investment conditions.

## **2.9 Instruments to achieve high-quality processing of mixed commercial solid waste**

### **Implementation of a pretreatment/sorting obligation in the renewed Commercial Waste Ordinance (GewAbfV)**

The experiences with the implementation of a land filling interdiction for untreated waste show that clearly formulated regulation has a direct impact on material flows. In order to increased recycling of mixed commercial waste, it may be useful in this context to prohibit immediate incineration of mixed commercial solid waste (that is still possible as of today) and to introduce an explicit pretreatment/sorting obligation instead (abolition of §6 GewAbfV).

The instrument ‘pretreatment/sorting obligation’ is linked to an increase of waste disposal costs. This can strengthen incentives to collect waste separately within companies and may lead to increased output of recyclable materials from mixed commercial solid waste.

However, a pretreatment obligation in the sense of a sorting obligation without additional instruments will only partially lead to increased material recycling. In order to change material flows and enhance material recycling, it is therefore indispensable to formulate further requirements for pretreatment/sorting plants. The following four different approaches could be a solution:

### Pretreatment obligation and state of technology

Mixed commercial solid waste is only directed to pretreatment plants that operated at a yet-to-be defined standard.

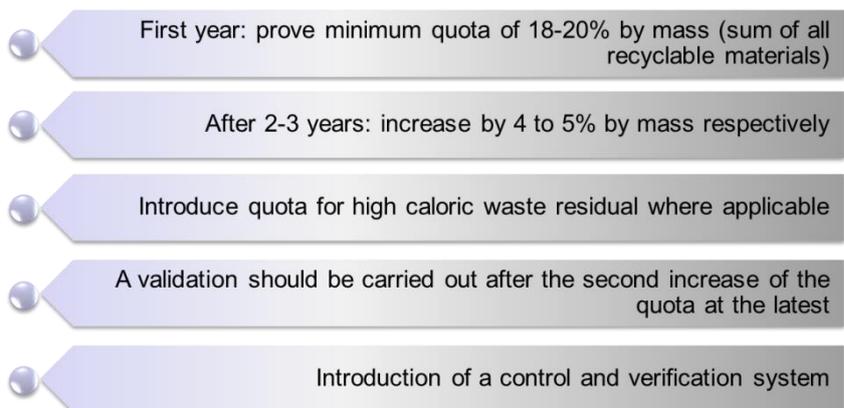
### Pretreatment obligation and qualitative quotation

In this model, the pretreatment obligation of all mixed commercial solid waste is linked to quotas for the fractions: plastic, paper and board packaging, metals, and wood. The output (recycled amounts for plastics, paper and board packaging, metals, and wood, high caloric “burnable waste” (secondary fuels - SBS) and mid caloric “burnable waste” (refuse-derived fuel)) is tagged with different evaluation factors. In consideration of heterogeneous composition of input materials, each specific material fraction is not considered alone, but rather a sum based approach over the four recycled material fractions (plastics, paper and board packaging, metals, and wood) is chosen to monitor pretreatment. In order to prevent manipulation in this plant based quotation model, single fractions that are processed alongside the sum based fractions are to be excluded from the output calculation. The ratio of the fraction output and evaluation factors are to be chosen such that recycled amounts from pretreatment has to be increased.

### Pretreatment obligation and time differentiated mass related quotas

This model combines the pretreatment obligation with sorting/recycling quotas<sup>10</sup>, as defined, for instance, in the packaging regulation for the sorting of LVP-recyclable material mixes. In comparison to LVP-mixes, however, input materials tend to vary more. Thus, defining sorting quotas for mixed commercial solid waste is more difficult. If quotas are defined in addition to the pretreatment obligation, it is useful, from our point of view, to introduce them in steps and to validate them after some time. The regulation could therefore be implemented as follows:

#### Illustration 8: Pretreatment obligation and time differentiated mass related quotas



<sup>10</sup> The hitherto legally defined quotas always aim at the output of the first plant. Treatment losses occurring after that, which decrease the available share of secondary resources in the market, are not on the balance sheet.

### Pretreatment obligation and mass related self-learning quotas

This model suggests measures to optimize material flow steering in LVP sorting that were originally presented by the Öko-Institut and HTP in 2012. The following model can be developed for mixed commercial solid waste.

Illustration 9: Possible sorting quotas for mixed commercial solid waste

Reference framework	• Separated mass in terms of input mass
Ferrous metals	• 95% by mass
Non-ferrous metals	• 60% by mass
plastic	• 50% by mass
Paper and board packaging	• 60% by mass
wood	• 55% by mass
Energetic processing of residual sorting waste 40 % by mass of input should be processed energetically in a high quality way	• 40% by mass of input should be processed

If mixed commercial solid waste were processed according to the above described quotas, 34 % by mass of the entire waste supply would go into material recycling.

### Increase of demand for high-quality solutions

While the previously discussed regulatory models emphasize push effects, other sometimes incremental instruments pursue a pull strategy. The goal is to activate and/or increase demand using appropriate measures and instruments.

### Fiscal instruments

Fiscal instruments usually work indirectly. Thus, their effectiveness is below the effectiveness of legal instruments. Possible approaches include decreasing the value added tax for recycling products from sorting plants or supporting measures to ease the investment risk connected to technological improvement of existing sorting plants. Fiscal instruments potentially have a supporting role, but do not necessarily lead to increased recycling output.

### 3 Einleitung

Rund 6 Mio. Mg/a gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle, die im Sprachgebrauch auch als „Abfälle zur Verwertung“ bezeichnet werden, enthalten nach den Ergebnissen eines UFOPLAN-Projektes [Dehne et al. 2011] ein erhebliches Sekundärrohstoffpotential. Von diesem Potential gelangt nur ein geringer Anteil zum Recycling. Selbst der in Sortieranlagen aufbereitete Mengenstrom wird nach Angaben der Betreiber vor allem aus wirtschaftlichen Gründen bislang überwiegend energetisch verwertet.

Hier setzt dieses Forschungsvorhaben an. Es untersucht mittels ökobilanzieller Methoden, wie sich eine stärker an der Abfallhierarchie des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ausgerichtete Entsorgung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle auf verschiedene umweltbezogene Wirkungskategorien auswirkt. Im Focus steht dabei die Frage, ob, und wenn ja, welcher Nutzen mit einem intensivierten Recycling einhergeht und mit welchen Maßnahmen und Instrumenten dieses Potential zur Umweltentlastung aktiviert werden kann. Wesentliche Teilziele des Projektes sind:

- ▶ die Aktualisierung und Erweiterung der Datenbasis zum Aufkommen und Verbleib gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle,
- ▶ die Entwicklung und Festlegung geeigneter Beurteilungskriterien und des Betrachtungsrahmens für die ökobilanzielle Betrachtung der Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle,
- ▶ die Identifizierung und Analyse der einzubeziehender Entsorgungswege und Stoffströme,
- ▶ die Durchführung der ökobilanziellen Betrachtung anhand verschiedener Szenarien für unterschiedliche Entsorgungswege und Stoffstromverteilungen,
- ▶ die Bewertung der Analyseergebnisse und Benennung vorrangig anzustrebender Entsorgungswege,
- ▶ die stoffstrombezogene Darstellung der möglichen und anzustrebenden Verwertungsoptionen,
- ▶ die Beurteilung der ökobilanziellen Ergebnisse unter Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren, wie wirtschaftliche Einflussfaktoren, Potential technischer Optimierungen und Darstellung optimierter Verwertungs- und Beseitigungswege sowie
- ▶ die Identifizierung von Maßnahmen und Instrumenten für eine Potentialausschöpfung und die Erarbeitung von praktischen Handlungsansätzen für eine Stoffstromlenkung.

Die Bearbeitung des Projektes wurde von einem Fachbeirat begleitet. Den teilnehmenden Institutionen und Firmen sei an dieser Stelle herzlich dafür gedankt:

- Verbandsvertreter der deutschen Entsorgungswirtschaft (BDE e.V., bvse e.V., Entsorgungsgemeinschaft Nord e.V., ITAD e.V., VKU e.V., ASA e.V., BGS e.V.),
- Behördenvertreter der Länder und des Bundes,
- Wissenschaftler der Universität Kassel, der Fachhochschule Nordhausen und der Fachhochschule Münster

Unser besonderer Dank gilt den vier Entsorgungsunternehmen, die uns die Anlagenbilanzen ermöglicht haben.

## 4 Untersuchungsgegenstand

Untersuchungsgegenstand sind analog zu [Dehne et al. 2011] die im Sprachgebrauch der Abfallwirtschaft als „Abfälle zur Verwertung“ benannten gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle, die in Gewerbebetrieben unter bestimmten, in der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) definierten Randbedingungen als vorzubehandelndes Gemisch (siehe §§ 3, 4 Gewerbeabfallverordnung<sup>11</sup>) oder als Gemisch zur energetischen Verwertung (§ 6 Gewerbeabfallverordnung<sup>12</sup>) entstehen können.

Die in Gewerbebetrieben getrennt erfassten Wertstoffe werden im Rahmen des Projektes nicht betrachtet. Auch die gemäß § 7 Gewerbeabfallverordnung in Gewerbebetrieben anfallenden Abfälle, die nicht verwertet werden, sondern dem öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger zu überlassen sind, sind ebenso wie Bau- und Abbruchabfälle gemäß § 8 der Gewerbeabfallverordnung nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Das Statistische Bundesamt erhebt Daten zu gemischten gewerblichen Abfällen unter der Bezeichnung „nicht gefährliche Abfälle mit gewerblichem Ursprung - getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt“. Dies sind Abfälle mit dem Abfallschlüssel 20030102 (gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle). Da nach Hinweisen aus der Entsorgungswirtschaft [Dehne et al. 2011] gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle auch als Verpackungsgemische unter dem Abfallschlüssel 15010600 entsorgt werden, werden diese Mengen in die Betrachtungen einbezogen.

Bezugsjahr für die ökobilanziellen Betrachtungen ist das Jahr 2010, da für dieses Jahr zu Beginn der Projektbearbeitung im Jahr 2012 die statistischen Daten zum Mengenaufkommen vorlagen sowie Untersuchungsergebnisse zum Abfallaufkommen in Betrieben, die nur alle 4 Jahre erhoben werden, verfügbar sind.

---

<sup>11</sup> Gemische gemäß § 3 GewAbfV enthalten PPK, Glas, Kunststoffe und Metalle, Gemische gemäß § 4 GewAbfV enthalten PPK, Glas, Bekleidung, Textilien, Holz, Kunststoffe, Metalle, Gummi, Kork, Keramik und verschiedene andere Abfälle gem. Anhang zur Verordnung, jedoch keine Organik.

<sup>12</sup> Gemische gemäß § 6 GewAbfV enthalten kein Glas, Metall, mineralischen Abfall und keine Organik.

## 5 Aufkommen gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle

Das statistische Bundesamt [STBA 2012a] erfasst jährlich im Rahmen einer Totalerhebung bundesweit die Daten zum Mengenaufkommen bei Abfallentsorgungsanlagen. Gemischte Siedlungsabfälle werden hierbei unter vier Abfallschlüsseln (AS) erfasst:

- ▶ AS 20030100 gemischte Siedlungsabfälle nicht differenzierbar
- ▶ AS 20030101 Hausmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle gemeinsam über die öffentliche Müllabfuhr eingesammelt
- ▶ AS 20030102 Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt
- ▶ AS 200399 Siedlungsabfälle a.n.g..

Für die Ermittlung des Mengenaufkommens der hausmüllähnlichen Gewerbeabfälle (getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt) werden die Mengen der undifferenzierten Abfallschlüssel 20030100 und 200399 summiert und in dem Verhältnis der AS 20030101 und AS 20030102 zueinander aufgeteilt. Die so erhaltene Abfallmenge wird der separat erfassten Abfallmenge AS 20030102 zugerechnet.

Diese Neuberechnung kann jedoch nicht genutzt werden, um die Anzahl der Abfallentsorgungsanlagen, in denen der Abfallschlüssel 200301XX verarbeitet wurde, zu benennen<sup>13</sup>. Die Anlagenanzahl wird unter folgenden Prämissen angegeben:

- ▶ Der Anlagenbetreiber registriert gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle entweder als AS 20030100 oder als AS 20030101 bzw. AS 20030102. Zusätzlich wird Abfall als AS 200399 registriert.
- ▶ Es gibt somit drei Kategorien: Anlagen für AS 20030100, für AS 20030101/ 20030102 und für AS 200399.
- ▶ Bei der Anlagenanzahl für die AS 20030101 und AS 20030102 wird die höhere Anlagenanzahl ausgewählt.
- ▶ Für mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen und thermische Behandlungsanlagen wird die tatsächliche Anlagenanzahl in Deutschland im Jahr 2010 gewählt.

Die ausführlichen Daten zur Neuberechnung der Abfallmenge und zur Anlagenanzahl sind dem Anhang 4 und Anhang 5 zu entnehmen.

Im Jahr 2010 sind in innerdeutschen Anlagen insgesamt 3,45 Mio. Mg gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle entsorgt worden, wovon rund 98 % aus dem Inland angeliefert wurden.

---

<sup>13</sup> Ansonsten würden sich beispielsweise 51 mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen oder 96 thermische Behandlungsanlagen errechnen.

Tabelle 1: Aufkommen gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt) im Jahr 2010 (berechnet) [STBA 2012a]

Abfallentsorgungsanlagen mit AS 200301XX im Input	529
Input in deutsche Abfallentsorgungsanlagen	3.450.000 Mg
aus Produktion im gleichen Betrieb entstandene Abfälle	17.500 Mg
angeliefert aus dem Inland	3.387.000 Mg
angeliefert aus dem Ausland	45.500 Mg

Werden in den nachfolgenden Kapiteln für die gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (AS 20030102) Abfallmengen angegeben, so wurden diese stets analog zu der oben beschriebenen Neuberechnung ermittelt.

Eine Plausibilitätsprüfung der Datenneuberechnung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (AS 20030102) einerseits und des Hausmülls andererseits mit den Daten der Abfallbilanz 2010 zeigt folgendes Bild:

- ▶ Das Abfallaufkommen der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (AS 20030102) auf der Grundlage der o.g. Berechnung mit 3,45 Mio. Mg weicht nur geringfügig von den in der vorläufigen Abfallbilanz 2010 [STBA 2012b] genannten Angaben (3,43 Mio. Mg) ab.
- ▶ Die berechneten Mengen des AS 20030101 stimmen annähernd mit den Hausmüllmengen überein. So weist die Abfallbilanz 2010 [STBA 2009] des statistischen Bundesamtes eine Hausmüllmenge von rund 14,81 Mio. Mg aus, während sich die berechnete Hausmüllmenge auf rund 14,9 Mio. Mg beläuft.

Im Jahr 2010 sind ferner rund 2,39 Mio. Mg als Verpackungsgemische mit dem Abfallschlüssel AS 15010600 in bundesdeutschen Anlagen entsorgt worden.

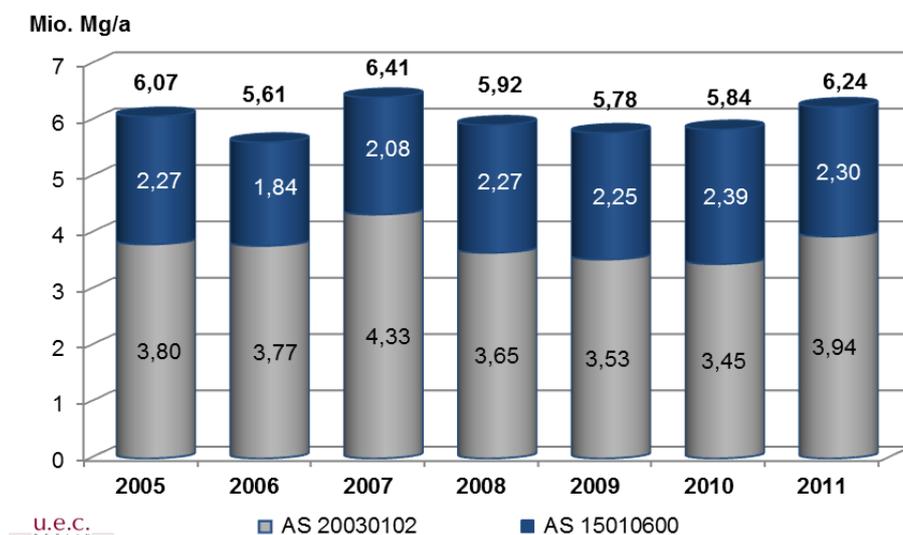
Tabelle 2: Aufkommen von gewerblichen Verpackungsgemischen im Jahr 2010 [STBA 2012a]

Abfallentsorgungsanlagen mit AS 15010600 im Input	507
Input in deutsche Abfallentsorgungsanlagen	2.393.500 Mg
aus Produktion im gleichen Betrieb entstandene Abfälle	4.700 Mg
angeliefert aus dem Inland	2.372.700 Mg
angeliefert aus dem Ausland	16.100 Mg

Damit sind im Jahr 2010 zusätzlich zu den rund 3,45 Mio. Mg gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen (AS 20030102) noch 2,39 Mio. Mg Verpackungsgemische (AS 15010600) angefallen und behandelt worden. Das Mengenaufkommen dieser beiden Abfallarten hat sich in den letzten vier Jahren unterschiedlich entwickelt. Während sich das Aufkommen der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle seit dem Jahr 2007 auf ca. 3,5 Mio. Mg/a verringert (Rückgang um ca. 20 Ma.-%) hat, sind die Verpackungsgemische im gleichen Zeitraum von 2,1 Mio. Mg/a auf rund 2,4 Mio. Mg im Jahr 2010 und damit um 15 Ma.-% angestiegen.

Die mittlerweile ebenfalls verfügbaren und analog ausgewerteten Daten für das Jahr 2011 zeigen im Gegensatz dazu einen Anstieg der Gesamtmenge auf 6,24 Mio. Mg/a. Während die Menge der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle deutlich um rund 440.000 Mg angestiegen ist, ist die Menge der Verpackungsgemische um rund 90.000 Mg gesunken.

Abbildung 10: Entwicklung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (AS 20030102) und der gemischten Verpackungen (AS 15010600) in den Jahren 2005 bis 2010 [eigene Berechnungen auf der Grundlage von STBA 2005-2011]



Die Entwicklung bezogen auf die Jahre 2006 und 2010 spiegeln auch die erhobenen Daten zur Abfallerzeugung in Gewerbebetrieben wider. Diese Daten werden bei max. 20.000 Betrieben mit einer Mitarbeitermindestanzahl, je nach Wirtschaftszweig, zwischen 50 und 500 Beschäftigten des produzierenden Gewerbes, der Energie- und Wasserversorgung sowie der Dienstleistungsbereiche erhoben. Die erzeugten Siedlungsabfälle (AS 2003XX) sind in Summe in den vier Jahren um 21 Ma.-% zurückgegangen, während die gemischten Verpackungen (AS 15010600) im gleichen Zeitraum um 16 Ma.-% angestiegen sind [STBA 2012c].

**Wird im Folgenden ohne eine Differenzierung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen gesprochen, handelt es sich gemäß Kapitel 4 immer um die Summe aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (AS 20030102) und gemischten Verpackungen (AS 15010600) mit einem Gesamtaufkommen von rund 5,84 Mio. Mg im Jahr 2010.**

## 6 Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle in Deutschland 2010

Im Jahr 2010 wurden 99 Ma.-% der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (AS 20030102) und 98 Ma.-% der gemischten Verpackungen (AS 15010600) in Sortieranlagen/sonstige Behandlungsanlagen<sup>14</sup>, in MBA-Anlagen (als Oberbegriff für MBA-, MBS- und MPS-Anlagen) und in energetischen/thermischen Abfallbehandlungsanlagen/Feuerungsanlagen<sup>15</sup> entsorgt, wobei sich die Mengenzuordnung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle von denen der Verpackungsgemische unterscheidet.

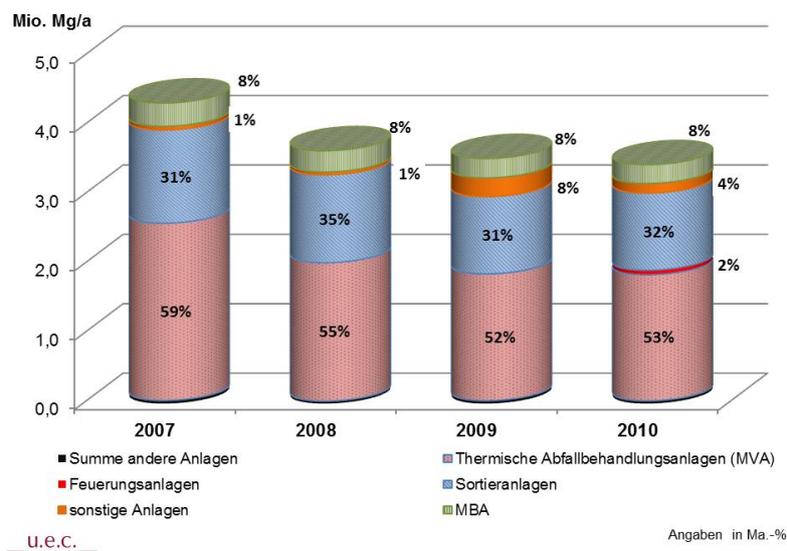
In den Jahren 2007 bis 2010 wurden rund 30 bis 35 Ma.-% der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (AS 20030102) in Sortieranlagen verarbeitet. Vor dem Hintergrund der insgesamt rückläufigen Abfallmengen ist damit die sortierte Abfallmenge kontinuierlich von 1,3 Mio. Mg/a auf 1,1 Mio. Mg/a (Anhang 8) zurückgegangen. Im gleichen Zeitraum hat sich der Input in sonstige Behandlungsanlagen (u.a. EBS-Aufbereitungsanlagen), wenn auch mit 0,14 Mio. Mg/a auf weitaus niedrigerem Niveau, nahezu verdreifacht. In MBA-Anlagen wurden in den letzten Jahren ca. 8 Ma.-% der Abfälle aufbereitet. 53 Ma.-% bzw. 1,82 Mio. Mg der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle gelangte im Jahr 2010 in thermische Abfallbehandlungsanlagen (MVA).

---

<sup>14</sup> Sonstige Behandlungsanlagen sind u.a. Ersatzbrennstoffaufbereitungsanlagen.

<sup>15</sup> Feuerungsanlagen sind Einrichtungen zur Erzeugung von Wärme durch Verbrennung von festen, flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen. Sie dienen zur Dampferzeugung oder Erwärmung von Wasser oder sonstigen Wärmeträgermedien. Zweck des Einsatzes von Abfällen in einer Feuerungsanlage ist deren Verwertung als Brennstoff oder zu anderen Zwecken. Unter dem Begriff Feuerungsanlage werden Ersatzbrennstoffkraftwerke, Biomassekraftwerke, Mitverbrennungskraftwerke (z. B. Kohlekraftwerke) und Anlagen für andere Produktionszwecke (z. B. Mitverbrennung in Zement-, Kalk-, Ziegel- oder Stahlwerken) subsumiert.

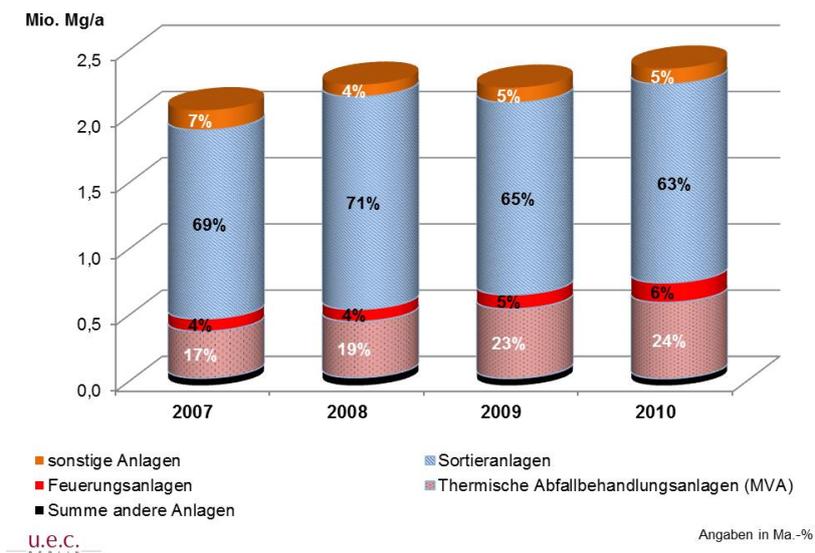
Abbildung 11: Verteilung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle auf die Entsorgungsanlagen in den Jahren 2007 bis 2010 [eigene Berechnungen auf der Grundlage von STBA 2007-2010]



Die auf Anregung der Verbände ITAD e.V., VKU e.V. und ASA e.V. ergänzend ausgewerteten Daten für das Jahr 2011 zeigen, dass im Jahr 2011 die verbrannten Mengen an gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen prozentual, aber auch absolut um rund 330.000 Mg gegenüber den Mengen des Jahres 2010 gestiegen sind.

Für die als gemischte Verpackungen entsorgten Gemische zeigt sich ein etwas anderes Bild, da diese größtenteils in Sortieranlagen gelangen. Obwohl die Absolutmengen der Verpackungsmische (AS 15010600), die in Sortieranlagen verarbeitet wurden, von 1,43 Mio. Mg/a auf 1,5 Mio. Mg/a angestiegen ist, verringerte sich jedoch der prozentuale Anteil von rund 69 Ma.-% auf 63 Ma.-%. Im Gegenzug sind die Abfallmengen für die thermischen Abfallbehandlungsanlagen von 0,35 Mio. Mg/a auf 0,58 Mio. Mg/a bzw. für Feuerungsanlagen von 0,09 auf 0,15 Mio. Mg/a angestiegen. Im Jahr 2010 wurden damit insgesamt 30 Ma.-% der Abfälle in thermischen Abfallbehandlungsanlagen/Feuerungsanlagen entsorgt.

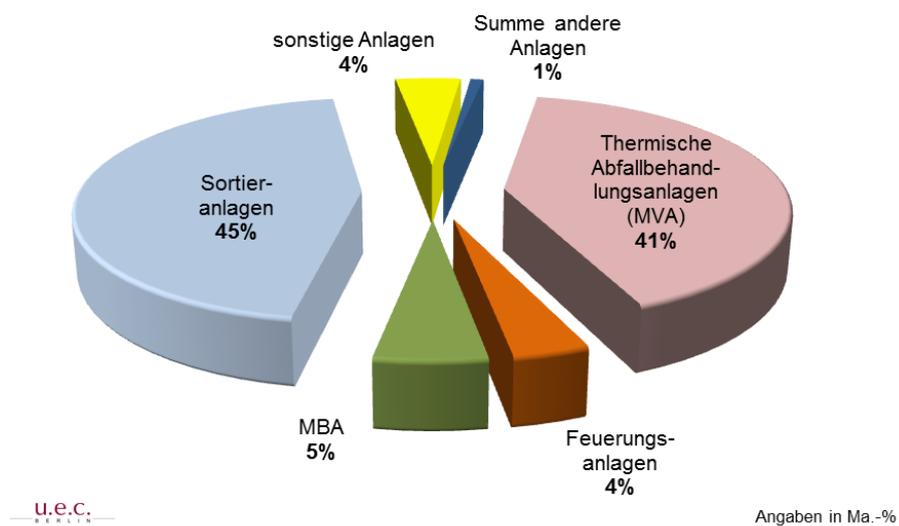
Abbildung 12: Verteilung der Verpackungsgemische auf die Entsorgungsanlagen in den Jahren 2007 bis 2010 [eigene Berechnungen auf der Grundlage von STBA 2007-2010]



In anderen Abfallentsorgungsanlagen, wie Deponien, biologische Behandlungsanlagen, chemisch-physikalische Behandlungsanlagen, Shredderanlagen, Bauschuttzubereitungsanlagen, werden mit rund 50.000 Mg/a nur geringe Abfallmengen entsorgt. Aus Vereinfachungsgründen konnten deshalb diese Anlagen ohne Informationsverlust von einer weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden. Insgesamt werden somit den ökobilanziellen Berechnungen 99,1 Ma.-% der entsorgten Abfallmenge respektive 5,7859 Mio. Mg im Jahr 2010 zu Grunde gelegt.

Vom Gesamtaufkommen beider Abfallgemische (Summe aus AS 20030102 und AS 15010600 - im Jahr 2010 rund 5,84 Mio. Mg) wurden mit 2,87 Mio. Mg/a rund 49 Ma.-% in Sortieranlagen/sonstigen Behandlungsanlagen (EBS-Aufbereitungsanlagen) aufbereitet und 2,6 Mio. Mg/a in thermischen Abfallbehandlungsanlagen/ Feuerungsanlagen verbrannt (Abbildung 13).

Abbildung 13: Verbleib der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (Summe aus AS 20030102 und AS 15010600) auf die Entsorgungswege<sup>16</sup> im Jahr 2010 [eigene Berechnungen auf der Grundlage von STBA 2012a]



<sup>16</sup> Andere Anlagen sind u.a. Deponien, biologische Behandlungsanlagen, Shredderanlagen, Bauschuttzubereitungsanlagen.

## 7 Zusammensetzung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle

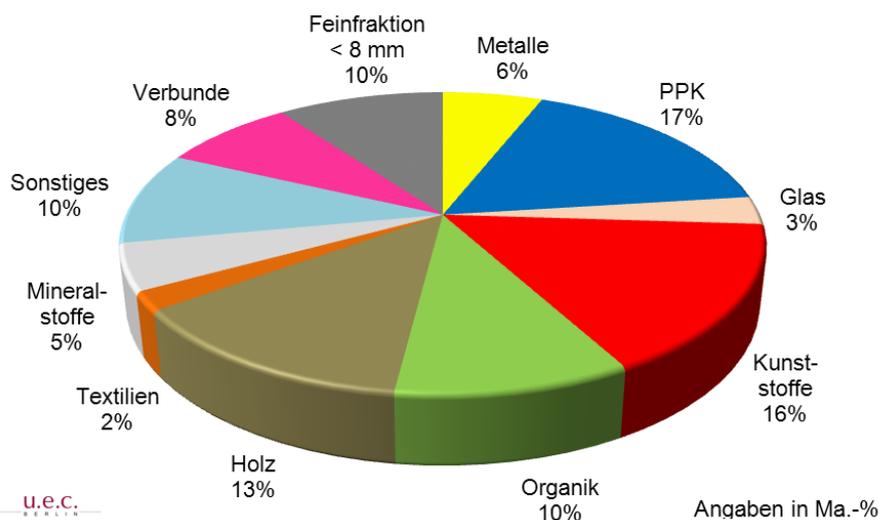
Repräsentative Daten zur Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle, die für die ökobilanziellen Betrachtungen benötigt werden, liegen nicht vor. Mit diesem Informationsdefizit sind regelmäßig Forschungsnehmer bei vergleichbaren Projekten der Abfallwirtschaft konfrontiert. Per Konvention werden in Ermangelung repräsentativer Daten stattdessen vorliegende, öffentlich zugängliche Daten herangezogen und diese auf das jeweilige Bezugsjahr und den zu betrachtenden Abfallstrom übertragen. Hierzu zwei Beispiele:

- ▶ Institut für Abfallwirtschaft und Altlasten der TU Dresden/Intecus GmbH, UFOPLAN-Vorhaben „Nutzung der Potentiale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung“ [IAA / Intecus 2011]:  
Die Zusammensetzung für Restabfall, Sperrmüll, LVP und Bioabfall wurde anhand von Literaturdaten abgeschätzt. Für Restabfall aus Haushalten einzelner Jahre lagen zwischen 3 und 8 Analysen vor, für Sperrmüll, LVP und Bioabfall war die Datengrundlage geringer. Zitat: "Die Zusammensetzung des Gewerbeabfalls erfolgte nach Validierung von Sortieranalysen von [Wiemer et al. 2002 und Fruth et al. 1997]“. Mithin nutzt die Studie zur Hochrechnung Sortiererergebnisse, die in den 90er Jahren, also vor Erlass der Gewerbeabfallverordnung und vor Umsetzung der TA Siedlungsabfall, in einzelnen Entsorgungsgebieten durchgeführt wurden.
- ▶ Ifeu/Ökoinstitut:  
Klimaschutzpotentiale der Abfallwirtschaft am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz, 2010 im Auftrag von BMUB, UBA, BDE: „Die Berechnungen der einzelnen Behandlungsschritte und der möglichen Mengenänderungen in den Szenarien basieren weitestgehend auf den Daten zur Zusammensetzung des Restmülls und des hausmüllähnlichen Gewerbeabfalls nach Abfallfraktionen. Hierzu liegen keine aktuellen belastbaren Daten vor. Eine bundesweite Sortieranalyse von Hausmüll wurde 1987 durchgeführt. Aktuellere Sortieranalysen wurden landesweit in Bayern und ansonsten in Stichprobenmessungen in anderen Gebieten Deutschlands vorgenommen. Diese Werte sind für Gesamtdeutschland allerdings nur bedingt repräsentativ und sie weisen teilweise deutliche Abweichungen voneinander auf, bedingt durch unterschiedliche Methoden der Probenahme und Zuordnung. Da keine belastbaren aktuellen Daten verfügbar sind, werden in dieser Studie die gleichen Daten wie im Statusbericht 2005 nach Kern (2001) zugrunde gelegt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu befördern. Zum Vergleich werden die Daten von IAA/INTECUS aus dem UFO-Plan Projekt 2008 für 2006 und aus der EdDE-Studie 2005 für 2004 sowie die Daten aus der Sortieranalyse in Bayern 2003 in Tabelle 4.4 und Tabelle 4.5 mit aufgeführt.“

Hinweise zu den bekannten Informationsdefiziten sind beispielsweise auch den Forschungsvorhaben von Wagner et al. 2012 oder Öko-Institut/HTP 2012 zu entnehmen.

Daten zur Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle haben ihren Ursprung entweder in den 80er/90er Jahren (u.a. aus der bundesweiten Gewerbeabfalluntersuchung 1993, deren Probenahme Ende der 80er Jahre in Westdeutschland erfolgte) oder in diversen Sortieranalysen oder Gewerbeabfallsichtungen aus den 90er Jahren (siehe dazu [Dehne et al. 2011]). Diese Daten sind als veraltet einzuschätzen. In Ermangelung aktuellerer Daten können auch Schätzwerte auf der Basis von Erfahrungswerten benutzt werden, wie sie im UFOPLAN-Projekt zum „Aufkommen, Verbleib und Ressourcenrelevanz von Gewerbeabfällen“ [Dehne et al. 2011] (Abbildung 14) hergeleitet wurden.

Abbildung 14: Abschätzung der Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle für die Jahre 2007/2008 (Angaben in Ma.-%) [Dehne et al. 2011]



Im Rahmen dieser Untersuchung konnte aktuelles, wenngleich nicht repräsentatives, Datenmaterial ausgewertet werden, das nachfolgend dargelegt wird.

## 7.1 Branchenspezifische Zusammensetzung

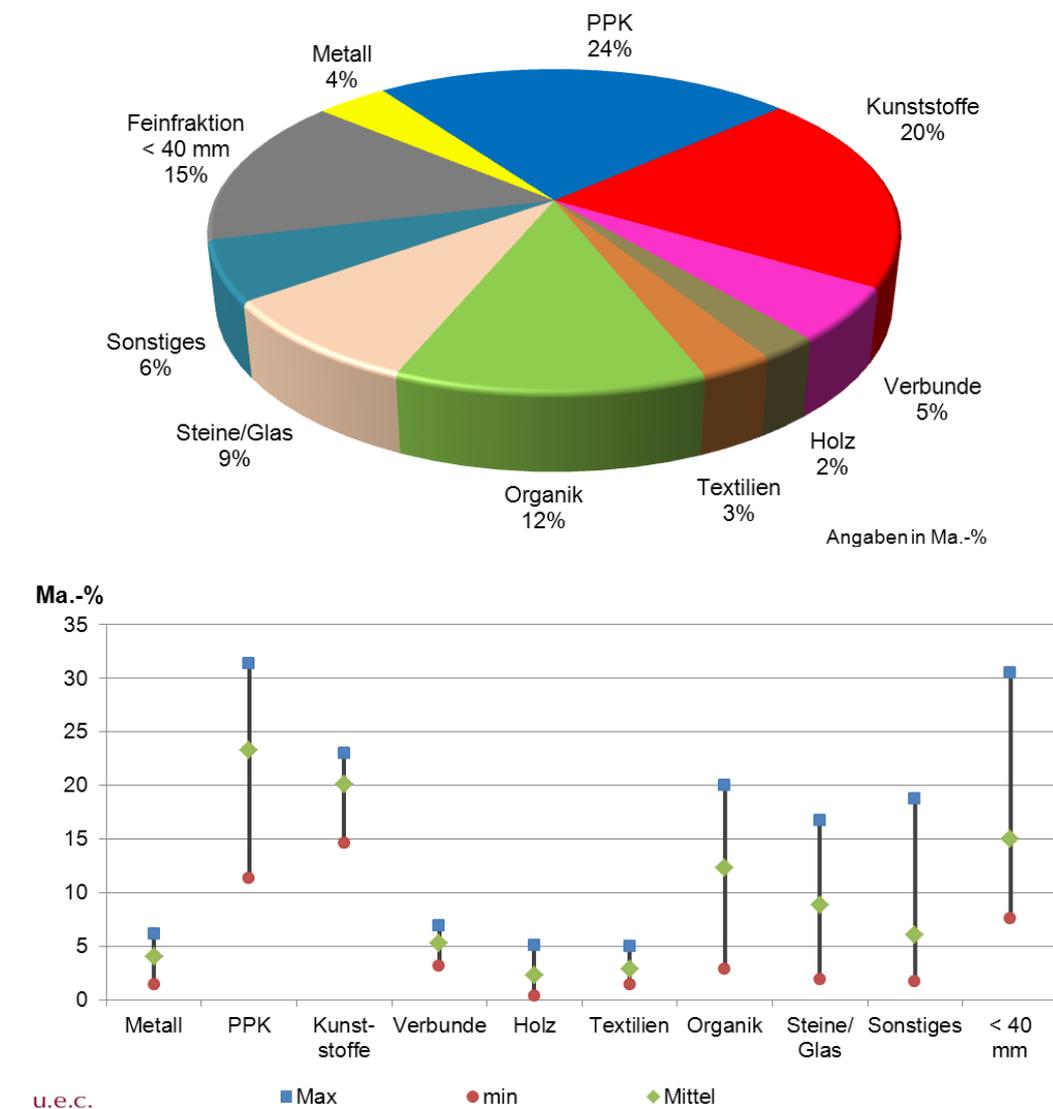
Im Rahmen einer Dissertation wurde die Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle folgender Branchen auf Stichprobenbasis untersucht [Helftwes 2012]:

- ▶ Gastronomie (Gaststätten, Hotels, Kinos, Raststätten usw.)
- ▶ Gesundheit (Pflegeheime, Krankenhäuser, karitative Einrichtungen usw.)
- ▶ Lebensmittel (Bäckereien, Fleischereien usw.)
- ▶ Handwerk (Bauhandwerksbetriebe, sonstige Handwerksbetriebe)
- ▶ Verwaltung (Behörden, Hochschulen, Banken, Versicherungen usw.)

Die Abfälle aus 1,1 m<sup>3</sup>-Behältern wurden in den Bundesländern Hamburg, Rheinland-Pfalz und Bayern unter Beachtung unterschiedlicher Betriebsarten und Betriebsgrößen mittels branchenspezifischer Sammeltouren erfasst.

Die Untersuchung der branchenspezifischen gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle kommt im Vergleich zu der vorgenannten Abschätzung für die Jahre 2007/2008 zu abweichenden Ergebnissen. Im (ungewichteten) Branchenmittel ist der PPK-Anteil um 7 Prozentpunkte höher und, mit Ausnahme der Branche Handwerk, die größte Fraktion. Ebenfalls im Branchenmittel höher ist der Kunststoffanteil (+ 4 Prozentpunkte). Demgegenüber liegt der mittlere Holzanteil bei nur 2 Ma.-% und hat untypischerweise sein Maximum mit 5,1 Ma.-% in der Branche Verwaltung (Anhang 9). Der Autor begründet den niedrigen Holzanteil mit der untersuchten Behältergröße [Helftwes 2012].

Abbildung 15: Mittelwert und Streubreite der Zusammensetzung von Gewerbeabfällen (n=5 Branchen, ungewichteter Mittelwert) [Helftwes 2012, eigene Berechnung]



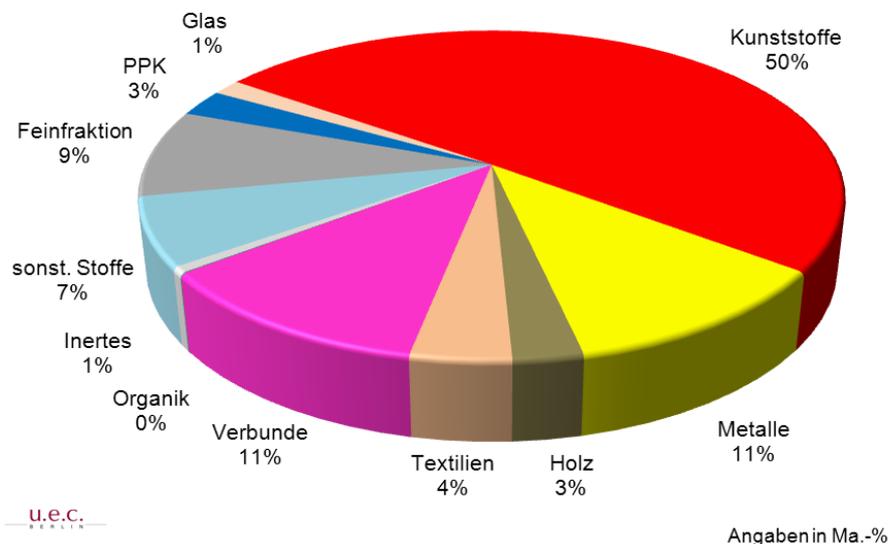
## 7.2 Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle einer Umschlaganlage

Untersuchungen von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen wurden in den Jahren 2010/2011 auch im Auftrag des bayerischen Staatsministeriums durchgeführt [STMUG Bayern 2013]. Bei Entsorgungsfach- und Verwertungsbetrieben wurden Betriebsdaten erfasst, Stoffstrombilanzen eingesehen, Abnehmer der Outputfraktionen abgefragt und die Anlagentechnik zur Abfallbehandlung systematisiert<sup>17</sup>. Beprobt und analysiert wurde jedoch nicht die Zusammensetzung des Inputmaterials, sondern die der Sortierreste. Allerdings wurde eine Sortieranalyse von Abfällen einer Umschlaganlage durchgeführt; da hier keine Wertstoffe entnommen wur-

<sup>17</sup> Zur Systematik siehe auch u.e.c. Berlin 2010

den, charakterisiert das Untersuchungsergebnis die Zusammensetzung des Inputgemisches dieser einen Anlage. Die untersuchten gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle bestehen zu rund 50 Ma.-% aus Kunststoffen (überwiegend Kunststofffolien und sonstige Kunststoffartikel) und 11 Ma.-% entfallen auf Metalle (incl. Metallverbunde). Auffällig ist zudem der sehr geringe PPK-Anteil von nur 3 Ma.-%.

Abbildung 16: Zusammensetzung von gemischten Gewerbeabfällen (n=1) [LfU Bayern 2013]



Die Ergebnisse dieser einen Sortierung weichen sehr stark von den Resultaten früherer Jahre (Abschätzung für die Jahre 2007/2008) aber auch von den o.g. branchenspezifischen Werten ab.

### 7.3 Anlagenbilanzen von Sortieranlagen

Eine repräsentative Ermittlung der stofflichen Zusammensetzung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen der Bundesrepublik war nicht Gegenstand des Projektes, da eine solche Untersuchung unter anderem mit einem erheblichem Kosten- und Zeitaufwand verbunden gewesen wäre. Zudem würde eine rein inputbezogene Untersuchung keine Informationen hinsichtlich der Verwertbarkeit der enthaltenen Bestandteile nach einer Behandlung der Abfälle in einer Sortieranlage bereitstellen. Da für die ökobilanziellen Betrachtungen nicht nur Daten zur Zusammensetzung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle als Inputmaterial, sondern auch zur Verteilung der Abfälle über die Verfahrensstufen von Vorbehandlungsanlagen benötigt werden, wurde im Rahmen dieses UFOPLAN-Projektes Anlagenbilanzen an vier Sortieranlagen zwischen der 11. und der 15. KW 2013 durchgeführt<sup>18</sup>.

Mit Hilfe der Anlagenbilanzierung ist es möglich, sowohl die Qualität der erzeugten Produkte als auch die Zusammensetzung des verarbeiteten gemischten Gewerbeabfalls zu bestimmen. Vorgegangen wurde wie folgt: Vor Beginn einer Bilanzierung wurde die Sortieranlage leer gefahren.

<sup>18</sup> Alle im Zusammenhang mit der Durchführung der Anlagenbilanzierungen überlassenen und sonst zur Kenntnis gelangten Informationen werden vertraulich und im Sinne des allgemeinen Datenschutzes behandelt. Alle Informationen werden zusammengefasst dargestellt, so dass Rückschlüsse auf die einzelnen Unternehmen nicht möglich sind.

Während der Verarbeitung der zu untersuchenden gewerblichen Siedlungsabfallgemische wurden dann alle erzeugten Produkte (Wertstoffe, brennbare Abfälle, Reststoffe) für die spätere manuelle Nach-Sortierung regelmäßig beprobt. Zum Abschluss der Bilanzierung wurden alle von der Sortieranlage erzeugten Stoffströme verwogen.

Bei den untersuchten Sortieranlagen handelt es sich um „Vorbehandlungsanlagen hoher Komplexität“ im Sinne der Definitionen aus [Dehne et al. 2011], d.h. die Sortieranlagen verfügen über Aggregate zur Zerkleinerung und Siebung, für die Magnetscheidung und NE-Metallabscheidung, über Sensortechnik (NIT-Trennung) und manuelle Klaubung. Anhang 6 zeigt vereinfacht die eingesetzte Anlagentechnik der untersuchten Sortieranlagen.

Die jeweiligen Stichproben wurden auf der Grundlage des nachfolgenden Sortierkataloges in Einzelbestandteile zerlegt. Durch eine Verknüpfung der verwogenen Stoffströme mit der ermittelten Zusammensetzung aller Produktströme wird dann die Zusammensetzung des Inputmaterials bestimmt. Mit Hilfe dieser Vorgehensweise werden folgende Informationen erarbeitet:

- ✓ die Zusammensetzung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle im Anlageninput,
- ✓ die Zusammensetzung jedes erzeugten Produktes,
- ✓ die Massenanteile der erzeugten Produkte am Input,
- ✓ die Sortierquoten (Verteilung der jeweiligen Sortierfraktion in die erzeugten Produkte) für jede Sortierfraktion.

Tabelle 3: Sortierkatalog der Anlagenbilanzierungen

Stoffgruppe	Nr.	Sortierfraktion	Beispiele
Papier, Pappe	1-1	Pappen, Kartonagen	Verpackungsmaterialien
	1-2	Druckerzeugnisse	Zeitungen, Illustrierte
	1-3	sonstige PPK 1, Deinking geeignet	grafische Papiere, Verpackungen aus Papier
	1-4	sonstige PPK 2, Deinking ungeeignet	Gefärbte und beschichtete Papiere und Pappen, Papierhandtücher
Glas	2-1	Verpackungen aus Glas	Flaschen, Gläser
	2-2	sonstiges Glas	Fensterscheiben, Gebrauchsgegenstände

Stoffgruppe	Nr.	Sortierfraktion	Beispiele
Kunststoffe	3-1	Folien > DIN A4	Verpackungen, Abfallsäcke, Baufolie
	3-2	Folien < DIN A4	
	3-3	Eimer, Kanister	Verpackungen, Gebrauchsgegenstände
	3-4	sonstige formstabile Kunststoffe	Verpackungen, Gebrauchsgegenstände, Rohre, Fensterrahmen
	3-5	EPS („Styropor“)	Verpackungen, Baustoffe
	3-6	Schaumstoffe	Verpackungen
	3-7	Umreifungsbänder	
	3-8	sonstige Kunststoffe	Kunststoffe die keiner anderen Kunststoffsortierfraktion zugeordnet werden können
Metalle	4-1	Fe-Metalle	Dosen, Deckel, Nägel, Werkzeug
	4-2	Aluminium	Schalen, Folien, Dosen, Rohre, Profile
	4-3	sonstige NE-Metalle	Gebrauchsgegenstände, Rohre, Leitungen, Armaturen, Draht
	4-4	Metallverbunde	Verbunde von Fe- und NE-Metallen
Holz	5-1	naturbelassenes Holz	naturbelassenes Holz, das lediglich mechanisch bearbeitet wurde (A I)
	5-2	sonstiges Holz	Holzmöbel, Spanplatten, lackierte Möbel, mit Holzschutzmitteln behandeltes Holz (A II, A III und A IV)
Textilien	6-1	Textilien, NAWARO	Putzlappen, Kleidung, Haus- und Heimtextilien, Unterscheidung in NAWAROS bzw. aus fossilen Rohstoffen
	6-2	Textilien, nicht NAWARO	
	6-3	Schuhe, NAWARO	alle Arten von Schuhen, Unterscheidung in NAWAROS bzw. aus fossilen Rohstoffen
	6-4	Schuhe, nicht NAWARO	

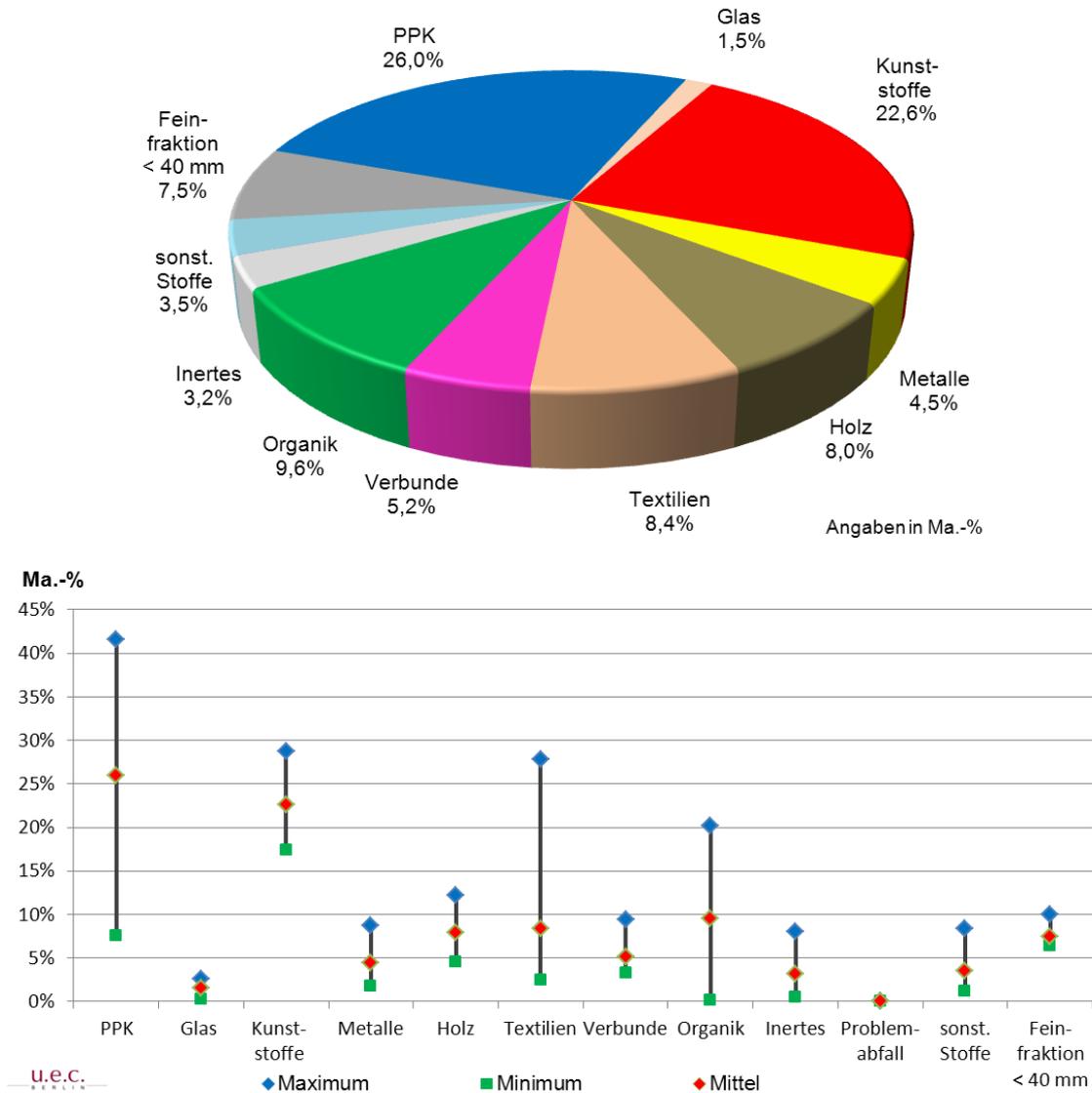
Stoffgruppe	Nr.	Sortierfraktion	Beispiele
Verbunde	7-1	Flüssigkeitskartonagen	Getränk kartonagen,
	7-2	andere Verbund-Verpackungen	Papier-/Kunststoff-Verbunde, sonst. Verbundverpackungen
	7-3	Sonstige Verbunde	Möbel, Kfz-Teile
	7-4	Elektroschrott	Bohrmaschinen, alle mit Batterien und Strom betriebenen Geräte und Werkzeuge
	7-5	Elektronikschrott	EDV-Geräte
Organik	8	Organik	Küchenabfall, Gartenabfall
Inertes	9	Inertes	Beton, Ziegel, Porzellan, Keramik, Steine
Problemabfall	10	Problemabfall	Farbe, Altöl, Chemikalien etc. falls vorhanden, Hg-haltige Materialien separat
sonstige Stoffe	11	sonstige Stoffe Materialien, die keiner anderen Sortierfraktion zugeordnet sind	gefüllte Verpackungen (Gläser, Metalldosen), Hygieneprodukte, Leder, Gummi
Feinfraktion	12	Feinfraktion < 10 mm	Mit Hilfe des Sortiertisches abgetrennte Fraktion

Zusätzlich zu den vier Anlagenbilanzierungen stellte ein Anlagenbetreiber eine weitere Sortieranalyse gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle zur Verfügung. Die Ergebnisse dieser weiteren Sortierung konnten den Stoffgruppen des Sortierkataloges (Tabelle 3) zugeordnet werden. Damit basiert die Angabe zur Abfallzusammensetzung () auf Ergebnissen von fünf aktuellen Sortieranalysen.

Die gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle setzen sich auf dieser Grundlage zu rund 48,6 Ma.-% aus den beiden Fraktionen PPK (26 Ma.-%) und Kunststoffe (22,6 Ma.-%) zusammen (Abbildung 17). Verglichen mit den oben genannten Daten aus den 80 und 90er Jahren ist eine Zunahme dieser beiden Fraktionen in den gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen zu verzeichnen. Diese Tendenz ergibt sich auch aus den Untersuchungen von Helftewes.

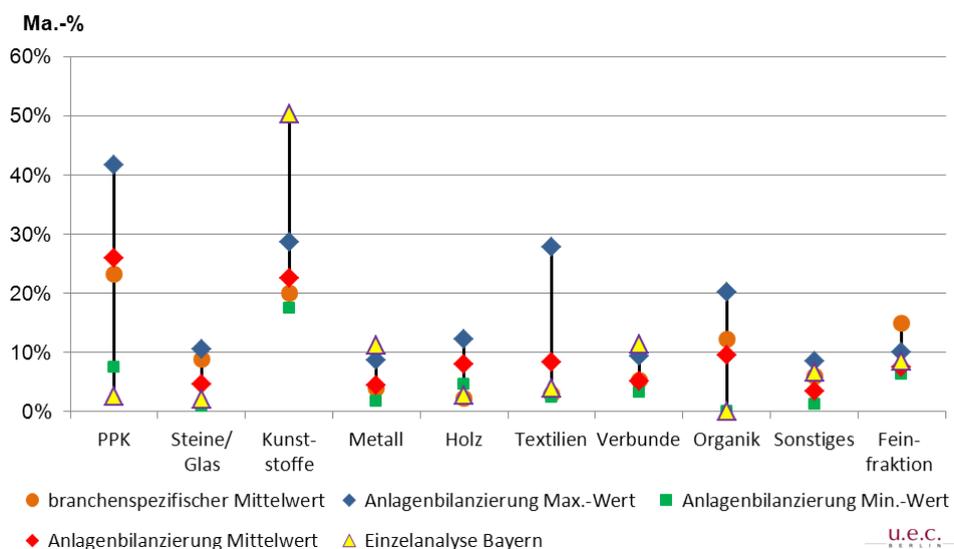
Die PPK-Fraktion weist mit 7,6 bis 41,6 Ma.-% die größten Schwankungen am Input auf (Anhang 10). Auffällig ist der untypische hohe Textilanteil mit knapp 28 Ma.-% in einer Sortieranlage, der Textilanteil der vier anderen Sortieranalysen liegt zwischen 2,5 und 4,6 Ma.-%. Auf Nachfrage beim Anlagenbetreiber handelt es sich jedoch um keine ungewöhnliche Zusammensetzung des Inputs, so dass von einer Korrektur des Textilanteils abgesehen wurde. Der Metallanteil in dem Abfallgemisch ist geringfügig gesunken, möglicherweise eine Folge verstärkter Getrennterfassung.

Abbildung 17: Mittelwert und Streubreite der Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle 2013 (n=5)



Die obige mittlere Zusammensetzung weicht in den Einzelfractionen von der ungewichteten mittleren branchenspezifischen Zusammensetzung (Abbildung 15) ab. Diese liegt jedoch innerhalb der Streubreite der Anlagenbilanzierungen. Eine Ausnahme stellen nur die Stofffraktionen Holz und Feinfraktion dar. Im Vergleich dazu liegt die im Rahmen der bayerischen Untersuchung ermittelte Zusammensetzung oftmals außerhalb der Streubreiten.

Abbildung 18: Gegenüberstellung des ungewichteten branchenspezifischen Mittelwertes, der Einzelanalyse aus Bayern und der Ergebnisse der Anlagenbilanzierungen [Helftwes 2012, LfU Bayern 2013, eigene Berechnungen]



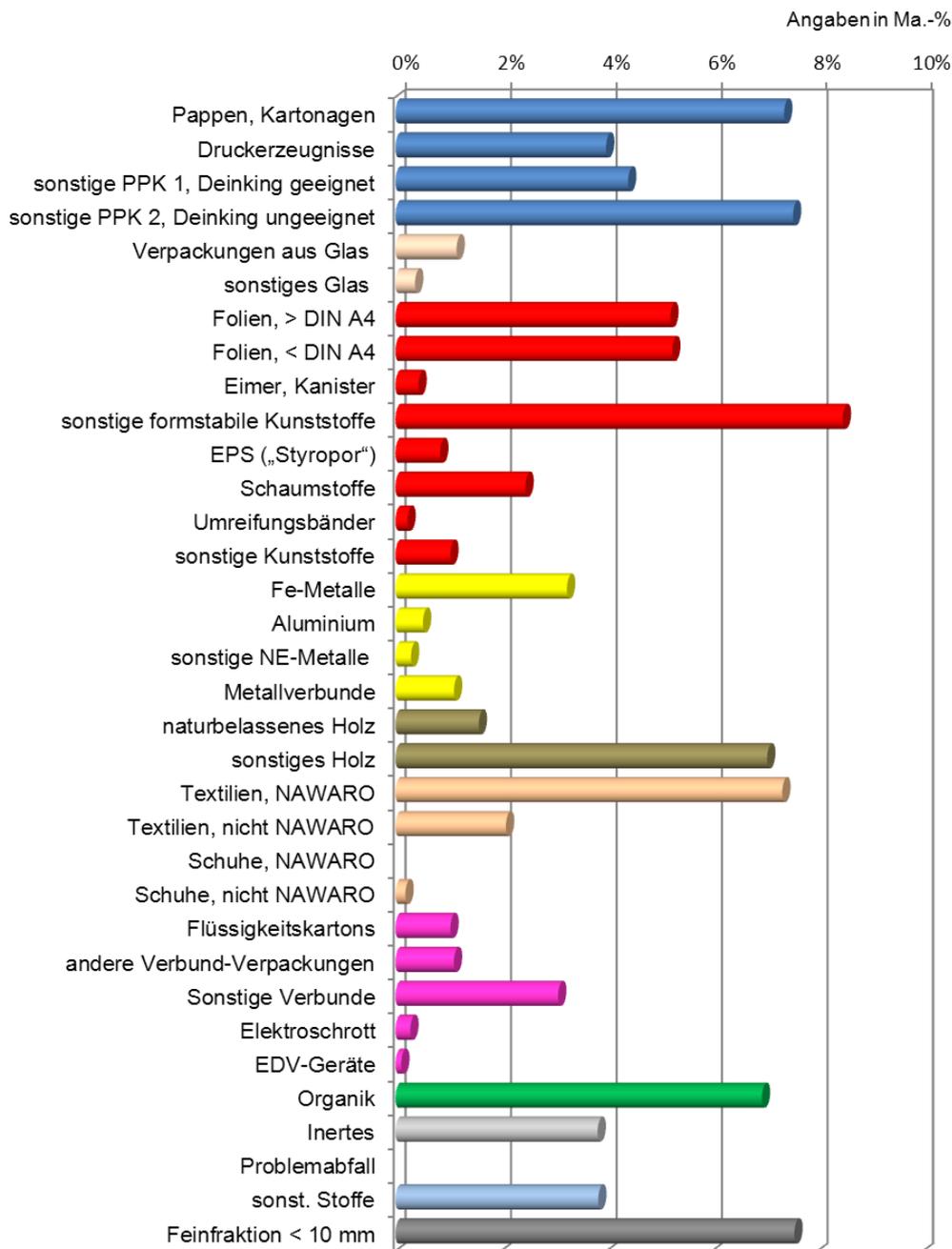
Die obigen Ausführungen zur Abfallzusammensetzung zeigen, dass es sich bei den gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen um ein inhomogenes Gemisch handelt. Die Anteile der einzelnen Stofffraktionen unterliegen weiten Streubreiten; so kann beispielsweise der Papieranteil im Gemisch zwischen 3 Ma.-% und 42 Ma.-% liegen.

## 7.4 Grundlagen für die Detailangaben und die Stoffstrommodellierung in Variante 2

Bislang erfolgte die Darstellung der Zusammensetzung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle auf Basis aggregierter Stoffgruppen, da entweder differenzierte Angaben zu einzelnen Sortierfraktionen nicht zur Verfügung stehen oder diese nicht vergleichbar sind. Für die Ermittlung der Detailaussagen und die Stoffstrommodellierung in Kapitel 11 ist diese Aggregationsebene jedoch nicht aussagekräftig genug. Zugrunde gelegt werden stattdessen die ausreichend detaillierten Daten der im Rahmen dieses Projektes durchgeführten vier Anlagenbilanzierungen.

Die nachfolgende Grafik zeigt die Zusammensetzung der bei den Anlagenbilanzen untersuchten gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle gegliedert nach 34 Sortierfraktionen. So besteht beispielsweise die PPK-Fraktion zu rund 30 % aus Pappen und Kartonagen und die Kunststofffraktion setzt sich maßgeblich aus Folien (größer und kleiner DIN A 4) und formstabilen Kunststoffen zusammen.

Abbildung 19: Mittlere Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (34 Sortierfraktionen) auf der Basis von Anlagenbilanzen 2013 (n=4)

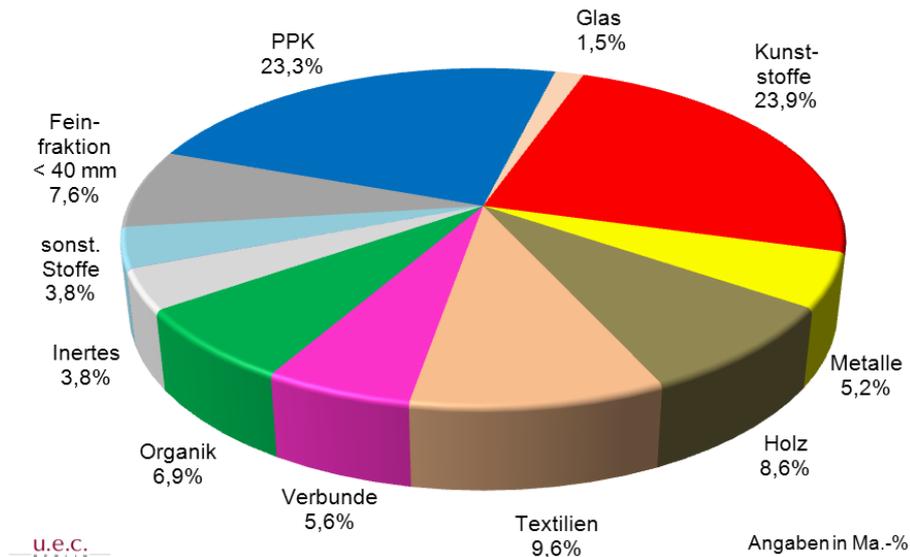


u.e.c.

Diese detaillierte Aufteilung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle in die 34 Sortierfraktionen bildet die Grundlage für die Variantenbetrachtungen und die ökobilanziellen Betrachtungen.

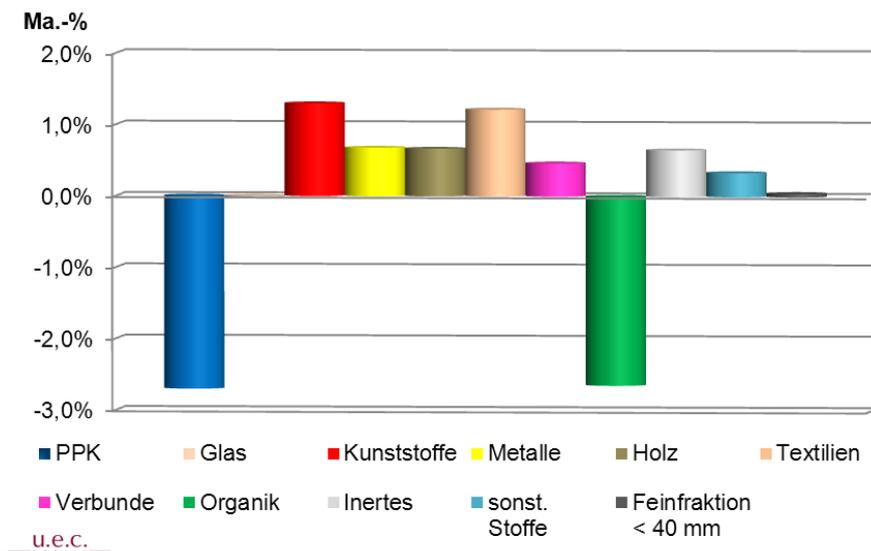
Damit wird, abweichend von der in Abbildung 17 aufgezeigten mittleren Zusammensetzung, für die ökobilanzielle Betrachtung die nachfolgende aggregierte Zusammensetzung zugrunde gelegt.

Abbildung 20: Mittlere Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle als Grundlage für die ökobilanzielle Betrachtung 2013 (n=4)



Die Abweichungen für die einzelnen Stoffgruppen zwischen Abbildung 17 und Abbildung 20 verdeutlicht das nachfolgende Bild. Der ökobilanziellen Betrachtung liegt somit ein geringerer PPK-Anteil und ein geringerer Organikanteil zugrunde. In Anbetracht der generellen Inhomogenität der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle werden diese Differenzen als vertretbar erachtet.

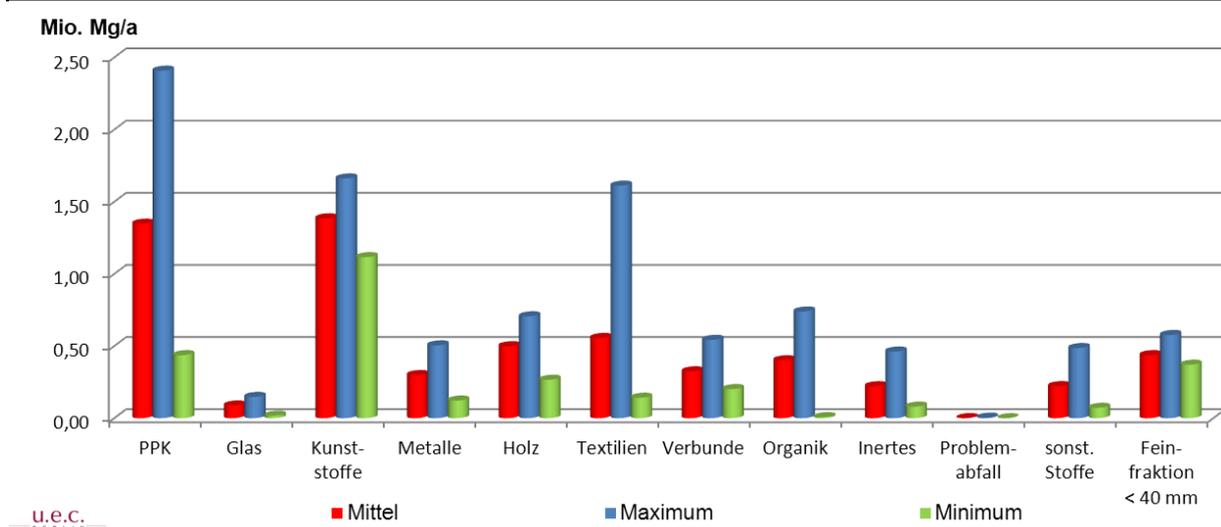
Abbildung 21: Differenzen zwischen der Zusammensetzung auf der Basis von 5 Sortierungen und der Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle als Grundlage für die ökobilanzielle Betrachtung 2013



Wird die mittlere Massenverteilung der vier Anlagenbilanzierungen für die Berechnung des Wertstoffpotentials herangezogen, lässt sich, bezogen auf die bundesweit im Jahr 2010 entsorgten gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle in Höhe von 5,78 Mio. Mg, die theoretische Sekundärrohstoffmenge errechnen (Anhang 7). Für die Hauptfraktionen ergeben sich folgende Potentiale:

PPK-Potential:	1,348 Mio. Mg/a
Kunststoff-Potential:	1,385 Mio. Mg/a <sup>19</sup>
Metall-Potential:	0,299 Mio. Mg/a
Holz-Potential:	0,499 Mio. Mg/a.

Abbildung 22: Abschätzung des in gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen enthaltenen Sekundärrohstoffmengenpotentials (n=4)



## 7.5 Abschließende Einschätzung zur Datenlage

Nicht nur in Deutschland basiert die Beschreibung von Stoffströmen der Abfallwirtschaft auf Einzeldaten und deren Übertragung auf die Gesamtmenge des zu analysierenden Stoffstroms, da seit den 80er Jahren keine Aktualisierungen repräsentativer, bundesweiter Abfallanalysen vorgenommen wurden. Diese Vorgehensweise ist eine gebräuchliche Konvention, die auch in diesem Forschungsvorhaben genutzt wird.

Im Rahmen der Bearbeitung wurden die zwischenzeitlich verfügbaren veröffentlichten Datensätze und zusätzlich die Ergebnisse von Anlagenbilanzen ausgewertet, anstatt vereinfachend Datensätze aus den 90er Jahren für die Übertragung auf die Gesamtmenge der gemischten gewerbli-

<sup>19</sup> persönliche Mitteilung von Dr. Joachim Wuttke (Umweltbundesamt) vom 16.06.2014: „Im Rahmen des Abschlussfachgespräches am 01.04.2014 wurde von einigen Beteiligten die Höhe des Kunststoffanteils im Gewerbeabfall unter Verweis auf Ergebnisse von Studien der Firma Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH problematisiert. Ohne eine detaillierte abschließende Beurteilung vorwegzunehmen, ergab ein Gespräch mit der Firma Consultic am 13.06.2014, dass aufgrund der unterschiedlichen zugrunde liegenden Methoden und Ansätze unterschiedliche Daten zu erwarten sind. Dies ist aber nicht im Rahmen dieses Berichts, sondern ggf. an geeigneter anderer Stelle in gebotener Tiefe auszuloten.“

chen Siedlungsabfälle zugrunde zu legen. Den nachfolgenden Untersuchungen liegen damit aktualisierte, nicht jedoch repräsentative Datensätze zugrunde.

Angesichts der durchaus komplexen Datenlage kommt bei den ökobilanziellen Betrachtungen der Analyse von Sensitivitäten eine große Bedeutung zu. Bezüglich der Wertstoffgehalte wurde deshalb eine entsprechende Sensitivität mit  $\pm 25\%$  Wertstoffanteil in den gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen berechnet.

## 8 Variantenbetrachtung für eine hochwertige Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle

Um beantworten zu können, ob die bei der Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle auftretenden Umweltwirkungen durch eine engere Ausrichtung an der Abfallhierarchie des Abfallwirtschaftsgesetzes verringert werden können, werden nach Abstimmung mit dem Auftraggeber drei verschiedene Varianten untersucht.

▶ **Basisvariante**

In der Basisvariante wird die derzeitige Behandlung für die gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle aufgezeigt und die Abfallströme hergeleitet.

▶ **Variante 1 - Vorbehandlungspflicht**

In der Variante 1 werden die Auswirkungen einer „Vorbehandlungspflicht“ dargestellt. Unterstellt wird, dass keine unmittelbare energetische Verwertung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle mehr statthaft ist, sondern stattdessen alle anfallenden Gemische Vorbehandlungsanlagen im Sinne der Gewerbeabfallverordnung zugeführt, also sortiert werden müssen. Für den Output der Sortierung werden ansonsten die gleichen prozentualen Massenströme wie bei der Sortierung gemäß der Basisvariante unterstellt. Damit steigt die Menge der dem Recycling zugeführten Wertstoffe proportional zur Steigerung der Inputmenge in die Sortierung an.

▶ **Variante 2 - Vorbehandlungspflicht und Steigerung der recycelten Mengen**

Variante 2 untersucht die Auswirkungen einer gesteigerten Ausbeute und verbesserten Selektivität bei der Sortierung von Wertstoffen in Kombination mit der „Vorbehandlungspflicht“. Dabei werden zunächst die in Sortieranlagen erzeugbaren Stoffströme zum Recycling losgelöst von den momentanen betriebswirtschaftlichen Fragen ermittelt. Für die nach der Wertstoffabschöpfung verbleibenden Sortierreste werden zudem Ansätze zur Optimierung der energetischen Verwertung modelliert.

Die jeweiligen Mengenströme werden unter Zuhilfenahme der zuvor erläuterten statistischen Daten, der Ergebnisse der durchgeführten Anlagenbilanzierungen, Literaturangaben und Erfahrungswerten modelliert.

## 9 Modellierung der Basisvariante: Derzeitige Behandlung der Abfallströme

Zur Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle werden die in Kapitel 6 genannten Entsorgungsanlagen genutzt. Diese Anlagen sind mit unterschiedlichen Verfahrenstechniken ausgestattet, aus denen wiederum unterschiedliche Stoffflüsse resultieren.

Sortieranlagen bieten die Möglichkeit, neben Metallen auch andere Wertstoffe wie insbesondere PPK und Kunststoffe für ein Recycling zur Verfügung zu stellen. Als Wertstoffe werden in Sortieranlagen PPK, Kunststoffe (überwiegend Folienware, aber auch andere Erzeugnisse wie Eimer), Metalle und Holz sortiert. Die nach der Sortierung verbleibenden i.d.R. hoch- und mittelkalorischen EBS-Fractionen werden nach betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten und je nach bestehenden Vertragsbeziehungen in unterschiedlich effizienten Anlagen energetisch verwertet.

EBS-Aufbereitungsanlagen verfolgen das Ziel, einen spezifischen, oftmals auf den Abnehmer zugeschnittenen Brennstoff zu erzeugen. Separiert werden i.d.R. nur Stoffe, die in dem erzeugten Produkt störend wirken. Hierzu zählen in erster Linie Fe- und NE-Metalle, teilweise auch PVC-haltige Kunststofffolien. Zwischen Sortieranlagen und EBS-Aufbereitungsanlagen kann es im Übrigen einen fließenden Übergang geben, wenn beispielsweise in Sortieranlagen aus den Sortierresten gezielt Ersatzbrennstoffe hergestellt und die Möglichkeiten zur Wertstoffgewinnung nicht oder nur in geringem Maße genutzt werden.

In MBA-Anlagen wird vorwiegend Hausmüll entsorgt; daneben werden rund 311.500 Mg/a gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle vorbehandelt. Im Rahmen der mechanischen Aufbereitung werden in allen Anlagen Störstoffe und Metalle abgetrennt, vereinzelt wird zusätzlich eine Holzfraktion erzeugt. Mengenmäßiges Hauptprodukt sind mit rund 51,3 Ma.-% vom Input Brennstoffe zur energetischen Verwertung [Balhar 2014]. Eine intensivere Wertstoffsartierung ist bei entsprechender Konfiguration einer MBA möglich, wird aber bislang nicht praktiziert.

Die in den thermischen Abfallverbrennungsanlagen und Feuerungsanlagen eingesetzten gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle werden zunächst energetisch verwertet. Die nach der Verbrennung übrig bleibenden Schlacken<sup>20</sup> enthalten Metalle, die im Rahmen der Schlackeaufbereitung entweder bereits bei den Verbrennungsanlagen oder bei nachgeschalteten Schlackeaufbereitern abgetrennt werden.

In der Praxis werden von den Anlagenbetreibern für die Ersatzbrennstoffe die Abfallschlüssel AS 191210 (brennbare Abfälle) und AS 191212 (sonstige Abfälle) verwendet. Gerade die sonstigen Abfälle (AS 191212) machen mitunter einen Großteil des Anlagenoutputs der Aufbereitungsanlagen aus. Diese Abfallfraktion wird, sofern sie nicht direkt einer thermischen Abfallbehandlungsanlage (MVA) zugeführt wird, in nachgeschalteten EBS-Aufbereitungsanlagen für die anschließende EBS-Verbrennung oder die Mitverbrennung in Kraftwerken konfektioniert. In den nachfolgenden Kapiteln wird vereinfachend nicht weiter zwischen diesen Abfallschlüsseln differenziert, sondern generell von „brennbaren Abfällen“ gesprochen.

---

<sup>20</sup> Es handelt sich hierbei eigentlich um Aschen; üblich ist jedoch die Verwendung des Begriffes Schlacke

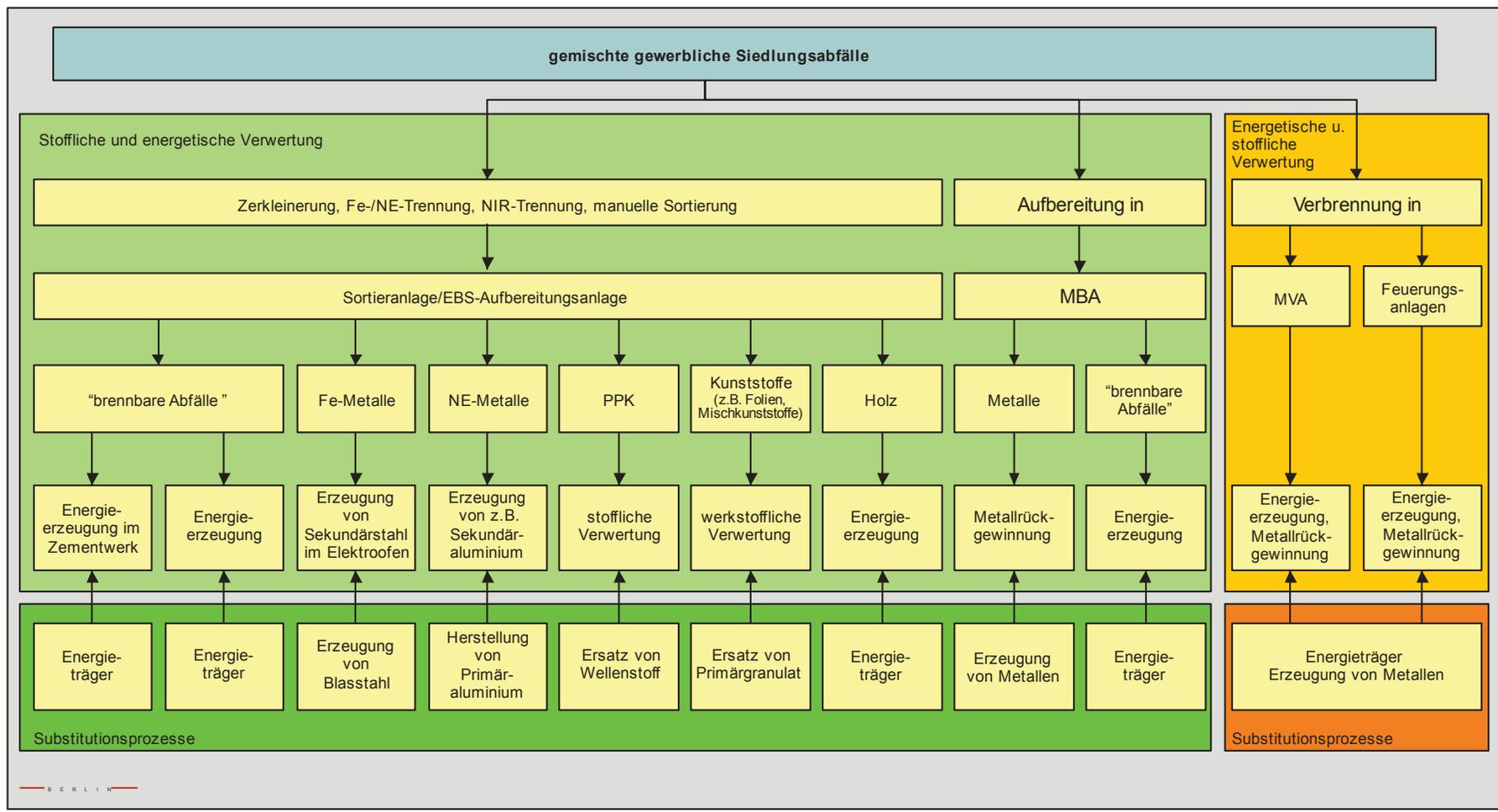
Das nachfolgende Bild gibt eine Übersicht über die wesentlichen bei der Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle auftretenden Stoffströme der Erstbehandlung.

Werden in diesen Erstbehandlungsanlagen feste Outputströme erzeugt, können diese in weiteren, nachgeschalteten Anlagen konfektioniert werden; teilweise ist die Nachaufbereitung auch unabdingbar:

1. NE-Metalle sind, sofern nicht ausgewählte Metalle händisch sortiert werden, Mischfraktionen aus diversen NE-Metallen und herkunftsspezifischen Störstoffen wie Schlackeresten, mitgerissenen PPK- und Kunststoffen etc.. Die NE-Metallgemische werden deshalb beispielsweise in trocken oder nass arbeitenden Trennanlagen wie Schwimm-Sink-Trennanlagen mittels Schwertrübe weiter getrennt und aufkonzentriert. Die dabei erzeugten NE-Metallfraktionen werden anschließend Schmelzanlagen zugeführt.
2. Die in Sortieranlagen manuell erzeugten Folien und Hartkunststoffe bestehen überwiegend aus Polyolefingemischen. In Kunststoffaufbereitungsanlagen werden die darüber hinaus enthaltenen Störstoffe wie z.B. Metalle, PPK, aber auch andere Kunststoffarten, mittels Wasch- und Trennprozessen abgetrennt. Erst danach werden die gereinigten Kunststoffe zu vermarktbareren Agglomeraten oder Granulaten verarbeitet.
3. Während manuell sortierte PPK-Fraktionen nicht nachsortiert werden müssen, können maschinell gewonnene PPK-Fraktionen in entsprechenden Sortieranlagen in einzelne Papiersorten getrennt werden.

Für die nachfolgende ökobilanzielle Betrachtung ist es erforderlich, zunächst die in den Erstbehandlungsanlagen erzeugten Stoffströme quantitativ zu beschreiben. Die in den nachgeschalteten Anlagen dann auftretenden Stoffmengenverluste werden in Kapitel 9.8 wieder aufgegriffen.

Abbildung 23: Übersicht über die Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle mit den resultierenden Stoffströmen für die ökobilanzielle Betrachtung



## 9.1 Erstbehandlung in Sortieranlagen - Ermittlung der Abfallströme anhand statistischer Angaben

Die Basisvariante beinhaltet, basierend auf den Entsorgungsmengen des Jahres 2010, die Stoffströme der derzeitigen Entsorgung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle.

Das Statistische Bundesamt erhebt jährlich Daten zu den In- und Outputströmen der in Deutschland betriebenen und immissionsschutzrechtlich genehmigten Sortieranlagen<sup>21</sup>. Geprüft wurde im Rahmen dieses Projektes zunächst, ob diese Datensätze zur Modellierung der bei der Sortierung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle entstehenden Stoffströme herangezogen werden können.

Zunächst ist festzustellen, dass bei den Datenerhebungen des statistischen Bundesamtes nicht nach der Art der Sortieranlagen (z. B. Monosortieranlage für PPK oder Altglas oder Sortieranlage für gemischte Gewerbeabfälle, Leichtverpackungen oder Bau- und Abbruchabfälle) differenziert wird. Es existieren stattdessen Daten für die Gesamtheit aller Sortieranlagen.

Danach wurden in Deutschland 905 (Stand 2007) bzw. 1.040 (Stand 2010) Sortieranlagen für Abfälle betrieben; den höchsten Zuwachs haben kleinere Sortieranlagen mit einem Anlagendurchsatz < 10.000 Mg/a. Die zur Verfügung gestellte Anlagenkapazität erhöhte sich in den vier Jahren von 41,2 Mio. Mg/a auf rund 46,8 Mio. Mg/a. Der Input in die Sortieranlagen ist in dem Zeitraum von rund 23 Mio. auf 24 Mio. Mg/a angestiegen, während die Auslastung aller Sortieranlagen von 56,3 % auf 51,4 % sank.

Die für diese Anlagen veröffentlichten Daten zum In- und Output lassen keinen direkten bzw. eindeutigen Rückschluss darauf zu, welche Outputströme speziell aus der Sortierung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle resultieren. Es ist somit nicht möglich, den aus gemischten Gewerbeabfällen aussortierten Wertstoffanteil direkt der Statistik zu entnehmen.

Im Rahmen der Bearbeitung dieses Projektes wurde zunächst geprüft, ob es zielführend ist, die benötigten Informationen aus den aggregierten Daten zu erzeugen. Da beispielsweise die In- und Outputströme von Monosortieranlagen bekannt sind, können diese Mengen von den Gesamtmengen des In- und Output herausgerechnet und das statistische Datenmaterial so bereinigt werden. Um diesen Ansatz zu prüfen, wird in einem ersten Schritt sowohl der In- als auch der Output aller Sortieranlagen in einzelne Stoffgruppen aufgeteilt (Anhang 11 und Anhang 12). Der jeweilige Abfallschlüssel spielt dabei eine untergeordnete Rolle, da die Praxis zeigt, dass die Sortieranlagenbetreiber z. B. für den Output nicht immer einen Abfallschlüssel der AVV-Gruppe 1912 (Abfälle aus der mechanischen Behandlung von Abfällen (z. B. Sortieren, Zerkleinern, Verdichten, Pelletieren) a. n. g.) verwenden. So weist auch die bundesweite Statistik für Sortieranlagen Abfallschlüssel aus insgesamt 14 AVV-Kapiteln aus.

Im zweiten Arbeitsschritt können von den Gesamtmengen die Stoffströme subtrahiert werden, die entweder in Monosortieranlagen behandelt werden oder für die aus anderen Untersuchungen Da-

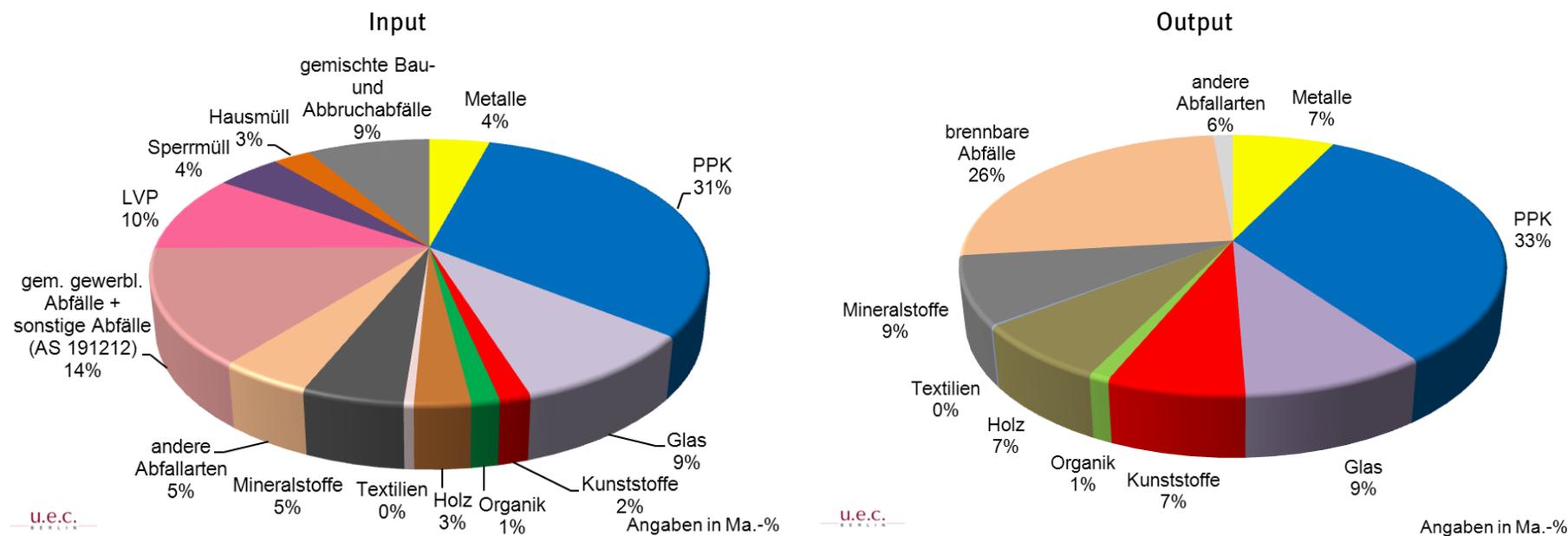
---

<sup>21</sup> : Daneben werden Kleinst- oder Einfachst-Sortieranlagen, zumeist Materialumschlag mit Baggersortierung, betrieben; diese werden statistisch nicht erfasst, wenn sie nicht nach Bundes-Immissionsschutzgesetz, sondern nach Baurecht genehmigt wurden.

ten zum In- und Output vorliegen. Unter Einbeziehung von Literaturangaben, Anlagenbilanzen und Erfahrungswerten können zudem die Outputströme einzelner Sortieranlagenkategorien abgeschätzt werden. Eine diesbezügliche Abschätzung wird für die folgenden Sortieranlagenkategorien vorgenommen:

- ▶ PPK- und Altglassortieranlagen
- ▶ LVP-Sortieranlagen
- ▶ Anlagen zur Metallaufbereitung
- ▶ Anlagen zur Aufbereitung mineralischer Abfälle
- ▶ gemischter Bau- und Abbruchabfälle und
- ▶ Sperrmüllaufbereitungsanlagen.

Abbildung 24: Informationen zum In- und Output aller statistisch erfassten bundesdeutschen Abfallsortieranlagen im Jahr 2010 (eigene Berechnung auf Basis der Daten von [STBA 2012a])



Die Korrektur des statistischen Zahlenmaterials erfolgt unter folgenden anlagenspezifischen Annahmen:

#### PPK- und Altglassortieranlagen

Monosortieranlagen für PPK und Glas erzeugen weitestgehend stoffgleiche Outputströme. So wird das Altpapier in verschiedene Papiersorten (z. B. D39, B12, B19) und das Altglas in verschiedenfarbiges Glas (z. B. Weißglas, Grünglas) aufgetrennt. Nichtstoffgleiche Abfälle fallen nur in geringem Umfang an, für die Berechnung werden aufgrund von Erfahrungswerten folgende Annahmen getroffen:

- ▶ Bei der PPK-Sortierung schwankt der Störstoffanteil in Abhängigkeit vom Erfassungsgebiet zwischen 1 und 7 Ma.-%, für die Abschätzung wird ein durchschnittlicher Störstoffanteil von 5 Ma.-% veranschlagt. Dieser wird in der Regel energetisch entsorgt.
- ▶ Bei der Altglassortierung liegt der Störstoffanteil zwischen 2 und 4 Ma.-%, im Mittel bei 2,5 Ma.-% des Inputs. Als Störstoffe fallen neben Fe- und NE-Metallen sowie Kunststoffen Abfälle an, die energetisch entsorgt werden (Etiketten, Korken etc.).

Tabelle 4: Zusammensetzung des Störstoffanteils bei der Altglassortierung [eigene Abschätzung]

Fraktionen	Ma.-%
Fe-Metalle	19
NE-Metalle	10
Kunststoff	8
„brennbare Abfälle“	63

#### LVP-Sortieranlagen

Der Output von LVP-Sortieranlagen (2,27 Mio. Mg im Jahr 2009) setzt sich aus Kunststoffen (u.a. Folien, Mischkunststoffe), PPK, Metallen und Sortierresten zusammen (Tabelle 5). Die Sortierreste werden zum einen in EBS-Aufbereitungsanlagen weiter aufbereitet und zum anderen in MVA verbrannt [Öko-Institut/HTP 2012].

Tabelle 5. Zusammensetzung des Outputs der LVP-Sortieranlagen [Öko-Institut/HTP 2012]

Fraktionen	Mg	Ma.-%
PPK (incl. FKN)	215.900	10
Fe-Metalle	258.900	11
NE-Metalle	63.600	3
Kunststoff	1.005.200	44
„brennbare Abfälle“	726.500	32
Summe	2.270.100	100

#### Anlagen zur Metallaufbereitung

Unter der Prämisse, dass Metallfraktionen nicht in Sortieranlagen für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle gelangen, sondern von speziellen Metallaufbereitungsanlagen angenommen werden, wird dieser Materialstrom ebenfalls gesondert betrachtet. Eine als Metallfraktion bezeichnete Fraktion, insbesondere wenn es sich hierbei um eine aus Abfallgemischen generierte Fraktion handelt, enthält 10-20 Ma.-%, im Mittel 15 Ma.-%, Nicht-Metallanteile/Störstoffe<sup>22</sup>. Hierbei handelt es sich um Kunststoffe, PPK, Verunreinigungen u.ä.. Diese Störstoffe werden in der Regel als „brennbare Abfälle“ energetisch verwertet.

#### Anlagen zur Aufbereitung mineralischer Abfälle

Mineralische Abfälle, wie Beton, Ziegel, Boden, Asche und Schlacken, werden aufgrund der erforderlichen Verfahrenstechnik nicht gemeinsam mit gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen aufbereitet, so dass auch dieser Input separat betrachtet wird. Bei der Aufbereitung der Mineralik werden in erster Linie Fe-Metalle, aber auch NE-Metalle, Holz und brennbare Stoffe als Störstoffe separiert. Der nichtmineralische Anteil wird anhand von Betreiberangaben mit 10 Ma.-% abgeschätzt.

Tabelle 6. Zusammensetzung des Störstoffanteils bei der Aufbereitung mineralischer Abfälle

Fraktionen	Ma.-%
Fe-Metalle	67
NE-Metalle	2
Holz	10
„brennbare Abfälle“	21

<sup>22</sup> Verfolgt die Abtrennung einer Metallfraktion mit dem Primärziel, nachgeschaltete Aggregate (z. B. Zerkleinerungsaggregate) zu schützen, kann der Störstoffanteil auch höher liegen.

### gemischte Bau- und Abbruchabfälle

Die quantitative Zusammensetzung der gemischten Bau- und Abbruchabfälle (umgangssprachlich auch gemischte Bau(stellen)abfälle) ist zwar herkunftsspezifisch und stark von den Gegebenheiten an der Baustelle geprägt. Dennoch weisen gemischte Bau- und Abbruchabfälle Grundcharakteristiken auf, die auch die Outputzusammensetzung aus der Sortierung dieser Abfälle bestimmen [Öko-Institut 2008]. Hierzu zählen neben mineralischen Stoffen, wie Beton- oder Gipsreste, hauptsächlich Holz. Aus Erfahrungswerten aus der Aufbereitung gemischter Bau- und Abbruchabfälle kann folgende Outputzusammensetzung abgeschätzt werden:

Tabelle 7. Zusammensetzung des Outputs aus der Aufbereitung gemischter Bau- und Abbruchabfälle [eigene Abschätzung]

Fraktionen	Ma.-%
Fe-Metalle	5
PPK	3
Kunststoffe	2
Holz	27
Mineralien	26
„brennbare Abfälle“	37

### Sperrmüllaufbereitungsanlagen

Für die Abschätzung des Outputs aus Sperrmüllaufbereitungsanlagen dienen Angaben aus Berlin und Hamburg [IFEU 2012, Öko-Institut 2008]. Beide Quellen weisen für die nicht wertstofforientiert arbeitenden Anlagen einen Fe-Metallanteil von ca. 5 Ma.-% aus. Der Anteil für die energetischen Verwertung liegt zwischen 90 und 95 Ma.-%, wobei in Berlin im Jahr 2012 rund 84 Ma.-% zu Ersatzbrennstoffen aufbereitet und 10 Ma.-% als Altholz separiert wurden, während in Hamburg die Aufteilung bei 50 Ma.-% EBS und 40 Ma.-% Altholz lag. Für die Abschätzung des Outputs aus Sperrmüllaufbereitungsanlagen wird folgender Ansatz gewählt:

Tabelle 8. Zusammensetzung des Outputs der Sperrmüllaufbereitung [IFEU 2012, Öko-Institut 2008].

Fraktionen	Ma.-%
Fe-Metalle	5
PPK und Kunststoffe	3
Holz	25
„brennbare Abfälle“	67

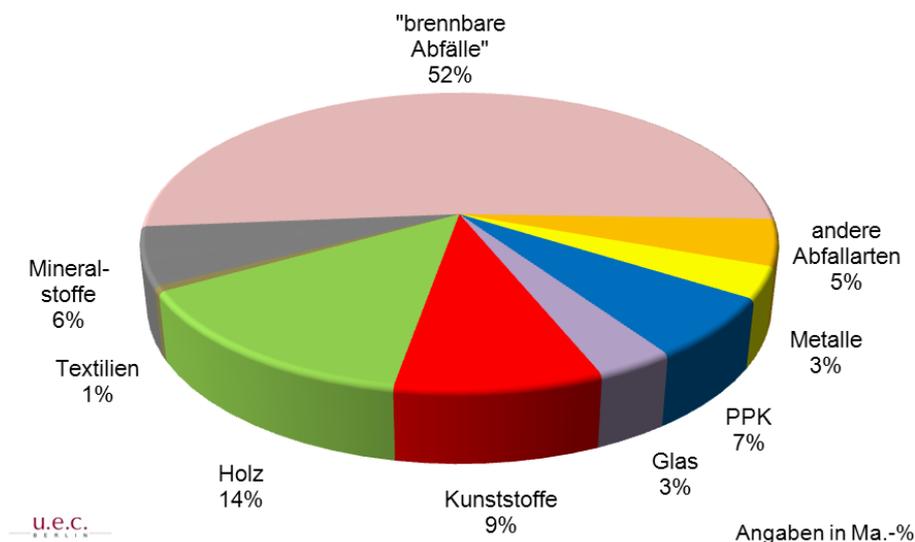
## Sortieranlagen für biologische Abfälle

Die Statistik weist sowohl im In- als auch im Output biologisch abbaubare Abfälle aus. Diese Abfälle werden nicht in Sortieranlagen für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle aufbereitet, da dieses zu einer Verunreinigung der anderen Fraktionen und somit zu Qualitätseinbußen führen würde. Aus diesem Grund werden die statistischen Angaben um diese Abfälle bereinigt.

Anhand der oben getroffenen plausibilisierten Annahmen wurde abschließend eine Bereinigung der statistischen Angaben zum Gesamtoutput der Sortieranlagen vorgenommen (Anhang 14). Im Ergebnis dieses Vorgehens verringert sich die Outputmenge von rund 23,3 Mio. Mg im Jahr 2010 auf rund 6,2 Mio. Mg. Sortieranlagen wurden im Jahr 2010 nur eine Menge von 2,87 Mio. Mg an gemischten gewerblichen Abfällen zugeführt, die Differenzmenge in Höhe von 3,33 Mio. Mg muss also auf andere Inputstoffe entfallen.

Dafür spricht auch die Zusammensetzung der 6,2 Mio. Mg/a Abfall. Diese Menge setzt sich zu 22 Ma.-% aus den Fraktionen Metalle, PPK, Altglas und Kunststoffe sowie zu 57 Ma.-% aus „brennbaren Abfällen“ zusammen. Der Holzanteil von 14 Ma.-% und der Anteil der Mineralstoffe von 6 Ma.-% sind jedoch untypisch für den Output aus der Verarbeitung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle.

Abbildung 25: Bereinigter Output der Sortieranlagen 2010 auf Basis statistischer Angaben



Zusammenfassend ist festzuhalten, dass aus der bundesweiten Statistik weder unmittelbar noch durch die oben dokumentierten Korrekturrechnungen verlässliche Daten zu den Stoffströmen aus der Sortierung ausschließlich gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle entnommen werden können.

Für die Belange dieser Untersuchung musste deshalb ein anderer Weg beschritten werden, der nachfolgend dargestellt wird.

## 9.2 Erstbehandlung in Sortieranlagen - Ermittlung der Abfallströme anhand der durchgeführten Anlagenbilanzierungen

Damit alle Varianten auf der identischen Datenbasis in Bezug auf die Massenströme und die Zusammensetzung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle beruhen, werden einheitlich die Ergebnisse der Anlagenbilanzierungen zugrunde gelegt, da diese Daten die erforderliche Informationstiefe bieten. Somit basiert die Modellierung auf folgenden Daten:

- ▶ Ergebnisse von vier Anlagenbilanzierungen, die im Jahr 2013 durchgeführt wurden. Alle in der jeweiligen Sortieranlage erzeugten Produkte (Wertstoffe, „brennbare Abfälle“) wurden im laufenden Betrieb beprobt und anhand eines Sortierkataloges manuell in Einzelbestandteile (12 Stoffgruppen mit 34 Einzelfraktionen) sortiert.
- ▶ Ergänzend liegt eine weitere Sortieranalyse aus dem Jahr 2012 mit Daten zu 12 Stoffgruppen vor, die aufgrund des geringeren Informationsgehaltes (keine Ergebnisse für Einzelfraktionen) jedoch nur für ausgewählte Aspekte in die Auswertung einbezogen wurde.

Hinweis: Im Folgenden wird auch auf die verfahrenstechnischen Kennzahlen Ausbeute, Selektivität und Reinheit Bezug genommen, um die Effizienz der Sortieranlagen zu beschreiben. Diese Kennzahlen sind wie folgt definiert:

- ▶ Unter der Ausbeute wird der mengenmäßige Anteil einer aussortierten Fraktion am Gesamt-massenstrom verstanden. So werden in einer aussortierten Fe-Metallfraktion aufgrund unvollkommener Trennleistungen neben der eigentlichen Stofffraktion (Fe-Metalle) auch immer fraktionsfremde Bestandteile (Störstoffe - z. B. PPK, Kunststoffe, Organik, Feinfraktion) gefunden. Hohe Ausbeuten gehen oft zu Lasten der Produktqualität, da der Störstoffanteil steigt. So können für aussortierte Fraktionen auch Ausbeuten > 100 % ermittelt werden.
- ▶ Die Selektivität gibt an, welcher Anteil einer Stofffraktion (Fe-Metalle) vom gesamten Input des jeweiligen Stoffes in die aussortierte Fraktion gelangt. Besser als die Ausbeute, die nur Mengenverhältnisse wiedergibt, ohne die Produktqualität zu berücksichtigen, ist daher die Selektivität als Kenngröße für den verfahrenstechnischen Wirkungsgrad geeignet [Urban 1983].
- ▶ Mit Reinheit wird der Anteil der erwünschten Stofffraktion an der aussortierten Fraktion bezeichnet.

Die obigen drei Begriffe werden anhand des nachstehenden Beispiels kurz erläutert.

Tabelle 9. Erläuterndes Beispiel für Ausbeute, Selektivität und Reinheit einer Stofffraktion

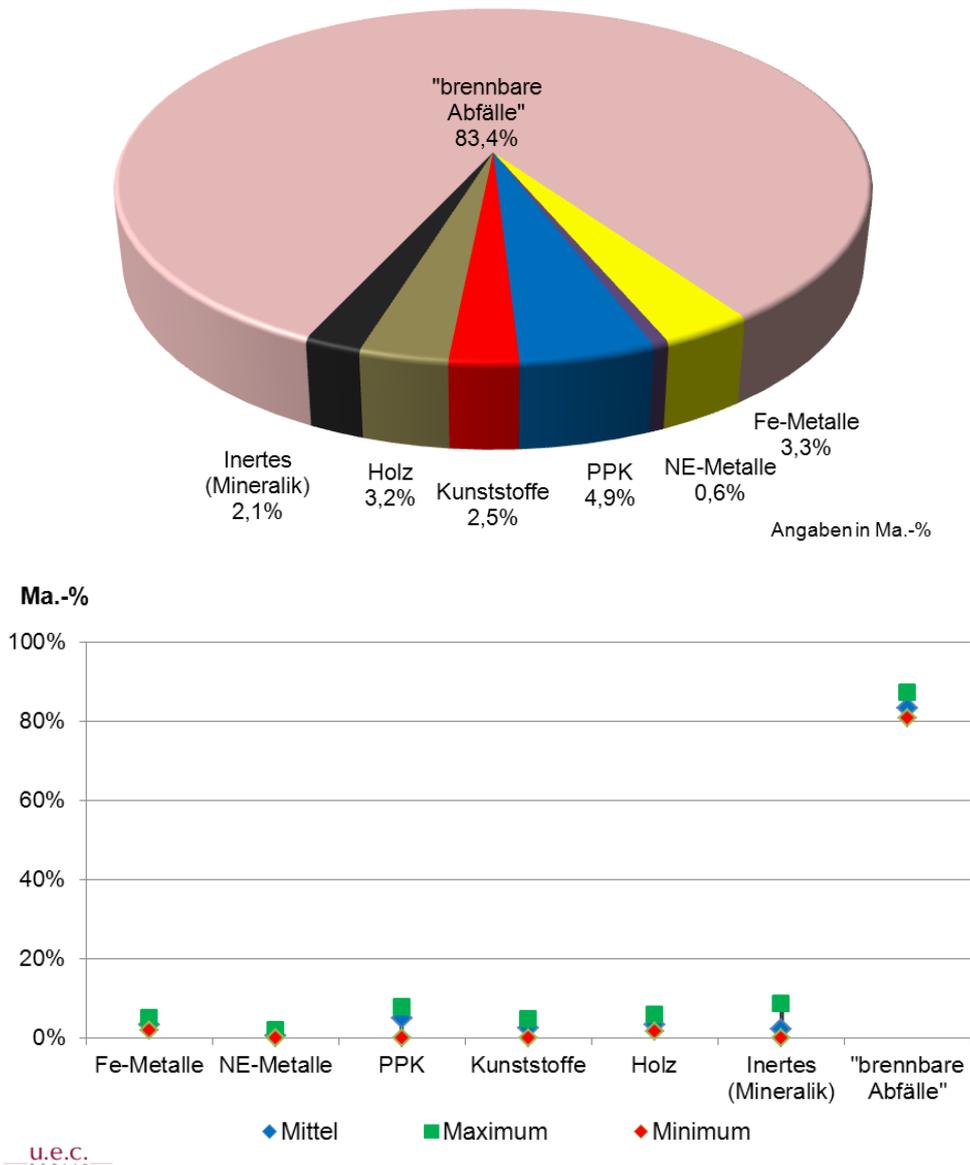
Fe-Metallgehalt im Inputmaterial:	(a)	50 kg
mittels Fe-Metallabscheider abgetrennte Fe-Metallfraktion (Fe-Metalle und Störstoffe):	(b)	63 kg
Fe-Metalle in der abgetrennten Fe-Metallfraktion	(c)	45 kg
Ausbeute	$(b) / (a)$	126 %
Selektivität	$(c) / (a)$	90 %
Reinheit	$(c) / (b)$	71,4 %

### 9.2.1 Output der Sortieranlagen

Die Untersuchung der Sortieranlagen zeigte, dass nur ein geringer Anteil des theoretischen Wertstoffpotentials dem Recycling zugeführt wurde.

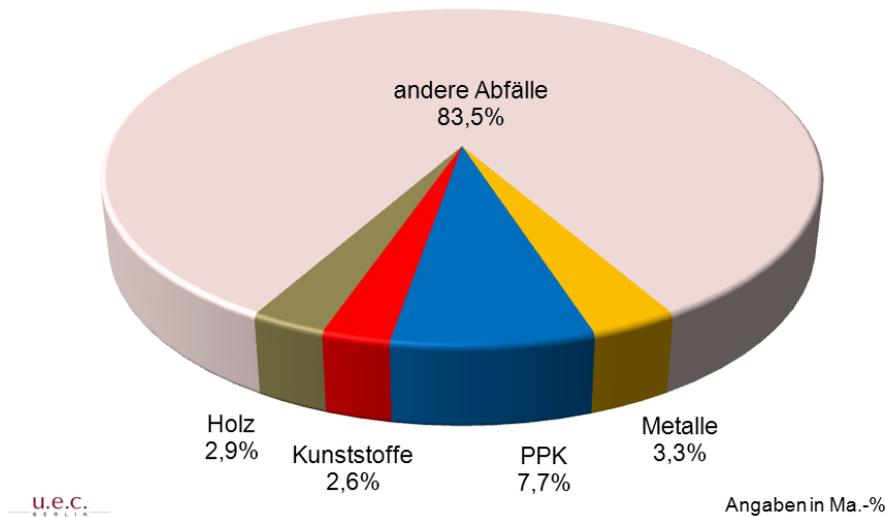
Nach Angaben der Betreiber werden aus wirtschaftlichen Gründen in den untersuchten Sortieranlagen in erster Linie „brennbare Abfälle“ in unterschiedlichen Qualitäten erzeugt; der Anteil liegt anlagenspezifisch zwischen 80 und 87 Ma.-%, im Mittel bei 83,4 Ma.-%. Als Sekundärrohstoffe werden Fe- Metalle, Aluminium und sonstige NE-Metalle, PPK, verschiedene Kunststoffarten und Holz sowie Mineralik aussortiert. Die aussortierten Stofffraktionen weisen zudem keine 100%ige Reinheiten auf, sondern sind noch in unterschiedlichem Maß mit Störstoffen versetzt (siehe hierzu Kapitel 9.2.5).

Abbildung 26: Mittelwert und Streubreite der Zusammensetzung des Outputs von Sortieranlagen 2013 (n=5)



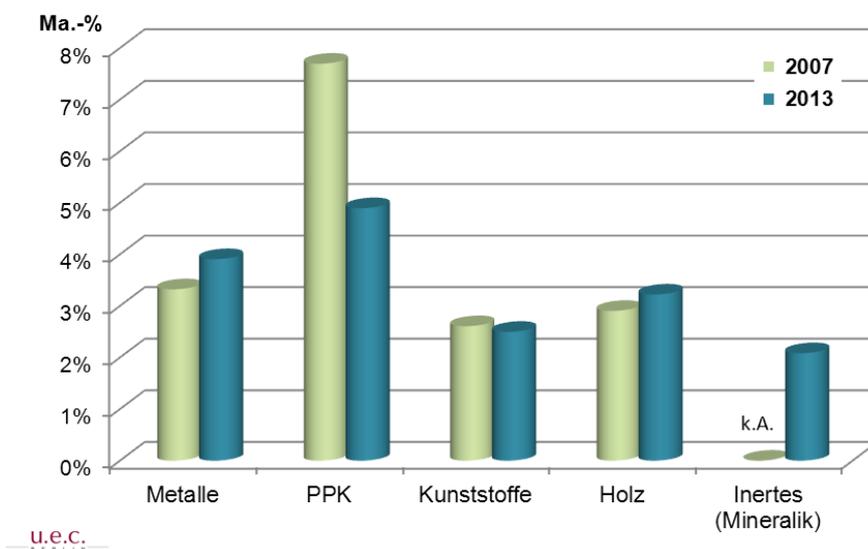
Zur Plausibilisierung und Verifizierung dieser Daten können die Untersuchungsergebnisse für das Jahr 2007 herangezogen werden, die auf der Basis von 43 Datensätzen (Fragebogenerhebung bei Anlagenbetreibern und Anlagenbilanzen) gründen. Danach wurden im Jahr 2007 rund 16,5 Ma.-% des Input als Metalle, PPK, Kunststoffe und Holz in den Sortieranlagen aussortiert [Dehne et al. 2011].

Abbildung 27: Mittlere Zusammensetzung des Outputs von Sortieranlagen 2007 [Dehne et al. 2011]



Der Vergleich der beiden Datensätze zeigt nur vergleichsweise geringe Unterschiede in Bezug auf die dem Recycling zugeführte Massenanteile. Im Detail ist vor allem für die Stoffgruppe PPK im Jahre 2013 ein geringerer aussortierter Massenanteil festzustellen.

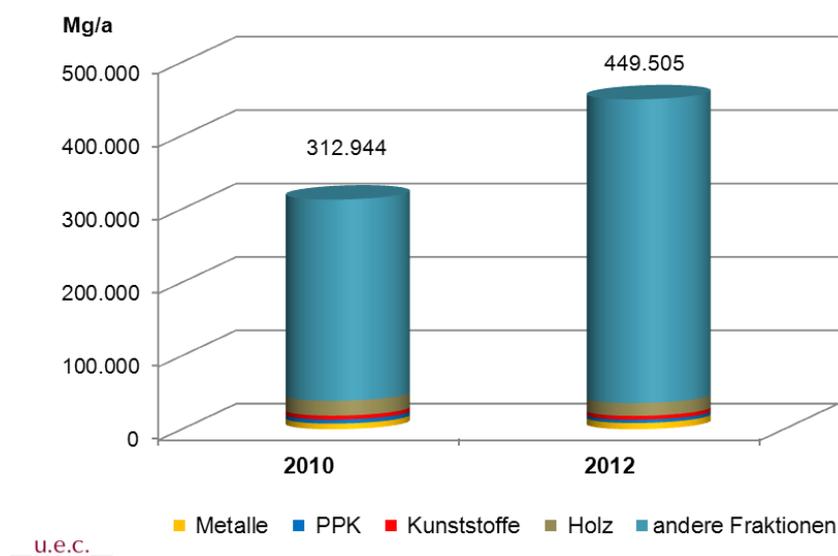
Abbildung 28: Gegenüberstellung der in Sortieranlagen aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen abgetrennten Mengen an Sekundärrohstoffen in den Jahren 2007 und 2013



Weitere Ergebnisse zum Anteil der von Sortieranlagen aussortierten Wertstoffe können Bilanzauswertungen für Berliner und Brandenburger Vorbehandlungsanlagen für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle und gemischte Bau- und Abbruchabfälle für die Jahre 2010 und 2012 [IFEU 2012, IFEU 2013] entnommen werden. Zwar ist der Input dieser Anlagen (gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle und gemischte Bau- und Abbruchabfälle) mit dem Input nur aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen nicht direkt vergleichbar. Dennoch zeigen auch die

Berliner Untersuchungen, dass nur geringe Anteile der Wertstofffraktionen Metalle, PPK, Kunststoffe und Holz aussortiert werden. Trotz eines Input-Mengenanstiegs werden im Jahr 2012 absolut und prozentual weniger Wertstoffe (Metalle, PPK, Kunststoffe und Holz) aussortiert. Wurden im Jahr 2010 im Mittel über die untersuchten Anlagen noch 12,4 Ma.-% dem Recycling zugeführt, sind es 2012 nur noch 7,9 Ma.-%. Obwohl diese Werte sicherlich durch die gemeinsame Betrachtung mit den gemischten Bau- und Abbruchabfällen beeinflusst werden, unterstützen sie den bereits zuvor aufgezeigten Trend, dass das vorhandene Wertstoffpotential nur unzureichend genutzt wird.

Abbildung 29: Output von Vorbehandlungsanlagen für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle und gemischte Bau- und Abbruchabfälle Berlin 2010 und 2012 [IFEU 2012, IFEU 2013]



Auch die Untersuchungen in Bayern im Jahr 2010/2011 zeigen, dass mit der Aufbereitung der gemischten Gewerbeabfälle zumeist das Ziel verfolgt wurde, heizwertreiche Fraktionen zur energetischen Verwertung zu gewinnen. Der Anteil der aussortierten Stofffraktionen lag oftmals unter 10 Ma.-% und maximal bei 20 Ma.-% [LfU Bayern 2013] bezogen auf den Input. Ursache dafür ist nicht ein zu geringes Wertstoffpotential. Als Grund für die nicht genügende Auftrennung „gaben die Entsorgungsfachbetriebe wirtschaftliche Gründe an; vor allem der zum Zeitpunkt der Untersuchung von den Verbrennungskapazitäten (EBS-Kraftwerke, Müllverbrennungsanlagen) ausgehende Preisdruck und die zu erlösenden Sekundärrohstoffpreise ließen aus Kostengründen eine weitere Aufbereitung, sprich Auftrennung der Gewerbeabfälle in die Wertstofffraktionen nicht zu.“ [LfU Bayern 2013].

Zur abschließenden Modellierung der Stoffströme für die Erstbehandlung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle werden die plausibilisierten Daten gemäß Abbildung 26 herangezogen und auf die Gesamtmenge der den Sortieranlagen zugeführten Abfälle herangezogen. Auf der Basis dieser mittleren prozentualen Wertstoffentnahme wird angenommen, dass im Jahr 2010 knapp 0,4 Mio. Mg verschiedener Stofffraktionen abgetrennt und rund 2,18 Mio. Mg als „brennbare Abfälle“ in die energetische Verwertung gelenkt werden.

Tabelle 10. Stoffströme der Sortieranlagen im Jahr 2010

Fraktion	Mittlere Stoffstromverteilung	Stoffstrom aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen
	Ma.-%	1.000 Mg
Fe-Metalle*	3,3	86,92
NE-Metalle*	0,6	15,14
PPK*	4,9	127,85
Kunststoffe*	2,5	65,23
Holz*	3,2	84,15
Mineralik*	2,1	54,42
„brennbare Abfälle“	83,4	2.178,38
Summe	100,0	2.612,10

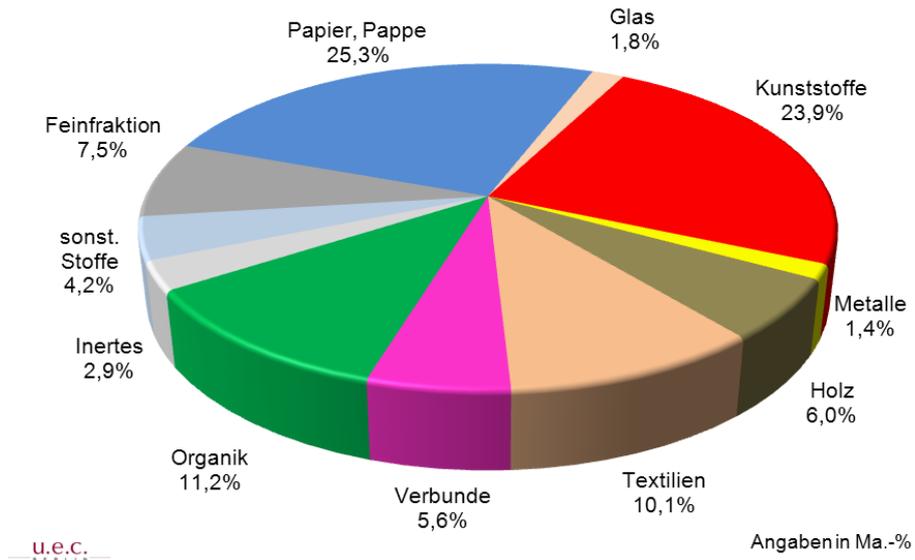
\* incl. Störstoffe

Die nur geringe Abtrennung von Wertstofffraktionen ist nicht auf ein mangelndes Wertstoffpotential (siehe dazu die Auswertungen in Abschnitt 9.2.2) oder auf mangelnde technische Möglichkeiten zurückzuführen. Vielmehr benennen die Betreiber von Sortieranlagen vor allem wirtschaftliche Gründe. So werden, um variable Betriebskosten zu reduzieren, beispielsweise vorhandene Sortierplätze nicht besetzt, Trennaggregate abgeschaltet und vorhandene Umfahrungen von Aufbereitungsaggregaten genutzt.

### 9.2.2 Zusammensetzung „brennbarer Abfälle“ im Output untersuchten Sortieranlagen

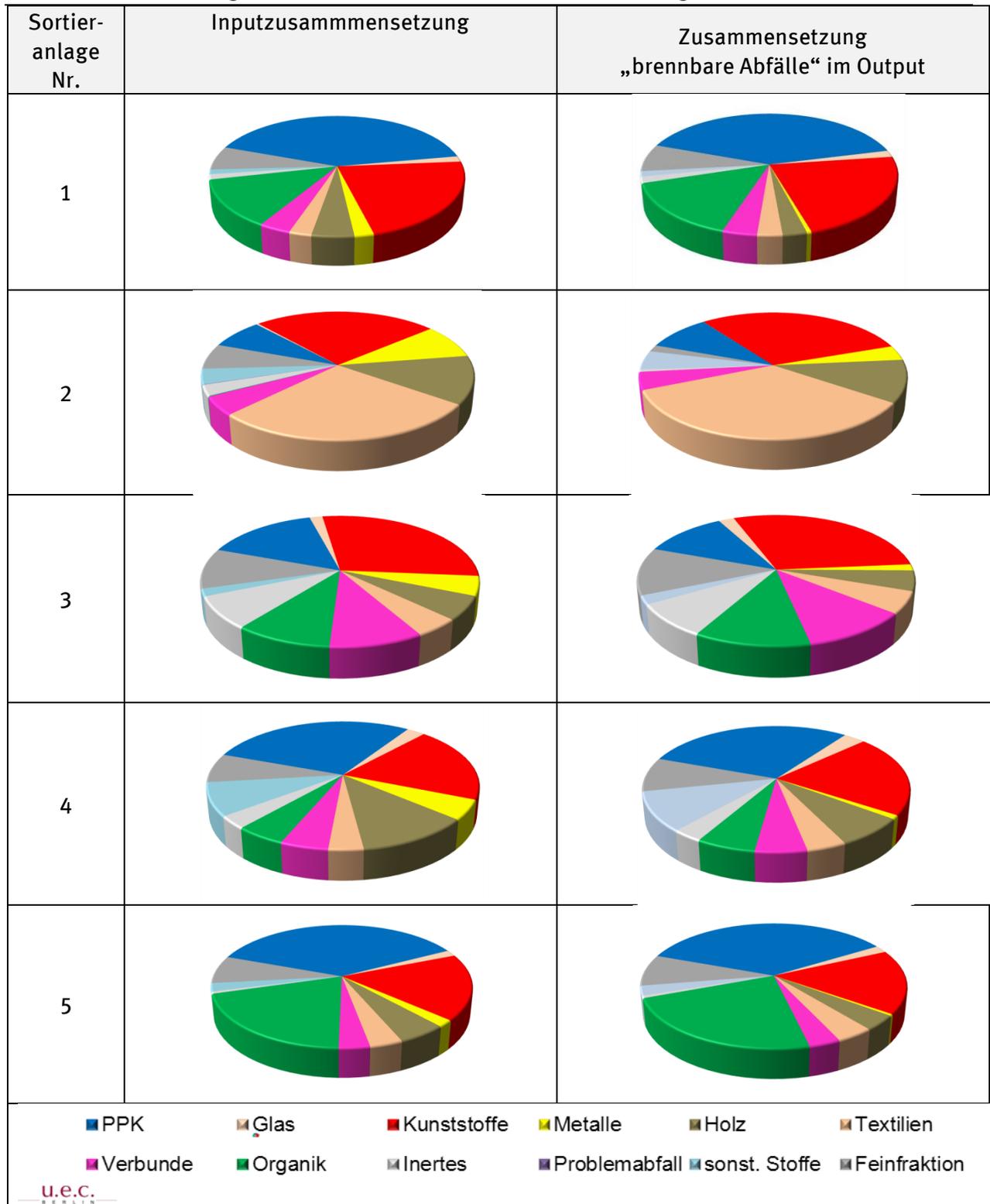
Die Zusammensetzung der „brennbaren Abfälle“ im Output unterscheidet sich nur marginal von der Zusammensetzung des Anlageninputs. Der Hauptanteil entfällt mit knapp 50 Ma.-% auf die PPK- und die Kunststoffanteile.

Abbildung 30: Mittlere Zusammensetzung der „brennbaren Abfälle“ im Output von Sortieranlagen 2013 (n=5)



Dass die Zusammensetzung der „brennbaren Abfälle“ im Output mit der Zusammensetzung des jeweiligen Anlageninputs vergleichbar ist, zeigt nicht nur die obige mittlere Zusammensetzung. Auch die Gegenüberstellungen der Zusammensetzung des Inputs und der Zusammensetzung der „brennbaren Abfälle“ im Output der vorliegenden fünf Anlagenbilanzen kommen zu diesem Ergebnis (Abbildung 31).

Abbildung 31: Gegenüberstellung der Inputzusammensetzung und der Zusammensetzung der erzeugten „brennbaren Abfälle“ der einzelnen Anlagenbilanzen 2013



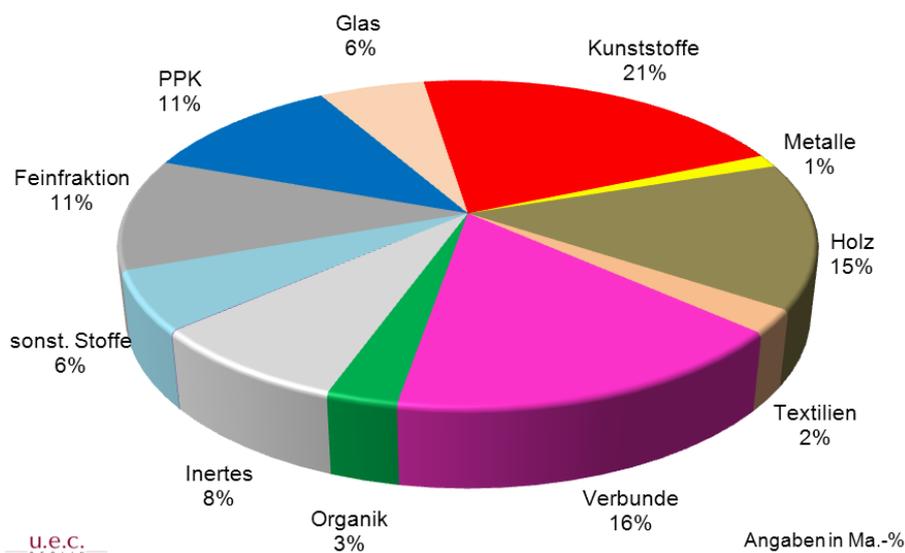
Bei der Untersuchung der Gewerbeabfallgemische in Bayern 2010/2011 wurde der Output von sechs Sortieranlagen betrachtet, von denen drei nicht mitbetrachtet werden können:

- Bei zwei Sortieranlagen handelte es sich um Einfachstanlagen, sog. „Baggersortierungen“.

- Bei einer weiteren Sortieranlage bestand der Input neben gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen auch aus gemischten Bau- und Abbruchabfällen.

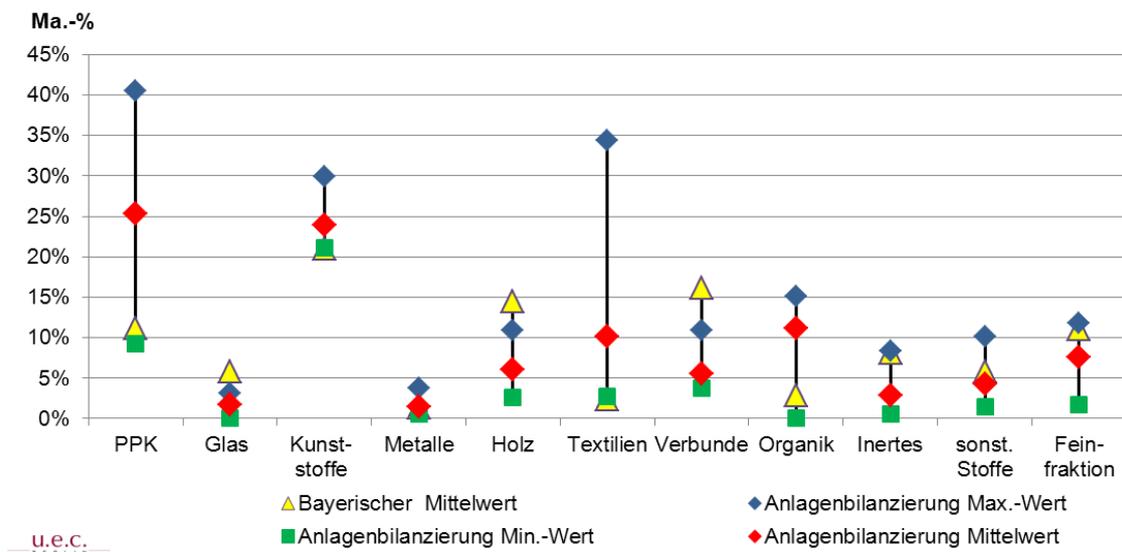
Ferner ist zu beachten, dass die Zusammensetzungen der einzelnen Stofffraktionen der während des Projektes durchgeführten Anlagenbilanzierungen und die der bayerischen Untersuchung aufgrund unterschiedlicher Sortierkataloge nicht direkt vergleichbar sind. So werden beispielsweise Metallverbunde nicht der Metallfraktion, sondern der Fraktion „Verbunde“ zugeordnet. Im Ergebnis zeigt sich, dass die Zusammensetzung der „brennbaren Abfälle“ von denen der Anlagenbilanzierungen abweichen.

Abbildung 32: Mittlere Zusammensetzung der „brennbaren Abfälle“ im Output in Bayern 2010/2011 (n=3) [LfU Bayern 2013]



Diese Differenzen können in der unterschiedlichen Inputzusammensetzung begründet sein, für die eine Analyse vorliegt (Abbildung 16). Wie schon bei der Zusammensetzung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle festgestellt, liegen die im Rahmen der bayerischen Untersuchung ermittelten Werte oftmals außerhalb der Streubreiten der Anlagenbilanzierungen. Aufgrund fehlender Informationen zu den Massenanteilen der aussortierten Stofffraktionen sind Rückschlüsse auf den Input der betrachteten drei Sortieranlagen nicht möglich.

Abbildung 33: Gegenüberstellung des Mittelwertes der bayerischen Untersuchung und der Ergebnisse der Anlagenbilanzierungen für „brennbare Abfälle“ [LfU Bayern 2013, eigene Berechnungen]



Für die Verwertung der „brennbaren Abfälle“ spielt deren Heizwert eine maßgebliche Rolle. Der Heizwert der „brennbaren Abfälle“ lässt sich anhand von Literaturangaben zu stoffspezifischen Heizwerten und Wassergehalten mit Hilfe nachstehender Formel überschlägig berechnen [Thomé-Kozmiensky 1985]:

$$Hu(FM)_{brennbarer\ Abfall} = \frac{\sum_i m_i * \left[ \frac{(100 - w_i) * Hu(TS)_i}{100} - 24,41 * w_i \right]}{m_{ges}}$$

wobei:

$Hu(FM)_{brennbarer\ Abfall}$  Heizwert der Feuchtmasse des „brennbaren Abfalls“

$Hu(TS)_i$  Heizwert der Trockensubstanz der Fraktion i

$w_i$  Wassergehalt der Stofffraktion i

$m_i$  Masse der Stofffraktion i

$m_{ges}$  Gesamtmasse „brennbarer Abfall“

$i$  Stofffraktion (PPK, Glas, Kunststoffe, Metalle, Holz etc.)

24,41 Verdampfungsenthalpie des Wassers

Die mit Literaturdaten für den Wassergehalt und den stoffspezifischen Heizwerten der Trockenmasse berechneten Heizwerte der Originalmasse bzw. Frischmasse zeigt die folgende Tabelle.

Tabelle 11. Berechnung des mittleren Heizwertes der „brennbaren Abfälle“ der Anlagenbilanzierung 2013 [Helftewes 2012, Öko-Institut/HTP 2012, Löschau 2006, IAA / Intecus 2011]

Stofffraktion	Anteil im Brennstoff gem. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. Ma-%	Wassergehalt Gew.-%	stoffspezifischer Heizwert (Hu) kJ/kg TS	berechneter Heizwert (Hu) kJ/kg FM
PPK	25,3	20,0	17.000	13.100
Glas	1,8	5,0	0	0
Kunststoffe	23,9	20,0	44.000	34.700
Metalle	1,4	5,0	0	0
Holz	6,0	15,0	15.000	12.400
Textilien	10,1	20,0	20.000	15.500
Verbunde	5,6	20,0	21.000	16.300
Organik	11,2	40,0	10.000	5.000
Inertes	2,9	10,0	0	0
Problemabfall	0,0	10,0	0	0
sonst. Stoffe	4,2	10,0	0	0
Feinfraktion	7,5	30,0	11.000	7.000
berechneter Heizwert der „brennbaren Abfälle“				15.900

Der mittlere Heizwert der „brennbaren Abfälle“ der fünf Sortieranlagen liegt bei knapp 16.000 kJ/kg FM. Die zusätzlich durchgeführten Berechnungen mit den Einzeldaten der Sortieranlage ergeben eine Bandbreite für den Heizwert der „brennbaren Abfälle“ zwischen 13.800 und 19.100 kJ/kg FM.

Abbildung 34: Beispiele „brennbarer Abfälle“ 2013 [Fotos u.e.c. Berlin]



### 9.2.3 Ausbeute der Stofffraktionen der Anlagenbilanzierungen

Ausgewählte Stofffraktionen<sup>23</sup> (PPK, Metalle, Kunststoffe und Holz) werden in den untersuchten Sortieranlagen mechanisch und/oder händisch aussortiert. Die Ausbeute ist für die Metallfraktion mit 87 % am höchsten, die geringste Ausbeute hat die Kunststofffraktion mit 11 %.

Tabelle 12. Ausbeuten der Stofffraktionen

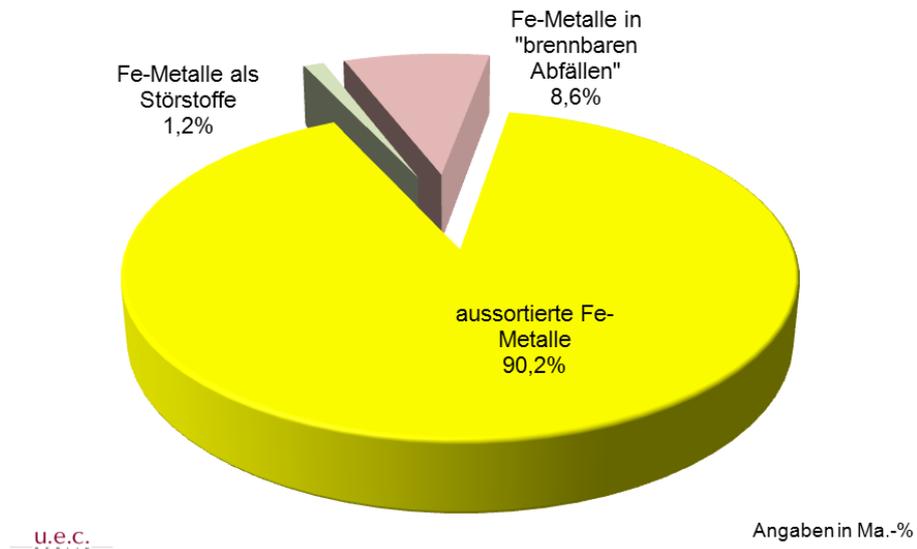
Stofffraktion	mittlere Ausbeute	Maximalwert	Minimalwert
Metalle	87%	100%	76%
PPK	19%	40%	0%
Kunststoffe	11%	16%	0%
Holz	40%	58%	27%

<sup>23</sup> Die aussortierten Stofffraktionen werden auf der Basis der vier Anlagenbilanzierungen (n=4) detaillierter betrachtet. Werden Stofffraktionen in einer Sortieranlage weder mechanisch noch händisch aussortiert, so reduziert sich der Stichprobenumfang in diesen Fällen auf drei Sortieranlagen.

### 9.2.4 Selektivität der Stofffraktionen der Anlagenbilanzierungen

Von den Fe-Metallen im Input werden rund 90 Ma.-% aussortiert, knapp 9 Ma.-% verbleiben in den „brennbaren Abfällen“ und ca. 1 Ma.-% wird als Störstoff/Verunreinigung mit anderen Fraktionen ausgetragen.

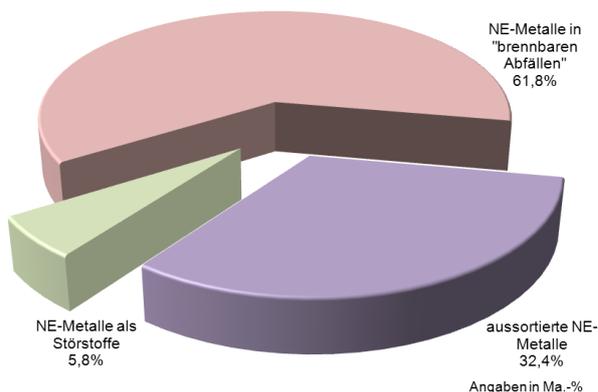
Abbildung 35: Verbleib der Fe-Metalle in den Outputfraktionen (n=4)



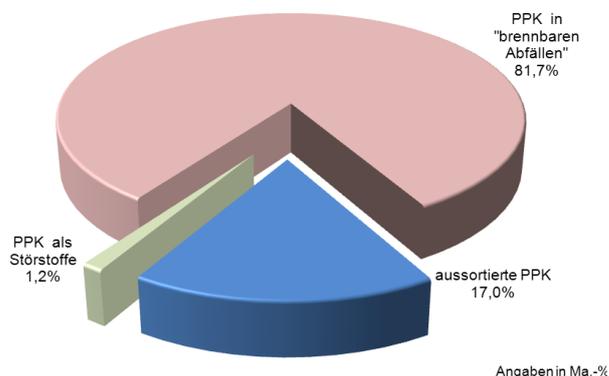
Von den Stofffraktionen NE-Metalle, PPK, Kunststoffe und Holz wird weit weniger aussortiert, der überwiegende Anteil verbleibt in den „brennbaren Abfällen“. Bei den NE-Metallen werden nur rund 32 Ma.-% aussortiert, knapp 62 Ma.-% verbleiben in den „brennbaren Abfällen“. Für Holz zeigt sich ein ähnliches Bild. Vom PPK-Input werden noch 17 Ma.-% aussortiert, bei Kunststoffen sind es nur knapp 9 Ma.-%.

Abbildung 36: Verteilung der Stofffraktionen NE-Metalle, PPK, Kunststoffe und Holz auf die Outputfraktionen (n=4)

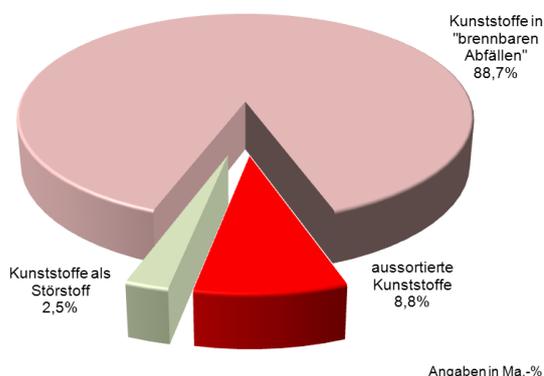
NE-Metalle:



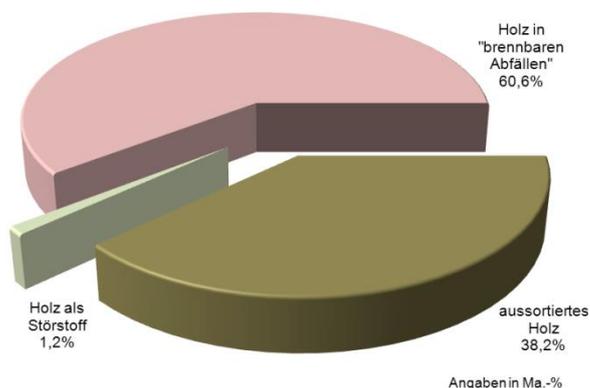
PPK:



Kunststoffe:



Holz:



9.2.5 Reinheit der aussortierten Stofffraktionen der Anlagenbilanzierungen

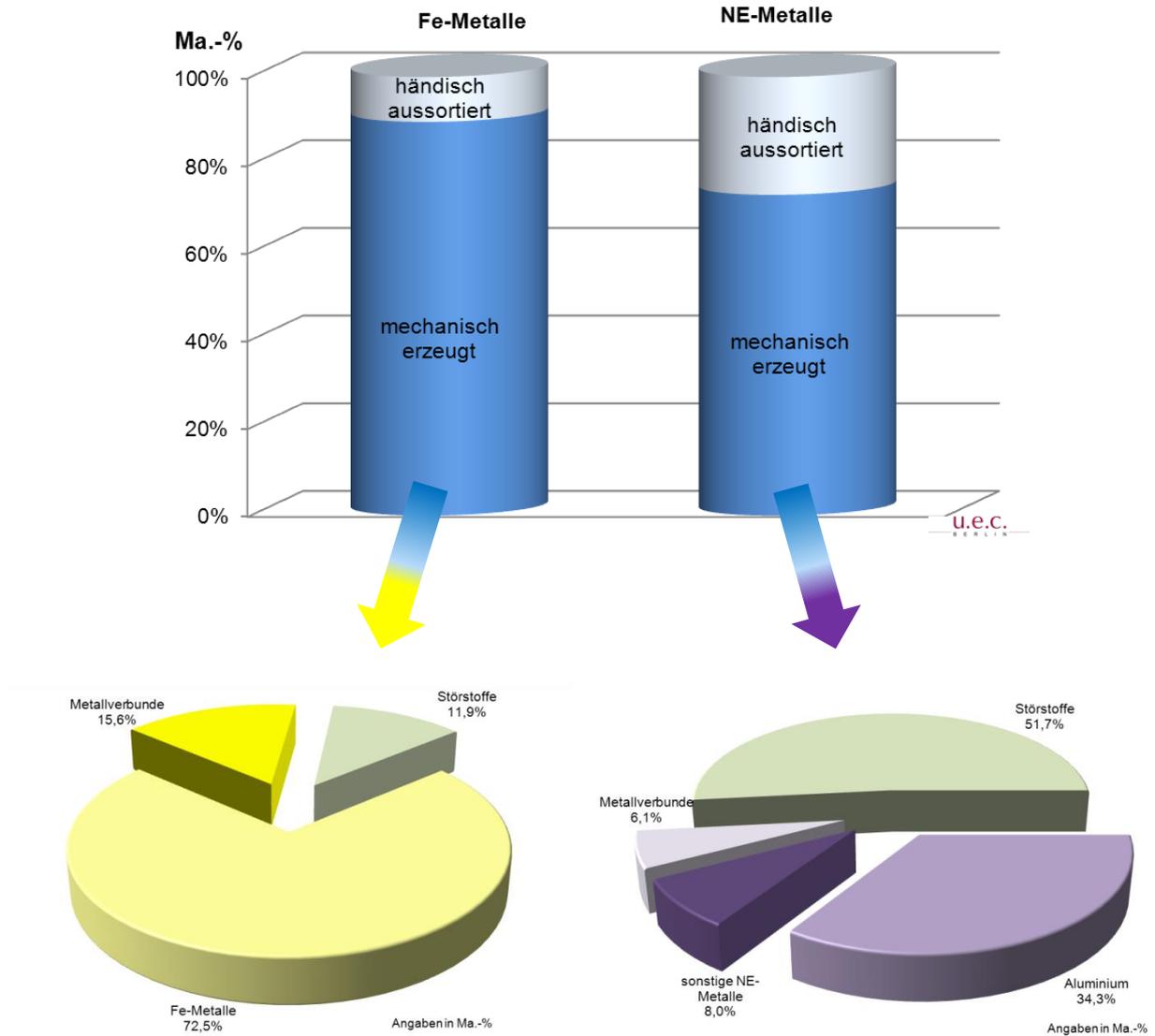
Die in den untersuchten Anlagen erzeugten Wertstofffraktionen beinhalten in unterschiedlichem Maße auch Anteile anderer Stoffe, die nachfolgend summarisch als Störstoffe bezeichnet werden. Die berechneten Reinheiten sind im Übrigen stark abhängig von verfahrenstechnischen Randbedingungen. Oft zu beobachten ist beispielsweise, dass Sortierplätze (auch zur Nachsortierung) nicht besetzt sind und das Betriebsregime auf einen möglichst hohen Stundendurchsatz ausgerichtet ist; dadurch kann dann die z.B. für eine effiziente NIR-Trennung erforderliche Vereinzelnung nicht im nötigen Umfang vorgenommen werden.

Im Einzelnen stellen sich die berechneten Reinheiten wie folgt dar.

Fe- und NE-Metalle

Metalle werden in allen untersuchten Sortieranlagen aus dem Materialstrom entfernt. Rund 90 Ma.-% der aussortierten Fe-Metalle werden mittels Magnetscheider abgetrennt, ferner werden größere Metallteile händisch aussortiert. Während die manuell erzeugte Fraktion nur aus Fe-Metallen und Metallverbunden besteht, enthält die mechanisch abgetrennte Fraktion neben den Fe-Metallen und den Metallverbunden noch rund 12 Ma.-% Störstoffe (u.a. PPK, Kunststoffe, Feinanteile).

Abbildung 37: Zusammensetzung der mechanisch erzeugten Fe- und NE-Metalloutputfraktionen (n=4)



Für die Abscheidung der NE-Metalle kommen Wirbelstromscheider zum Einsatz, zudem werden diese Sekundärrohstoffe im Gegensatz zu der Fe-Metallfraktion in den Sortieranlagen vielfach händisch in die Fraktionen Aluminium, VA-Stahl, Kabel und sonstige Metalle mit einer Reinheit von 100 Ma.-% aussortiert. Die Reinheit der mechanisch abgetrennten NE-Metallfraktion beträgt im Mittel nur 48 Ma.-%.

Die nachfolgenden Bilder verdeutlichen den Grad der Verunreinigungen bei mechanisch aussortierten Fe- und NE-Metallen.

Abbildung 38: Beispiele aussortierter Fe- und NE-Metalle [Fotos u.e.c. Berlin]

mechanisch abgetrennte Fe-Metalle:



mechanisch abgetrennte NE-Metalle:



händisch aussortierte NE- Metalle



#### PPK

In einer untersuchten Sortieranlage wurde kein PPK aussortiert. In den anderen drei Anlagen werden zum einen Pappen und Kartonagen händisch aussortiert und zum anderen eine Mischpapierfraktion mechanisch mittels NIR-Trenner erzeugt. Die Reinheit der händisch aussortierten Fraktion (Pappen und Kartonagen) liegt im Mittel bei 96 %. Mechanisch abgetrennte PPK-Fraktionen sind demgegenüber erwartungsgemäß mit 35 Ma.-% Pappen/Kartonagen, knapp 15 Ma.-% Druckerzeugnissen und 11,5 Ma.-% Deinking geeigneten PPK bzw. ca. 28 Ma.-% Dein-

king ungeeigneten PPK sowie rund 11 Ma.-% Störstoffen (Kunststoffen, Holz oder Textilien) wesentlich inhomogener.

Abbildung 39: Zusammensetzung der PPK-Outputfraktion (n=3)

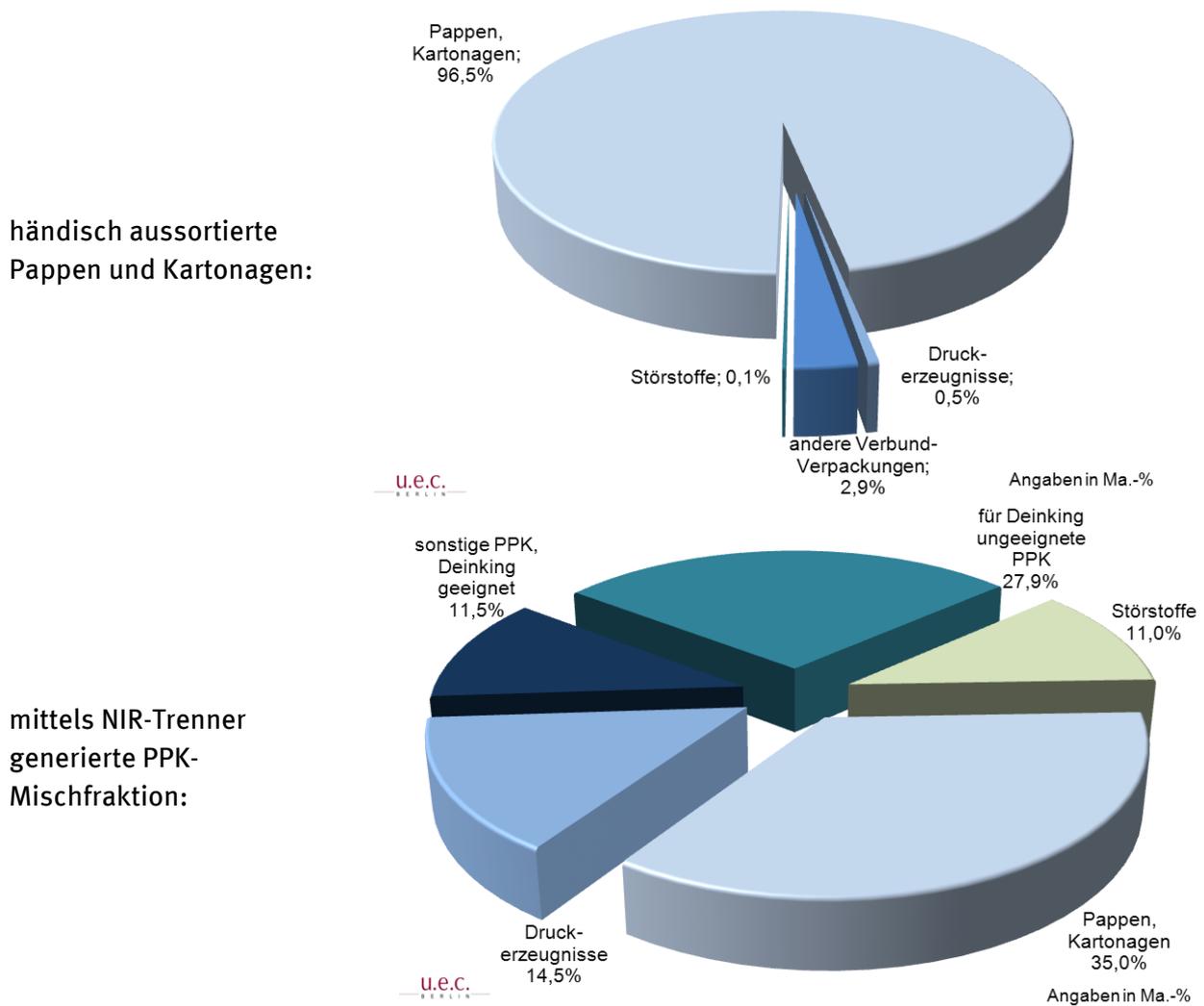


Abbildung 40: Beispiele aussortierter PPK-Fraktionen [Fotos u.e.c. Berlin]

mittels NIR abgetrenntes PPK:



manuell aussortierte Pappen und Kartonagen:



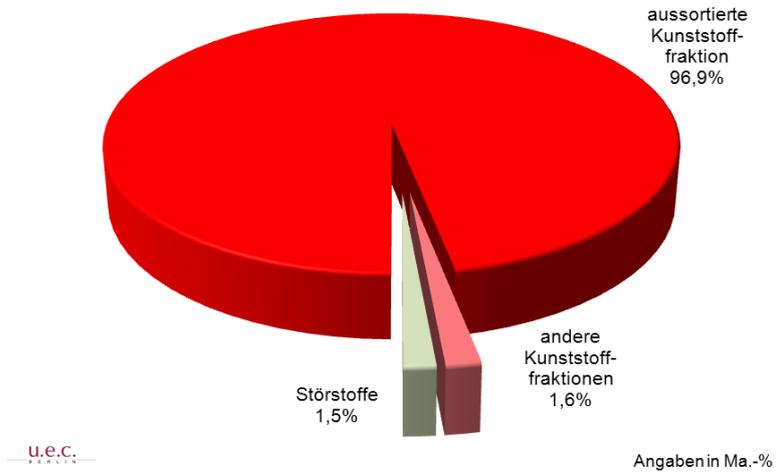
### Kunststoffe

Für die erzeugten Kunststofffraktionen zeigt sich ein vergleichbares Bild, wie auch schon bei der PPK-Fraktion. Händisch aussortierte Kunststoffe (Folien und Eimer) weisen eine hohe Reinheit

auf. Die mittels NIR-Trenner erzeugten Folienfraktionen hingegen haben einen Störstoffanteil von im Mittel 18 Ma.-%; hierbei handelt es sich hauptsächlich um PPK und um Verbundverpackungen.

Abbildung 41: Zusammensetzung der Kunststoffoutputfraktion (n=3)

händisch aussortierte Kunststofffraktion (Folien, Eimer):



mittels NIR-Trenner generierte Kunststoffoutputfraktion (Folien):

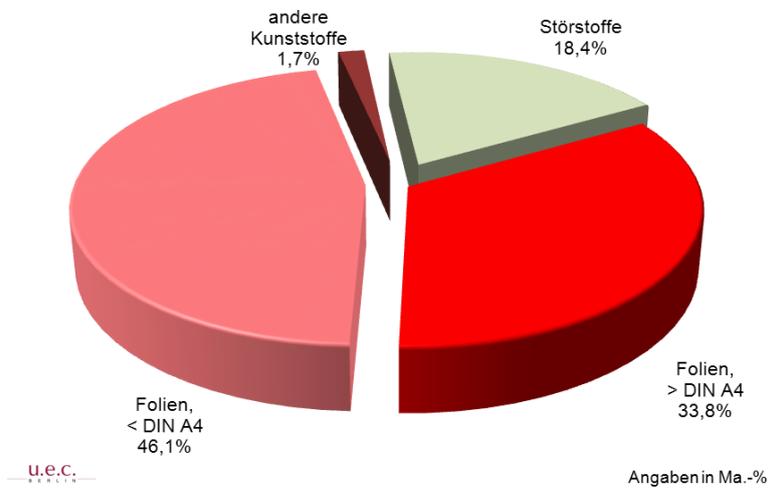


Abbildung 42: Beispiele aussortierter Kunststofffraktionen [Fotos u.e.c. Berlin]

mittels NIR abgetrennte Kunststofffolien:



mittels NIR abgetrennte Kunststofffolien\*:



manuell aussortierte Kunststofffolien:



manuell aussortierte Eimer:



\* nach manueller Nachsortierung

### Holz

Holz wird in allen vier Sortieranlagen aussortiert; hierbei handelt es sich überwiegend um sonstige behandelte Hölzer. Während der Störstoffanteil bei den händisch aussortierten Fraktionen bei ca. 1,3 Ma.-% liegt, steigt er bei der mittels NIR abgetrennten Fraktion auf ca. 14 Ma.-% an. Zu den Störstoffen gehören u.a. PPK, Kunststoffe und Organik.

Abbildung 43: Zusammensetzung der Holz-Outputfraktion (n=4)

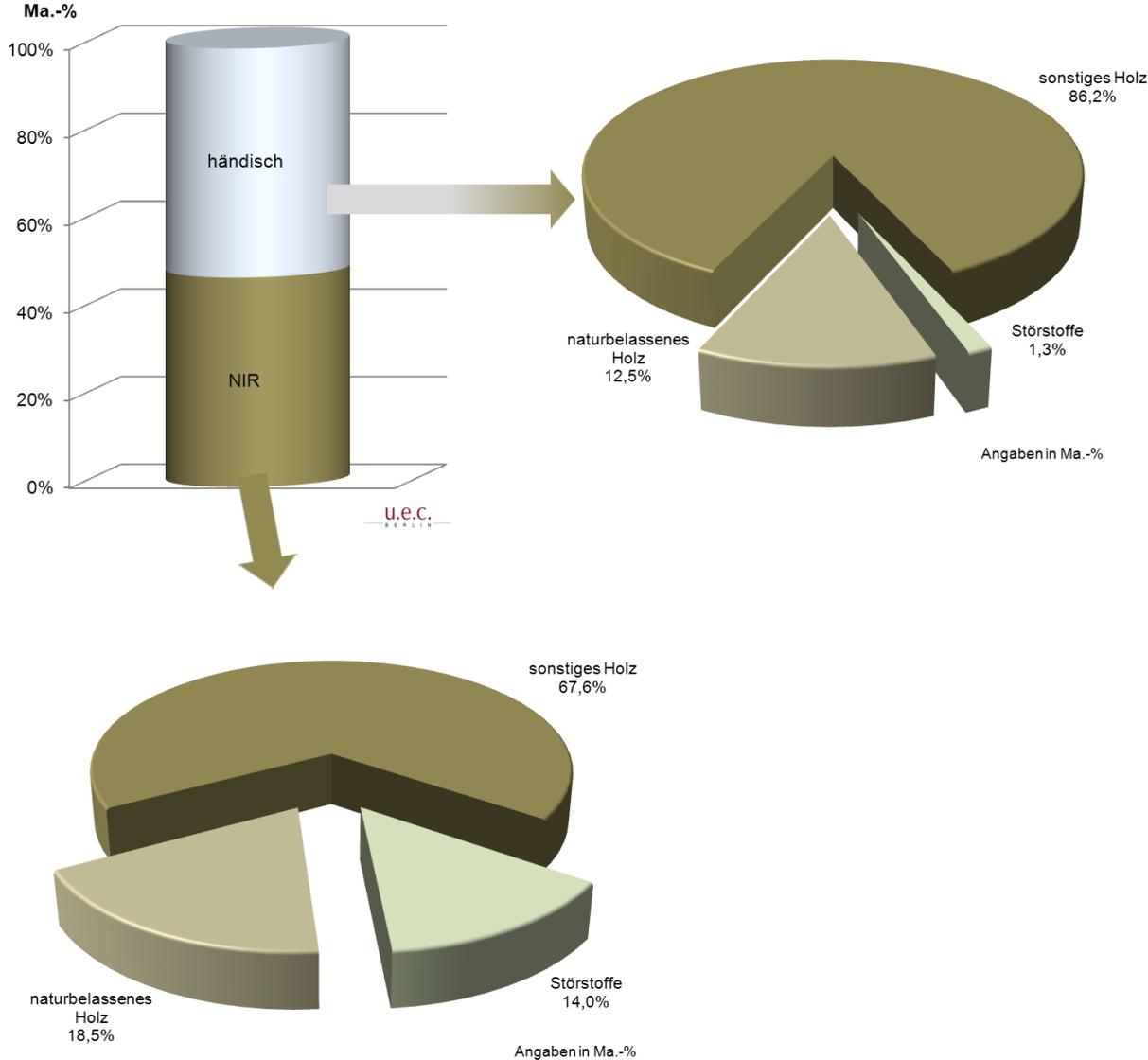


Abbildung 44: Beispiele aussortierte Holzfraktionen [Fotos u.e.c. Berlin]

mittels NIR abgetrenntes Holz:



manuell aussortiertes Holz:



### 9.3 Erstbehandlung in Ersatzbrennstoffaufbereitungsanlagen (EBS-Aufbereitungsanlagen)

Ersatzbrennstoffaufbereitungsanlagen werden vom Statistischen Bundesamt unter der Kategorie „Sonstige Behandlungsanlagen“ erfasst. In diese Kategorie fallen auch Schlacke- und Kabelaufbereitungsanlagen, Kunststoffverwertungsanlagen oder Produktionsanlagen, in denen Abfälle behandelt werden. Vom Gesamtabfallinput in „Sonstige Behandlungsanlagen“ in Höhe von 21,3 Mio. Mg im Jahr 2010 lassen sich mit 0,257 Mio. Mg nur 1,2 Ma.-% den gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen zuordnen. Aufgrund der Heterogenität dieser Kategorie ist eine Bereinigung der statistischen In- und Outputmengen der „Sonstigen Behandlungsanlagen“ nicht zielführend, so dass für die Ermittlung der Stoffstrommengen andere Daten herangezogen werden.

EBS-Aufbereitungsanlagen konditionieren unterschiedliche Inputmaterialien (Mono- oder Mischfraktionen) für den Einsatz in thermischen Verwertungsanlagen (Mitverbrennung von EBS in Zement- und Kohlekraftwerken; Monoverbrennung in EBS-Kraftwerken). In den EBS-Anlagen werden in erster Linie „brennbare Abfälle“ aus Erstbehandlungsanlagen eingesetzt, unvorbehandelte gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle und gemischte Verpackungen spielen, wie anhand der statistischen Zahlen in Kapitel 6 dargelegt, eine eher ungeordnete Rolle.

In EBS-Anlagen werden in erster Linie Metalle separiert. Hierfür werden mehrere Fe- und NE-Metallabscheider installiert, so dass Abscheidegrade für Fe-Metall von 99 Ma-% und für NE-Metalle von 95 Ma.-% erreicht werden. Brennbar Stofffraktionen wie PPK und Kunststoffe verbleiben in der Regel in den „brennbaren Abfällen“.

Ersatzbrennstoffkraftwerke stellen in Bezug auf die Stückigkeit, den Heizwert und den Schadstoffgehalt höhere Anforderungen an das Inputmaterial als Müllverbrennungsanlagen; auf diese Anforderungen hat sich der Lieferant einzustellen.

Tabelle 13. Beispielhafte Input-Anforderungen von EBS-Kraftwerken [Dehne et al. 2011]

Parameter	Rostfeuerung 1	Rostfeuerung 2	Rostfeuerung 3	Wirbelschicht
Stückigkeit*	100 % < 500 mm, 90 % < 300 mm	100 % < 1.000 mm	100 % < 500 mm, 90 % < 300 mm	100 % < 140 mm
Heizwert	12,5 – 15,5 MJ/kg	11 – 18 MJ/kg	11 – 18 MJ/kg	
Feinanteil	< 10 %	90 % > 3 mm	< 1 mm max. 10%	
Chlor	< 1 %		< 1,2 %	< 1 %
Quecksilber	< 4 mg/kg	< 2 mg/kg	< 4 mg/kg	
Metallgehalt				< 1 Ma.-% Fe-Metalle < 0,3 Ma.-% NE-Metalle

\* Summe der Kantenlängen

Auch Anlagen zur Mitverbrennung stellen sehr hohe Anforderungen an den Brennstoff (z.B. Heizwert, Korngröße, Schüttdichte).

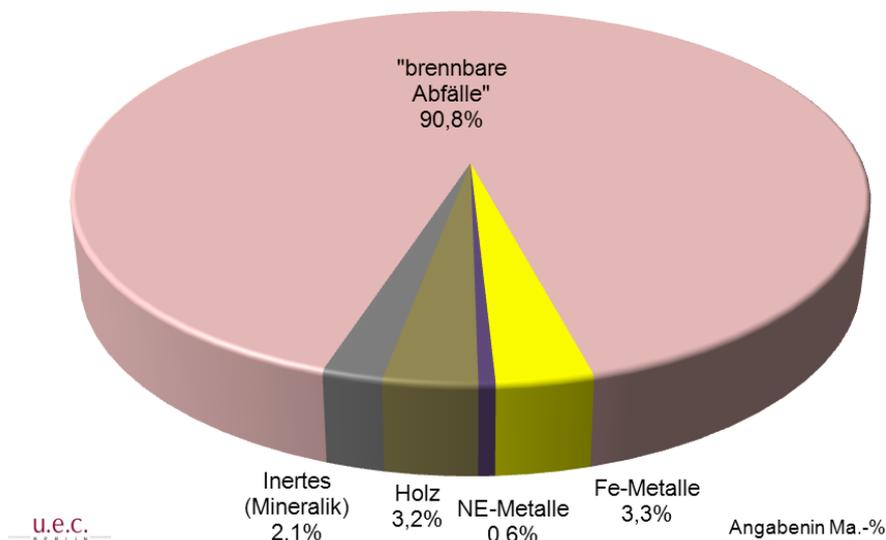
Die Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz (BGS e.V.) gliedert Ersatzbrennstoffe in zwei unterschiedliche Fraktionen [Flamme 2014]:

- ▶ Heizwertreiche Fraktionen weisen höhere Heizwerte als das ursprüngliche Abfallgemisch auf. Das Heizwertband liegt in der Regel zwischen 11- 15 MJ/kg FM. Die Aufbereitungstiefe ist deutlich geringer als die von sogenannten Sekundärbrennstoffen (SBS). Die Korngröße liegt zwischen 80 – 300 mm. Heizwertreiche Fraktionen werden in Monokraftwerken („EBS-Kraftwerken“) eingesetzt.
- ▶ Sekundärbrennstoffe sind Brennstoffe, die durch spezielle und anspruchsvolle Aufbereitung aus den heizwertreichen Fraktionen des Siedlungsabfalls oder/und aus produktionspezifischen Abfällen hergestellt werden. Damit eine hochwertige Verwertung sichergestellt ist, müssen Sekundärbrennstoffe einer festgelegten Qualität entsprechen. Wird die Qualität beispielsweise mit dem RAL-GZ 724-Gütesiegel nachgewiesen, handelt es sich um SBS®. Sekundärbrennstoffe werden mitverbrannt und ersetzen so einen Teil der fossilen Energieträger, z.B. in Kraft-, Zement- und Kalkwerken. Sie besitzen eine Korngröße von im Mittel < 30 mm (< 10 mm - < 50 mm) und weisen je nach Einsatzzweck Heizwer-

te von 13-16 MJ/kg FM (Braunkohlekraftwerke<sup>24</sup>), 20 MJ/kg (Zementindustrie) und > 25 MJ/kg (Kalkwerke, Steinkohlekraftwerke) auf.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Anlagenbilanzierungen kann davon ausgegangen werden, dass Anlagen zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen rund 9 Ma.-% als Wertstoffe und Störstoffe ausschleusen, rund 91 Ma.-% stellen dann das Hauptprodukt „brennbare Abfälle“ dar.

Abbildung 45: Outputzusammensetzung von EBS-Anlagen für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle [eigene Abschätzung]



Auf der Basis dieser Outputzusammensetzung und einem Abfallinput in EBS-Anlagen in Höhe von 0,257 Mio. Mg/a lassen sich folgende Ausgangsdaten für die ökobilanzielle Betrachtung benennen.

<sup>24</sup> Abweichungen von diesen Heizwerten sind möglich; so nimmt das Braunkohlekraftwerk Jänschwalde auch Ersatzbrennstoffe mit Heizwerte ab 11 MJ/kg FM an, das Steinkohlekraftwerk Flensburg setzt Brennstoffe mit einem Heizwertband von 11 – 24 MJ/kg ein [Oetjen-Dehne et al. 2007]

Tabelle 14. Stoffströme der EBS-Aufbereitungsanlagen für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle

Fraktion	Anteil im Output Mittelwert	Stoffstrom des Outputs aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen
	Ma.-%	1.000 Mg
Fe-Metalle*	3,3%	8,55
NE-Metalle*	0,6%	1,49
Holz *	3,2%	8,27
Inertes*	2,1%	5,35
„brennbare Abfälle“	90,8%	233,16
Summe	100,0	256,8

\* incl. Störstoffe

#### 9.4 Erstbehandlung in Mechanisch – Biologischen Aufbereitungsanlagen (MBA-Anlagen)

In den MBA-Anlagen<sup>25</sup> wird in erster Linie Hausmüll verarbeitet, gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle spielen eine untergeordnete Rolle. So ist der Anteil der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle am Gesamtinput einer MBA in den letzten Jahren rückläufig und liegt durchschnittlich bei 8 Ma.-% [STBA 2012a]. Die Verfahrenstechnik einer MBA-Anlage ist auf den Anteil der biologisch abbaubaren Bestandteile im Hausmüll ausgerichtet, eine Verfahrenstechnik, die für die Aufbereitung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle nicht erforderlich ist.

Aus diesem Materialstromgemisch (hauptsächlich Hausmüll) werden im Zuge der Aufbereitung hauptsächlich Metalle separiert. Der Fe-Metallanteil im Output der MBA-Anlagen lag gemäß den statistischen Angaben in den letzten Jahren zwischen 2,3 bis 2,7 Ma.-%. (Tabelle 15); abweichend hiervon lag nach Angaben einer Befragung von MBA-Betreibern im Jahr 2007 der Metallanteil im Output zwischen 1 und 5 Ma.-% [Dehne et al. 2011].

NE-Metalle werden in weit geringerem Umfang in den Anlagen gewonnen. Zwar verfügen alle MBA-Anlagen über einen oder mehrere Fe-Metallabscheider, einen NE-Metallabscheider haben aber nur die Hälfte der MBA-Anlagen installiert [ASA 2010]. Insofern ist es nicht verwunderlich, dass der NE-Metallanteil nur bei 0,1 bis 0,3 Ma.-% des Outputs liegt (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

<sup>25</sup> Unter Begriff MBA-Anlagen werden in diesem Kapitel mechanisch – biologische Aufbereitungsanlagen, mechanisch – biologische Stabilisierungsanlagen und mechanisch – physikalische Aufbereitungsanlagen subsumiert.

Tabelle 15. Ausgewählte Outputströme der MBA [STBA 2007-2010]

Outputfraktion*	2007	2008	2009	2010	Mittelwert
	Ma.-%				
Fe-Metalle	2,4	2,3	2,5	2,7	2,5
NE-Metalle	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2
Holz	0,2	0,3	0,4	0,7	0,4
Kunststoffe	0	0	1	0,3	0,3
„brennbare Abfälle“	55,8	58,5	64,1	68,1	61,6

\* Input in erster Linie Hausmüll

Andere im Aufgabebudget der MBA enthaltene Wertstoffe, wie Kunststoffe, PPK oder Holz, werden vereinzelt separiert, der Schwerpunkt der Aufbereitung liegt gegenwärtig auf der Gewinnung von heizwertreichen Ersatzbrennstoffen (EBS) [ASA 2012]. Die Ersatzbrennstoffe werden laut [ASA 2012] zu

- ▶ 51 Ma.-% in EBS-Kraftwerken,
- ▶ 16 Ma.-% in Kohlekraftwerken,
- ▶ Ma.-% in Zementwerken,
- ▶ 18 Ma.-% in Müllverbrennungsanlagen und
- ▶ 5 Ma.-% in sonstigen Anlagen

verwertet.

Anhand der veröffentlichten statistischen Informationen ist es nicht möglich, den Stofffluss von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen durch eine MBA zu quantifizieren. Deshalb werden die Outputströme der MBA-Anlagen für das Einsatzgut gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle nachfolgend abgeschätzt.

Im mechanischen Teil einer MBA erfolgt nach einer Eingangszerkleinerung eine Klassierung des Eingangsmaterials, mit der die biologisch behandelbaren Bestandteile im Unterkorn und die heizwertreichen Fraktionen im Überkorn ausgebracht werden. Anhand von Korngrößenverteilungen für vorzerkleinerte gemischte Gewerbeabfälle kann davon ausgegangen werden, dass max. 25 Ma.-% des Inputs der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle in den Siebdurchgang gelangen. Aufgrund des im Vergleich zu Hausmüll geringen Anteils an biologisch abbaubarer Substanz gehen bei der anschließenden Behandlung max. 20 Ma.-% der Trockenmasse des Unterkorns verloren (Anhang 15). Da gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle einen höheren Metallanteil als Hausmüll aufweisen, wird die abgetrennte Metallfraktion rund 4 bis 5 Ma.-% vom Input betragen. Vor dem Hintergrund der eingesetzten Verfahrenstechnik (nur die Hälfte der MBA-

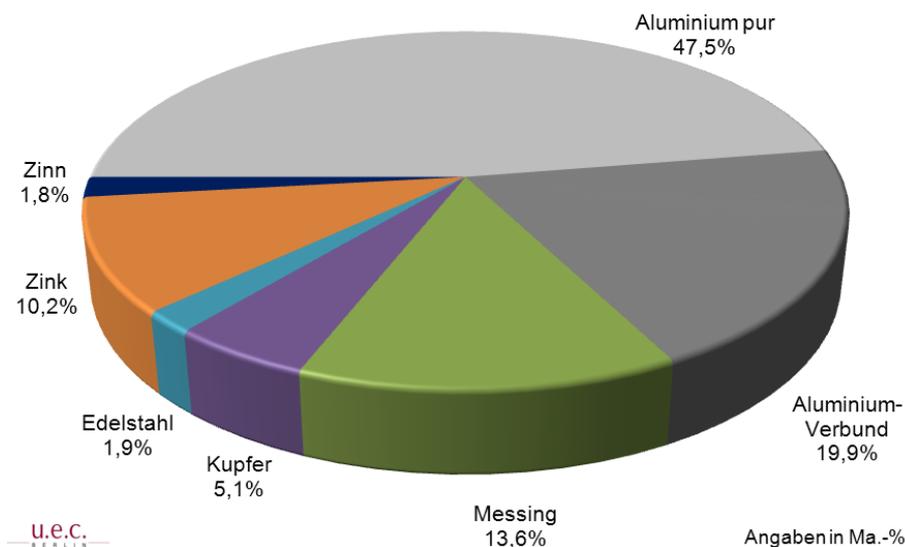
Anlagen haben einen Wirbelstromscheider installiert), besteht die generierte Metallfraktion zu 90 Ma.-% aus Fe-Metallen und zu 10 Ma.-% aus NE-Metallen. Im Ergebnis der Berechnungen liegt der Anteil der „brennbaren Abfälle“ bei Verarbeitung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen im Output der MBA um knapp 9 Prozentpunkte höher als der für den Gesamtinput (Hausmüll und anderen Inputfraktionen) ausgewiesene Wert.

Tabelle 16. Stoffströme der MBA [eigene Abschätzung], bezogen auf gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle

Fraktion	Anteil Ma.-%	Output 1.000 Mg (siehe Anhang 15)
Fe-Metalle	3,0	9,45
NE-Metalle	0,4	1,05
„brennbare Abfälle“	71,6	223,12
Deponat	20,0	62,30
Trockenmasseverlust	5,0	15,58
Summe	100,0	311,5

Vor dem Hintergrund der Ressourcen- und Energieeinsparung und nicht zuletzt aufgrund des Marktpreises verstärken MBA-Betreiber ihre Bemühungen, die bislang ungenutzte NE-Metallfraktion zu gewinnen. Versuche haben gezeigt, dass bei optimaler Einstellung der Verfahrenstechnik ein NE-Metallgemisch von ca. 0,5 – 0,6 Ma.-% des Inputs dem Materialstrom entnommen werden kann, dass zu ca. 67 Ma.-% aus Aluminium und Aluminium-Verbunden besteht.

Abbildung 46: Zusammensetzung der NE-Metallfraktion aus MBA-Anlagen [SATURN 2012]



## 9.5 Erstbehandlung in Thermischen Abfallbehandlungsanlagen (MVA<sup>26</sup>)

Bei der energetischen Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle fallen neben elektrischer und thermischer Energie Schlacken an, die aus unverbrannten bzw. mineralischen Komponenten und den im Aufgabegut enthaltenen Metallen bestehen.

Die Gewinnung der Metallfraktion, insbesondere der Fe-Metalle, aus der Rohschlacke gehört heute zum Stand der Technik. Dazu ist eine Aufbereitung der Schlacke notwendig, die anlagenintern oder in externen Aufbereitungsanlagen vorgenommen wird. So zeigt eine Untersuchung aus dem Jahr 2007, dass knapp 60 % der damals 65 befragten Müllverbrennungsanlagen die Rohschlackeaufbereitung extern durchführen lassen [Fehrenbach et al. 2007]. Das statistische Datenmaterial zum Output der thermischen Abfallverbrennungsanlagen weist nur die anlagenintern abgetrennten Metallanteile rund 99.000 Mg Fe- und NE-Metalle im Jahr 2010 [STBA 2012a] aus. Da Mengenangaben zu den bei nachgeschalteten Schlackeaufbereitern gewonnenen Metallfraktionen nicht separat vom Statistischen Bundesamt ausgewiesen werden, muss diese Menge zusätzlich geschätzt werden.

Die dazu benötigten Daten liegen allerdings nur für die Gesamtheit aller verbrannten Abfälle vor. Sortier- und Analysenergebnisse für Rohschlacke zeigen beispielsweise, dass diese einen Fe-Metallgehalt von 6,5 bis 9,5 Ma.-% und einen NE-Metallgehalt<sup>27</sup> von ca. 0,6 bis 2 Ma.-% aufweist [Maerz et al. 2010, Haeming 2012, Kersting 2012, Deike 2012, Alwast et al. 2010]. Werden diese Fe- und NE-Metallgehalte auf den gesamten MVA-Input bezogen (Rohschlacke: ca. 25 Ma.-% des Inputs), ergibt sich ein Fe-Metallanteil von 1,6 bis 2,4 Ma.-% im Input und ein NE-Metallanteil von ca. 0,2 bis 0,5 Ma.-% des Inputs. Hochgerechnet auf die gesamte Schlackemenge beträgt das

<sup>26</sup> Anstelle des vom Statistischen Bundesamt gewählten Begriffs „thermischen Abfallbehandlungsanlage“ wird nachfolgend auch der weitaus gebräuchlichere Begriff Müllverbrennungsanlage bzw. MVA verwendet.

<sup>27</sup> ohne den Teil der elementar eingebundenen NE-Metalle in der Rohschlacke

Fe-Metallpotential rund 335.000 bis 490.000 Mg/a und das NE-Metallpotential rund 30.000 bis 100.000 Mg/a, jeweils bezogen auf den Input in Abfallverbrennungsanlagen im Jahr 2010 in Höhe von 20,5 Mio. Mg [STBA 2012a]. Zum Vergleich: Alwast et al. 2010 und ITAD 2012 geben an, dass im Jahr 2009 rund 346.000 Mg Fe-Metalle und 32.000 Mg NE-Metalle aus Schlacken/Aschen aus Abfallverbrennungsanlagen gewonnen werden konnten.

Von den Metallen in der Rohschlacke werden über Fe-Metallabscheider mindestens 90 Ma.-% der Fe-Metalle abgeschieden, der Abscheidegrad für die NE-Metalle lag im Jahr 2008 bei 34 % [Alwast et al. 2010]. Stichprobendaten von drei Schlackeaufbereitungsanlagen [ITAD 2014] zeigen, dass Fe-Metalle in den 3 Anlagen zu > 95 % abgeschieden werden, die Reinheit beträgt > 95 %. Die Selektivität beträgt dann für Fe-Metalle mindestens 90,25 Ma.-%. NE-Metalle werden in diesen drei Anlagen je nach (Korn-) Fraktion zu 30 bis 70 % abgeschieden, die Reinheiten schwanken zwischen 60 und 93 %. Hieraus kann vereinfachend eine Selektivität von 34,9 % für NE-Metalle errechnet werden.

Darauf hinzuweisen ist, dass die Abtrennung von NE-Metallen derzeit optimiert wird; so wurden in den letzten Jahren sowohl neue Schlackeaufbereitungsanlagen gebaut als auch bestehende Anlagen geeignet nachgerüstet. Alwast et al. 2010 ging deshalb davon aus, dass eine NE-Metallabtrennung von 50 % sinnvoll und technisch ohne großen Aufwand möglich erscheint.

Nicht abgeschiedene Metalle verbleiben zusammen mit dem elementaren, potenziell recycelbaren Metallgehalt in der aufbereiteten Schlacke und stellen bisher Verluste dar. [Lübben 2013] weist daraufhin, dass der für eine höhere Metallrückgewinnung erforderliche mechanische Aufschluss zu mehr Feinkorn führt und sich deshalb ein Zielkonflikt zwischen der Metallabtrennung und der Verwertbarkeit der Schlacke ergeben kann, da deren Verwertung als Baustoff aufgrund eines veränderten Auslaugverhaltens erschwert wird.

Bislang werden weder für die Gesamtmenge der verbrannten Abfälle noch für die Teilfraktion der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle die Mengen der abgetrennten Fe- und NE-Metalle statistisch erfasst; mit 300.000 Mg/a bis 600.000 Mg/a wie z.B. in [DGAW 2014] ist die Bandbreite der in verschiedenen Literaturstellen angegebenen Metallmengen sehr groß.

Um für die ökobilanzielle Betrachtung die aus gemischten gewerblichen Abfällen stammenden und aus den MVA-Schlacken abgetrennten Metallmengen im Jahr 2010 abzuschätzen, wird deshalb folgender Ansatz gewählt:

- ▶ Der Rohschlackeanteil bezogen auf den Input wird mit 25 Ma.-% angesetzt.
- ▶ Der Fe-Metallanteil im Input wird mit 3,5 Ma.-% und der NE-Metallanteil mit 1,4 Ma.-% angesetzt. Dieser Ansatz berücksichtigt nicht, dass die direkt verbrannten Gewerbeabfälle nach § 6 Gewerbeabfallverordnung eigentlich keine Metalle enthalten dürfen.
- ▶ Für die Schlackeaufbereitung wird eine Selektivität von 90 % für Fe-Metalle und eine Selektivität von 30 % für NE-Metalle gewählt. Höhere Selektivitäten sind wie dargestellt erreichbar, werden für das Bezugsjahr 2010 aber nicht berücksichtigt.

Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich für die energetischen Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle in MVAen die nachfolgenden Mengenströme (Anhang 16).

Tabelle 17. feste Output-Ströme der MVA, bezogen auf gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle

Fraktion	Output 1.000 Mg
Fe-Metalle	70,5
NE-Metalle	10,2
Reinschlacke	517,6

Bezogen auf die nach [ITAD 2012] aus den Schlacken von Müllverbrennungsanlagen insgesamt abgetrennten Fe-Metalle würden rund 20 % aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen stammen, bei NE-Metalle wären es 34 % der Gesamtmenge.

Die Reinschlacke wird im Wege- und Straßenbau, im sonstigen Hoch- und Tiefbau, im Garten- und Landschaftsbau und bei Deponiebaumaßnahmen verwertet.

## 9.6 Erstbehandlung in Feuerungsanlagen

Zu den Feuerungsanlagen zählen Ersatzbrennstoffkraftwerke, Mitverbrennungskraftwerke (z. B. Kohlekraftwerke) und Zementwerke. Anhand der statistischen Daten lässt sich nicht ermitteln, in welcher Art Feuerungsanlage die gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle eingesetzt werden. Da aber sowohl die Mitverbrennungskraftwerke als auch Zementwerke hohe Anforderungen an den Brennstoff stellen, ist davon auszugehen, dass die unaufbereiteten Gemische gewerblicher Siedlungsabfälle vor allem in Ersatzbrennstoffkraftwerke mit Rostfeuerung gelangen.

In der Regel sind die Rückstandsmengen bei EBS-Kraftwerken aufgrund des bereits vorbehandelten Inputs geringer als in Müllverbrennungsanlagen. Im Rahmen dieser Studie wird dieser Aspekt jedoch vernachlässigt, da auch die gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle im Input nicht vorbehandelt sind. Aus diesem Grund wird für EBS-Rostfeuerungen für die ökobilanzielle Betrachtung für die Ermittlung der Stoffströme aus den EBS-Anlagen vereinfachend der gleiche Ansatz wie für Müllverbrennungsanlagen gewählt (Anhang 17).

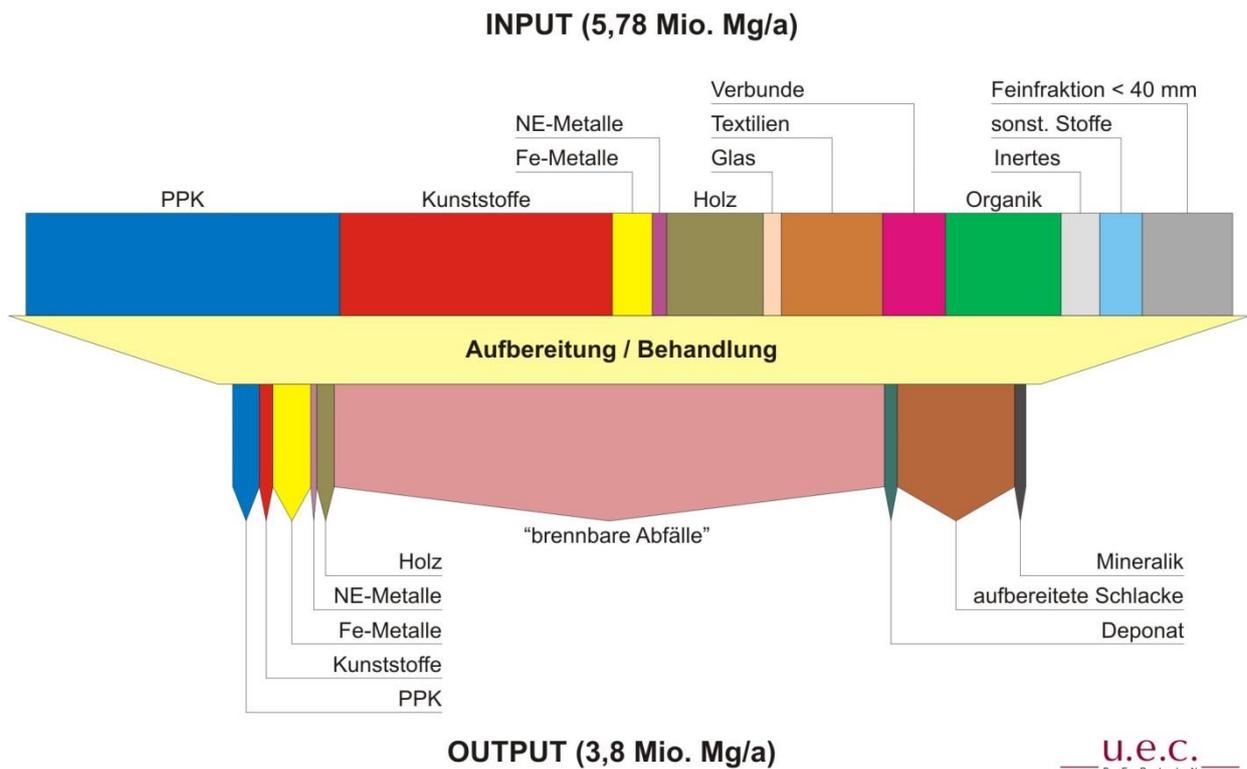
Tabelle 18. feste Outputströme von Feuerungsanlagen für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle

Fraktion	Output 1.000 Mg
Fe-Metalle	6,3
NE-Metalle	0,9
Reinschlacke	46,0

## 9.7 Zusammenfassender Überblick über die Outputströme der Erstbehandlungsanlagen

Von den rund 5,8 Mio. Mg/a gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen werden im Zuge der Aufbereitung in den Erstbehandlungsanlagen ca. 0,4 Mio. Mg/a (7 Ma.-% vom Gesamtinput) stofflich verwertbare Wertstofffraktionen (PPK, Kunststoffe, Metalle) aussortiert (Anhang 18). Hinzu kommen ca. 0,56 Mio. Mg/a (9,6 Ma.-% vom Gesamtinput) verwertbare aufbereitete Schlacke der Verbrennungsanlagen. In den Sortieranlagen, den EBS-Anlagen und den MBA-Anlagen werden rund 2,6 Mio. Mg/a „brennbare Abfälle“ erzeugt und einer nachfolgenden energetischen Verwertung zugeführt. Auch die aussortierte Holzfraktion wird in der Regel energetisch, vor allem in Biomassekraftwerken, verwertet.

Abbildung 47: In- und Output<sup>28</sup> fester Massenströme der Erstbehandlungsanlagen gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (Basisvariante)



Aufgrund der Verunreinigungen einiger Outputfraktionen mit Störstoffen ist, mit Ausnahme der mineralischen Fraktion und der händisch aussortierten Stofffraktionen, eine weitere Aufbereitung dieser Abfälle erforderlich.

## 9.8 Zweit- und Drittbehandlung

Die bei der Erstbehandlung der Abfälle in den Sortieranlagen, EBS-Anlagen und MBA-Anlagen, aber auch in den MVA- und Feuerungsanlagen erzeugten wertstoffangereicherten Fraktionen

<sup>28</sup> Output incl. der Störstoffe aus der mechanischen Aufbereitung

weisen aufgrund der unvollkommenen Trennprozesse neben den Gutanteilen noch Störstoffe auf und werden deshalb in spezialisierten Anlagen weiter aufbereitet.

So werden z. B. Kunststoffe in den werkstofflichen Aufbereitungsanlagen von anderen, nicht der Zielfraktion entsprechenden Kunststoffsorten und kunststofffremden Bestandteilen getrennt. Die nach einer nassmechanischen Aufbereitung verbleibende Gutfraktion (je nach Zielstellung variierend, z .B. bestehend aus HDPE oder LDPE oder gemischten Polyolefinen oder PP etc.) wird anschließend zu einem Mahlgut, zu Agglomerat oder zu Regranulat verarbeitet. Die abgewiesene Fraktion enthält neben den Störstoffen auch die nicht zur Gutfraktion zählenden Kunststoffsorten. Im Ergebnis der Kunststoffaufbereitung sinkt deshalb die dem Markt zur Verfügung gestellte Produktmenge ab, zumal auch die dem Inputmaterial anhaftende Feuchte im Zuge der Aufbereitung fast vollständig mittels Trocknung aus dem Endprodukt entfernt wird.

In den Drittaufbereitungsanlagen werden die abgetrennten Störstoffe bzw. Verunreinigungen der Zweitaufbereitung entsorgt, größtenteils werden dazu MVAen oder EBS-Verbrennungsanlagen zur energetischen Verwertung genutzt. Die aufbereiteten heizwertreichen EBS werden zu 10 Ma.-% der Mitverbrennung und zu 90 Ma.-% dem EBS-HKW zugeordnet<sup>29</sup>. Bei der ökobilanziellen Betrachtung werden diese Stoffstromverschiebungen mitbetrachtet und zwischen den Bruttomengen (Ergebnis der Modellierung der Basisvariante für die Erstbehandlung) und den Nettomengen (Bruttomengen abzüglich Störstoffe etc.) unterschieden.

---

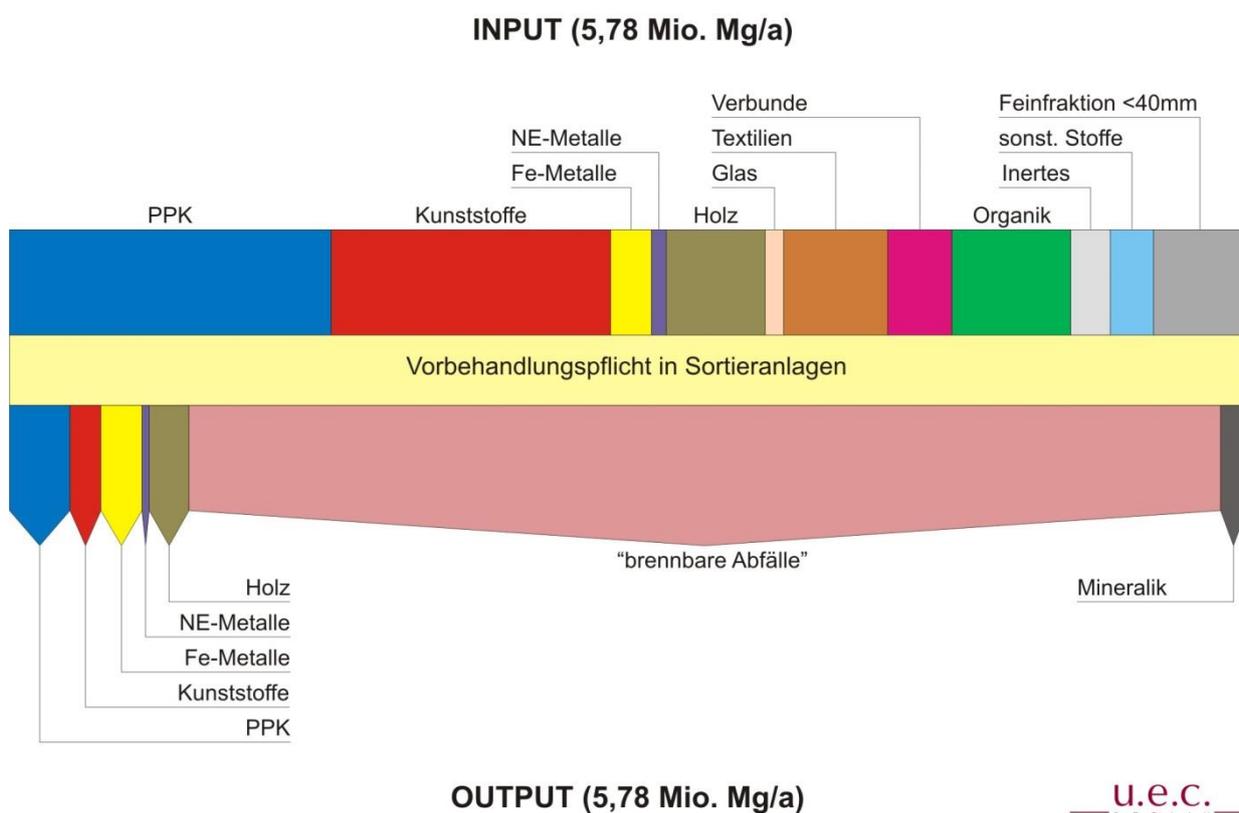
<sup>29</sup> Diese Variante wird der Ökobilanz zugrunde gelegt (vgl. hierzu Tab. 9-**Fehler! Nur Hauptdokument**).

## 10 Modellierung der Variante 1: Vorbehandlungspflicht für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle

Aus den gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen werden im Ergebnis der Untersuchungen zur Basisvariante derzeit ca. 0,4 Mio. Mg/a stofflich verwertbare Wertstofffraktionen (PPK, Kunststoffe, Metalle) aussortiert. Eine Steigerung der Wertstoffausbeute kann bereits dadurch erzielt werden, dass gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle prinzipiell einer Vorbehandlung in Sortieranlagen unterzogen werden<sup>30</sup>, eine direkte Verbrennung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle wäre dann ausgeschlossen.

Durch diese Vorbehandlungspflicht würde der Input in Vorbehandlungsanlagen auf 5,78 Mio. Mg/a erhöht werden, aus denen mit unveränderten Modellierungs-Ansätzen dann die Wertstoffmenge auf rund 0,66 Mio. Mg/a bzw. auf 11 Ma.-% für die Fraktionen Metalle, Kunststoffe und PPK erhöht würde (Anhang 19). Die Holzausbeute beträgt weitere knapp 0,2 Mio. Mg/a bzw. 3,2 Ma.-%.

Abbildung 48: In- und Output<sup>31</sup> fester Massenströme der Sortieranlagen von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen (Variante 1)



Mit der angenommenen „Vorbehandlungspflicht“ würde sich die Menge der „brennbaren Abfälle“ aus der Erstbehandlung auf knapp 5 Mio. Mg/a vergrößern, da im Gegenzug eine direkte

<sup>30</sup> Als Sortieranlagen kommen hier auch MBA in Frage. In der Ökobilanz wird jedoch nicht mehr zwischen verschiedenen Sortieranlagen unterschieden.

<sup>31</sup> Output incl. der Störstoffe aus der mechanischen Aufbereitung

energetische Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle entfallen würde. Das Modell der „Vorbehandlungspflicht“ würde dann auch Chancen bieten, die entstehenden „brennbaren Abfälle“ energetisch effizient zu verwerten. Hierfür besteht in einzelnen Marktsegmenten auch eine Nachfrage. Beispielsweise erklären die Zementhersteller Holcim, Cemex und Lafarge, dass für den Energiebedarf die Einsatzquote an „brennbaren Abfällen“ bis zum Jahr 2020 zu steigern ist [EUWID 2012a]. Trendresearch kommt zu dem Ergebnis, dass bis zum Jahr 2020 die Einsatzmenge alternativer Brennstoffe in Zementwerken deutschlandweit von rund 2,9 Mio. Mg/a im Jahr 2010 auf max. 4,2 Mio. Mg/a gesteigert werden kann [EUWID 2013a]. In der Ökobilanz werden in Variante 1 von den aufbereiteten EBS-Fraktionen 10 % der Mitverbrennung, 65 % dem EBS-HKW und 25 % der MVA zugeordnet.

## 11 Modellierung der Variante 2: Vorbehandlungspflicht und Steigerung der aussortierten recycelbaren Stoffströme

Die Zusammensetzung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle zeigt, dass das theoretische Wertstoffpotential im Input für die Stofffraktionen PPK, Kunststoffe, Metalle und Holz bei rund 61 Ma.-% liegt (Abbildung 17). Folgerichtig wird bei der Modellierung der Variante 2 davon ausgegangen, dass das theoretische Wertstoffpotential intensiver als bislang bzw. in der Basisvariante und der Variante 1 genutzt wird.

Die Gewinnung höherer Wertstoffmengen aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen wird in verfahrenstechnischer Hinsicht von der Zusammensetzung, der Stoffcharakteristik des Inputs, der eingesetzten Aufbereitungstechnik und den Betriebsbedingungen der Anlage beeinflusst. Bislang werden nur FE-Metalle aufgrund der weitgehend maschinellen Ausbringung und unterstützt durch händische Sortierung fast vollständig abgetrennt. Die Sortieranlagen sind ansonsten entweder nicht auf eine möglichst vollständige Wertstoffgewinnung der genannten Wertstofffraktionen ausgelegt oder die Anlagen werden derzeit nicht mit den erforderlichen Betriebsbedingungen gefahren.

Um die vermehrte Ausbeute und Selektivität der wertstoffhaltigen Fraktionen zu untersuchen, wurde eine Modellsortieranlage hoher Komplexität auf der Grundlage eigener Erfahrungen aus der Planung und dem Bau von Sortieranlagen, aus Anlagenbilanzen sowie der BREF-Dokumentation für Anlagen zur Behandlung von Gewerbeabfall [BREF 2008] konzipiert und ein Rechenmodell zur Stoffstrommodellierung erarbeitet. Die Anforderungen an die Modellanlage werden nachfolgend skizziert.

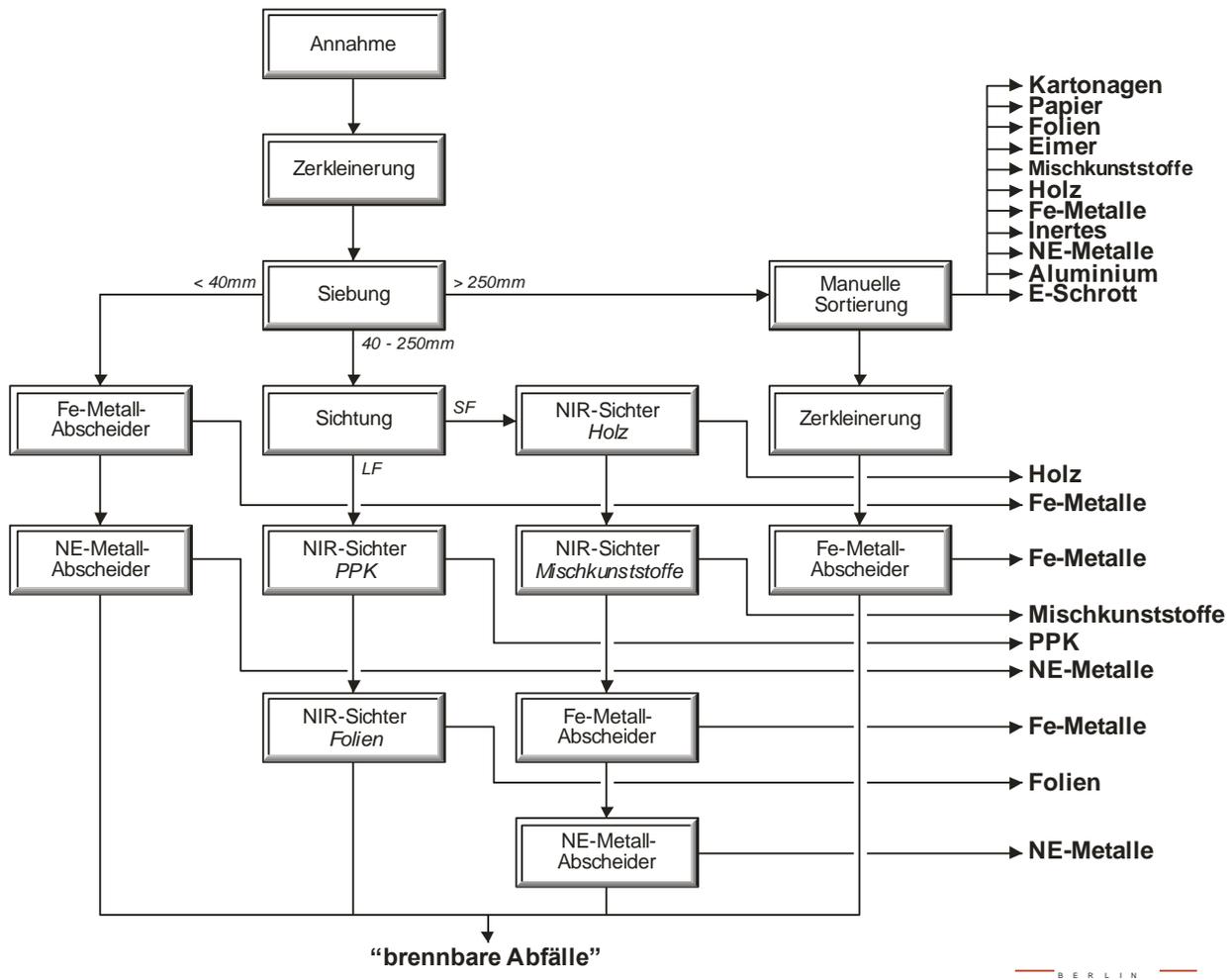
Tabelle 19. Anforderungen an die Sortierung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle

Mindestanforderung	Begründung
Vorzerkleinerung	Die Vorzerkleinerung wird eingesetzt, um ein grobstückiges Aufgabegut mittels Förderbändern transportieren zu können, das Aufgabegut dosiert der Aufbereitung zuzuführen, Gebinde zu öffnen und/oder die Korngröße grob zu reduzieren.
Klassierung mit einer Aufteilung in drei Korngrößenbänder	Ziel der Klassierung ist die Erzeugung einer manuell sortierfähigen Grobfraction, einer maschinell aufzubereitenden (nicht manuell sortierfähigen) Mittelfraction und einer weitgehend nicht sortierwürdigen Feinfraction. Durch die Siebklassierung werden die nachfolgenden Sortierprozesse verbessert.
Fe- und NE-Metallabscheidung	maschinelle Abtrennung der Metallfraktionen in den einzelnen Siebfractionen

Mindestanforderung	Begründung
NIR-Geräte	maschinelle Abtrennung von Wertstoffen in der Mittelfraktion; durch die individuelle Einstellung der NIR-Geräte können zielgerichtet einzelne Stofffraktionen abgetrennt werden
manuelle Sortierung	Mittels der manuellen Sortierung kann bedarfsgerecht die Ausbeute und Reinheit der Wertstofffraktionen gesteuert werden. Die Wertstoffausbeute der manuellen Sortierung wird vom Wertstoffgehalt und der Wertstoffbeschaffenheit (Korngröße, Stückgewicht) des Inputgemisches und den Sortierparametern (Anzahl der Sortierkräfte, Durchsatzleistung) geprägt.  Die manuelle Sortierung sollte im Übrigen auch im Anschluss an mechanische Kläubungstechniken eingesetzt werden, um die Reinheit der mechanisch erzeugten Produktfraktionen zu erhöhen.
ausreichende Förderbandbreite	Geringere Förderbandbreiten in Kombination mit zu hohen Volumendurchsätzen erschweren die Abtrennung der Wertstoffe („Überbelegung der Förderbänder“) und bergen ein Verstopfungsrisiko.
gradlinige Anordnung des Hauptmassenstroms	Verwinkelte Anordnungen führen insbesondere bei großvolumigen gewerblichen Abfällen zu Verstopfungen.

In der Modellanlage wird das Inputmaterial nach einer Vorzerkleinerung in drei Fraktionen (< 40 mm, 40 – 250 mm und > 250 mm) klassiert. Das Unterkorn wird mittels Fe- und NE-Metallabscheidern von den Metallfraktionen befreit. Windsichter teilen das Mittelkorn in eine Leicht (LF)- und eine Schwerfraktion (SF) auf. Aus der Leichtfraktion werden PPK und Folien mittels NIR-Technik separiert, aus der Schwerfraktion werden mittels NIR Mischkunststoffe abgetrennt, Fe- und NE-Metallabscheider entfernen die Metallfraktionen. Der Siebüberlauf wird der manuellen Sortierung zugeführt; hier werden verschiedene Wertstofffraktionen (PPK, Kunststoffe, Metalle) aussortiert. Der Überlauf der Sortierung wird zerkleinert und anschließend entschrotet. Die „brennbaren Abfälle“ der vier Verfahrenslinien können dann je nach Zielstellung und Marktanforderungen entweder getrennt oder gemeinsam verwertet werden.

Abbildung 49: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild der Modellanlage für die vermehrte Ausbeute und Selektivität von Wertstoffen (Variante 2)



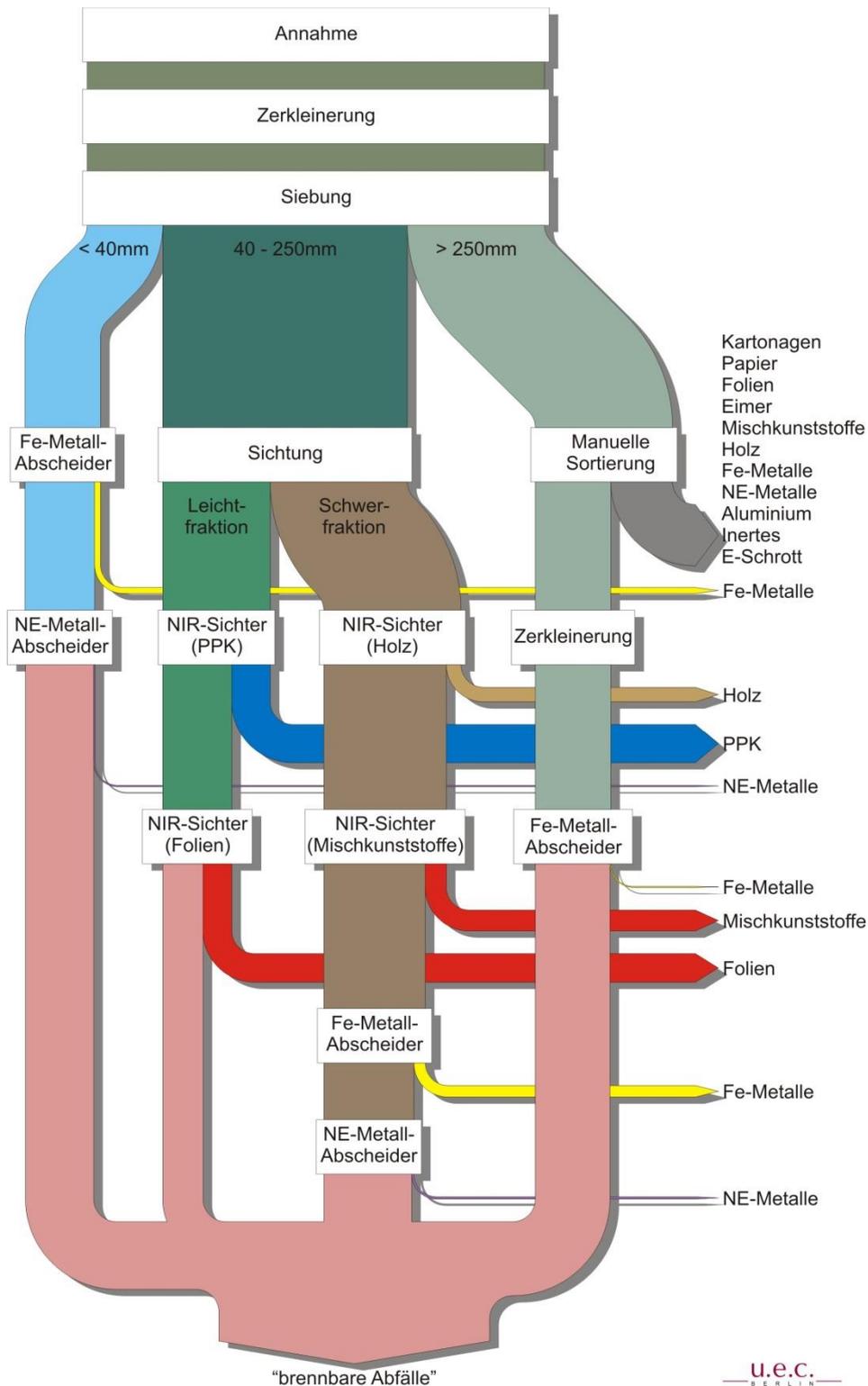
### 11.1 Output der Modellanlage

Der Stoffstrom durch die Modellanlage wird anhand von aggregate-, stoff- und korngößenspezifischen Transferfaktoren auf der Grundlage der Ergebnisse der durchgeführten Anlagenbilanzierung und Erfahrungswerten aus der Planung von Sortieranlagen ermittelt. Hierbei werden folgende Annahmen berücksichtigt:

- ▶ Mit Ausnahme der manuellen Sortierung werden bei jedem Aufbereitungsschritt auch Störstoffe aus dem Materialstrom separiert (Reinheit < 100 %).
- ▶ Bei der Ausschleusung von Stofffraktionen kann deren Selektivität nie 100 % betragen, da nie alle Inputbestandteile einer Stofffraktion erfasst und aussortiert werden können.

Die graphische Darstellung des Mengenflusses der Modellanlage zeigt das nachfolgende Sankey-Diagramm (Anhang 20).

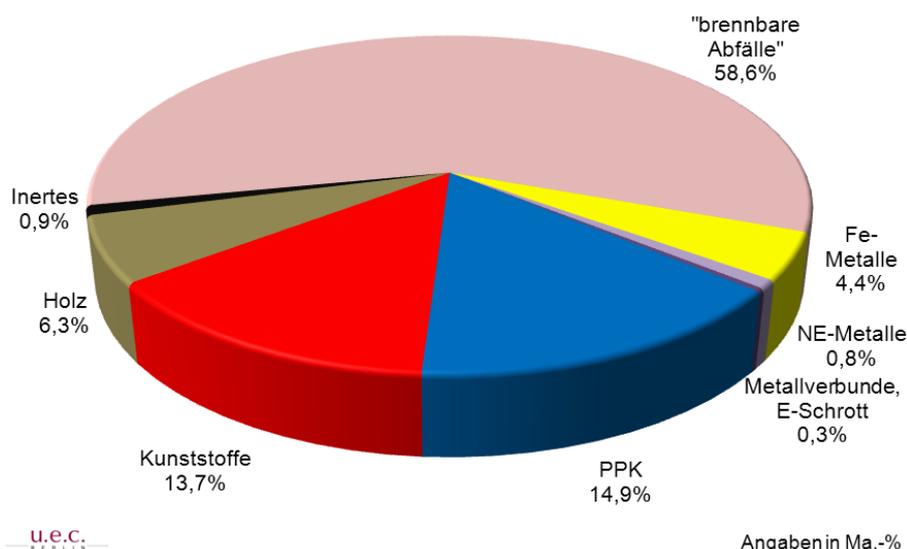
Abbildung 50: Sankey-Diagramm der Modellanlage (Variante 2)



Ausgehend von der in Kapitel 7 ermittelten Zusammensetzung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle im Input werden in der Modellanlage rund 40 Ma.-% des Input als Wertstoffe (PPK, Kunststoffe, Metalle und Holz) ausgebracht (zum Vergleich: in der Basisvariante werden

16,5 Ma.-% aussortiert.). Die Massenanteile insbesondere der Stofffraktionen PPK und Kunststoffe können also im Vergleich mit den untersuchten und bilanzierten Anlagen deutlich gesteigert werden, aber auch für die Stofffraktionen Metalle und Holz ist eine – wenn auch nur geringere – Zunahme verfahrenstechnisch möglich. Der Anteil der „brennbaren Abfälle“ liegt dann nur noch bei knapp 59 Ma.-%. Dass das im Gemisch enthaltene Wertstoffpotential nicht zu einem höheren Anteil aussortiert werden kann, hat seine Ursachen in verfahrenstechnischen Verlusten (Korngrößenverteilung des Materials, Wirkungsgrad der eingesetzten Aggregate) und den Anforderungen an die Qualität der aussortierten Wertstoffe (siehe hierzu auch Kapitel 13.3).

Abbildung 51: Stoffströme der Modellanlage



Auf der Basis dieser Output-Zusammensetzung und einem Aufkommen an gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen in Höhe von rund 5,8 Mio. Mg im Jahr 2010 lassen sich die Ausgangsdaten für die ökologische Betrachtung berechnen.

Im Ergebnis werden vom theoretischen Wertstoffpotential für die Stoffgruppen PPK, Kunststoffe, Metalle, Holz und Inertes in Höhe von 3,75 Mio. Mg/a (bzw. knapp 65 Ma.-% des Gesamtinputs) rund 2,39 Mio. Mg/a in hoher Qualität aussortiert, das sind knapp 64 Ma.-% des theoretischen Wertstoffpotentials. Die verbleibenden „brennbaren Abfälle“ in Höhe rund 3,4 Mio. Mg/a setzen sich aus der Restfraktion und den nicht aussortierten Wertstoffen zusammen (Anhang 21).

Abbildung 52 Überblick über die Verteilung der Stofffraktionen auf die Stoffströme der Model-  
lanlage (Variante 2)

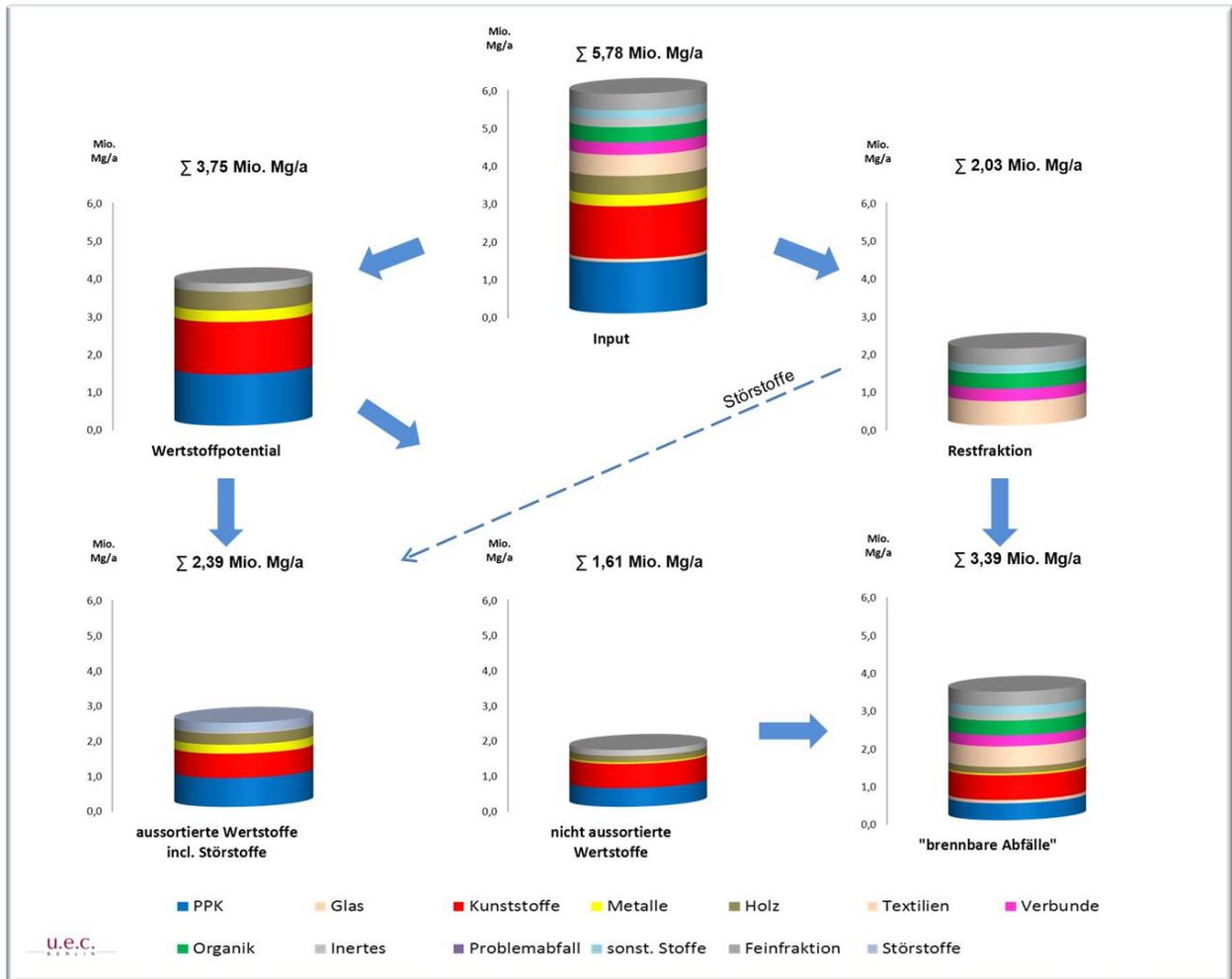
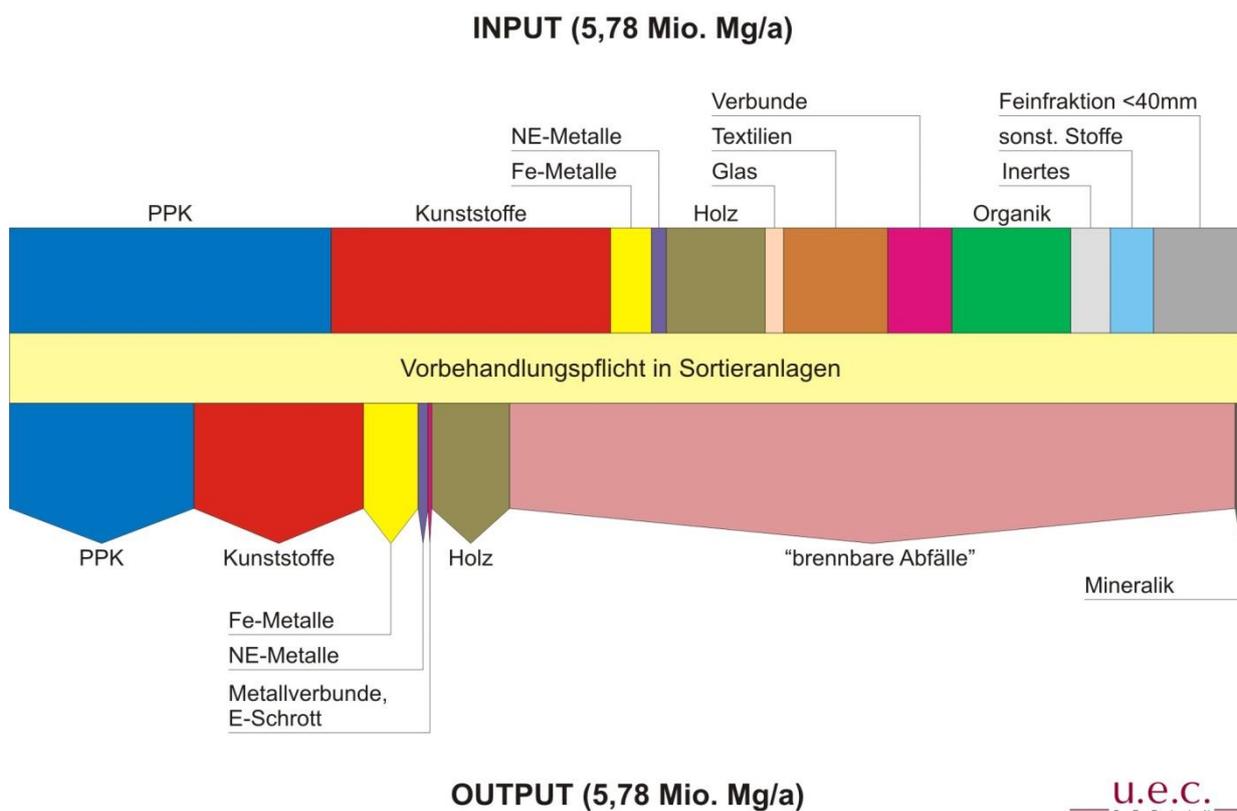


Tabelle 20. Stoffströme der Variante 2 für das Jahr 2010

Fraktion	Stoffstromverteilung der Modellanlage	Stoffstrom aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen
	Ma.-%	1.000 Mg
Fe-Metalle*	4,4	257,28
NE-Metalle*	0,8	47,15
Metallverbunde, E-Schrott*	0,3	18,58
PPK*	14,9	861,33
Kunststoffe*	13,7	791,37
Holz*	6,3	363,90
Mineralik*	0,9	53,20
„brennbare Abfälle“	58,6	3.393,11
Summe	100,0	5.785,90
* incl. Störstoffe		

Abbildung 53: In- und Output<sup>32</sup> fester Massenströme der Variante 2 für das Jahr 2010



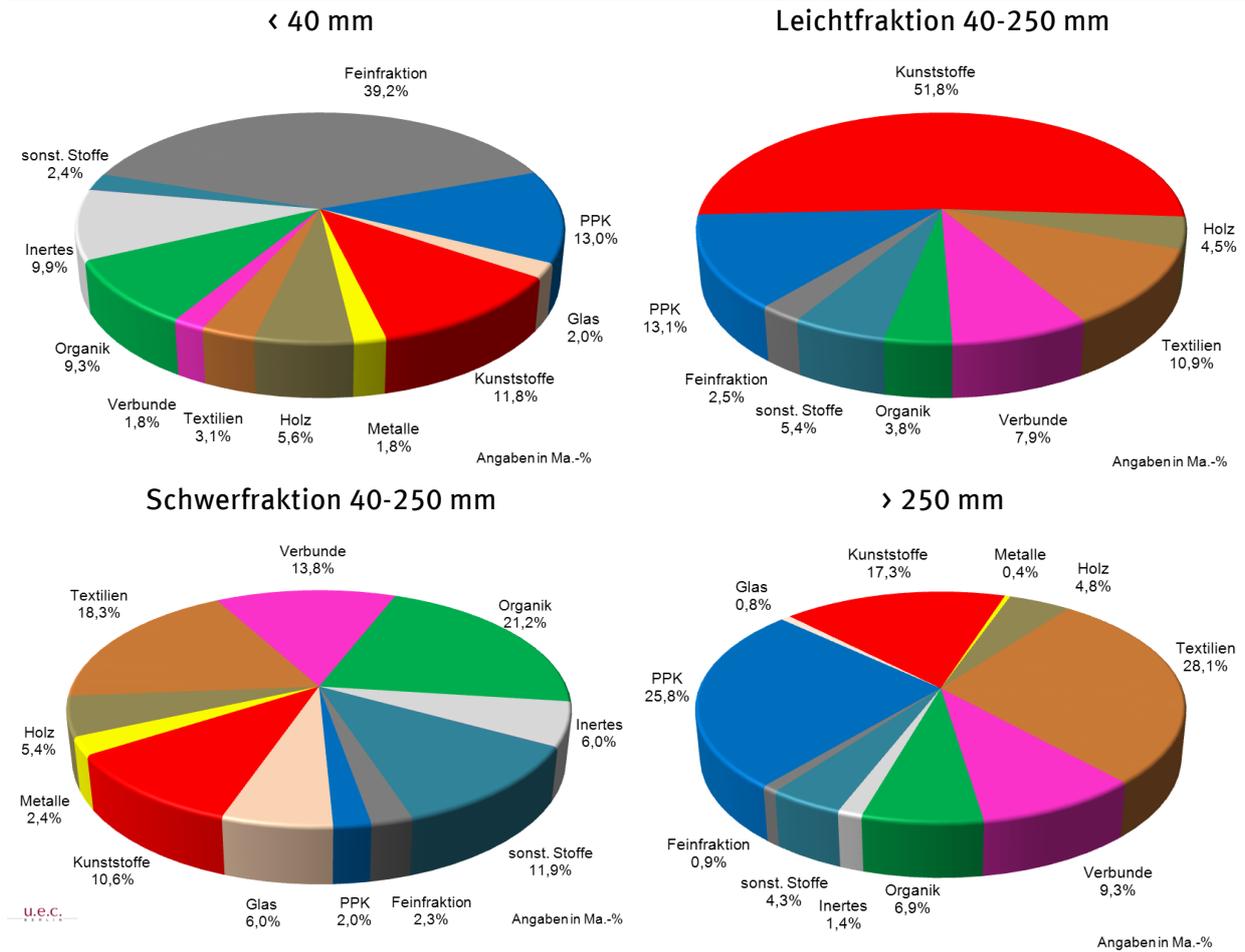
### 11.2. „brennbare Abfälle“ im Output der Modellanlage

Am Ende jeder Verfahrenslinie der Modellanlage entsteht jeweils eine Mischfraktion mit unterschiedlichen Massenanteilen der einzelnen Stofffraktionen (Abbildung 54). Diese Inhomogenität der einzelnen Fraktionen ist der eingesetzten Verfahrenstechnik und der für eine Vermarktung notwendigen Produktqualität der aussortierten Materialien geschuldet. So bestehen die „brennbaren Abfälle“ < 40 mm zu knapp 40 Ma.-% aus der Feinfraktion < 10 mm, inerte Stoffe sind hauptsächlich in den „brennbaren Abfällen“ < 40 mm und in der Schwerfraktion 40-250 mm zu finden.

Die berechneten Heizwerte der vier Einzelfraktionen liegen zwischen 10.500 kJ/kg für die „brennbaren Abfälle“ < 40 mm und 23.600 kJ/kg für die „brennbaren Abfälle“ der Leichtfraktion 40-250 mm (Anhang 22); die Berechnung des Heizwertes erfolgte anhand der Grunddaten zum Wassergehalt und zum stoffspezifischen Heizwert in Tabelle 11.

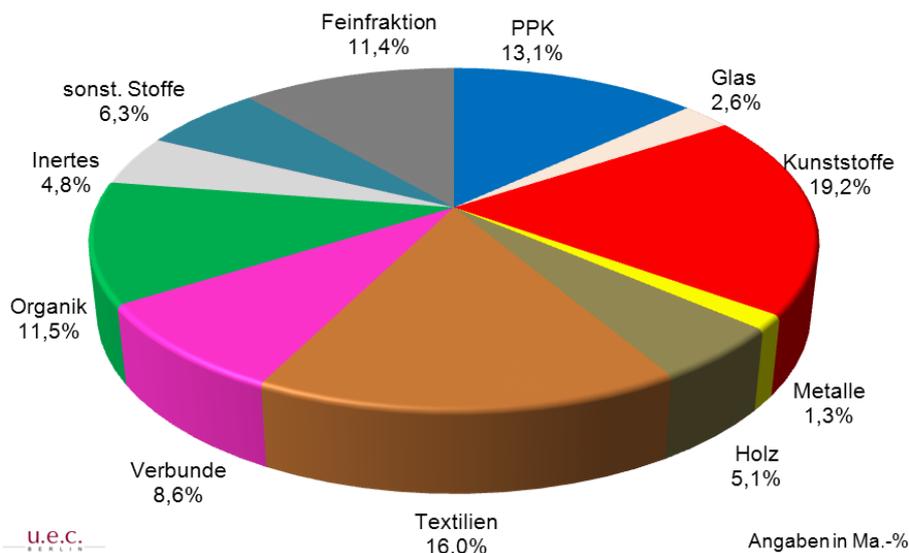
<sup>32</sup> Output incl. der Störstoffe aus der mechanischen Aufbereitung

Abbildung 54: Zusammensetzung der „brennbaren Abfälle“ der einzelnen Verfahrenslinien der Modellanlage (Variante 2)



Werden diese vier Verfahrenslinien zusammengeführt, entsteht ein „brennbarer Abfall“, der sich maßgeblich aus den Stofffraktionen PPK, Kunststoffe, Textilien, Organik und Feinfraktion < 10 mm zusammensetzt (Abbildung 55).

Abbildung 55: Mittlere Zusammensetzung der „brennbaren Abfälle“ der Modellanlage (Variante 2)



Der berechnete Heizwert der mittleren Zusammensetzung des „brennbaren Abfalls“ liegt bei 14.300 kJ/kg. Im Vergleich mit den Ergebnissen der Anlagenbilanzierungen ist der berechnete Heizwert des „brennbaren Abfalls“ trotz der Erhöhung der Wertstoffausbeute von 15 Ma.-% auf 40 Ma.-% nur um rund 10 % zurückgegangen.

Tabelle 21. Gegenüberstellung der Massenanteile der ausgebrachten Wertstofffraktionen und des berechneten Heizwertes der Modellanlage (Variante 2) und der Anlagenbilanzierungen 2013

	Einheit	Modellanlage	Anlagenbilanzierung <sup>33</sup>
Wertstoffausbeute	Ma.-%	40,4	14,5
▶ PPK	Ma.-%	14,9	4,9
▶ Kunststoffe	Ma.-%	13,7	2,5
▶ Metalle	Ma.-%	5,3	3,9
▶ Holz	Ma.-%	6,3	3,2
Heizwert „brennbare Abfälle“	kJ/kg	14.300	15.900

Die „brennbaren Abfälle“ werden in der ökobilanziellen Betrachtung dieser Variante zu 37 % der Mitverbrennung zugeordnet. Der Rest gelangt zu 70 % in EBS-HKW und zu 30 % in MVA-Anlagen.

<sup>33</sup> siehe Kapitel 7.3

Es wird davon ausgegangen, dass an die Herstellung und den Einsatz von EBS in Mitverbrennungsanlagen eine verpflichtende Gütesicherung eingeführt wird, die insbesondere die notwendige Schadstoffanreicherung bzw. die Qualitätsparameter der Brennstoffe kontrolliert.

### 11.3 Ausbeute der Stofffraktionen der Modellanlage

Die Ausbeute der aussortierten PPK-, Kunststoff- und Holzfraktionen liegen zwischen 57 % und 79 %. Für die Metallfraktionen beträgt die Ausbeute aufgrund des hohen Störstoffanteils 124 %.

Tabelle 22. Ausbeuten der Stofffraktionen der Modellanlage (Variante 2)

Stofffraktion	Ausbeute der Modellanlage
Metalle	124%
PPK	57%
Kunststoffe	60%
Holz	79%

### 11.4 Selektivität der Stofffraktionen der Modellanlage

Mit der Modellanlage lassen sich die Selektivitäten der Stofffraktionen steigern. So werden rund 85 Ma.-% der Metalle aus dem Materialstrom entnommen. Die höchste Selektivität weisen die Fe-Metalle auf, aber auch Aluminium wird zu rund 62 % aussortiert (Anhang 23). Auch für die Stofffraktionen PPK, Kunststoffe und Holz wird mehr Material aussortiert als in den „brennbaren Abfällen“ verbleibt. In den nachfolgenden Bildern werden einige Selektivitäten der Wertstofffraktionen

- ▶ Metalle<sup>34</sup>,
- ▶ Holz,
- ▶ PPK<sup>35</sup> und
- ▶ Kunststoffe<sup>36</sup>

exemplarisch aufgezeigt.

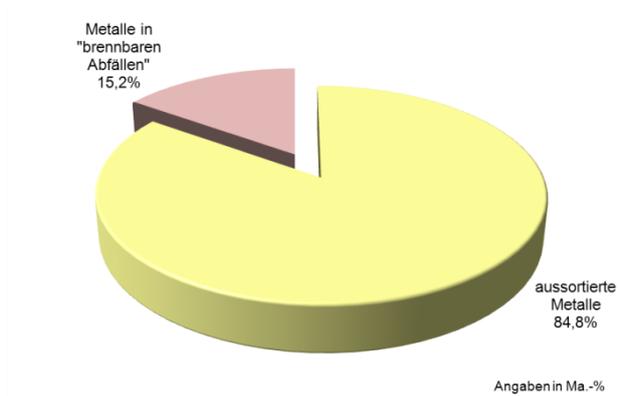
<sup>34</sup> Hierzu gehören: Fe-Metalle, Aluminium, sonstige NE-Metalle und Metallverbunde

<sup>35</sup> Hierzu gehören: Pappen, Kartonagen, Druckerzeugnisse, sonstige PPK 1 (Deinking geeignet) und sonstige PPK 2 (Deinking ungeeignet).

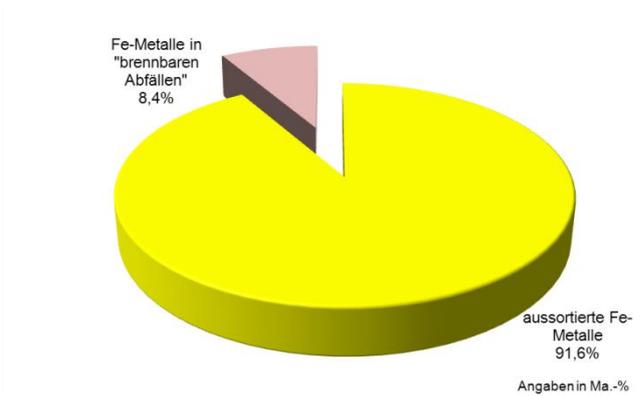
<sup>36</sup> Die Kunststofffraktion setzt sich aus folgenden Einzelsortierfraktionen zusammen: Folien, > DIN A4, Folien, < DIN A4, Eimer, Kanister, sonstige formstabile Kunststoffe, EPS („Styropor“), Schaumstoffe, Umreifungsbänder, sonstige Kunststoffe.

Abbildung 56: Verteilung der Stofffraktionen Metalle und Holz auf die Outputfraktionen der Modellanlage (Variante 2)

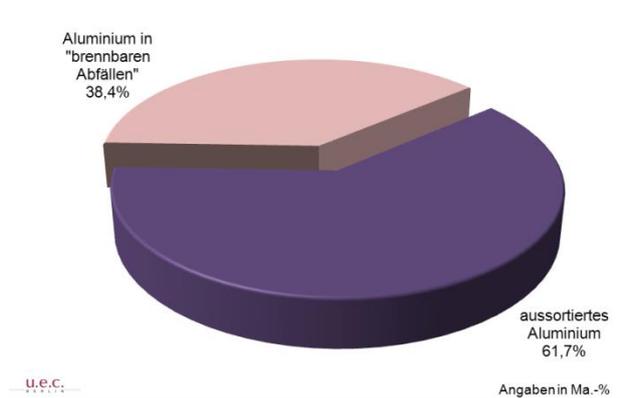
alle Metallfraktionen:



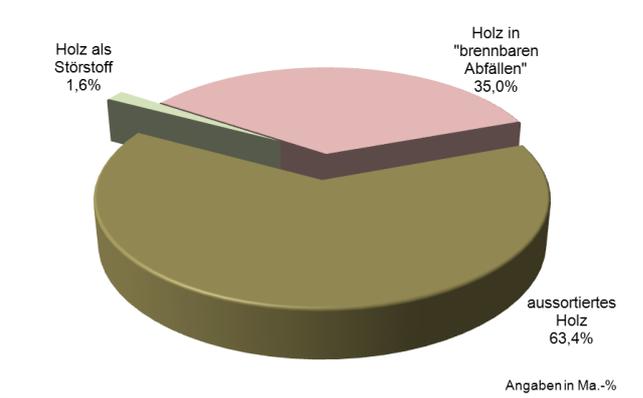
Fe-Metalle:



Aluminium:



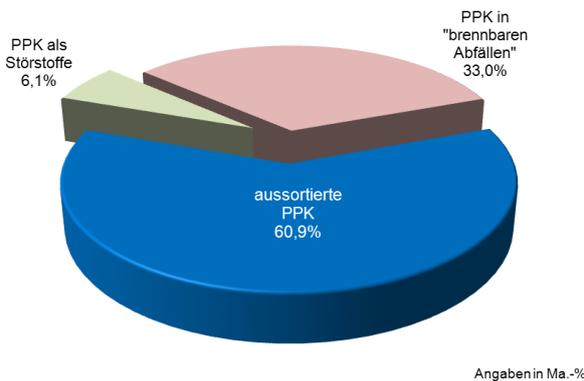
Holz:



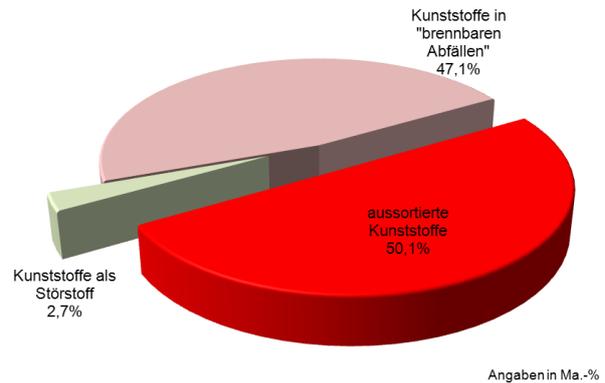
U.E.C.

Abbildung 57: Verteilung der Stofffraktionen PPK und Kunststoffe auf die Outputfraktionen der Modellanlage (Variante 2)

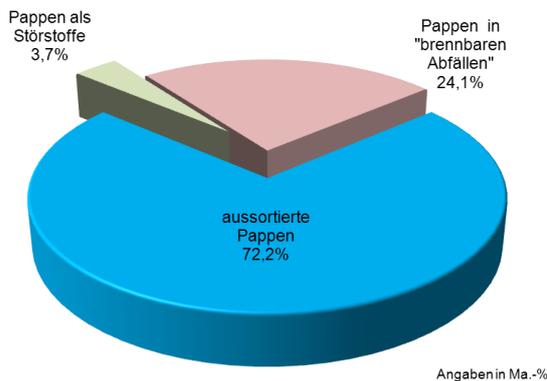
alle PPK-Fraktionen:



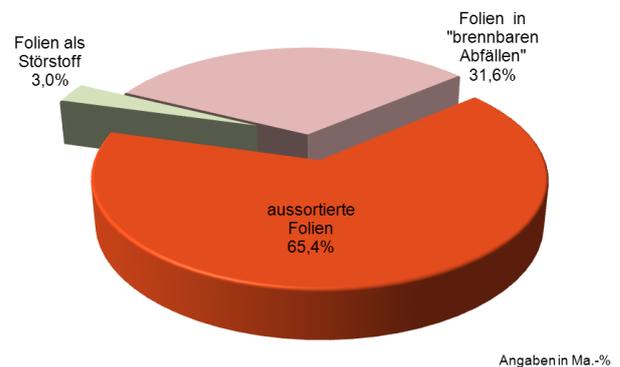
alle Kunststofffraktionen:



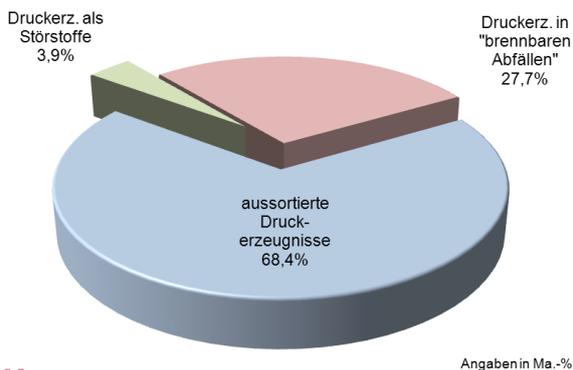
Pappen und Kartonagen:



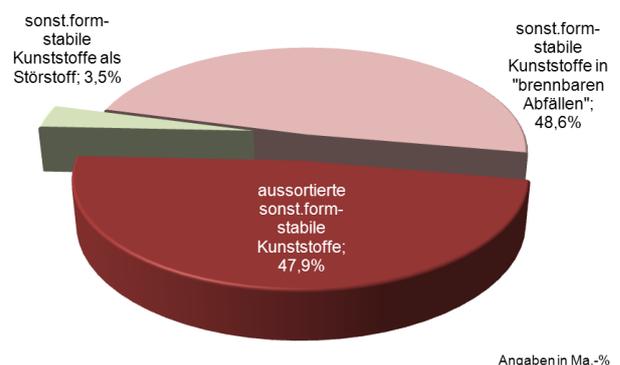
Folien:



Druckerzeugnisse:



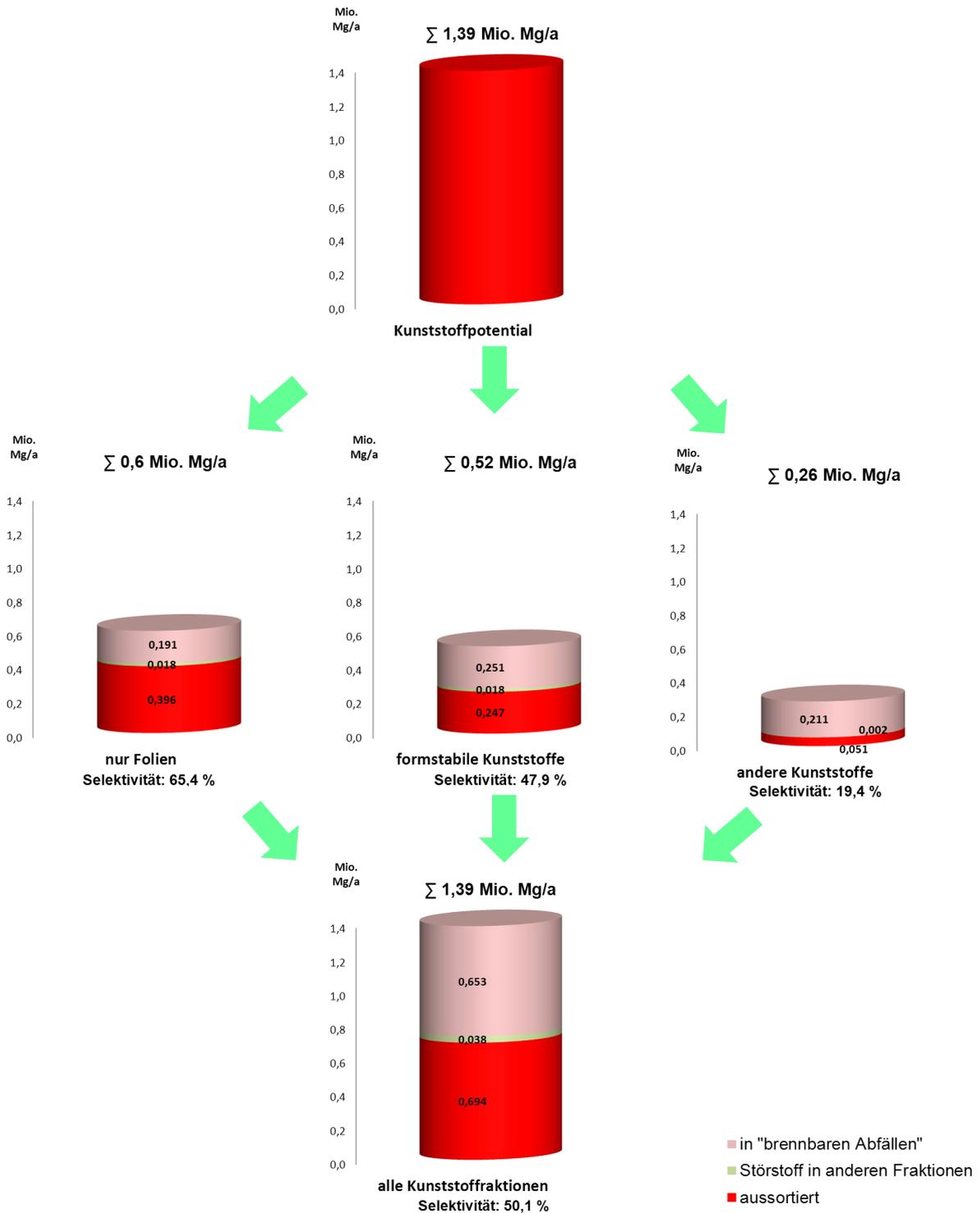
Eimer, Kanister u. sonst. formstabile Kunststoffe:



u.e.c.

Am Beispiel der Kunststofffraktion soll die Selektivität mit Hilfe der Massenverteilung erläutert werden. Das mittlere Kunststoffpotential in den gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen beträgt rund 1,39 Mio. Mg im Jahr 2010. Von dieser Gesamtmenge entfallen ca. 0,6 Mio. Mg/a auf die Folienfraktion. Anhand der obigen Verteilung der Folienfraktion werden 65,4 % bzw. knapp 396.000 Mg/a als potentielle Wertstoffe aussortiert. 18.000 Mg/a gelangen als Störstoffe in andere Fraktionen und knapp 191.000 Mg/a verbleiben in den „brennbaren Abfällen“. Das Ergebnis einer analogen Berechnung für alle Kunststoffeinzelfraktionen zeigt Abbildung 58.

Abbildung 58: Verbleib des Kunststoffpotentials in der Modellanlage (Variante 2)



### 11.5 Reinheit der aussortierten Stofffraktionen der Modellanlage

Die Reinheit der aussortierten Fraktionen ist mit denen der Anlagenbilanzierung (Kapitel 9.2.5) vergleichbar. Die dort dokumentierten Ergebnisse für die Transferfaktoren beruhen auf realen Anlagen, deren Sortierprodukte vermarktet werden. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle nicht

weiter auf die Reinheit eingegangen. Festzuhalten bleibt jedoch, dass durch eine manuelle Nachsortierung mechanisch abgetrennter Stofffraktionen deren Reinheit noch erheblich gesteigert werden kann.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Stoffstromverteilung der Kapitel 9, 10 und 11 gehen in die nachfolgenden Untersuchungen zur ökobilanziellen Bewertung ein.

## 12 Ökobilanzielle Bewertung

### 12.1 Methodik

#### 12.1.1 Grundlagen

Mit der Ökobilanz steht ein Umweltbewertungsinstrument zur Verfügung, das in der Lage ist, komplexe Systeme bezüglich ihrer ökologischen Auswirkungen zu bewerten. Sie ist hierzu das erste Handwerkszeug, das im internationalen Rahmen wissenschaftlich entwickelt und in ihren Grundsätzen seit 1993 national und international genormt wurde (DIN ISO 14040 und 14044 [DIN 2006a und DIN 2006b]). Die grundsätzliche Eignung des Ökobilanzansatzes zur Bewertung von Fragestellungen der Abfallwirtschaft wurde durch ein UBA-Forschungsvorhaben methodisch untermauert [IFEU 1998] und durch eine Reihe von weiteren wissenschaftlichen Arbeiten bestätigt. Sollen mehrere Produkte oder Dienstleistungen gleichzeitig betrachtet werden, kann die Ökobilanz zur sogenannten Stoffstromanalyse erweitert werden. Diese löst sich von der detailgetreuen Abbildung einzelner Produkte zugunsten einer übergreifenden Betrachtung ganzer Sektoren oder Handlungsfelder wie beispielsweise der Abfallwirtschaft.

Die Stoffstromanalysen in dieser Arbeit werden mit Hilfe von Excel-Modellen und den Software-Tools Umberto® ([www.umberto.de](http://www.umberto.de)) und GEMIS ([www.gemis.de](http://www.gemis.de)) durchgeführt. Umberto® und GEMIS erlauben die Modellierung der Stoff- und Energieumwandlungen aller in der Abfallwirtschaft und der Stoffstromwirtschaft vorkommenden Prozesse in der jeweils notwendigen Detailierungstiefe. Die Stoffstromdaten basieren dabei auf Ökobilanzdaten, die teilweise in den genannten Rechentools hinterlegt sind, überwiegend aber aus Datenbanken wie ecoinvent [ecoinvent V3 2013] und Informationen von Industrieverbänden (wie z. B. APME, FEFCO, GDA) stammen.

Bei der Erstellung des gesamten Stoffstrommodells werden für die zu untersuchenden Abfallfraktionen deren Entsorgungswege abgebildet. Einzelne Prozessschritte sind dabei verschiedenen Abfalltypen gemeinsam, andere wiederum kommen nur für eine bestimmte Abfallart vor. Die wesentlichen Prozessschritte sind in Tabelle 23 beschrieben.

Die Bilanz berücksichtigt damit alle wesentlichen Prozessschritte der Gewerbeabfallsammlung, -behandlung und -sortierung sowie der Verwertung der daraus gewonnenen Wertstofffraktionen. Ziel ist ausschließlich die vergleichende Bewertung der untersuchten Varianten als Ganzes. Eine vergleichende Bewertung der einzelnen Module ist nicht Ziel der Studie. Die Bilanz wurde so angelegt, dass beispielsweise Sortieranlagen, MBA und MVA als Vorbehandlung aufgeführt werden. Wertstoffe sowie die „brennbaren Abfälle“, die dort abgetrennt werden, werden getrennt bilanziert. Die in der MBA und MVA selbst gewonnene Energie (Strom, Wärme, in der MBA über Biogasproduktion) wird mit dem Energieaufwand der Anlagen direkt verrechnet und der Überschuss wird den Anlagen gutgeschrieben. Einen Vergleich dieser Verfahren untereinander ist bei dieser Bilanz nicht möglich.

Alternativ zu dieser Vorgehensweise werden in manchen Ökobilanzen der Abfallwirtschaft jeweils die Erstbehandlungsanlagen getrennt analysiert. Das heißt, alle Outputströme werden bis zur letzten Stufe der Erstbehandlung zugeordnet. Dies wäre eine geeignete Herangehensweise, wenn verschiedene Erstbehandlungsverfahren miteinander verglichen werden sollten. In diesem Falle hier, würde aber in Variante V 1 und V 2 aufgrund der Sortierpflicht damit das Ergebnis

Sortieranlage alleine stehen und alle weitere Behandlungsschritte enthalten. Um auf einen Blick eine transparentere Ergebnisdarstellung zu ermöglichen, wurde deshalb die Zuordnung zu den Verwertungsanlagen gewählt.

Tabelle 23. Bilanzierung

Prozessschritte	Beschreibung des Vorgehens
Sammlung	Die Sammlung wird nicht bilanziert, da zwischen den verschiedenen Szenarien keine Differenzen zu erwarten sind.
Transporte	Die Transporte zu den Erstbehandlungsanlagen und zwischen den einzelnen Anlagen von der Sortierung zur Aufbereitung, Verwertung und Behandlung sind in den Szenarien verschieden und werden deshalb erfasst. Da erfahrungsgemäß der Einfluss der Transporte auf die Bilanzergebnisse gering ist, werden die erforderlichen Daten zu Entfernungen und Fahrzeugen überschlägig erhoben.
Sortierung/ Aufbereitung	Die Sortieranlagen, MBAs und sonstigen Aufbereitungsanlagen werden bezüglich der Aufteilung der Stoffströme möglichst gut beschrieben. Dies erfolgt in den Kapiteln 6 und 9 bis 11.  Zusätzlich sind der Betriebsaufwand, insbesondere der Energieaufwand und die direkten Emissionen der Anlagen zu erheben. Entsprechende Daten liegen aus durchgeführten Bilanzen vor. Im Rahmen der Anlagenbilanzen werden diese Daten validiert.
Recycling	Die aussortierten und aufbereiteten Wertstoffe (Metalle, PPK, Kunststoffe) werden ihren Materialeigenschaften entsprechend recycelt; ebenfalls recycelt werden die in den Verbrennungsschlacken anfallenden Metalle nach einer Aufbereitung der MVA-Aschen.
Co-Verbrennung	Aussortiertes Altholz und Anteile der „brennbaren Abfälle“ (hier: SBS) werden ihren Eigenschaften entsprechend im Zementwerk oder in Kohlekraftwerken verbrannt.  Bilanziert wird am Beispiel von Zementwerken.
Thermische Verwertung	Die übrigen „brennbaren Abfälle“ werden in EBS-Verbrennungsanlagen und MVA thermisch verwertet. In der Basisvariante (Ist-Zustand) gelangt ein Teil der gemischten Gewerbeabfälle direkt in die MVA.

### 12.1.2 Systemgrenzen

Im Rahmen von Ökobilanzen für die Abfallwirtschaft gibt es einige Abweichungen von der üblichen Lebenswegbetrachtung („von der Wiege bis zur Bahre“):

- ▶ Die Bilanzierung erfolgt erst ab der Bereitstellung des Abfalls und schließt somit das Vorleben des Abfalls, wie beispielsweise die Herstellung oder Verwendung des zu Abfall gewordenen Gutes aus. Für die bei der Aufbereitung und Verwertung des Abfalls eingesetzten Betriebsmittel und Energieverbräuche muss allerdings der gesamte Lebensweg berücksichtigt werden.
- ▶ Führt das zu bilanzierende Entsorgungssystem zur Erzeugung eines quantifizierbaren Nutzens (Bereitstellung von Energie, Sekundärrohstoffen bzw. -produkten), so wird dem System eine Gutschrift zugeschrieben. Diese Gutschrift wird zu 100 % dem Abfallwirtschaftssystem gutgeschrieben und nicht teilweise auf die aufnehmenden Produktionssysteme allokiert, wie dies bei Produktökobilanzen üblich ist [UBA 1999].

Als funktionale Einheit wird auf die Gesamtmenge zu entsorgender gemischter Gewerbeabfälle abgestellt. Die Ergebnisse spiegeln so die Leistungsfähigkeit des gesamten Systems aus Erfassung, Sortierung und Verwertung wider. Ergänzend werden die spezifischen Ergebnisse je Tonne erfasster Menge an gewerblichem Siedlungsabfall (Sammelmenge pro Jahr: tSM/a) dargestellt.

### 12.1.3 Sachbilanz

Die Datenerhebungen zur Ermittlung der zugrunde zu legenden Stoffströme ist Schwerpunkt der gesamten Studie und erfolgt schwerpunktmäßig in den Kapiteln 6 und 9 bis 11. Als Grundlage für die Wirkungsbilanz und die spätere Bewertung werden die Aufwendungen (Energie, Treibstoffe, Betriebsmittel) und die Emissionen für die zu bilanzierenden Prozessschritte mit Sortierung, Aufbereitung, Verwertung, Behandlung und Transport soweit notwendig erhoben.

### 12.1.4 Wirkungsabschätzung

Von den in den einzelnen Prozessschritten freigesetzten Schadstoffen können unterschiedliche Auswirkungen auf die Umwelt ausgehen. Diese möglichen Auswirkungen sind bei der Schadstoffbewertung in der Wirkungsbilanz zu berücksichtigen. Um zu verhindern, dass die im späteren Projektverlauf zu analysierenden stoffstrombezogenen Optimierungsmaßnahmen (z. B. Stärkung der stofflichen Verwertung) durch zusätzliche Umweltbelastungen in anderen Umweltmedien nicht erkannt werden, wird die Bilanz für diesen Teil der Studie um die Umweltkriterien

- ▶ Treibhauseffekt (Global Warming Potential - GWP),
- ▶ Schonung/Verbrauch energetischer Ressourcen,
- ▶ Schonung/Verbrauch fossiler energetischer Ressourcen (Kumulierter fossiler Energieaufwand - KEAfossil),
- ▶ Versauerung (Acidification Potential - AP) und
- ▶ Eutrophierung (Eutrophierungspotential – EP)

erweitert.

Aus bisherigen Ökobilanzen in der Abfallwirtschaft ist bekannt, dass durch diese Kategorien die wichtigsten Umweltauswirkungen der Abfallwirtschaft beschreibbar sind [Öko-Institut 2008]. Soweit während der Bilanzierung eine Ergänzung als erforderlich angesehen wird, werden weitere Kriterien, z. B. Feinstaub oder einzelne Schadstoffemissionen (z. B. Quecksilber im Zusammenhang mit der Co-Verbrennung im Zementwerk) hinzugenommen.

### Treibhauseffekt (GWP)

Zur Auswertung des Treibhauseffektes werden die einzelnen Treibhausgase, die laut den Ergebnissen der Sachbilanz in einem Szenario emittiert wurden, entsprechend Klimawirksamkeit zusammengefasst. Diese wird für alle Parameter normiert als CO<sub>2</sub> Äquivalente.

Die wichtigsten Treibhausgase und ihre aktuellen CO<sub>2</sub>-Äquivalenzwerte nach IPCC 2007 sind in Tabelle 24 für den Betrachtungszeitraum von 100 Jahren aufgeführt. Darin unterschieden sind Methanemissionen nach ihrer Entstehung. Regeneratives Methan (aus der Umwandlung organischer Substanz) weist gegenüber fossilem Methan (aus der Umwandlung fossiler Energieträger) einen etwas geringeren Äquivalenzfaktor auf, da das im Laufe der Zeit aus dem Methan durch luftchemische Umsetzung (Oxidation) entstehende regenerative Kohlendioxid als klimaneutral bewertet wird.

Tabelle 24 Treibhauspotential der wichtigsten Treibhausgase

Treibhausgas	CO <sub>2</sub> -Äquivalente (GWP <sub>i</sub> ) in kg CO <sub>2</sub> -Äq/kg	
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> ), fossil	1	1
Methan (CH <sub>4</sub> ), fossil	27,75	21
Methan (CH <sub>4</sub> ), regenerative	25	18,25
Distickstoffmonoxid (N <sub>2</sub> O)	298	310
	[IPCC 2007, WG I, Chapter 2, Table 2.14]	[IPCC 1996]

### Schonung/Verbrauch energetischer Ressourcen (KEA<sub>fossil</sub>)

Die Schonung bzw. der Verbrauch energetischer Ressourcen wird über den Indikator „kumulierter fossiler Energieaufwand“ (KEA<sub>fossil</sub>) ausgewiesen.

Aufsummiert wird dabei der gesamte mit dem Energieverbrauch verbundene Ressourcenverbrauch. Für KEA<sub>fossil</sub> wird der Energieinhalt der verbrauchten oder „bereitgestellten“ fossilen Ressourcen Erdöl, Braunkohle, Steinkohle, Erdgas aufsummiert (Tabelle 25).

Genau genommen handelt es sich beim Ressourcenverbrauch nicht um eine Umweltwirkung, sondern um einen Wert auf Sachbilanzebene. Durch die Auswertung des fossilen kumulierten Energieaufwandes verschiedener Szenarien kann aber erkannt werden, welches System fossile Ressourcen besser schont. Dies wird aus dem Vergleich der Ergebnisse deutlich.

Tabelle 25. Fossile Energieressourcen und deren Energieinhalt

Rohstoffe in der Lagerstätte / Energieträger	Fossile Energie Hu in kJ/kg
Braunkohle	8.303
Erdgas (roh)	37.781
Erdöl	42.622
Steinkohle	29.809

Quelle: [GEMIS 1994 und www.gemis.de]

#### Versauerung (AP)

Eine Versauerung kann sowohl bei terrestrischen als auch bei aquatischen Systemen eintreten. Verantwortlich sind die Emissionen säurebildender Abgase. Die Berechnung erfolgt in Form von Säurebildungspotentialen [CML 2001] mit den in Tabelle 26 dargestellten Charakterisierungsfaktoren nach CML 2004.

Tabelle 26. Wirkfaktoren für die Versauerung

Wirkungskategorie	Wirkstoff	Wirkfaktor	Quelle
Versauerung kg SO <sub>2</sub> -Äq/kg	SO <sub>2</sub>	1,2	CML 2004
	NO <sub>x</sub>	0,5	CML 2004
	NH <sub>3</sub>	1,6	CML 2004

#### Eutrophierung (EP)

Die Eutrophierung steht für eine Nährstoffzufuhr im Übermaß, sowohl für Gewässer als auch für Böden. In dem Projektzusammenhang wird allein die terrestrische Eutrophierung betrachtet. Das Eutrophierungspotential von Nährstoffemissionen wird hierbei durch die Aggregation von Phosphatäquivalenten nach CML 2004 ermittelt (vgl. Tabelle 27).

Tabelle 27. Wirkfaktoren für die Eutrophierung

Wirkungskategorie	Wirkstoff	Wirkfaktor	Quelle
Eutrophierung, terrestrisch kg PO <sub>4</sub> -Äq/kg	NO <sub>x</sub>	0,13	CML 2004
	NH <sub>3</sub>	0,35	CML 2004

## 12.2 Bilanz

Zunächst werden die Stoffströme bilanziert und den einzelnen Behandlungs- und Verwertungsanlagen zugeordnet. Die Ermittlung der ökologischen Auswirkungen erfolgt dann für die Endbehandlungsanlagen. Deshalb sind Ausschnitte der Bilanz für einzelne Module nicht mit anderen vergleichbar. Beispielsweise werden die Recyclinggutschriften für Metalle, die in der MBA oder MVA abgetrennt werden, beim Metallrecycling und nicht bei den Ausgangsanlagen bilanziert. Die Aussagen zeigen deshalb die Leistungen des Gesamtsystems und weisen aus, welchen zusätzlichen Beitrag Recycling und energetische Verwertung infolge der bilanzierten Änderungen insgesamt leisten können.

In den folgenden Unterkapiteln werden die Bilanzdaten der Behandlungs- und Verwertungsmodule beschrieben. Um die Übersichtlichkeit zu steigern, werden Sach- und Wirkungsbilanzdaten zusammengefasst und die beispielhafte Herleitung von Emissionsfaktoren für das Beispiel von GWP dargestellt. Die Faktoren für Ressourcenschonung, Versauerung und Eutrophierung werden nach dem gleichen Vorgehen ermittelt.

### 12.2.1 Transporte

Die Sammlung des gemischten Gewerbeabfalls wird in dieser Bilanz nicht betrachtet, da davon ausgegangen wird, dass sich diese für die verschiedenen Szenarien nicht unterscheidet.

Neben den Abfallsammeltransporten kommt es zu Transportvorgängen zwischen den verschiedenen Behandlungs- und Verwertungsanlagen.

Die Transporte zu den Erstbehandlungsanlagen werden in der Basisvariante für alle Anlagenarten mit 50 km geschätzt. Aufgrund der Vielzahl der Sortieranlagen bleibt die Entfernung in der Variante 1 gleich. Bei Variante 2 wird unterstellt, dass die Optimierung nur in den Großanlagen wirtschaftlich durchführbar ist und demzufolge eine geringere Anzahl größerer Anlagen dazu führen, dass die Transportentfernung auf 100 km zunimmt.

Da erfahrungsgemäß der Einfluss der Transporte auf die Bilanzergebnisse gering ist, wurden zur Bilanzierung der Transportprozesse jeweils mittlere Transportentfernungen angenommen (Tabelle 28).

Tabelle 28. Mittlere Transportentfernungen

Fraktion	In Anlage	Entfernung km
Gewerbeabfall – Basisvariante (Ist)	Erstbehandlung	50
Gewerbeabfall - Variante 1	Sortierung	50
Gewerbeabfall – Variante 2	Sortierung	100
Fe-Metalle	Stahlwerk	200
Aluminium	Aluhütte	300
PPK	Papierfabrik	200
PE/PP-Fraktion und Mischkunststoffe	Regranulat	300
Holz	Biomasse-HKW	100
„Brennbarer Abfall“ (EBS)	EBS-HKW	200
„Brennbarer Abfall“ (SBS)	Zementwerk	300
Deponat, Steine, Schlacke	Deponie	300

Als Transportmittel wurde mit einem Lkw mit einer Zuladung von 24 Tonnen und Dieselkraftstoff mit 5 % Biodiesel Zumischung gerechnet (Tabelle 29).

Tabelle 29. Verbrauchs- und Emissionsdaten Lkw je Strecke (voll beladen, inkl. Rückfahrt leer)

Verbrauch l/100km	Verbrauch l/Mg*km	GWP je Liter Diesel kg CO <sub>2</sub> äq/ l Diesel	KEA je Liter Diesel kJ/l Diesel	GWP kg CO <sub>2</sub> äq/Mg, km	KEA kJ/Mg, km
34,9	0,029	3,1	39.140	0,09	1.135

### 12.2.2 Sortieranlagen

Die Beschreibung der Sortieranlagen erfolgt in den Kapiteln 9 (Basisvariante und Variante 1) und 11 (Variante 2). Als weitere Daten gehen noch die Aufwendungen zum Betrieb der Anlagen in die Bilanz ein. Bei den rein mechanischen Sortier- und EBS-Aufbereitungsanlagen ist das im Wesentlichen der Energie- und Dieselaufwand. Der Strombedarf wurde bei vier Anlagen erhoben und durch Erfahrungswerte validiert und ergänzt. Der Strombedarf ergibt sich aus dem Mittel dieser Werte. Der Dieserverbrauch beruht auf Erfahrungswerten.

Für die Variante 2 (verbesserte Sortierung in einer optimierten Modellanlage) wurde der hierfür erforderliche Mehraufwand für die Sortierung (Betrieb zusätzlicher Trennaggregate) auf +20 % geschätzt.

Tabelle 30. Aufwendungen der Sortier- und EBS-Aufbereitungsanlagen

	Verbrauch kWh/Mg	Emissionsfaktor (EF) kg CO <sub>2</sub> /MWh	Belastung kg CO <sub>2</sub> /Mg
<b>Basisvariante/ Variante 1</b>			
Strom	59,5	665,9	39,6
Diesel	6,3	341,8	2,2
Gesamt			41,8
<b>Variante 2</b>			
Gesamt			50,2

Für die Aufbereitung der gemischten Gewerbeabfälle in EBS-Aufbereitungsanlagen wurde der gleiche Strombedarf berechnet.

Nach Öko-Institut 2008 ist der Aufwand für die Herstellung von hochwertigem EBS für Zementwerke höher als der für EBS, die in EBS-HKWs eingesetzt werden. Demzufolge erhöht sich der Aufwand für diesen Teilstrom auf 86,6 kg CO<sub>2</sub>/Mg.

### 12.2.3 MBA

Nach [Öko-Institut/IFEU 2010] wurden in 2006 in MBA, MA und MBS in Deutschland durchschnittlich 53 % des Inputs verwertet und 47 % als Summe aus Deponiegut und Verlusten durch biologischen Abbau und Trocknung ausgewiesen. Dabei wurde ein Mix von 69 % aeroben MBAs (ohne Vergärung) und 31 % anaeroben MBAen (mit Vergärung) angesetzt. Bei letzteren wird der Bedarf an Strom und Wärme mit den bereitgestellten Mengen verrechnet.

Bei der MBA sind darüber hinaus die Bereitstellung von Strom und Wärme, die direkten Emissionen und der Aufwand zur Ablagerung des Deponats zu berücksichtigen. Der daraus resultierende Emissionsfaktor für den Betrieb der MBA beträgt 27,2 kg CO<sub>2</sub>/Mg [Öko-Institut/IFEU 2010].

Der Energieaufwand und die -bereitstellung für eine so generierte „durchschnittliche“ MBA zeigt Tabelle 31.

Tabelle 31. Energiedaten der „durchschnittlichen“ MBA [Öko-Institut/IFEU 2010]

Bedarf kWh/Mg		Bereitstellung kWh/Mg	
Strom	Wärme	Strom	Wärme
41,6	11,2	-19,8	-28,2

Bei der Behandlung von Gewerbeabfällen in einer MBA ist zu berücksichtigen, dass Gewerbeabfälle gegenüber Restabfall aus Haushalten einen höheren Anteil an heizwertreichen Fraktionen aufweisen. Nach Tabelle 16 werden in der MBA etwa 75 % verwertbare Stoffe abgetrennt und nur 25 % als Summe aus Deponiegut und Verlusten ausgewiesen. Deshalb wird der Emissionsfaktor nach [Öko-Institut/IFEU 2010] von 27,2 kg CO<sub>2</sub>/Mg zur Hälfte angesetzt. Für den restlichen Anteil wird davon ausgegangen, dass nur eine mechanische Aufarbeitung erforderlich ist, die nach [Fricke/ Kugelstadt 2010] je Mg Input einen Energiebedarf von 19,4 kWh aufweist. Daraus resul-

tiert ein Emissionsfaktor von 13 kg CO<sub>2</sub>/Mg. Für die Behandlung des Gewerbeabfalls in der MBA wird demnach ein Aufwand von 20,1 kg CO<sub>2</sub>/Mg angesetzt.

In den Varianten V 1 und V 2 wird die MBA nicht mehr extra bilanziert. Es wird dennoch davon ausgegangen, dass auch MBAen ihren mechanischen Anlagenteil so ausbauen könnten, dass die Anforderungen für die Sortierung von Gewerbeabfälle erfüllt werden können.

#### 12.2.4 Recycling

Die in den Sortieranlagen abgetrennten Wertstofffraktionen werden den Verwertungsanlagen angeliefert und dort weiter aufbereitet. Dabei entstehen Verluste durch die Abtrennung der Störstoffe und durch Feuchteverluste.

Für die Feuchteverluste werden durchschnittliche Praxisdaten eingesetzt, die schon der Bilanz in Öko-Institut/HTP 2012 zugrunde gelegt wurden.

Die Störstoffgehalte werden aus den Ergebnissen der Anlagenbilanzen abgeleitet. Ein Abgleich mit Bilanzdaten aus bereits durchgeführten Ökobilanzen zur Verwertung von vergleichbaren Fraktionen aus Haushalts- und Verpackungsabfällen zeigte eine gute Übereinstimmung. Bei der aufwendigen Verwertung von Mischkunststoffen zu PO-Granulat wurden zusätzliche Aufbereitungsverluste nach Öko-Institut/HTP 2012 angesetzt.

Die abgetrennten Störstoffe werden dem EBS-Strom (EBS im HKW in Tabelle 32) zugeschlagen, der in EBS-Verbrennungsanlagen verwertet wird. Eine Ausnahme bilden die Rückstände aus der Verarbeitung der Folienfraktion, die der MKS-Verwertung zugeschlagen werden. Diese Vorgehensweise führt dazu, dass die in Tabelle 32 aufgeführten Zahlenangaben für EBS im HKW von den Zahlenangaben der „brennbaren Abfälle“ in den Anhang 18, Anhang 19 und Anhang 21 abweichen.

Tabelle 32. Bruttomengen zum Recycling und zur energetischen Verwertung, Störstoffe und Feuchteverluste sowie daraus abgeleitete Nettomengen

	Brutto-Mengen**			Störstoffe			Feuchteverluste (Aufbereitungsverluste)	Mengen nach Feuchte- und Aufbereitungsverlusten (Nettomengen)		
	Mg			Mg				Mg		
	Ist	V 1	V 2	Ist	V 1	V 2		Ist	V 1	V 2
Fe-Metalle	181.720	192.530	257.280	12.507	22.951	30.669	3%	158.925	150.701	201.383
Aluminium	28.780	33.530	47.150	9.141	17.337	24.379	3%	18.530	15.708	22.088
PPK	127.850	283.190	861.330	49.839	110.394	335.766	18%	63.969	141.693	430.963
PE/PP-Fraktion	63.891	141.524	481.022	11.743	26.013	66.976	13% Folien 8% KS	45.579	100.961	362.157
Mischkunststoff (Regranulat)	446	989	103.449	82	182	11.285	15% Feuchte (30%)	217	480	54.831
Mischkunststoff (Holz-/Beton-Ersatz)*	986	2.183	230.398	164	363	22.571	15%	698	1.546	176.592
Holz	92.420	186.390	363.900	12.939	26.095	50.946		79.481	160.295	312.954
EBS/SBS***	2.944.075	3.771.445	3.191.492				2,2% – 3,2%	2.810.282	3.607.787	3.104.988
MVA	2.392.900	1.257.148	740.425					2.392.900	1.257.148	740.425

Abweichungen bei der Summen-/Produktbildung sind auf Rundungsfehler zurückzuführen.

\* Die Summe der Mischkunststoffe-Brutto weicht von den Angaben in Anhang 18 ab, da in Tabelle 32 der Aufbereitungsverlust der Mischkunststoffe bei der Regranulierung in der Bruttomenge der Mischkunststoffe für Holz-/Betonersatz enthalten ist.

\*\* Vergleiche zu Ist: Anhang 18, zu V 1: Anhang 19 und zu V 2: Anhang 21

\*\*\* EBS ins HKW, SBS zur Mitverbrennung (zur Aufteilung vgl. Tabelle 30).

In Tabelle 33 werden die Emissionsfaktoren für die Aufwendungen des Recyclings und für Herstellung des Primärmaterials, das dem Recyclingsystem gutgeschrieben wird, am Beispiel des GWP ausgewiesen.

Tabelle 33. Spezifische Emissionsfaktoren für die Aufwendungen und Gutschriften der einzelnen Recyclingfraktionen

Fraktion		Aufwendung kg CO <sub>2</sub> /Mg	SF	Gutschrift **** kg CO <sub>2</sub> /Mg	Netto- Gutschrift kg CO <sub>2</sub> /Mg	Quelle
Fe-Metalle		338	1	-1.284	-945	Öko-Institut/IFEU 2010
Aluminium		406	1	-9.713	-9.307	Öko-Institut/IFEU 2010
PPK		168	1	-887	-719	Öko-Institut/IFEU 2010
PE/PP- Fraktion	Folien	732	0,95	-2.101	-1.369	Öko-Institut/HTP 2012 ecoinvent V3 2013
	Andere KS	340	0,95	-1.954	-1.615	Öko-Institut/HTP 2012 ecoinvent V3 2013
Mischkunststoffe (Regranulat)		300	0,9	-1.852	-1.552	Öko-Institut/HTP 2012 ecoinvent V3 2013
Mischkunststoffe (Holz- /Betonersatz)*		226	**	-447	-221	Öko-Institut/HTP 2012 HTP 2013 ecoinvent V3 2013
Steine		0	1	-5	-5	Eigene Annahme ecoinvent V3 2013
Holzschonung PPK		45,1	1,78 ***	-1.128	-1.083	Öko-Institut/IFEU 2010 ecoinvent V3 2013
Holzschonung MKS (Holz- /Betonersatz)*		45,1	1***	-219	-174	Öko-Institut/IFEU 2010 eigene Annahmen ecoinvent V3 2013

\* vgl. hierzu Tabelle 36 und Tabelle 37

\*\* Substitutionsfaktoren für Mischkunststoffe als Ersatz für Holz, Beton oder dickwandige Kunststoffe wurden in die Berechnung der spezifischen Gutschriften integriert (vgl. Tabelle 35).

\*\*\* pro Tonne PPK bzw. MKS werden 1,78 bzw. 1 Tonne Holz geschont.

\*\*\*\* Der Substitutionsfaktor ist berücksichtigt.

## Papierrecycling

Der Einsatz von zusätzlichen Mengen Post-Consumer-Altpapier kann nur grob abgeschätzt werden, da genaue Stoffflüsse für diesen Sektor nicht vorliegen und diese ohnehin nur eine Momentaufnahme bilden würden. Die Verwendung unterliegt dem Marktgeschehen und wird stark durch die Art der Sortierung beeinflusst [Öko-Institut 2008].

Bei der Frage, welche Primärfasern durch Altpapierrecycling ersetzt werden, würde eine Beschränkung auf ein Papiersegment den Verflechtungen des Papiermarktes nicht gerecht werden. So besteht z. B. im Verpackungsbereich eine traditionell hohe Altpapiereinsatzquote. Eine Verminderung dieser würde eigentlich den Einsatz von Neufasern in diesem Segment erfordern<sup>37</sup>. Wahrscheinlicher ist aber der Zufluss von höheren Faserqualitäten aus dem Sektor der Graphischen Papiere, wo dann dafür Neufasern eingesetzt werden müssen. Insofern wurde zur Ermittlung der wahrscheinlich ersetzten Neufasern der Papiermarkt als Ganzes betrachtet und für die wichtigsten Segmente (Zeitungsdruckpapier, Magazinpapier, Kopierpapier, PPK für Verpackungen) der jeweilige Anteil an eingesetztem Zell- und/oder Holzstoff abgeschätzt und über Vermarktungszahlen der Papierprodukte nach VDP gewichtet. Danach ergibt sich ein Neufasereinsatzmix in Deutschland von rund 57 % Zellstoff und 43 % Holzstoff [VDP]. Da in Deutschland keine integrierte Papierproduktion erfolgt und auch wenn es kein Altpapier gäbe, keine Zellstoffindustrie aufgebaut, sondern verstärkt importiert würde, ist eine Verrechnung der Substitution auf Faser-ebene für Deutschland angemessen [Öko-Institut/IFEU 2010].

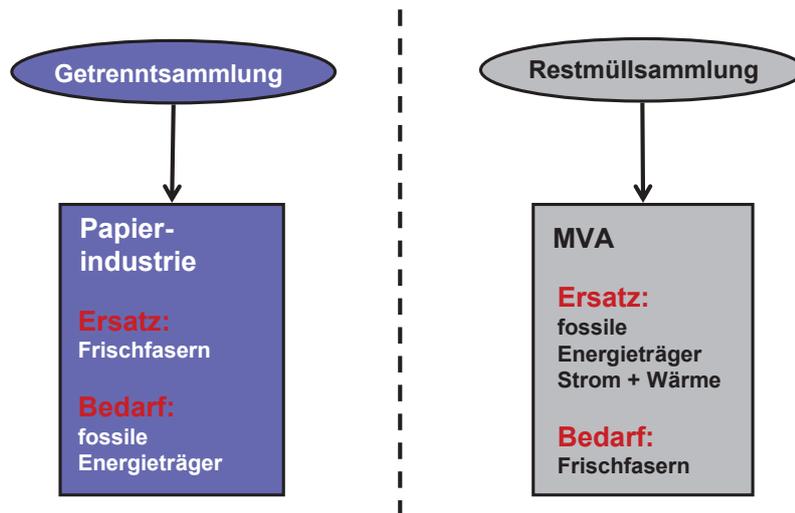
## Holzschonung

Die Abschätzung von Umwelt- und Klimaeffekten durch Ökobilanzen beruht auf dem Vergleich der Herstellung von Papieren bzw. Faserstoffen aus Altpapier im Vergleich zu qualitativ vergleichbaren Papieren bzw. Faserstoffen aus Primärrohstoffen. In der Basisvariante wird das Altpapier dagegen in der MVA oder in EBS-Verbrennungsanlagen energetisch genutzt (Abbildung 59).

---

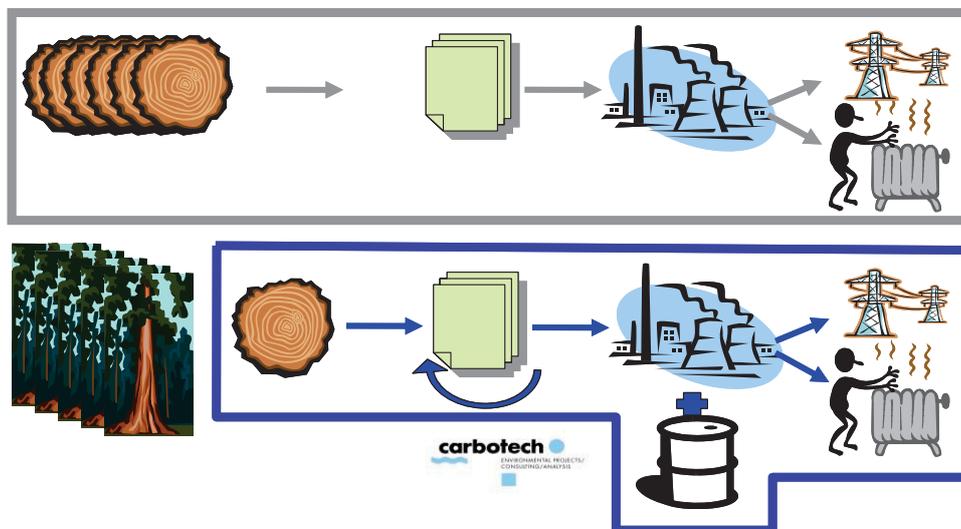
<sup>37</sup> PPK für Verpackungen bestehen bei Herstellung aus Primärmaterial etwa zu 70 % aus Zellstoff und 30 % aus Holzstoff.

Abbildung 59: Bilanzrahmen der Bilanzierung zusätzlich erfasster Mengen Altpapier im Vergleich zur Verbrennung in der MVA [Öko-Institut 2008]



Gleichzeitig kann eingespartes Holz energetisch verwertet werden. Würde die energetische Nutzung des eingesparten Holzes wie in zahlreichen Bilanzen [BIFA, ATZ] nicht berücksichtigt, wäre die Bilanz asymmetrisch, da weder bei einer Klimabilanz noch durch die sonstigen gebräuchlichen Umweltkriterien der Ökobilanz die „positiven“ Aspekte der Schonung von Holz bewertet würden. In diesem Fall muss im Szenario Papierrecycling durch zusätzlichen Primärenergieverbrauch, dargestellt durch das Ölfass, die Energiebilanz ausgeglichen werden (Abbildung 60), da in der MVA weniger Altpapier energetisch genutzt wird.

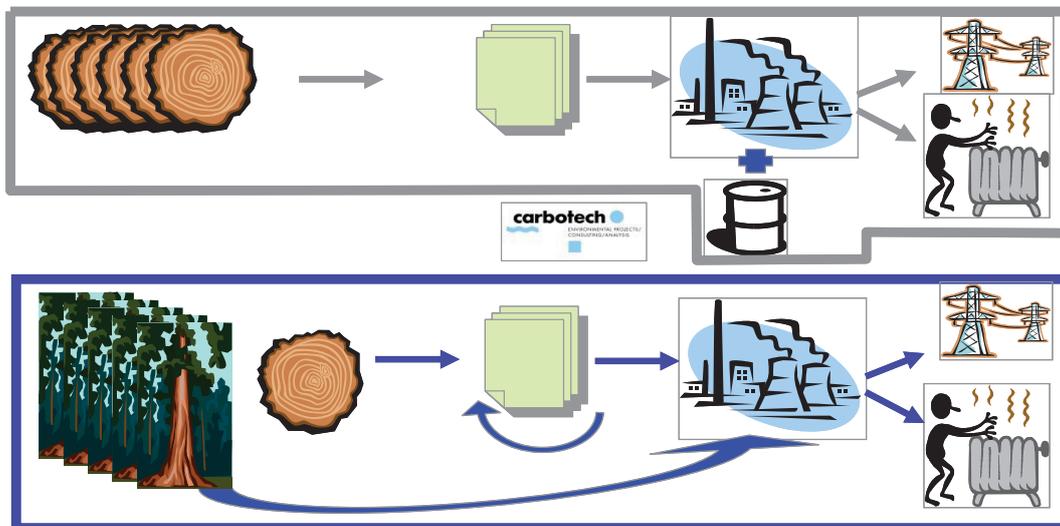
Abbildung 60: Asymmetrische Systemgrenzen der Vergleichsszenarien ohne Berücksichtigung der Holznutzung [nach Dinkel 2000, Dinkel 2006]



Wird die Systemgrenze allerdings, wie in dieser Studie, um die Nutzung des Waldholzes erweitert, können die Systemgrenzen der beiden Vergleichsszenarien angepasst werden (Abbildung 61). Die energetische Nutzung des eingesparten Holzes führt zu einer Gutschrift aus der Strom- und Wärmebereitstellung bei der Holzverbrennung. Jetzt muss im Szenario MVA zusätzlich Pri-

märenergie eingesetzt werden. Angesichts der intensiven Holznutzung in Deutschland [Vorher/Kibat 2007] und Europa ist dies ein realistischer Ansatz [Öko-Institut 2008].

Abbildung 61: Symmetrische Systemgrenzen der Vergleichsszenarien mit Berücksichtigung der Holznutzung [nach Dinkel 2000, Dinkel 2006]



Vorgehen bei der ökobilanziellen Betrachtung:

- ▶ Die Gutschriften für das Papierrecycling werden getrennt nach Holzgutschrift und Fasergutschrift ausgewiesen.
- ▶ Für die Ermittlung der Fasergutschrift wird ein Neufasereinsatzmix in Deutschland von rund 57 % Zellstoff und rund 43 % Holzstoff zugrunde gelegt.
- ▶ Je Mg PPK, das recycelt wird, werden etwa 1,8 kg Holz eingespart. Als Holzgutschrift für die Holzschonung wird eine Nutzung des eingesparten Holzes im Holz-HKW angerechnet. Der Strom wird im europäischen Strommarkt genutzt. Als Gutschrift wird der europäische Strommix bilanziert. Die Wärmegutschrift wird als Mix aus Öl- und Gasheizungen beim Endverbraucher<sup>38</sup> berechnet. Als Aufwand wird der Lkw-Transport des Holzes zum HKW mit 100 km angesetzt.
- ▶ In einer Sensitivität wird die Holzschonung, also die Einsparung von CO<sub>2</sub>-Emissionen durch die Erhaltung des eingesparten Holzbestandes nach [Öko-Institut/IFEU 2010] bilanziert<sup>39</sup>.

<sup>38</sup> Analog wird bei allen Recyclingverfahren vorgegangen, bei dem Holzprodukte ersetzt werden. In dieser Bilanz wird die Holzschonung noch für den Anteil der Mischkunststoffe angesetzt, der Holzprodukte ersetzt.

<sup>39</sup> Wird Wald geschont, also verbleibt das Holz im Wald, verändert er sich über die Zeit, es wird vermehrt Kohlenstoff angereichert. Nach IFC Consulting 2006 [Öko-Institut/IFEU 2010] wird konservativ eine Speicherung von 0,8 Mg C/Mg Industrieholz angesetzt und über einen üblichen Zeitraum von 20 Jahren abgeschrieben

## Stoffliche Verwertung (Recycling) von Mischkunststoffen

Nach [Öko-Institut/HTP 2012] werden aus Mischkunststoffen entweder

- ▶ nach einer weitergehenden Aufbereitung hochwertige PO-Granulate hergestellt, die primäres PE- bzw. PP-Granulat mit einem Substitutionsfaktor von nahezu 1,0 ersetzen (PO-Recycling) oder
- ▶ mit geringerem Verarbeitungsaufwand Produkte hergestellt, die (einfache) dickwandige Kunststoffprodukte oder solche aus Holz und Beton ersetzen (Holz- und Betonersatz).

Das Mengenverhältnis zwischen PO-Recycling und Holz- und Betonersatz wird nach [Öko-Institut/HTP 2012] gemäß der Ergebnisse des Mengenstromnachweises bei der LVP-Verwertung mit 1:2 angesetzt.

Die bilanzielle Bewertung des PO-Granulats aus Mischkunststoffen erfolgt analog der Bilanz für die Hartkunststofffraktionen. Die aufwendige Aufarbeitung in Verbindung mit Verlusten um die 50 % führt zu hohen Aufwendungen bezogen auf den Output der Anlagen. In der Bilanz wird ein Substitutionsfaktor von 0,9 angesetzt.

Eine adäquate Bewertung des Verwertungsweges über den Ersatz von „einfachen“, dickwandigen Produkten aus Kunststoffen, Holz, Beton oder ähnlichen Materialien ist aufgrund der komplexen Verhältnisse nicht möglich, da:

- ▶ keine Daten über die mengenmäßige Verteilung der daraus letztendlich hergestellten Produkte, wie Parkbänke und -tische, diverse Pfähle, Paletten, Regalsysteme, Dachziegel, Pflastersteine etc. vorliegen.
- ▶ selbst bei einzelnen Produkten oder Produktgruppen der Ersatz unterschiedlicher Primärmaterialien denkbar ist. So kann eine Bank aus Mischkunststoffen eine Bank aus Holz, aus Metall und Holz, aus Primärkunststoff oder aus Beton ersetzen.
- ▶ viele Produkte aus Mischkunststoffen gegenüber den ursprünglich ersetzten Materialien Vorteile aufweisen, die dazu führen, dass als Ersatz von solchen Sekundärprodukten z.T. solche mit gleichen Eigenschaften aus Primärkunststoff den ursprünglichen aus Holz oder Beton vorgezogen würden. Dazu gehören z. B. Mehrwegpaletten aus Mischkunststoffen, die Einweg- und Mehrwegpaletten aus Holz ersetzen oder Systembauprodukte, die den schwereren Betonprodukten wegen der besseren und einfacheren Bearbeitung vorgezogen werden.
- ▶ der Substitutionsfaktor sich aus der Dichte und der Einsatzmenge der Materialien der ersetzten Produkte und der Nutzungsdauer der Produkte in Relation zu den Produkten aus Mischkunststoffen ergibt. Er kann selbst dann unterschiedlich sein, wenn das Material des Ersatzprodukts bekannt ist. Dies trifft insbesondere bei Holz zu, dessen Dichte in Abhängigkeit der Holzart (vgl. Tabelle 34) und des Feuchtegehalts sehr unterschiedlich sein kann. Selbst bei gleicher Holzart und Feuchte schwanken die Dichten für Holz in Abhängigkeit von den Standorten und den Witterungsverhältnissen in der Wachstumsphase. Die Nutzungsdauer der Kunststoffprodukte liegt aufgrund der besseren Beständigkeit gegenüber Witterungseinflüssen häufig höher als bei Holz und Beton.

- ▶ sich auf die Bestimmung des Emissionsfaktors von Holz zudem die Art der Trocknung, Imprägnierung und Verarbeitung auswirkt. Gegenüber Betonprodukten können aufgrund des geringeren Gewichts für Produkte aus MKS Einsparungen beim Umgang mit Bauteilen (reduzierter Maschinenaufwand) zum Tragen kommen.

Tabelle 34. Spannweite von Rohdichten von darrtrockenem Holz (0 % Feuchte) nach [GDH 2013, Dornbach 2013]

Holzart	Mittel kg/m <sup>3</sup>	von kg/m <sup>3</sup>	bis kg/m <sup>3</sup>
Fichte	0,43	0,30	0,64
Eiche	0,39	0,65	0,93
Bongossi	0,95	1,04	1,14

Tabelle 35. Dichte von verarbeiteten Mischkunststoffen, Beton und verschiedenen Hölzern und daraus abgeleitete Substitutionsfaktoren bei gleicher Nutzungsdauer [GDH 2013, ]

	Dichte kg/m <sup>3</sup>	SF (Dichte)
verarbeitete Mischkunststoffe	0,93	1,00
Schnittholz, lutro		
Tanne	0,46	0,49
Eiche	0,87	0,94
Beton	2,3	2,47

In [Öko-Institut/HTP 2012] wurde deshalb für den Ersatz dickwandiger Kunststoffprodukte, Holz und Beton pauschal die Gutschrift für PE-Granulat bei einem Substitutionsfaktor von 0,5 abgeschätzt.

In dieser Studie werden ein unterer und ein oberer Bereich für die Aufwendungen und Gutschriften definiert (vergleiche Tabelle 36 und Tabelle 37) und als Sensitivitäten (siehe Kapitel 0) gerechnet, der Mittelwert daraus wird in der Standardbilanz eingesetzt. Als Grundlage werden Emissionsfaktoren für die Bereitstellung von lufttrockenem Holz und Beton nach ecoinvent und für dickwandige Kunststoffprodukte der Ersatz von PE-Primärgranulat gerechnet. Die gegenüber PE schlechtere Qualität der Mischkunststoffe wird durch den Substitutionsfaktor berücksichtigt. Der Substitutionsfaktor SF wird aus Dichteunterschieden (SF<sub>D</sub>) und sonstigen Aspekten (SF<sub>S</sub>) wie Nutzungsdauer, Ersatz anderer Holzarten, Einsparungen beim Verarbeitungsaufwand und beim Emissionsfaktor nicht berücksichtigte Herstellungsschritte berechnet. Der erhöhte Materialbedarf aufgrund geringerer Qualität, Reinheit und Ähnlichem ging als grobe Abschätzung mit ein.

$$SF = SF_D \cdot SF_S$$

wobei:

- $SF$  Substitutionsfaktor
- $SF_D$  Dichteunterschiede
- $SF_S$  sonstige Aspekte wie Nutzungsdauer, Ersatz anderer Holzarten, Einsparungen beim Verarbeitungsaufwand und beim Emissionsfaktor nicht berücksichtigte Herstellungsschritte

Außerdem muss berücksichtigt werden, zu welchem Anteil die verschiedenen Materialien ersetzt werden.

Tabelle 36. Unterer Bereich des durchschnittlichen Emissionsfaktors für den Ersatz von Produkten aus dickwandigen Kunststoffen (20 %), Holz und Beton (je 40 %)

	EF kg CO <sub>2</sub> /Mg	SF <sub>D</sub>	SF <sub>S</sub>	SF	EF <sub>TS</sub> ** kg CO <sub>2</sub> /Mg	An- teil	EF <sub>MKS</sub> *** kg CO <sub>2</sub> /Mg
Weichholz, lutro	76,2	0,49	1	0,4 9	37,7	0,4	15,1
Beton	184,8	2,47	1	2,4 7	457,1	0,4	182,8
Dickwandige Kunststof- fe	977,2	1,00	0,7	0,7 0	684,1	0,2	136,8
Gutschrift MKS (H, B, dwKS) ohne Holzschonung							334,7
Gutschrift Holzschonung	633,4			0,4 9	313,3	0,4	125,3
Gutschrift MKS (H, B, dwKS) mit Holzschonung							460,1

Abweichungen sind auf Rundungsfehler zurückzuführen.

\* Als Nettogutschrift wird 50 % der Gutschrift für HDPE-Granulat angesetzt. Hierdurch wird berücksichtigt, dass für solche Produkte bei der Herstellung aus Primärware häufig Füllstoffe, wie Talkum, Kaolin, Schwerspat u. ä. zum „Strecken“ der Kunststoffe zugemischt werden.

\*\* EF<sub>TS</sub> = EF \* SF

\*\*\* EF<sub>MKS</sub> = EF<sub>TS</sub> \* Anteil

Tabelle 37. Oberer Bereich des durchschnittlichen Emissionsfaktors für den Ersatz von Produkten aus dickwandigen Kunststoffen, Holz und Beton (je ein Drittel)

	EF kg CO <sub>2</sub> /Mg	SF <sub>D</sub>	SF <sub>S</sub>	SF	EF <sub>TS</sub> ** kg CO <sub>2</sub> /Mg	An- teil	EF <sub>MKS</sub> *** kg CO <sub>2</sub> /Mg
Weichholz, lutro	76,2	0,49	3	1,4 8	113,1	0,333	37,7
Beton	184,8	2,47	1,5	3,7 1	685,6	0,333	228,5
Dickwandige Kunststoffe	977,2	1,00	0,9	0,9 0	879,5	0,333	293,2
Gutschrift MKS (H, B, dwKS) ohne Holzschonung							559,4
Gutschrift Holzschonung	633,4			1,4 8	939,9	0,333	313,3
Gutschrift MKS (H, B, dwKS) mit Holzschonung							872,7

Abweichungen sind auf Rundungsfehler zurückzuführen.

\* Als Nettogutschrift wird 50 % der Gutschrift für HDPE-Granulat angesetzt. Hierdurch wird berücksichtigt, dass für solche Produkte bei der Herstellung aus Primärware häufig Füllstoffe, wie Talkum, Kaolin, Schwerspat u. ä. zum „Strecken“ der Kunststoffe zugemischt werden.

\*\*  $EF_{TS} = EF * SF$

\*\*\*  $EF_{MKS} = EF_{TS} * \text{Anteil}$

Für die Standardberechnung ergeben sich daraus als Mittelwerte Emissionsfaktoren für die Mischkunststoffe, die dickwandige Kunststoffe, Holz oder Beton ersetzen, von

- ▶ 447,1 kg CO<sub>2</sub>/Mg MKS ohne Berücksichtigung der Holzschonung bzw.
- ▶ 666,4 kg CO<sub>2</sub>/Mg MKS mit Berücksichtigung der Holzschonung.

Die Gutschrift bezieht sich auf die Menge aufbereiteter MKS. Der Aufwand für Aufbereitung und Verarbeitung der MKS von 226 kg CO<sub>2</sub>/Mg ist dabei noch abzuziehen.

Als weitere Sensitivität wird eine Aufbereitung der gesamten Mischkunststoffe zu hochwertigem PO-Granulat bilanziert (siehe Kapitel 0).

### 12.2.5 Energetische Verwertung

Wie in den Kapiteln 8.4 und 8.5 ausführlich beschrieben, werden gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle auch direkt in MVAen und EBS-Verbrennungsanlagen (Feuerungsanlagen) verwertet. Darüber hinaus erfolgt die energetische Nutzung des abgetrennten Holzes im Holz-HKW.

Die Daten zu den Wirkungsgraden, die zur Bewertung der bereitgestellten Energie herangezogen werden, zeigt Tabelle 38. Die direkten Emissionen und die Strom- und Wärmegutschriften wer-

den aus Verbrennungsrechnungen ermittelt, denen die in den Abfallanalysen und -bilanzen erhobenen Zusammensetzungen der Abfallströme zugrunde liegen (Kapitel 8 bis 10).

Tabelle 38. Wirkungsgrade der Anlagen zur energetischen Verwertung

Anlage	Elektrischer Netto-Wirkungsgrad	Thermischer Netto-Wirkungsgrad
EBS-HKW	0,2	0,16
Holz-HKW	0,2	0,2
MVA	0,12	0,3

Für die Bereitstellung und den Bedarf von Strom wird ein Strommix nach ecoinvent angesetzt (Tabelle 39). Nach UBA 2013 liegt der Emissionsfaktor des deutschen Strommixes – bei ausschließlicher Berücksichtigung der direkten Emissionen - bei 576 kg CO<sub>2</sub>/MWh und bei 601 kg CO<sub>2</sub>/MWh für den Strominlandverbrauch (Abzug des Stromhandelssaldos). Der deutlich höhere Wert nach ecoinvent von 666 kg CO<sub>2</sub>/MWh berücksichtigt zusätzlich die Vorketten und stellt alle erforderlichen Ökobilanzdaten zur Verfügung. Durch die Nutzung eines etwas höheren Emissionsfaktors für Strom werden die Leistungen des Recyclings (Strombedarf) gegenüber der Verbrennung (Strombereitstellung) konservativ bewertet.

In Ökobilanzen der Abfallwirtschaft wurde und wird teilweise auch ein fossiler Strommix im Sinne eines Verdrängungsmixes für die Energiebereitstellung gutgeschrieben, womit unterstellt wird, dass Strom aus Abfällen nur Strom aus fossilen Brennstoffen ersetzt bzw. verdrängt. Nach vorherrschender Praxis in Ökobilanzen und in Klimabilanzen der Energiewirtschaft, wird zumindest für den Bestand der Anlagen, insbesondere wenn sie nicht flexibel betrieben werden können, der mittlere Strommix herangezogen. Weder MVA, noch EBS- und Biomasse-HKW werden derzeit flexibel betrieben. Auch für die zugebauten Kapazitäten an EBS- und Biomasse-HKW wird in dieser Studie in der Standardvariante der in der folgenden Tabelle (Tabelle 39) aufgeführte mittlere Strommix aus ecoinvent eingesetzt.

In einer Sensitivitätsanalyse (Kapitel 0) wird zudem sowohl mit dem aktuellen Wert des mittleren Strommixes von 601 kg CO<sub>2</sub>/MWh<sup>40</sup>, als auch mit dem aktuellen Wert für den fossilen Strommix von 760 kg CO<sub>2</sub>/MWh bilanziert.

Der EBS im HKW setzt sich in der Basisvariante aus den Störstoffen aus der Sortierung sowie den brennbaren Abfällen aus Sortierung, EBS-Aufbereitung und MBA zusammen. Von diesem gesamten EBS gehen 10 % ins Zementwerk und 90 % ins EBS-HKW.

In Variante 1 geht der gesamte gewerbliche Abfall in eine Sortierung. Demnach besteht der EBS aus den Störstoffen und den brennbaren Abfällen der Sortierung. Auf Grund der Wertstoffauschleusung verringert sich der Heizwert und fossile C-Gehalt des brennbaren Abfalls geringfügig gegenüber der Basisvariante. 10 % des EBS gehen ins Zementwerk, 25 % werden in der MVA entsorgt und 65 % im EBS-HKW verwertet.

<sup>40</sup> Da es sich dabei ausschließlich um direkte Emissionen handelt, wurde der höhere Wert für den Inlandsverbrauch herangezogen.

Tabelle 39. Emissionsfaktoren für Strom und Wärme

	EF kg CO <sub>2</sub> /MWh	Quelle
Strom (deutscher Strommix)	665,9	ecoinvent V3 2013
Wärme (50 % Heizöl, 50 % Erdgas) unter Berücksichtigung von 10 % Leitungsverlusten	253,6	ecoinvent V3 2013

Für die Gutschrift für Wärme wird der Ersatz von Heizungsanlagen beim Endverbraucher unterstellt. Dabei werden zu je 50 % Erdgas- und Ölheizungen durch Fernwärme ersetzt. Für das Fernwärmenetz werden 10 % Leitungsverluste berücksichtigt (vgl. auch Öko-Institut/IFEU 2010).

### 12.2.6 Co-Verbrennung

Bei der Co-Verbrennung von EBS kommt es zu einer umso besseren Gutschrift, je höher die Umweltlasten des substituierten Prozesses bzw. Brennstoffs sind. In diesem Zusammenhang wird bei der ökobilanziellen Betrachtung wie folgt vorgegangen:

- ▶ EBS ersetzen in der Standardbilanz Steinkohle.
- ▶ Es wird der Substitutionsfaktor 1 bezogen auf den Heizwert zugrunde gelegt.
- ▶ Am Beispiel der energetischen Verwertung im Zementwerk sowie einer Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss des ersetzten Brennstoffes aufgezeigt. Dabei steht die Berechnung aber stellvertretend für den Ersatz von primären Brennstoffen, egal in welchen Anlagen diese eingesetzt werden.
- ▶ Als Sensitivitäten wird der Ersatz des Mixes aus Primär- und Sekundärbrennstoffen bilanziert, der sich an dem realen Mix von Brennstoffen in deutschen Zementwerken orientiert (siehe Kapitel 0).

Die Leichtfraktion setzt sich aus den Sortierfraktionen „EBS 40 – 250 mm Leichtfraktion“ und „EBS > 250 mm“ der durchgeführten Abfallanalysen zusammen (vgl. Anhang 22).

Die daraus resultierenden Bilanzmengen, die der Co-Verbrennung zugeteilt werden, sind Tabelle 40 in Kapitel 12.3 zu entnehmen.

## 12.3 Ergebnisse

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse getrennt nach den einzelnen Umweltkriterien dargestellt.

### 12.3.1 Treibhauseffekt (GWP)

In Tabelle 40 sind die Ergebnisse für die drei untersuchten Varianten unter Angabe der Beiträge der wichtigsten Behandlungsschritte mit und ohne Anrechnung der Gutschriften für Holzschonung dargestellt. Die Ergebnisse sind zudem graphisch in Abbildung 62 bis Abbildung 65 dargestellt. Nach oben aufgetragen (positive Werte) sind jeweils die mit der Abfallentsorgung verbundenen Aufwendungen, nach unten (negative Werte) die damit verbundenen Gutschriften. Durch Verrechnen dieser beiden Effekte ergibt sich die Summe.

Im Ergebnis (Tabelle 40) wird deutlich, dass bereits in der Basisvariante in der Summe ohne Berücksichtigung der Holzschonung ein Beitrag von 579.044 Mg CO<sub>2</sub>/a zur Reduktion der Treibhausgase erreicht wird, der in Variante 1 um 366.702 Mg CO<sub>2</sub>/a (Faktor 1,6) und in Variante 2 um etwa 2 Mio. Mg CO<sub>2</sub>/a (Faktor 5) gesteigert werden kann. Der extra ausgewiesene Beitrag für die Holzschonung beträgt in der Basisvariante 13 %, in Variante 1 ca. 17 % und in Variante 2 ca. 17 % des Gesamtbeitrags inkl. Holzschonung.

Tabelle 40. Ergebnisse für GWP in der Standardbilanz mit Angabe der zugrunde gelegten Mengen und Emissionsfaktoren

	spez. GWP	Basisvariante		Variante 1		Variante 2	
	Basis/ V1/ V2	Menge	ges. GWP	Menge	ges. GWP	Menge	ges. GWP
	kg CO <sub>2</sub> /Mg	(Tabelle 32) Mg/a	Mg CO <sub>2</sub> /a	(Tabelle 32) Mg/a	Mg CO <sub>2</sub> /a	(Tabelle 32) Mg/a	Mg CO <sub>2</sub> /a
Fe-Metalle	-945,5	158.925	-150.259	150.701	-142.483	201.383	-190.402
Aluminium	-9.307,3	18.530	-172.461	15.708	-146.196	22.088	-205.582
PPK	-719,4	63.969	-46.017	141.693	-101.927	430.963	-310.015
PE/PP-Fraktion	-1.387,8	45.579	-63.253	100.961	-140.110	362.157	-502.588
Mischkunststoff (Regranulat)	-1.551,9	217	-336	480	-745	54.831	-85.093
Mischkunststoff (Holz-/Beton-Ersatz)	-220,7	698	-154	1.546	-341	176.592	-38.968
Steine	-5,0	59.770	-296	120.540	-597	53.200	-263
Holzschonung (PPK)	-1.082,9	78.011	-84.481	172.796	-187.127	525.564	-569.153
Holzschonung (MKS)	-174,3	698	-122	1.546	-269	176.592	-30.773
Holzverbrennung	-651,5	79.481	-51.785	160.295	-104.438	312.954	-203.900
EBS ins HKW*	-36,7 / -34,2 / -35,3*	2.538.353	-93.036	3.104.928	-106.116	1.641.155	-58.015
SBS/EBS Mitverbrennung	-1.218,7	271.929	-337.103	502.859	-623.382	1.463.833	-1.814.677
MVA*	41,8 / 21,0 / 21,0*	2.392.900	100.013	1.257.148	26.368	740.425	15.530
Sortierung	41,8	2.612.100	109.116	5.785.900	241.697	5.785.900	290.036

Stoffstromorientierte Lösungsansätze für eine hochwertige Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle

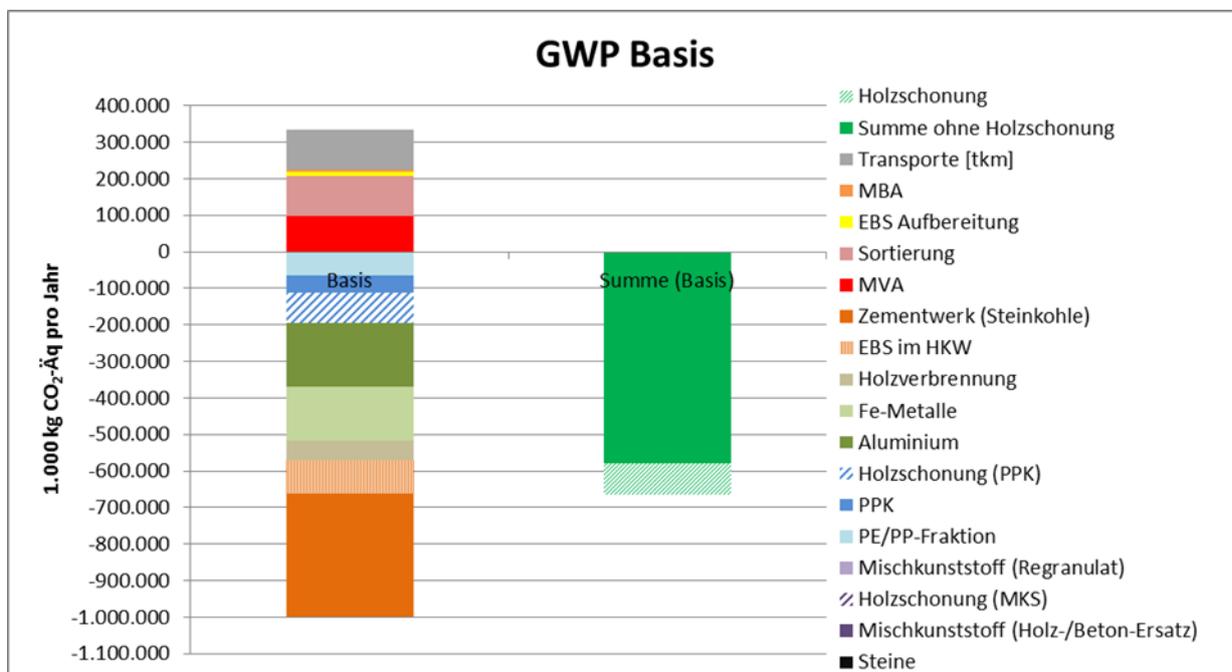
	spez. GWP		Basisvariante		Variante 1		Variante 2	
	Basis/ V1/ V2		Menge	ges. GWP	Menge	ges. GWP	Menge	ges. GWP
	kg CO <sub>2</sub> /Mg		(Tabelle 32) Mg/a	Mg CO <sub>2</sub> /a	(Tabelle 32) Mg/a	Mg CO <sub>2</sub> /a	(Tabelle 32) Mg/a	Mg CO <sub>2</sub> /a
EBS Aufbereitung	39,6	256.820	10.175					
MBA	20,1	311.500	6.261					
Transporte [tkm]	0,09	1.139.974.932	102.738	1.541.554.258	138.930	1.703.766.073	153.549	
Summe mit Holzschonung			-663.647		-		-3.550.314	
Summe ohne Holzschonung			-579.044		1.133.143		-945.746	
					-945.746		-2.950.388	

Abweichungen bei der Summen-/Produktbildung sind auf Rundungsfehler zurückzuführen.

- \* Die unterschiedlichen spezifischen Emissionsfaktoren in den Varianten ergeben sich aus den jeweils unterschiedlichen Anteilen von Schwer- und Leichtfraktion (mit unterschiedlichen Heizwerten und fossilen C-Gehalten am EBS (vgl. Anhang 26)).

Aus den Abbildungen lässt sich erkennen, dass die Aufwendungen in der Basisvariante und der Variante 1 ungefähr gleich groß sind. In der Basisvariante dominieren Transporte, Sortierung und die MVA. In Variante 1 verringert sich die Belastung durch die MVA auf Grund der reduzierten Menge sowie der veränderten Abfalleigenschaften und des damit einhergehenden geringeren Emissionsfaktors. Durch die in Variante 1 gesetzten Rahmenbedingungen (Sortierung des gesamten gemischten Gewerbeabfalls) leistet die Sortierung den größten Beitrag zu den Belastungen.

Abbildung 62: Ergebnisse für GWP für die Basisvariante in der Standardbilanz

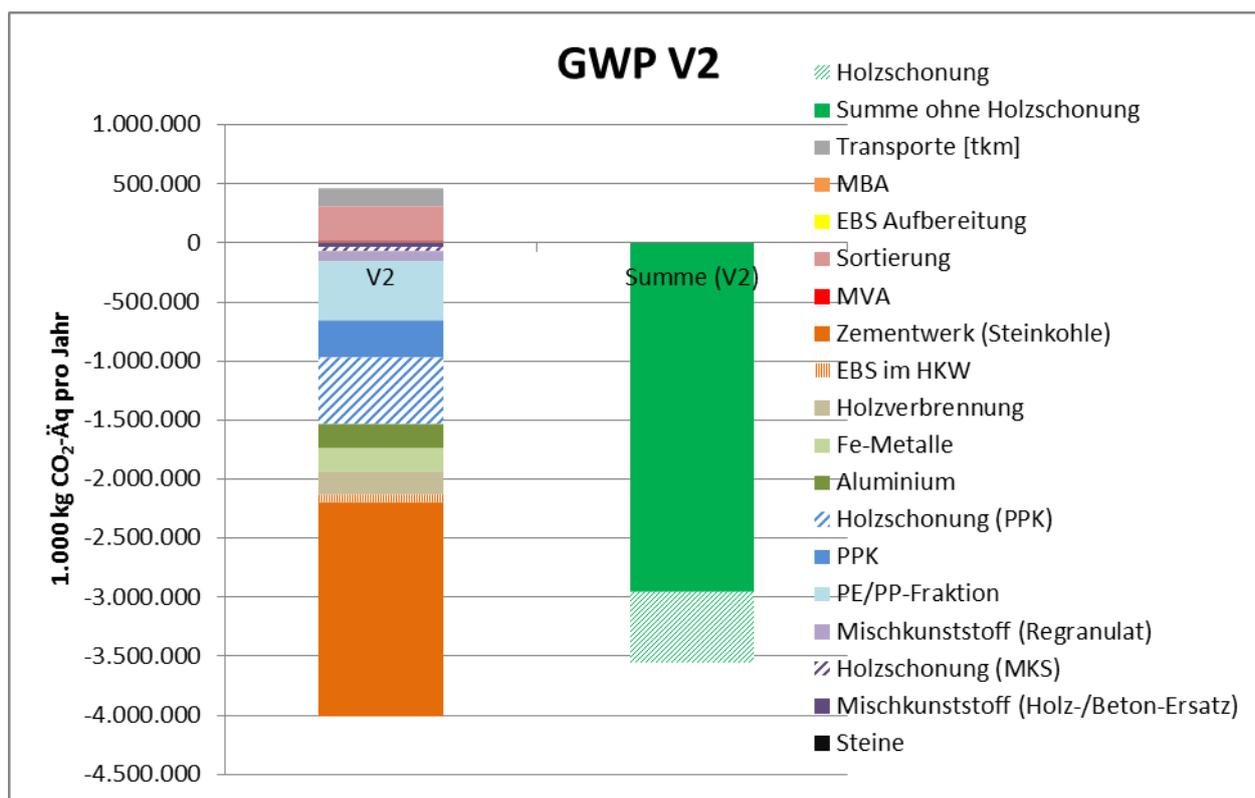


Auch in Variante 2 dominiert die Sortierung. Vor allem auf Grund des hohen Sortieraufwands der Modellanlage der Variante 2, ist der Gesamtaufwand hier größer als in den beiden anderen Varianten. In allen Varianten leistet der Ersatz von Steinkohle (bilanziert am Beispiel Zementwerk) einen erheblichen Beitrag zur Entlastung. Weiterhin wird deutlich, dass sowohl in der Basisvariante als auch in Variante 1 das Recycling der Wertstoffe Metalle, PPK inklusive Holzgutschrift sowie PE/PP einen wesentlichen Beitrag zu den Gutschriften leistet.

Dabei fällt auf, dass der Beitrag der Metalle in der Basisvariante größer ist als in Variante 1. Eigentlich sollte auf Grund des größeren Masseninputs in die Sortieranlage in Variante 1 der Metall-Output und somit auch der Beitrag zur Gutschrift größer sein. Der Rückgang des Beitrags für Fe-Metalle und Aluminium bei Variante 1 liegt an der relativ geringen Ausbeute in der durchschnittlichen Sortieranlage und den gegenüber dem Output aus den Verbrennungsanlagen höheren Verlusten bei der weiteren Aufbereitung. Das bedeutet, dass die Brutto-Mengen in Variante 1 tatsächlich höher als in der Basisvariante sind, während die zur Berechnung der Gutschriften verwendeten Netto-Mengen in Variante 1 geringer sind.



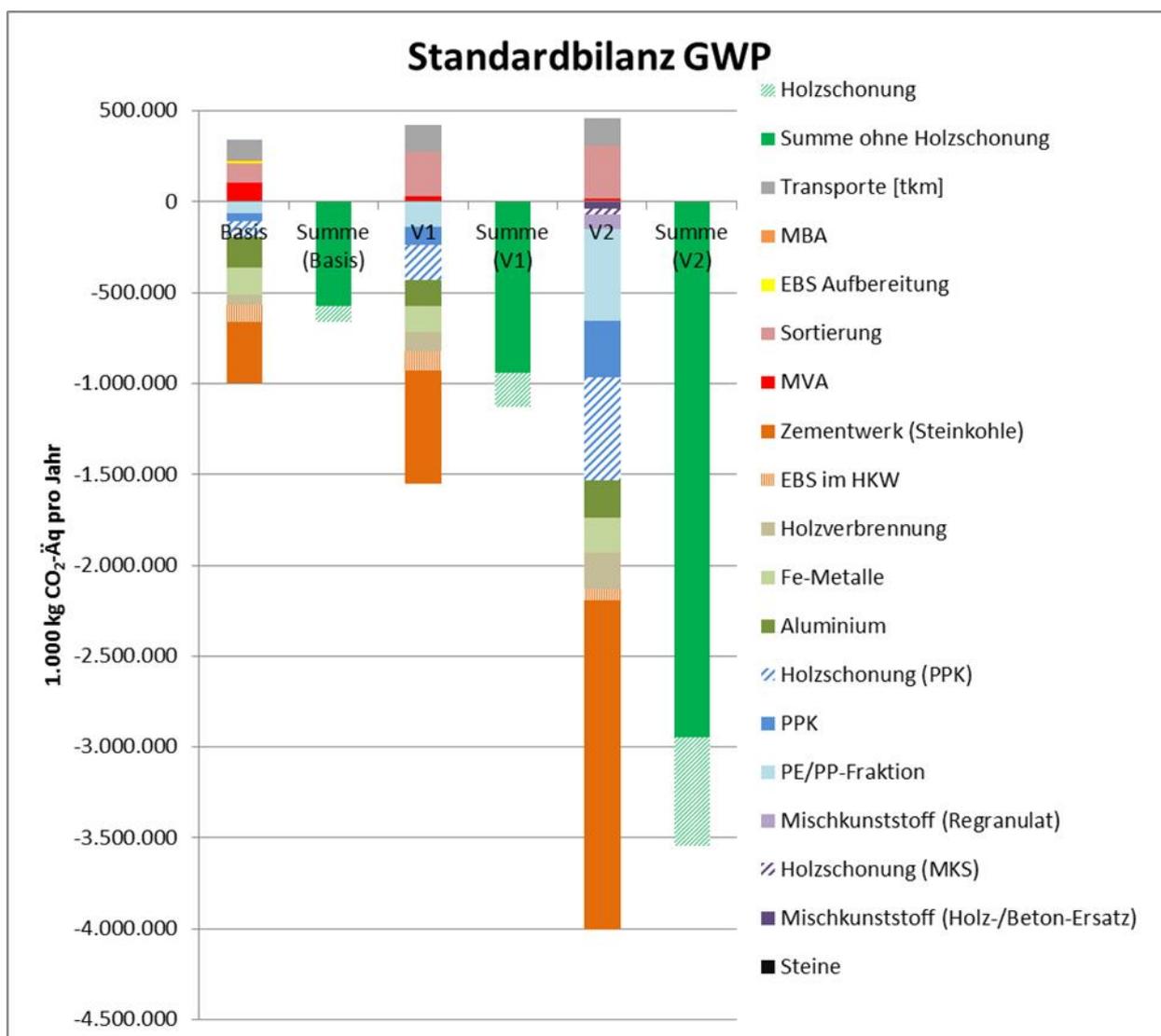
Abbildung 64: Ergebnisse für GWP für die Variante 2 in der Standardbilanz



Das Recycling von Steinen, Mischkunststoffen sowie die Holzgutschrift durch Mischkunststoffrecycling spielen auf Grund der geringen Mengen in allen drei Varianten eine eher untergeordnete Rolle. Indirekt werden durch die Verwertung des Mischkunststoffs allerdings die Emissionen in der energetischen Verwertung reduziert. Die Gutschriften nehmen von der Basisvariante hin zu Variante 2 zu.

Der direkte Vergleich der drei Varianten in Abbildung 65 zeigt noch einmal deutlicher die Größenverhältnisse der einzelnen Fraktionen sowie das Gesamtergebnis zwischen den verschiedenen Varianten. Daraus wird ersichtlich, dass die optimierte Sortierung in Variante 2 in Zusammenhang mit dem vermehrten Ersatz von Steinkohle zu einer erheblichen Verbesserung des Gesamtergebnisses beim GWP führt. Vor allem in den Fraktionen PPK und PE/PP-Kunststoffe kommt es zu einem sehr viel höheren Wertstoffoutput. Auch bei den Mischkunststoffen kommt es zu einer Verbesserung des Outputs. Allerdings spielen diese trotzdem weiterhin eine unerhebliche Rolle für das Gesamtergebnis. Zuletzt ist in der Basisvariante der Einfluss des Recyclings und der Verbrennungsprozesse auf die Gutschriften ungefähr ausgeglichen. Dieses Verhältnis verschiebt sich in den Varianten 1 und vor allem 2 infolge der Beiträge der Mitverbrennung zu Gunsten der Verbrennungsprozesse.

Abbildung 65: Vergleich der drei Varianten der Standardbilanz (GWP)



Die hohe Relevanz der dargestellten Maßnahmen für den Klimaschutz verdeutlicht ein Abgleich mit den Ergebnissen der Klimabilanz für Haushaltsabfälle. Dort wurden in einem Szenario für 2020 die Treibhausgaseinsparungen der gesamten Haushaltsabfallmengen inklusive Altholz bilanziert, bei technischer Ausstattung der Anlagen wie in 2006 aber optimierten Abfallströmen<sup>41</sup> [Öko-Institut/IFEU 2010]. Die Emissionsminderungsleistung von 12,8 Mio. Mg CO<sub>2</sub>/a aus der Behandlung von etwa 40 Mio. Mg/a Haushaltsabfällen (entspricht etwa 320 kg CO<sub>2</sub>/Mg Abfall) steht dem Beitrag in Variante 2 dieser Bilanz von 3,5 Mio. Mg CO<sub>2</sub>/a aus 5,8 Mio. Mg/a gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (entspricht etwa 600 kg CO<sub>2</sub>/Mg Abfall) gegenüber.

<sup>41</sup> Das entspricht in etwa dem Vorgehen dieser Bilanz. Wenn die Altholzmenge und der daraus ermittelte Beitrag wieder herausgerechnet wird, kann der der dort bilanzierte Beitrag der Haushaltsabfälle dem hier bilanzierten der gemischten Gewerbeabfälle gegenüber gestellt werden.

### 12.3.2 Schonung/Verbrauch fossiler energetischer Ressourcen (KEA)

Die Aufwendungen beim Kriterium „Schonung der energetischen Ressourcen“ entsprechen ihren Anteilen nach den Aufwendungen beim GWP. Ausnahme hierbei ist die thermische Verwertung in der MVA. Diese trägt hier zur Schonung fossiler Ressourcen bei und erhält somit eine Gutschrift. An dieser Tatsache lässt sich erkennen, dass energetische Verfahren beim KEA zur Schonung maßgeblich beitragen, unabhängig ob fossile oder regenerative Brennstoffe genutzt werden.

Bei den Gutschriften dominieren in der Basisvariante und der Variante 1 die Beiträge der thermischen Verwertung in der MVA, der energetischen Verwertung von EBS und der Ersatz von Steinkohle. Die leichte Verschlechterung des Gesamtergebnisses von der Basisvariante zu Variante 1 liegt in erster Linie an der erheblich geringeren Gutschrift der MVA. Dieser Rückgang liegt zum einen an der reduzierten Menge, die in die MVA geht. Zum anderen am geringeren Heizwert des Abfalls in Variante 1 und den damit zusammenhängenden geringeren spezifischen Gutschriften. Die deutliche Verbesserung in Variante 2 ist auf Seiten der Verbrennungsprozessen vor allem auf die gesteigerte Menge Steinkohleersatz durch Mitverbrennung zurückzuführen. Allerdings trägt in Variante 2 auch das Recycling, in erster Linie das PP/PE-Recycling, deutlich zu den Gutschriften bei.

Abbildung 66: Ergebnisse für KEA für die Basisvariante in der Standardbilanz

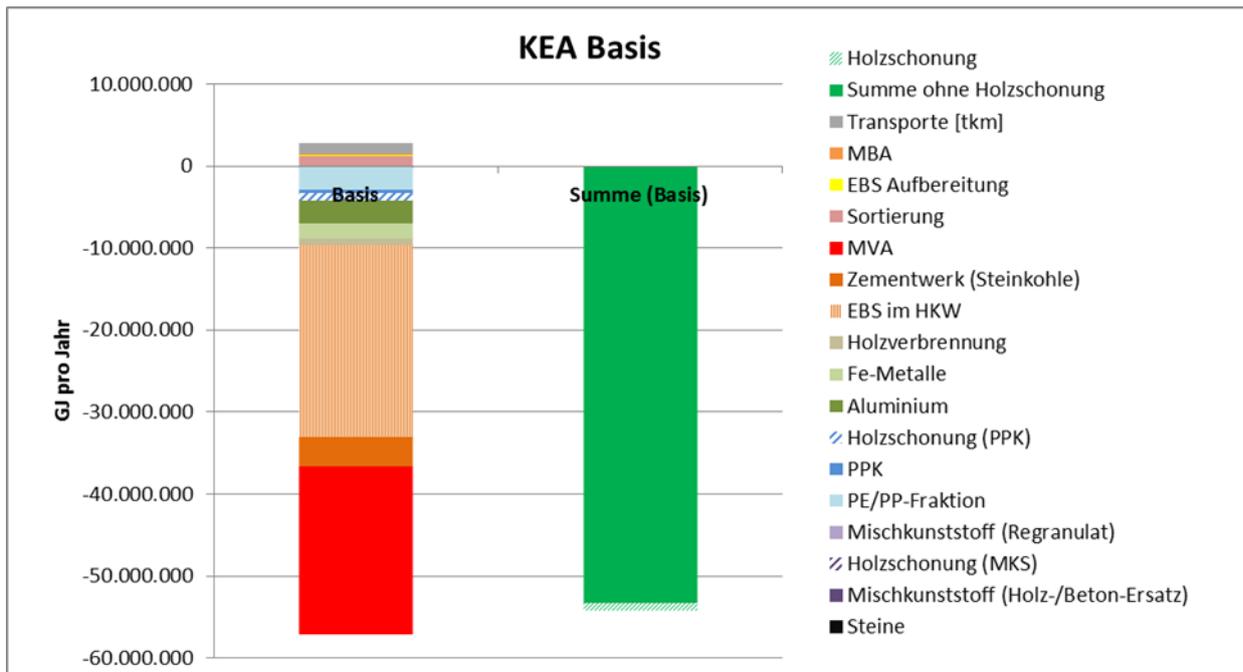
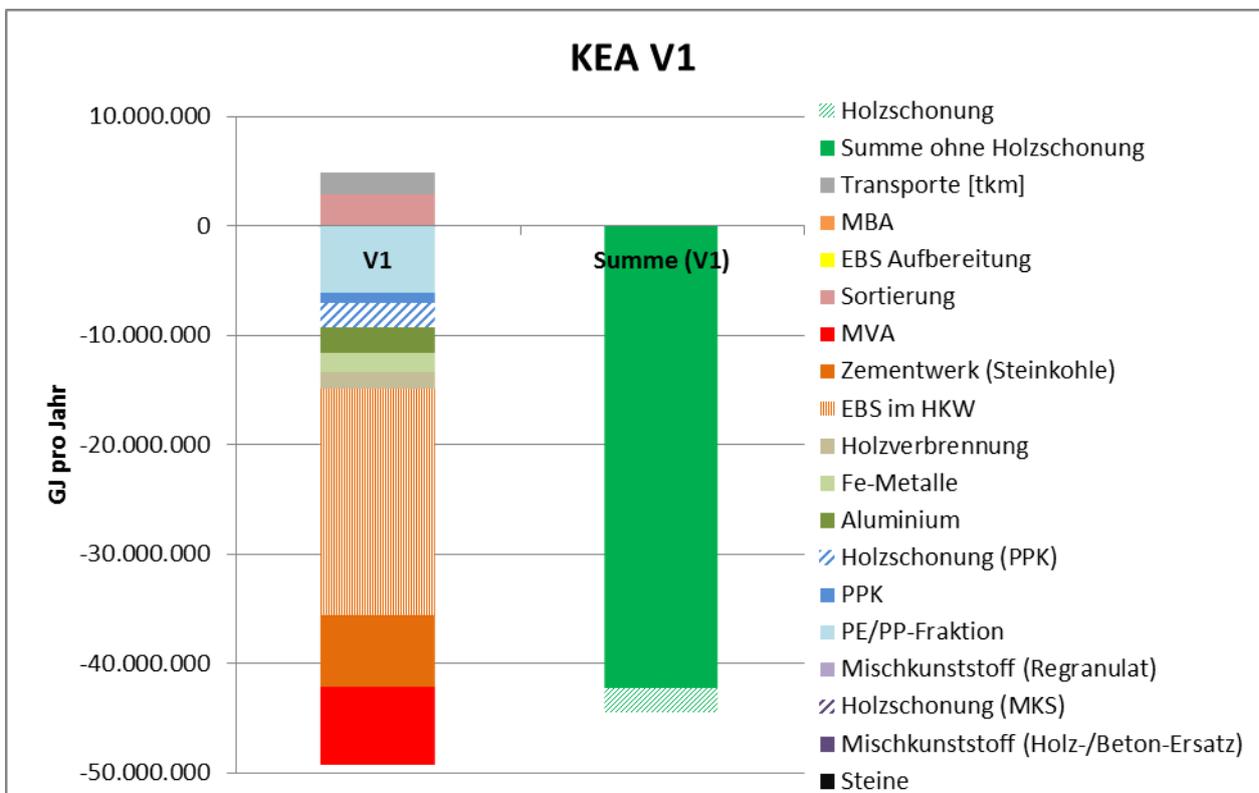


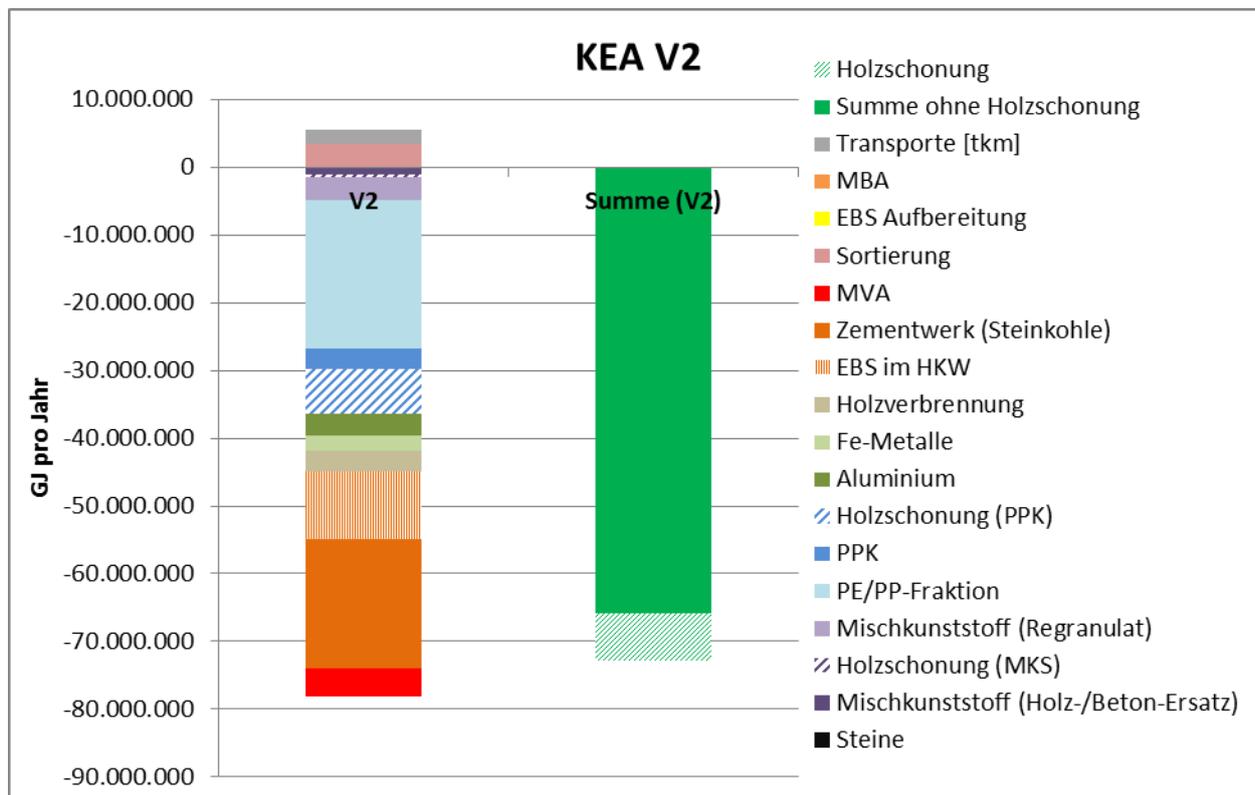
Abbildung 67: Ergebnisse für KEA für die Variante 1 in der Standardbilanz



Obwohl Aluminium auf Grund seines hohen Energiebedarfs bei der Herstellung von Primäraluminium eine hohe spezifische KEA-Gutschrift für das Recycling bekommt, spielt Aluminium wegen der sehr geringen Mengen keine große Rolle. Insgesamt kann Variante 2 die Gesamtbeiträge zur Ressourcenschonung gegenüber der Basisvariante knapp um Faktor 1,2 steigern. Zu dieser Ver-

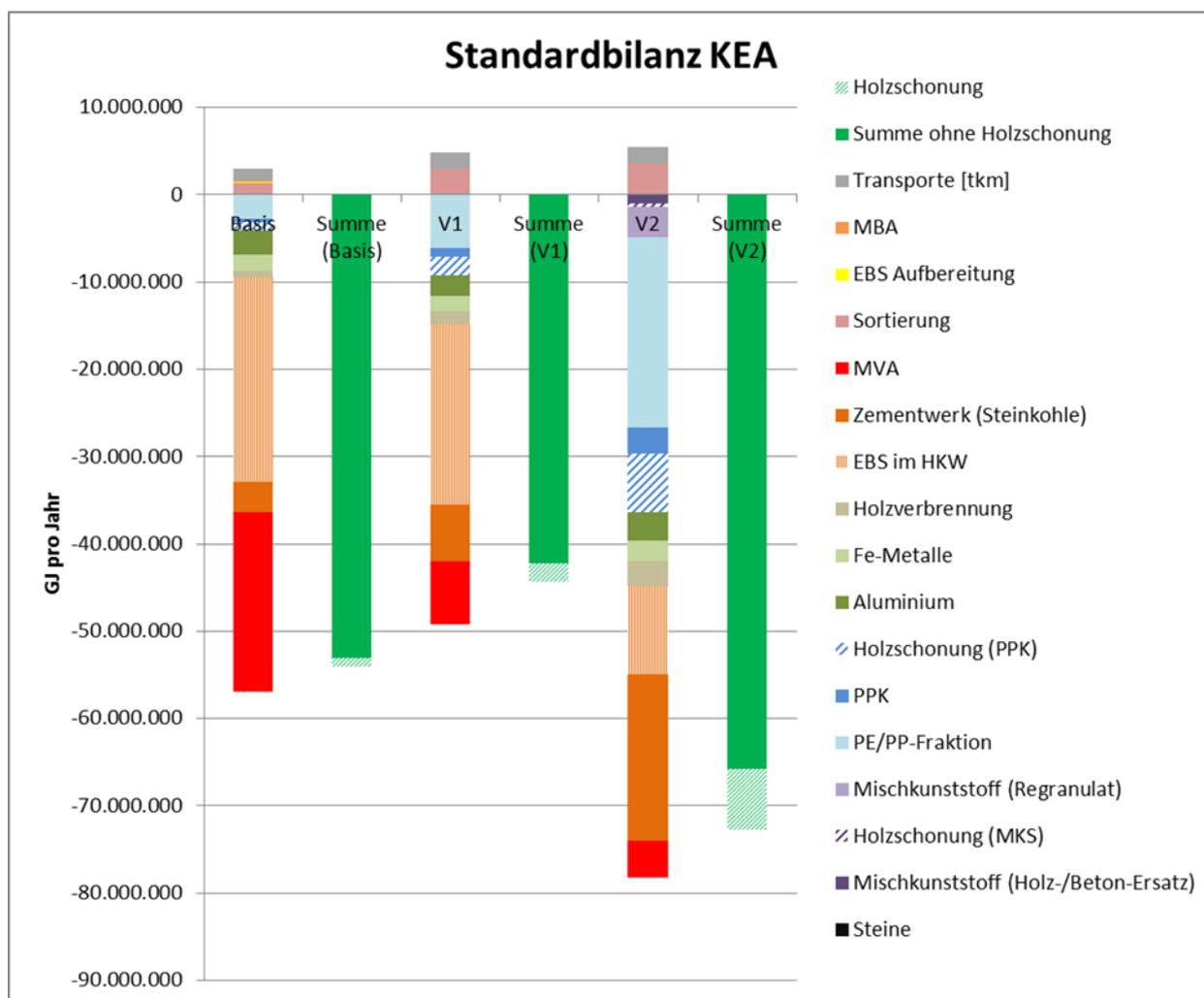
besserung trägt zum großen Teil die optimierte Sortierung bei, die von der Basisvariante zu Variante 2 zu einer 9,5-fach höheren KEA-Gutschrift für Kunststoffe führt.

Abbildung 68: Ergebnisse für KEA für die Variante 2 in der Standardbilanz



Insgesamt lässt sich erkennen, dass für die Schonung fossiler Ressourcen eine Umstellung auf Variante 1 keine positiven Effekte bringt, während eine optimierte Sortierung wie in Variante 2 zu einer verbesserten Schonung fossiler Ressourcen beitragen kann. Zudem hat in der Basisvariante und der Variante 1 die Verbrennung den größten Einfluss auf die Gutschriften, während die Anteile zwischen den Verbrennungsprozessen und dem Recycling in Variante 2 ausgeglichen sind.

Abbildung 69: Vergleich der drei Varianten der Standardbilanz (KEA)



### 12.3.3 Versauerung (AP)

Für die Wirkungskategorie Versauerung sind die Aufwendungen ähnlich verteilt wie beim KEA: Transporte und Sortierung dominieren, MVA geht als Gutschrift nicht als Aufwand ein. Zu beachten ist hier, dass der Ersatz von Steinkohle zu einem Aufwand führt und nicht zu einer Gutschrift, wie in allen anderen Wirkungskategorien.

Bei den Gutschriften zeigt sich ein verändertes Bild. Auch innerhalb der Wirkungskategorie unterscheiden sich die Varianten in der Zusammensetzung ihrer Gutschriften. In der Basisvariante und Variante 1 dominieren die Recycling- nur leicht die Verbrennungsprozesse, während in Variante 2 das Recycling deutlich mehr zu den Gutschriften beiträgt als die Verbrennungsprozesse. Diese Entwicklung ist zum einen den steigenden Recycling-Mengenanteilen und zum anderen den spezifischen AP-Gutschriften zuzuschreiben (diese sind für die Recyclingprozesse deutlich besser als für Verbrennungsprozesse).

Abbildung 70: Ergebnisse für AP für die Basisvariante in der Standardbilanz

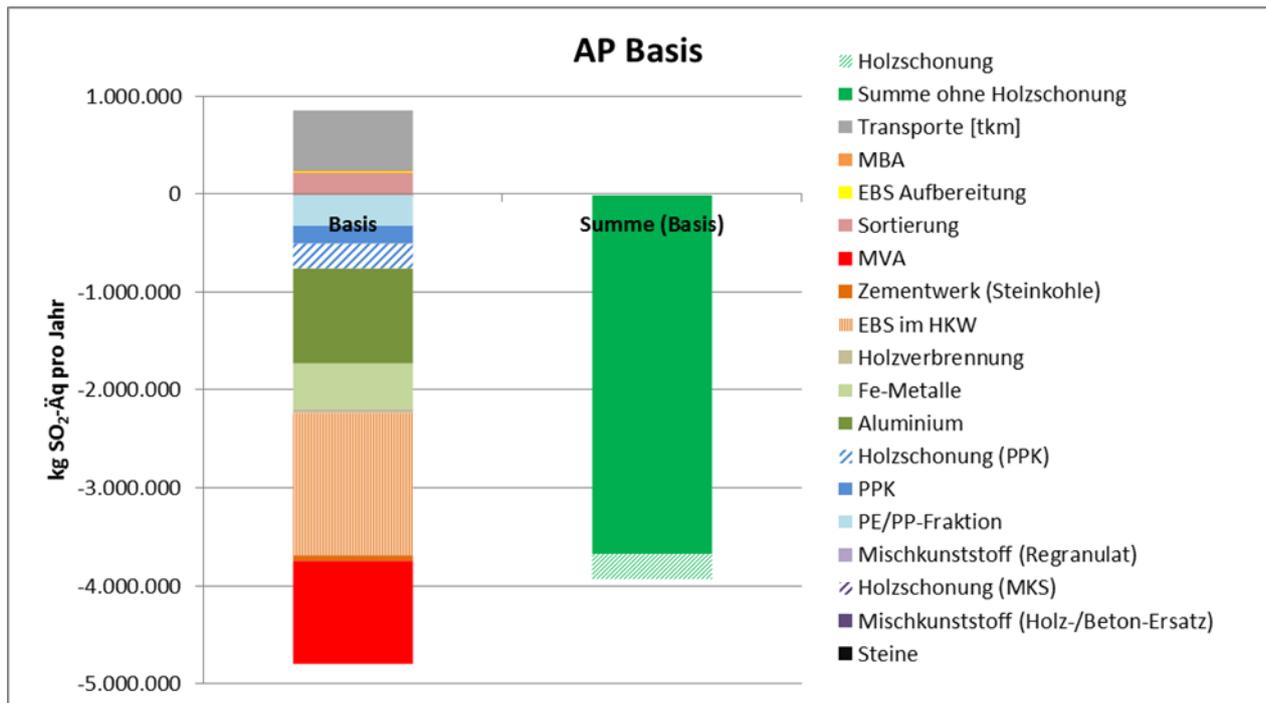
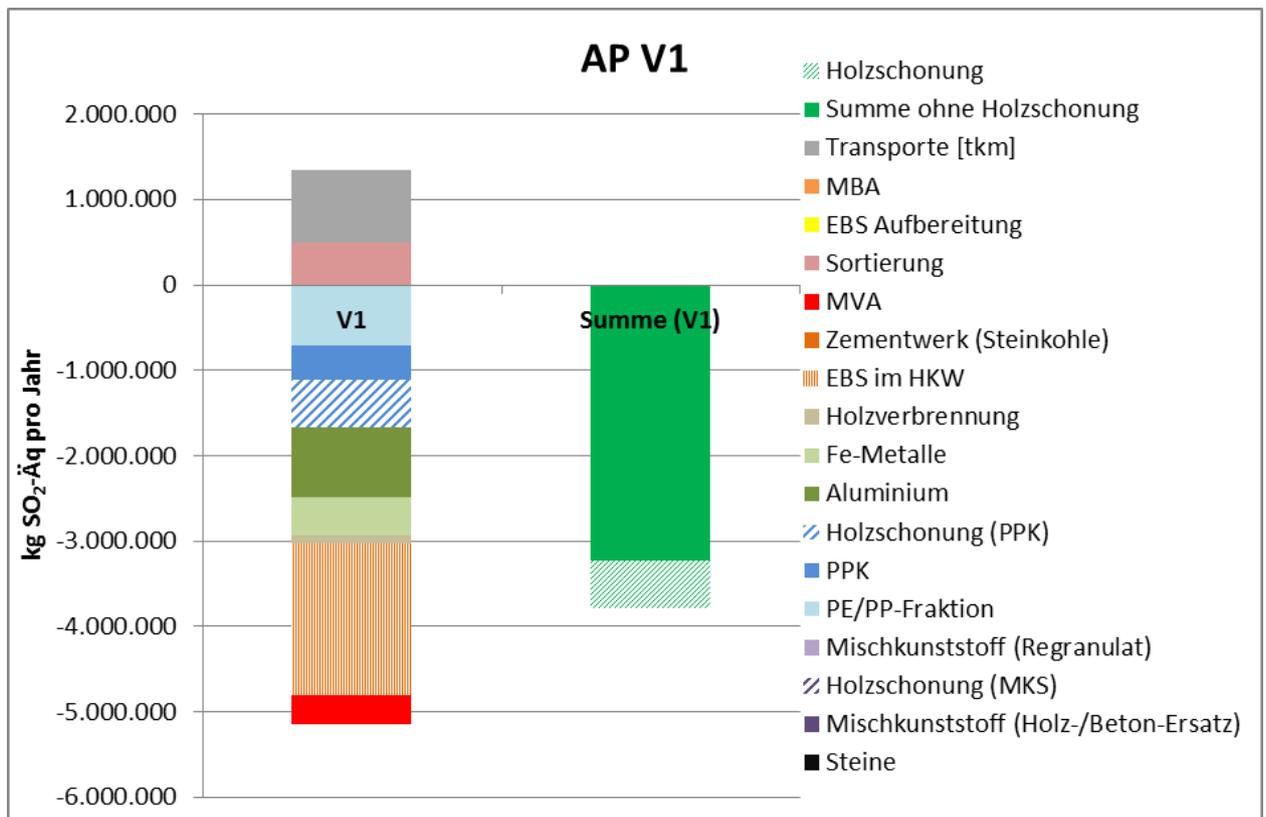


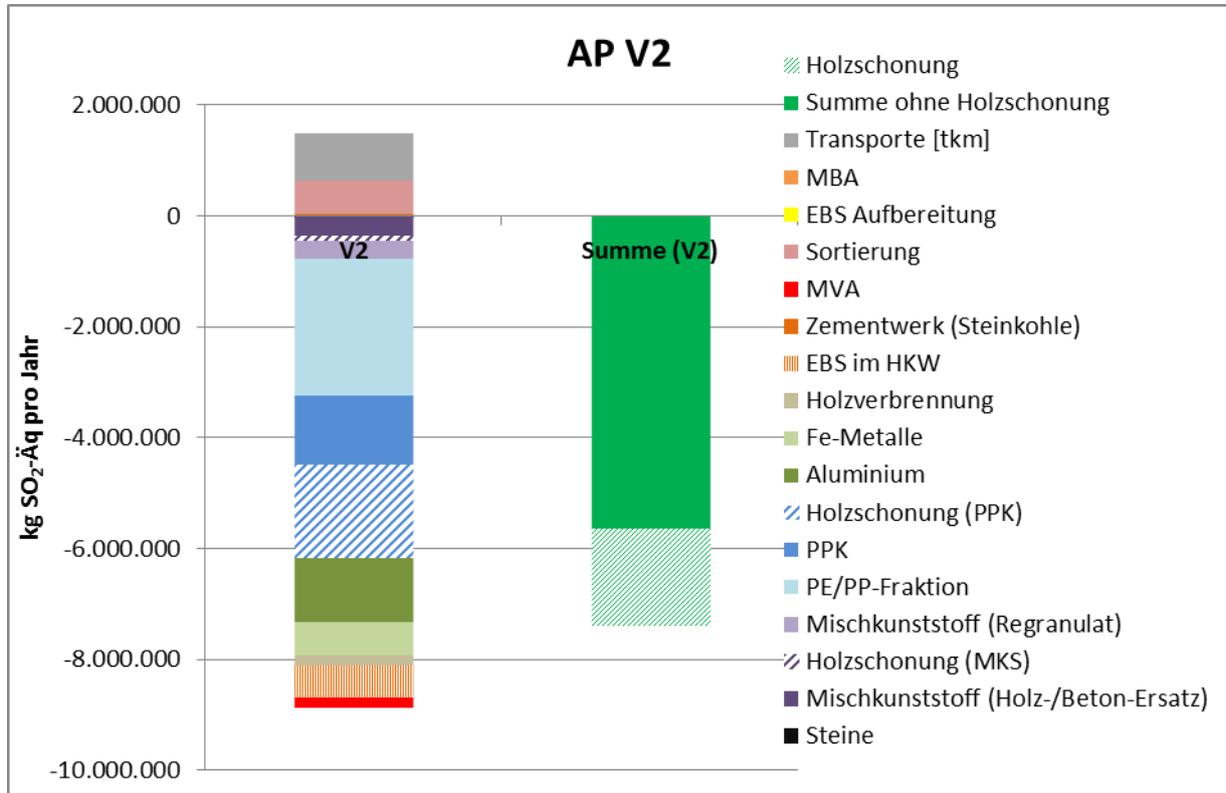
Abbildung 71: Ergebnisse für AP für die Variante 1 in der Standardbilanz



Die Menge an „brennbarem Abfällen“ nimmt von der Basisvariante zu Variante 2 um etwa 1 Mio. ab, während die Wertstoffmenge um 1 Mio. zunimmt. Gleichzeitig sind die spezifischen AP-Gutschriften für die Wertstoffe sehr viel größer als die der Verbrennungsprozesse. Innerhalb der

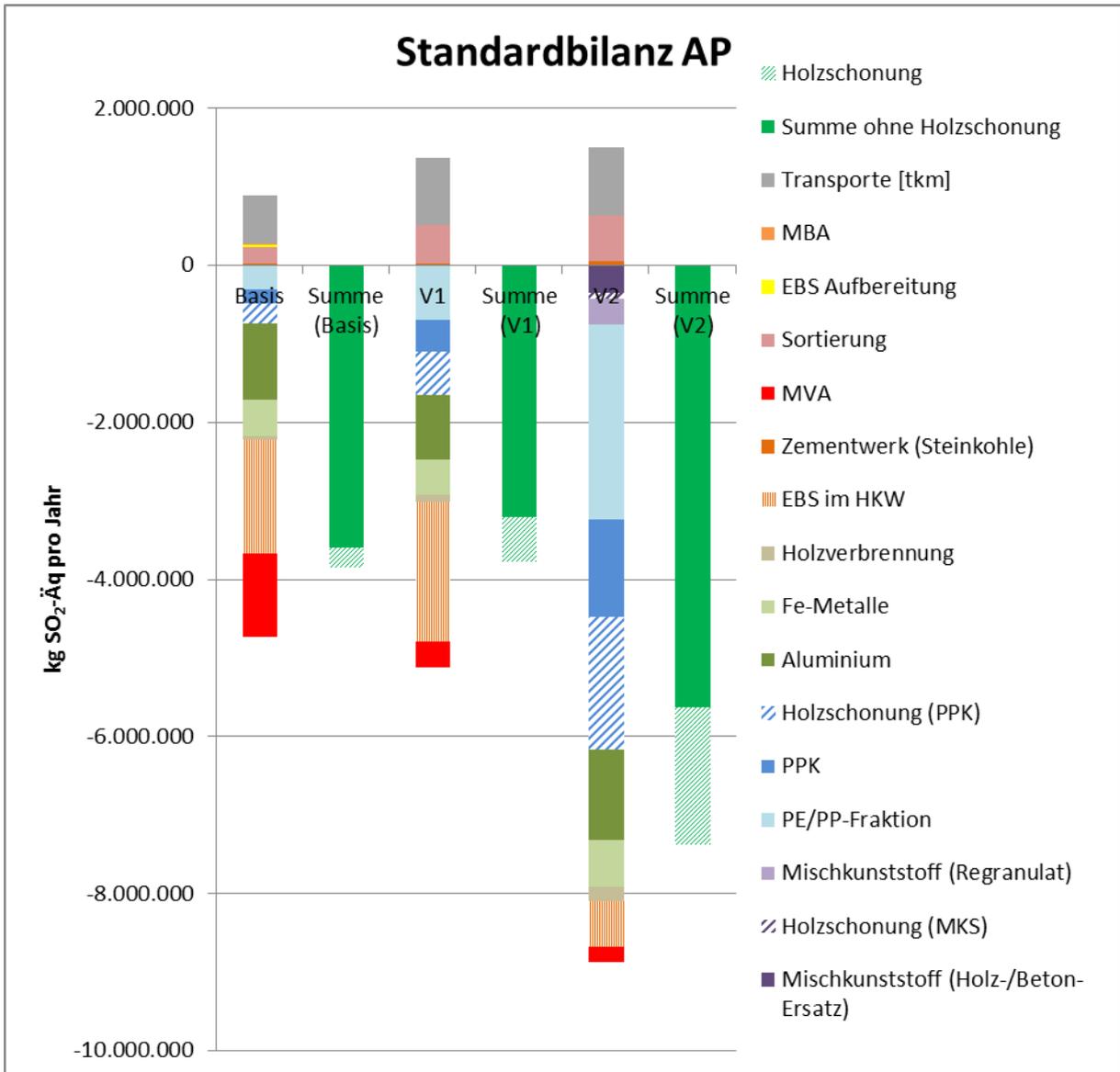
Recyclingprozesse nimmt der Anteil der PPK und Kunststofffraktionen von der Basisvariante zu Variante 2 deutlich zu. Auch hier ist diese Entwicklung der stark verbesserten Ausbeute dieser Fraktionen zuzuschreiben.

Abbildung 72: Ergebnisse für AP für die Variante 2 in der Standardbilanz



Der Vergleich der drei Varianten zeigt somit, dass vor allem ein optimiertes Kunststoff- und PPK-Recycling zu einer Verbesserung in der Wirkungskategorie Versauerung führt.

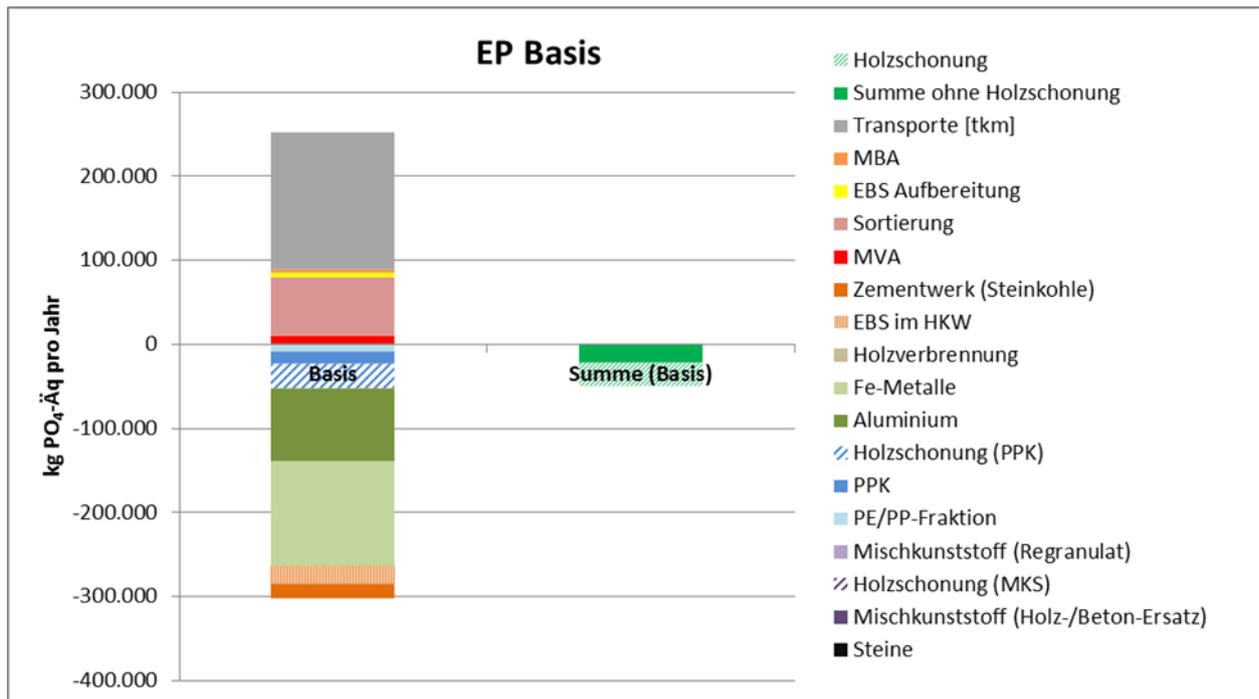
Abbildung 73: Vergleich der drei Varianten der Standardbilanz (AP)



### 12.3.4 Eutrophierung (EP)

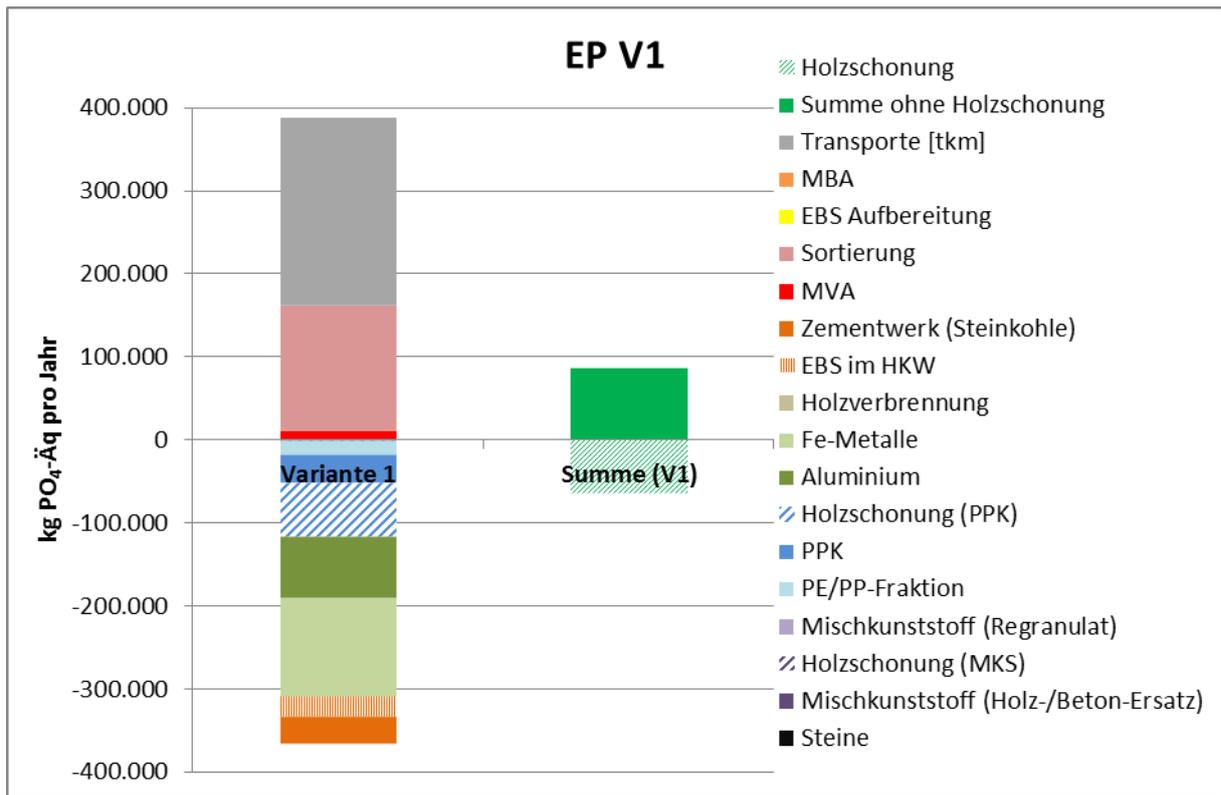
Beim Umweltkriterium Eutrophierung fällt zunächst auf, dass die Aufwendungen einen deutlich größeren Anteil am Gesamtergebnis ausmachen als in den anderen Wirkungskategorien. Auch hier dominieren wieder die Transporte und die Sortierung. Die MVA geht hier wieder als Aufwand in die Bilanz ein.

Abbildung 74: Ergebnisse für EP für die Basisvariante in der Standardbilanz



Den größten Anteil bei den Gutschriften haben das Metall- und das PPK-Recycling (vor allem die Holzgutschrift durch PPK). Die Verbrennungsprozesse spielen hier eine untergeordnete Rolle.

Abbildung 75: Ergebnisse für EP für die Variante 1 in der Standardbilanz



Durch die hohen Aufwendungen beim Transport sowie der Sortierung und der geringen Wertstoffausbeute, kommt es in der Basisvariante zu einer sehr kleinen Summe. In Variante 1 kommt es aus diesem Grund sogar zu einer Belastung der Umwelt. In der Variante 2 kommt es wegen den hohen Kunststoff- und PPK-Ausbeuten zu einem deutlichen besseren Gesamtergebnis als in den beiden anderen Varianten.

Abbildung 76: Ergebnisse für EP für die Variante 2 in der Standardbilanz

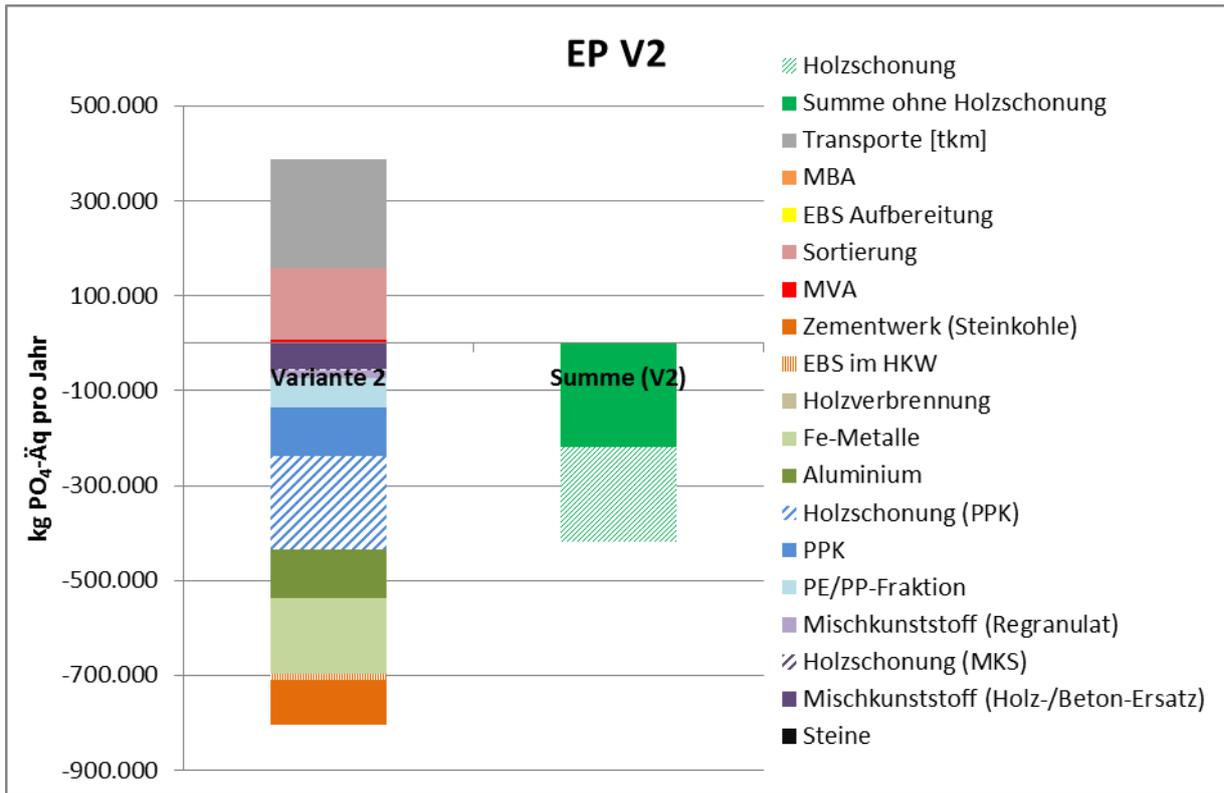
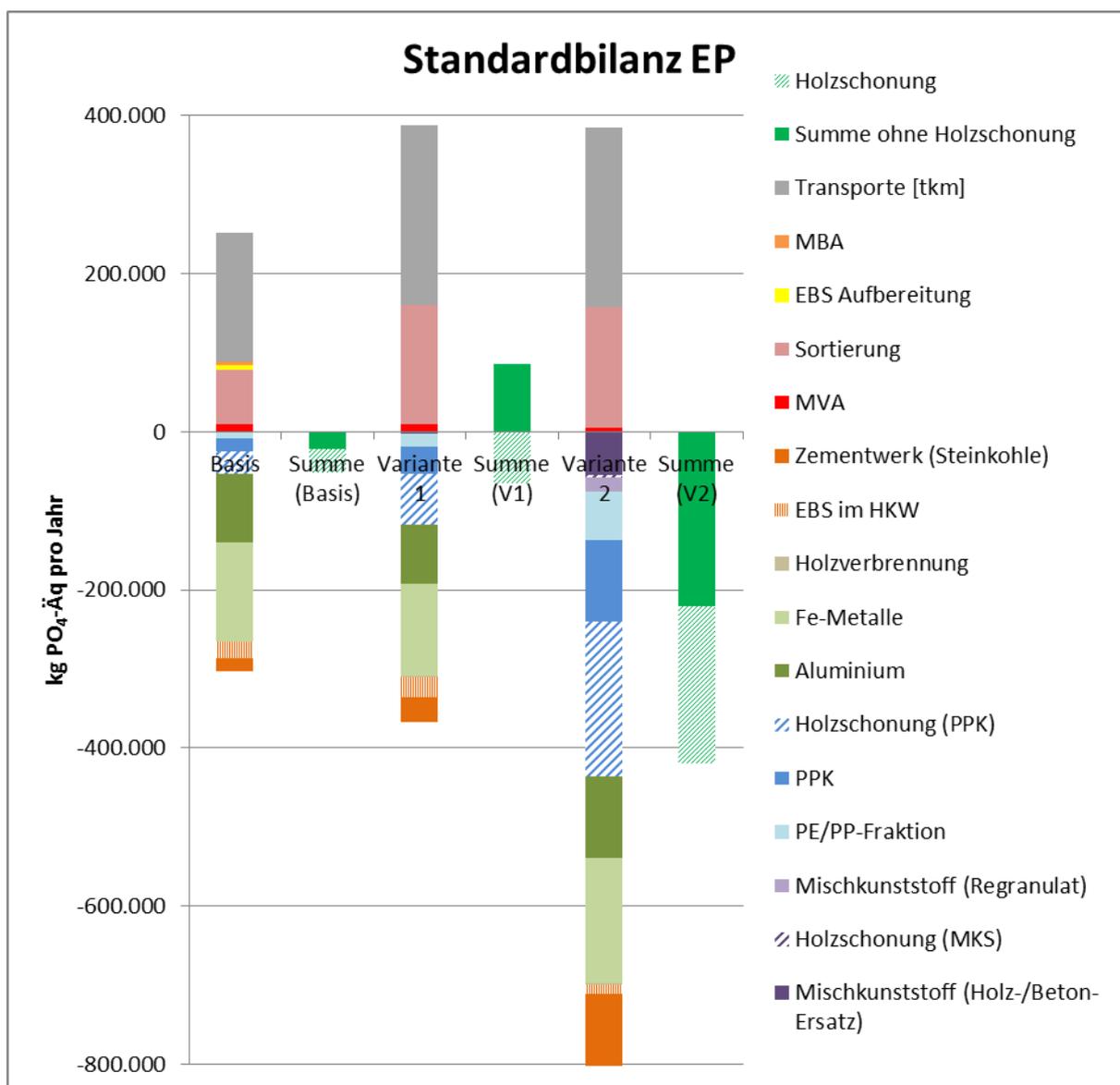


Abbildung 77: Vergleich der drei Varianten der Standardbilanz (EP)



### 12.3.5 Quecksilberemissionen

Bezüglich der Alternative zwischen der Verbrennung von Abfällen in der MVA und der SBS-Mitverbrennung in Kohlekraftwerken oder Zementwerken spielt die Frage der Quecksilberemissionen, in Abhängigkeit der Quecksilbergehalte im Input, eine nicht zu vernachlässigende Rolle.

Quecksilber (Hg) stellt aus verschiedenen Gründen einen problematischen Schadstoff dar, hierzu zählen:

- ▶ toxikologische Eigenschaften, insbesondere reproduktionstoxische Wirkungen, Beeinträchtigungen des Nerven- und Immunsystems, Schädigungen der Atemwege, der Nieren und des Magendarmtrakts [LANUV 2013],
- ▶ ubiquitäre Verteilung aufgrund von natürlichen und anthropogenen Emissionen,
- ▶ durch den bis vor kurzem noch sehr hohen Einsatz in der Industrie sind die Vorbelastungen in den Umweltmedien hoch,

- ▶ hohe Verweilzeiten in der Atmosphäre und damit weite Verteilung von elementarem Quecksilber,
- ▶ Anreicherung in der Nahrungskette, v.a. als organisches Methylquecksilber ( $\text{CH}_3\text{Hg}$ ), mit bedenklichen Konzentrationen insbesondere in (Süßwasser-)Fischen.

### Quecksilber in der Umwelt und in Produkten

Quecksilber kommt in der natürlichen Umwelt überwiegend als Zinnober ( $\text{HgS}$ ) vor. Der mittlere Gehalt in der Erdkruste (bis ca. 40 km Tiefe) liegt etwa bei 0,04 ppm, in der oberen Erdkruste (bis 20 km Tiefe) etwa bei 0,056 ppm [Köser/Zeng 2013, Beckers et al. 2013].

Quecksilber wird insbesondere im Goldbergbau in hohen Mengen eingesetzt (800 bis 1.000 Mg/a weltweit). Weitere wichtige Anwendungen sind die Vinyl-Chlorid-Monomer-Produktion; Chlor-Alkali-Herstellung, Verwendung bei der Herstellung von Batterien, als Dentalamalgam und für die Produktion von Beleuchtungskörpern.

Insgesamt werden weltweit etwa 4.000 Mg/a, in Europa ca. 500 Mg/a und in Deutschland zwischen 25 und 40 Mg/a Quecksilber in der industriellen Produktion eingesetzt [Beckers et al. 2013]. Im Vergleich dazu lag die in Deutschland im Jahr 1993 verwendete Menge noch bei etwa 73 Mg/a [IVD 2003].

Das Verhältnis anthropogen verursachter Emissionen zu den natürlich auftretenden Emissionen stellt sich für Quecksilber im globalen Maßstab wie folgt dar. Nach [IVD 2003] überwogen im Jahr 1990 die weltweiten anthropogenen Emissionen mit einem Anteil von etwa 60 % (v.a. aus der Energieumwandlung und der Müllverbrennung) die natürlichen Emissionen (aus biogenen Quellen, vulkanischer Tätigkeit und Stauberosion). Die Gesamtemission lag etwa bei 6.000 Mg/a. [Beckers et al. 2013] gehen von einem umgekehrten Verhältnis zwischen natürlichen und anthropogenen Hg-Emissionen aus. Entsprechend den Angaben aus dem Jahr 2008 überwiegen global die natürlichen Quecksilberemissionen (ca. 5.200 Mg/a) gegenüber den anthropogenen Neuemissionen (ca. 2.300 Mg/a) deutlich<sup>42</sup>. Kohlekraftwerke verursachen dabei etwa 35 % der anthropogenen Emissionen, Zementwerke ca. 10 % und die Abfallbehandlung und -ablagerung ca. 8 %. Weltweit wird aufgrund der zunehmenden Verbrennung von Kohle weiterhin ein Anstieg der anthropogenen bzw. der Gesamtemissionsfrachten erwartet [Beckers et al. 2013].

In dem Pollutant Release and Transfer Register (PRTR) nach der Aarhus-Konvention werden Schadstoffemissionen in die Luft, den Boden und das Wasser (über die Kanalisation) erfasst. Für Quecksilberemissionen in die Luft werden alle Emissionsquellen ab einer Fracht von 10 kg/a erfasst. Im Jahr 2010 betrug die Gesamtfracht der erfassten Hg-Emittenten in die Luft etwa 7,5 Mg Quecksilber. Der Anteil der Energiegewinnung beträgt dabei etwa 70 %, der mineralischen Industrie etwa 9 % und der Abfallverbrennungsanlagen etwa 3 %. Zum Vergleich: Im Jahr 1990 wurden insgesamt noch rund 29 Mg Quecksilber in die Luft emittiert.

Infolge von Beschränkungen beim Einsatz als Roh- und Hilfsstoff in der industriellen Produktion und aufgrund von Verschärfungen bei der Festsetzung von Emissionsgrenzwerten sind die Emissionen von Quecksilber und deren Gehalt in den Umweltmedien in Deutschland seit Jahren stark

---

<sup>42</sup> Die Daten stammen aus unterschiedlichen Quellen, die alle auf mehr oder weniger groben Schätzungen und Ehebungen beruhen und erheblich voneinander abweichen. Trends über den zeitlichen Verlauf lassen sich daraus nicht ohne weiteres ableiten.

rückläufig. Aufgrund neuer Anstrengungen zur Reduktion von Quecksilber-Belastungen der Umwelt, ist eine Fortführung dieses Trends zu erwarten.

#### Verhalten bei der Verbrennung

Quecksilber als sehr leichtflüchtiges Schwermetall wird während des Aufheizvorganges in der Verbrennung (nahezu) vollständig freigesetzt und gelangt als elementares  $\text{Hg}^0$  in die Rauchgase. In Abhängigkeit der Temperaturverhältnisse und insbesondere des Angebots von Halogeniden und dem Gehalt von Schwefel und Calciumoxid wird Quecksilber im Laufe des Abkühlprozesses mehr oder weniger vollständig in ionische Verbindungen (wie  $\text{HgCl}_2$ ,  $\text{HgO}$ ,  $\text{HgSO}_4$ ) überführt. In der Rauchgasreinigung werden die ionischen Hg-Verbindungen deutlich besser abgeschieden als elementares Hg [IVD 2003, IVD 2006].

Nach [IVD 2003] sind „genaue Vorhersagen zum Verhalten von Quecksilber in der Feuerung und insbesondere in konventionellen Rauchgasreinigungsanlagen aufgrund der besonderen chemischen und physikalischen Eigenschaften von Quecksilber und seiner Verbindungen bisher nicht möglich.“ In der Zwischenzeit wurde das Verhalten von Hg im Rauchgas von MVA und Kohlekraftwerken intensiv untersucht. Die Ergebnisse finden sich unter anderem in dem Entwurf (Grünfassung) von Blatt 2 der VDI-RL 2927 „Abgasreinigung – Abscheidung von anorganischen und organischen Spurenstoffen aus Abgasen von Verbrennungsprozessen (Rauchgasen)“ von Dezember 2013.

#### 12.3.6 Quecksilbergehalte in den Brennstoffen

##### Primärbrennstoffe

Die Primärbrennstoffe und ferner die in Zementwerken eingesetzten Rohstoffe weisen aufgrund der ubiquitären Quecksilberverteilung Hg-Gehalte in relevanten Konzentrationen auf.

Die Bandbreite der Hg-Gehalte der in Europa eingesetzten Steinkohle liegt zwischen 0,02 mg/kg und 1 mg/kg [IVD 2006, DFIU 1998], im Mittel werden Werte von 0,2 mg/kg bis 0,3 mg/kg genannt. Bezogen auf einen mittleren Heizwert von etwa 29,5 MJ/kg entspricht dies einem Hg-Gehalt von etwa 7  $\mu\text{g}/\text{MJ}$  bis 10  $\mu\text{g}/\text{MJ}$  [DFIU 1998, Flamme 2002, Ifeu 2007, MKULNV NRW 2013]. Die Hg-Konzentration in Kohlen können auch innerhalb einer Lagerstätte erheblich schwanken. In einzelnen Fällen in Kohlen Werte von mehr als 10 ppm Hg festgestellt, z.B. in der Lagerstätte im Donetsk-Becken in der Ukraine [Köser/Zeng 2013].

Braunkohle weist Hg-Gehalte zwischen 0,015 mg/kg und 0,2 mg/kg auf, im Mittel etwa 0,04 mg/kg. Daraus ergeben sich bei einem Bezugsheizwert von 21,5 MJ/kg für getrocknete Braunkohle mittlere Hg-Gehalte in Höhe von rund 2  $\mu\text{g}/\text{MJ}$ . Der Hg-Gehalt in Petrolkoks beträgt etwa 0,01 mg/kg. Bei einem Bezugsheizwert von 31 MJ/kg resultiert daraus ein Hg-Gehalt von 0,3  $\mu\text{g}/\text{MJ}$  [IVD 2006, Flamme 2002, Ifeu 2007, MKULNV NRW 2013].

##### Siedlungsabfälle

Der Quecksilbergehalt in Siedlungsabfällen ist insgesamt schlecht dokumentiert. Nach [Ifeu 2007] enthält Restabfall 0,24 mg Hg /kg. Bei einem Heizwert von 9,7 MJ/kg, berechnet sich daraus ein Hg-Gehalt in Höhe von rund 24,7  $\mu\text{g}/\text{MJ}$ . Für Sperrmüll wird ein Hg-Gehalt von 0,1 mg/kg angegeben. Bezogen auf den Heizwert von 13,7 MJ/kg entspricht dies einem Hg-Gehalt von 7,3  $\mu\text{g}/\text{MJ}$ . Kommunaler Klärschlamm weist einen Hg-Gehalt von 1 mg/kg TS auf; mit einem Heizwert von 11 MJ/kg TS ergibt sich daraus ein Hg-Gehalt von 91 MJ/kg TS.

## Ersatz- und Sekundärbrennstoffe (EBS/SBS)

Bei der Aufbereitung von EBS und SBS wird zunehmend auch auf die Schadstoffentfrachtung abgezielt, insbesondere bezüglich Chlor und Quecksilber. Bei der Aufbereitung von SBS ist darauf zu achten, insbesondere stark quecksilberhaltige Abfälle aus Industrie und Gewerbe nicht anzunehmen und bei der Sortierung der grundsätzlich geeigneten Abfälle die Fraktionen mit erhöhten Hg-Gehalten gezielt auszuschleusen [Flamme 2002].

Die Auswertung der Daten des BGS e. V. zu gütegesichertem SBS in den Jahren 2009 bis 2013 ergab bei einer Anzahl von 624 Proben einen Median für Quecksilber von 0,2 mg/kg TS. Als Heizwert wurden im Median 25,3 MJ/kg TS ermittelt, daraus ergibt sich ein Hg-Gehalt von 7,9 µg/MJ. Dabei ist zu berücksichtigen, dass 0,2 mg/kg etwa der Bestimmungsgrenze der in der Gütesicherung eingesetzten Analyseverfahren entsprechen und deshalb in der tatsächlichen Praxis von einem deutlich geringeren Wert auszugehen ist [BGS 2014].

## Quecksilberemissionen in der Müllverbrennung

Hausmüllverbrennungsanlagen zeigten über Jahrzehnte immer wieder erhöhte Quecksilberemissionen, häufig in Verbindung mit erhöhten Einträgen von elektronischen Bauteilen, von belasteten Stäuben oder von sonstigen Abfällen aus der Elektroschrottaufbereitung und der Metallindustrie sowie von Laborchemikalien [Gebhardt 2005]. Inzwischen ist das Quecksilber-Emissionsproblem bei MVAen weitestgehend gelöst. Die Mehrheit der Anlagen ist so ausgelegt, dass eine intensive und betriebssichere Abscheidung von Quecksilber erreicht wird. In der Praxis wird der Emissionsgrenzwert der 17. BImSchV von 0,03 mg/m<sup>3</sup> deutlich unterschritten.

Nach einer Auswertung von Emissionsberichten geht [Ifeu 2007] für Modellberechnungen von Emissionskonzentrationen in mittleren Abfallverbrennungsanlagen in Deutschland von 0,0031 mg/m<sup>3</sup> bei einem Abgasvolumen von 5.000 m<sup>3</sup>/Mg Restabfall durchschnittlicher Zusammensetzung aus. Daraus ergibt sich eine Fracht von 15,3 mg Hg je Mg Abfall. Bezogen auf den Hg-Gehalt im Restmüll von 240 mg/Mg errechnet sich daraus ein Emissionsfaktor von 6,4 %.

[IVD 2003] gibt an: „Durch den Einsatz einer säureimprägnierten Aktivkohle können Abscheidegrade für Gesamtquecksilber von mehr als 98 % erzielt werden.“ In theoretischen Modellrechnungen konnte ein Emissionsfaktor von 1,2 % ermittelt werden, ausgehend von einer Reingasemission von 0,004 mg/m<sup>3</sup>.

Welche Emissionsfaktoren in Bezug auf die eingebrachten Hg-Frachten in der Praxis erreicht werden, hängt von einer Vielzahl von Parametern ab. Dazu gehört u.a.:

- ▶ Spezifische Oberfläche des verwendeten Adsorbens (Körnung, Porenvolumen, Porenradialverteilung),
- ▶ Menge bzw. Anteil des verwendeten kohlenstoffhaltigen Adsorbens [IVD 2003],
- ▶ Hg-Gehalt im Rohgas (je stärker die eingebrachte Hg-Fracht in hohen Abgasvolumen verdünnt wird, umso geringer ist der erreichbare Abscheidegrad).

[IVD 2003] führt hierzu aus: „Literaturwerte zu den dosierten Mengen (angegeben als Massen-Verhältnis von kohlenstoffhaltiger Adsorbens zu adsorbiertem Hg; kurz: C/Hg-Verhältnis) liegen bei C/Hg-Verhältnissen von 500 bis 8500.“

Die in der Praxis erreichbaren Abscheideleistungen haben damit auch Einfluss auf die Betriebskosten einer Verbrennungsanlage.

#### Quecksilberemissionen in Zementwerken und Kohlekraftwerken

Eine vergleichbar effektive Rückhaltung von Quecksilber wie in Müllverbrennungsanlagen ist in Kohlekraftwerken und Zementwerken in Deutschland derzeit nicht Stand der Technik. Im Zuge des Einsatzes von Sekundärbrennstoffen werden aber auch in Kohlekraftwerken und Zementwerken zunehmend effektiver Schadstoffe ausgeschleust, insbesondere um die Emissionen an Quecksilber zu begrenzen.

Die Emissionsfaktoren für Quecksilber in Zementwerken und Kohlekraftwerken sind von Anlage zu Anlage sehr unterschiedlich. Es wird über Emissionsfaktoren zwischen 8 % und über 50 % bei Zementwerken und 20 % bis 70 % bei Kohlekraftwerken berichtet [Flamme 2002, Ifeu 2007, MKULNV NRW 2013, IVD 2006, IVD 2003].

Die Auswertung von 34 Jahresmittelwerten aus kontinuierlicher Überwachung und 53 Werten aus Einzelmessungen von 40 Drehrohrofenanlagen der Zementindustrie im Jahr 2011 ergab Werte für die Hg-Konzentration im Reingas zwischen  $< 0,003 \text{ mg/m}^3$  und max.  $0,16 \text{ mg/m}^3$ . Die überwiegende Mehrheit der Messungen lag zwischen  $0,01$  und  $0,03 \text{ mg/m}^3$  [VDZ 2012].

Eine Auswertung von PRTR-Daten des Jahres 2009 durch das UBA ergab, dass nur in wenigen Kohlekraftwerken die mittleren Betriebsdaten oberhalb von  $10 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  (entspricht  $0,01 \text{ mg/m}^3$ ) lagen. „Von 20 untersuchten Standorten mit Steinkohlekraftwerken lag die Hälfte im Bereich unter  $3 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  im Jahresmittel, die übrigen zwischen 3 und  $12 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  mit Schwerpunkt im unteren Intervallbereich. Für die 14 Standorte mit Braunkohlenkraftwerken ergaben sich etwas höhere Jahresmittelwerte im Bereich zwischen 3 und  $20 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ “ [Beckers et al. 2013]. Nach [Beckers et al. 2013] können die Emissionen in Kohlekraftwerken mit ökonomisch vertretbaren Nachrüstungen oder Änderungen in der Betriebsweise kurzfristig um 40 % (mittlere betriebliche Reingaskonzentrationen  $< 3 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ) bzw. mittelfristig um 80 % (mittlere betriebliche Reingaskonzentrationen  $< 1 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ ) gesenkt werden.

#### Gegenüberstellung der Emissionsfrachten

Für die Frage der Umweltrelevanz der Quecksilberemissionen aus der Mitverbrennung ist insbesondere die Gegenüberstellung der energiebezogenen Quecksilber-Gehalte von SBS und den ersetzten Primärbrennstoffen relevant. Die Emissionen aus der Verbrennung von EBS sind mit denen aus der Verbrennung der Primärbrennstoffe zu verrechnen. Der Ersatz der Primärbrennstoffe wird durch den Energiegehalt bestimmt.

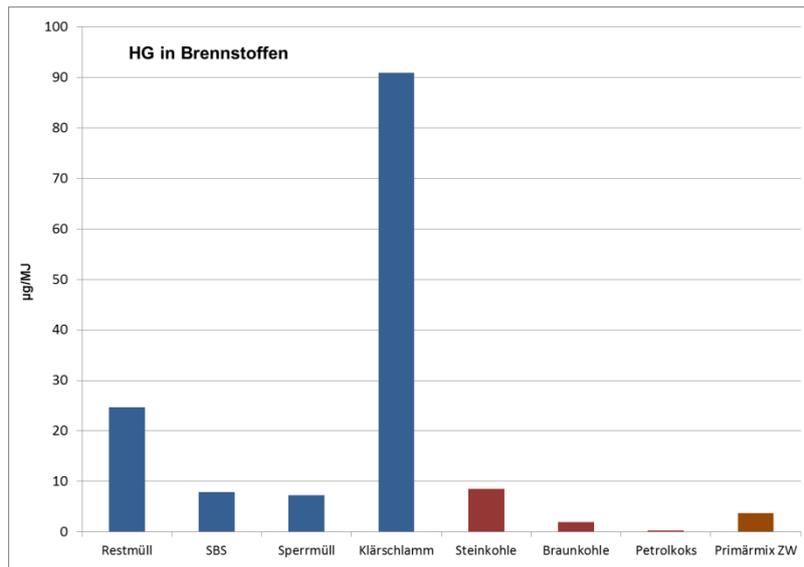
Tabelle 41. Gegenüberstellung von mittleren Hg-Gehalten und Heizwerten von Restmüll, SBS, Steinkohle, Braunkohle und Petrolkoks (Quellenangaben im Text)

	Heizwert	Hg-Gehalt	
	MJ/kg	massenbezogen mg/kg	energiebezogen µg/MJ
Restmüll	9,7	0,24	24,7
SBS*	25,3	0,2	7,9
Sperrmüll	13,7	0,1	7,3
Klärschlamm*	11,0	1,0	90,9
Steinkohle	29,5	0,25	8,5
Braunkohle**	20,0	0,04	2,0
Petrolkoks	31,0	0,01	0,3

\* Heizwertangabe in MJ/kg TS  
\*\* getrocknete Braunkohle

Tabelle 41 zeigt, dass die güteüberwachten SBS energiebezogene Hg-Gehalte etwa wie mittlere Steinkohle aufweisen. Das heißt, dass mit dem Ersatz von Steinkohle keine Mehremissionen verbunden sind. Braunkohle enthält in Bezug auf den Energiegehalt etwa um den Faktor 4 weniger Quecksilber, Petrolkoks etwa um den Faktor 26. Gegenüber Restabfall ist der energiebezogene Hg-Gehalt der SBS um den Faktor 3, gegenüber Klärschlamm etwa um Faktor 11 geringer. Tabelle 42 zeigt die mittleren energiebezogenen Hg-Gehalte in einigen Primär- und Sekundärbrennstoffen und den Wert für den, in den folgenden Berechnungen herangezogenen, Primärmix, wie er in der Zementindustrie derzeit zum Einsatz kommt [Oerter 2013].

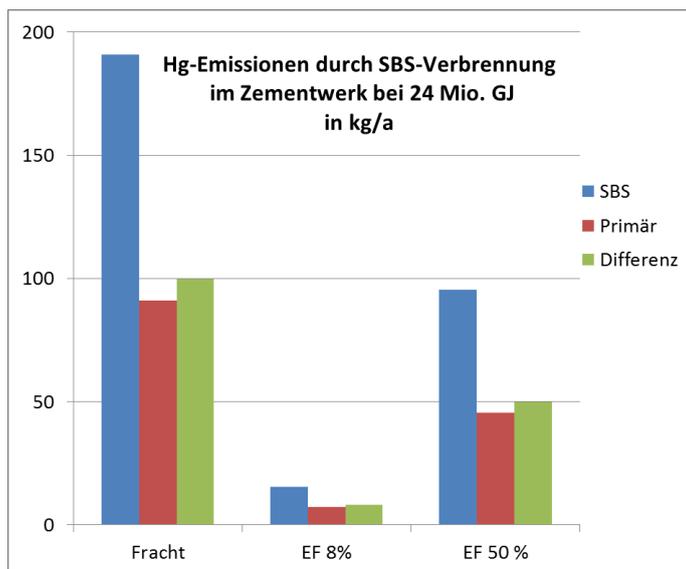
Abbildung 78: Übersicht über mittlere energiebezogene Hg-Gehalte in Brennstoffen



Die in Zementwerken heute noch genutzte Energie aus Primärbrennstoffen wird zu 28 % aus Steinkohle, zu 66 % aus Braunkohle und zu 6 % aus Petrolkoks gedeckt (vgl. Tabelle 46). Daraus resultieren ein mittlerer Heizwert von ca. 23,7 MJ/kg und ein mittlerer Hg-Gehalt von ca. 3,7 µg/MJ.

In der Bilanz in Variante 2 wurden zum Ersatz von Primärbrennstoffen SBS mit einer Energiemenge von etwa 24 Mio. GJ eingesetzt. Damit ist eine Hg-Fracht von etwa 191 kg verbunden. Bei einem Emissionsfaktor von 8 % resultiert daraus eine Hg-Emissionsfracht von 15 kg, bei einem Emissionsfaktor von 50 % von 96 kg. Die ersetzten Emissionsfrachten aus der Verbrennung des substituierten Primärbrennstoffmixes betragen 7 kg bzw. 46 kg. Daraus resultieren Mehremissionen in Höhe von 8 kg bzw. 50 kg Quecksilber.

Abbildung 79: Hg-Emissionen durch SBS-Verbrennung im Zementwerk. Gegenüberstellung der Frachten in den Inputströmen und Emissionen bei unterschiedlichen Emissionsfaktoren



In der MVA wird bei der Verbrennung der heizwertreichen SBS bei einem Abgasvolumen von etwa 10 m<sup>3</sup>/kg TS ein Abgasvolumenstrom von ca. 9.700 Mio. m<sup>3</sup> erzeugt. Bei einer Reingaskonzentration von 0,003 mg/m<sup>3</sup> [vgl. Ifeu 2007] ergibt sich daraus eine Emissionsfracht von 29 kg.

Tabelle 42. Hg-Emissionen bei der Verbrennung des SBS in der MVA bei unterschiedlichen Reingaskonzentrationen

	Menge Mg	Spez. Abgasvolumen m <sup>3</sup> /Mg	Reingasvolumen mg/m <sup>3</sup>	Emissionsfracht kg	Bemerkung
SBS TS (25 MJ/kg)	970.000	10.000	0,0003	2,9	Faktor 100 <
SBS TS (25 MJ/kg)	970.000	10.000	0,003	29	Faktor 10 <

Zusätzlich zu den ermittelten Werten sind der MVA für den bereitgestellten Strom noch die vermiedenen Hg-Emissionen des Strommixes gutzuschreiben. Nach [Zeschmar-Lahl et al. 2014] wurden 2010 durch den Energiesektor 5.280 kg Hg in die Luft emittiert. Bezieht man diese Fracht für eine überschlägige Betrachtung ausschließlich auf den Stromverbrauch in 2010 von 560 TWh [UBA 2013] entspricht dies einer spezifischen Emission von etwa 9,4 kg/TWh. Die o.g. Energiemenge der SBS von 24 Mio. GJ entspricht 6,7 TWh bei einem Wirkungsgrad von 12 % können daraus bei der Nutzung in der MVA 0,8 TWh Strom bereitgestellt werden. Die Gutschrift für die Energiebereitstellung reduziert den Beitrag der MVA damit um etwa 7,5 kg Hg auf 21,5 kg Hg.

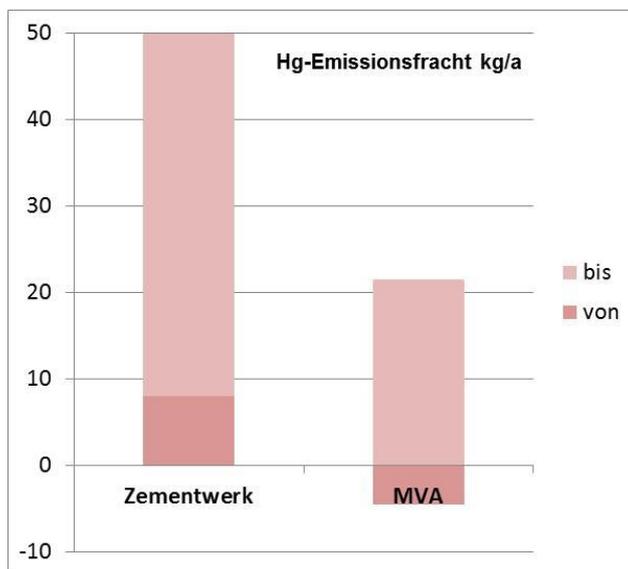
Im Vergleich zur ermittelten Spanne für die Mehremissionen bei der Mitverbrennung in Zementwerken liegt die MVA etwa im Mittelfeld. Das heißt die Emissionsfracht entspricht der Mitverbrennung in einem Zementwerk mit einem Emissionsfaktor von etwa 21,5 %. Damit liegen die Emissionen bei Verbrennung der SBS in der MVA 13,5 kg über denen von Zementwerken mit einem Wirkungsgrad von 8 % und 28,5 kg unterhalb der von Zementwerken mit einem Wirkungsgrad von 50 %.

Würde man in der MVA Reingaskonzentrationen von  $0,0003 \text{ mg/m}^3$  unterstellen, also um Faktor 100 unterhalb des Grenzwertes, errechnete sich eine Hg-Gutschrift gegenüber dem Strommix von -4,6 kg. In einer ähnlichen Größenordnung läge die Emissionsfracht bei der Annahme, dass in der MVA eine Abscheideleistung für Hg von 98,8 % bzw. ein Emissionsfaktor von 1,2 % realisiert werden kann. Diese Daten setzt [IVD 2003] für Hg-Bilanzrechnungen für die MVA an, allerdings bei deutlich höheren Hg-Inputgehalten im Restmüll von  $183 \text{ } \mu\text{g/MJ}$  und einer Reingaskonzentration von  $0,004 \text{ mg/m}^3$ . Unter diesen Annahmen würde die Verbrennung der Gesamtmenge an SBS in der MVA zu einer Hg-Emissionsfracht von 2,3 kg, unter Berücksichtigung der Stromgutschrift insgesamt ebenfalls zu einer Entlastung gegenüber dem Strommix.

Maximal wäre damit im günstigsten Fall bei der Verbrennung in der MVA eine Entlastung gegenüber dem Zementwerk von 55 kg je Jahr denkbar. Unter realistischen Annahmen bezüglich der Emissionskonzentrationen, liegen MVA und Mitverbrennung im gleichen Bereich, je nachdem, welcher Emissionsfaktor für die Zementwerke in Deutschland durchschnittlich anzusetzen ist.

Im für die Verbrennung in der MVA ungünstigsten Fall werden bei der Verbrennung in der MVA 13 kg mehr emittiert als bei der Mitverbrennung in Zementwerken oder Kohlekraftwerken. Die Differenzen liegen etwa zwischen 0,2 % und 0,7 % der gesamten anthropogenen Hg-Emissionsfracht in Deutschland aus dem PRTR für das Jahr 2010 von etwa 7.500 kg [vgl. Beckers et al. 2013].

Abbildung 80: Hg-Emissionen durch SBS-Verbrennung. Gegenüberstellung der Frachten bei der Verbrennung im Zementwerk und in der MVA unter Angabe von Schwankungsbreiten



Damit ist eine abschließende Bewertung bezüglich des Quecksilbers nicht eindeutig zu treffen. Eine umfassende abschließende Bewertung ist im Rahmen dieser Studie zu diesem Thema nicht möglich. Die überschlägigen Berechnungen legen aber nahe, dass bei guter Aufbereitung der SBS, wie bei den Werten aus der Gütesicherung des BGS e.V. dokumentiert, die Mitverbrennung in Zementwerken oder Kohlekraftwerken zu Emissionsfrachten in ähnlicher Größenordnung führt wie die Verbrennung in der MVA. Entsprechende Vorgaben der Aufbereitung zur Schadstoffentfrachtung und Gütesicherung sollten bei der Nutzung von EBS und SBS vorgeschrieben werden. Darüber hinaus sollte, unabhängig von der Mitverbrennung von Abfällen, bei Anlagen zur Energiegewinnung und bei Prozessfeuerungen der Stand der Technik zur Rückhaltung von Hg umgesetzt

werden [vgl. Zeschmar-Lahl et al. 2014]. In Verbindung mit entsprechende Vorgaben zur Qualität von SBS und zur Gütesicherung, könnten erhebliche Emissionsreduktionen bei der aus Ressourcen- und Klimaschutz vorteilhaften Mitverbrennung realisiert werden.

Eine intensivere Untersuchung dieser Fragestellung ist empfehlenswert.

### 12.3.7 Sensitivitätsanalysen

In den nachfolgenden Sensitivitätsanalysen werden verschiedene Faktoren variiert, um zu prüfen, ob auch bei veränderten Daten die Ergebnisse der obigen Untersuchungen verifiziert werden. Es werden neun verschiedene Sensitivitäten geprüft.

Tabelle 43.      Untersuchte Sensitivitäten

Sensitivität	Beschreibung	
	Standardbilanz	Sensitivität
1	Bei der werkstoffliche Verwertung von Mischkunststoff zu Produkten, die Holz, Beton und dickwandigen Kunststoffe ersetzen wird der Mittelwert als Gutschrift eingesetzt.	Anstelle des Mittelwertes wird jeweils der untere und obere Wert eingesetzt.
2	Mischkunststoffe werden zu 2/3 werkstofflich verwertet.	Mischkunststoffe werden zu 100 % zu hochwertigem PO-Granulat verarbeitet.
3	EBS ersetzen Steinkohle.	EBS ersetzen Brennstoffmix aus Primär- und Sekundärbrennstoffen
4	Anwendungen des Strommix nach ecoinvent	Anwendungen des Strommix nach UBA 2013
5	Holz aus Holzschonung durch PPK-Recycling wird energetisch genutzt.	Holz aus Holzschonung durch PPK-Recycling verbleibt im Wald.
6	Thermischer Netto-Wirkungsgrad für EBS-HKW: 16 %	Thermischer Netto-Wirkungsgrad für EBS-HKW: 32 %
7		Gesamter Abfall geht in MVA.
8	Anwendungen des Strommix nach ecoinvent V3	Fossiler Verdrängungsmix als Stromgutschrift nach BMU 2012
9	Zusammensetzung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle gemäß Kap. 7.4	Veränderte Abfallzusammensetzung (+25% und -25% generierte Wertstoffe)

In den folgenden Kapiteln werden die Rahmenbedingungen und Ergebnisse der im Text bereits erwähnten Sensitivitätsanalysen am Beispiel des Umweltkriteriums GWP aufgeführt. Im oberen Teil

jeder Tabelle werden die Bilanzdaten der Standardbilanz denen der jeweiligen Sensitivität gegenübergestellt. Im unteren Teil werden die Gesamtergebnisse der Sensitivität denen der Standardbilanz für alle Varianten, jeweils mit und ohne Holzschonung, gegenübergestellt. Dabei werden jeweils alle Ergebnisse dargestellt, auch wenn diese sich nicht geändert haben. Änderungen bei den Ergebnissen aufgrund der Sensitivität werden durch Fettdruck hervorgehoben. Die Vergleichsdaten der Standardbilanzen werden in blauer Schrift dargestellt.

### Sensitivität 1

Die Sensitivität 1 betrachtet die werkstoffliche Verwertung von Mischkunststoffen zu Produkten, die Holz, Beton und dickwandige Kunststoffe ersetzen (vgl. auch Kapitel 12.2.4). In der Standardbilanz wird der Mittelwert als Gutschrift eingesetzt. In der Sensitivität wird jeweils der untere (vgl. Tabelle 36) und obere Wert (vgl. Tabelle 37) eingesetzt.

Tabelle 44. Sensitivität 1 - Obere und untere Werte der Gutschriften für Mischkunststoffe, die Produkte aus Holz, Beton und dickwandigen Kunststoffen ersetzen (MKS\_uW, MKS\_oW)

	Aufwendung	Gutschrift	Netto-Gutschrift
spezifisches GWP	kg CO <sub>2</sub> /Mg		
ohne Holzschonung			
Mittelwert	226	-447	-221
unterer Wert	226	-335	-108
oberer Wert	226	-559	-333
Holzschonung			
Mittelwert	45	-219	-174
unterer Wert	45	-125	-80
oberer Wert	45	-313	-268
Gesamtergebnisse	Basisvariante	Variante 1	Variante 2
ohne Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a		
Mittelwert	-579.044	-945.746	-2.950.388
unterer Wert	-578.965	-945.572	-2.930.549

	Aufwendung	Gutschrift	Netto-Gutschrift
oberer Wert	-579.122	-945.920	-2.970.227
mit Holzschonung		Mg CO <sub>2</sub> /a	
Mittelwert	-663.647	-1.133.143	-3.550.314
unterer Wert	-663.503	-1.132.824	-3.513.877
oberer Wert	-663.791	-1.133.462	-3.586.752

Aufgrund der relativ geringen Unterschiede bei den Emissionsfaktoren und den Mengen, die diesen Verwertungsweg gehen, ergeben sich in der Gesamtbilanz keine relevanten Unterschiede. Da die Menge an Mischkunststoffen in Variante 2 deutlich ansteigt, hat die Sensitivität für Variante 2 einen etwas größeren Einfluss auf das Gesamtergebnis ( $\pm 1$  %) als bei der Basisvariante und der Variante 1.

### Sensitivität 2

Sensitivität 2 beschäftigt sich mit der Frage, wie sich das Gesamtergebnis ändert, wenn die Menge Mischkunststoff, die in der Standardbilanz werkstofflich verwertet wird, stattdessen zu hochwertigen PO-Granulat verarbeitet werden würde.

Tabelle 45. Sensitivität 2 - MKS wird zu 100 % PO-Regranulat aufgearbeitet, kein Ersatz von Produkten aus Holz, Beton und dickwandigen Kunststoffen (MKS\_100-Reg)

	Aufwendung	Gutschrift	Netto-Gutschrift
spezifisches GWP	kg CO <sub>2</sub> /Mg		
MKS zu Holz/Beton/ dickwandige KS	226	-447	-221
MKS zu Regranulat	300	-1.852	-1.552

Gesamtergebnis	Basisvariante	Variante 1	Variante 2
ohne Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a		
Regranulat: H/B/dw KS = 1:2	-579.044	-945.746	-2.950.388
Regranulat: H/B/dw KS = 1:0	-579.562	-946.895	-3.081.607
mit Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a		
Regranulat: H/B/dw KS = 1:2	-663.647	-1.133.143	-3.550.314
Regranulat: H/B/dw KS = 1:0	-664.044	-1.134.022	-3.650.760

Die Verluste, die bei der Regranulierung auftreten, gehen in der Standardbilanz zu den Mischkunststoffen als werkstofflicher Ersatz. In der Sensitivität werden sie im EBS-HKW thermisch verwertet.

Bei Variante 2 lässt sich ein kleiner Effekt erkennen. Das Ergebnis der Sensitivität verbessert sich gegenüber der Standardbilanz um ca. 4%. Hier ist besonders die spezifische Netto-Gutschrift zu beachten. Diese liegt für PO-Granulat um den Faktor 7 höher als für die werkstoffliche Verwertung. Die hohe Relevanz der Verbesserung der Netto-Gutschrift durch hochwertigeres Recycling zeigt somit eine mögliche Optimierung des Beitrags für das Kunststoffrecycling auf.

### Sensitivität 3

Einen sehr hohen Anteil am Gesamtergebnis der Variante 2 weist die SBS-Verwertung auf, bei der die leichten, besonders heizwertreichen Bestandteile nach weitergehender Aufbereitung Steinkohle ersetzen. Als Beispiel wurde die Verwertung im Zementwerk gewählt, das aber nur als Beispiel für den Steinkohleersatz mit einem Substitutionsfaktor von 1:1 steht.

In der Sensitivität 3 wurde statt Steinkohle ein Brennstoffmix aus Primär- und Sekundärbrennstoffen deutscher Zementwerke nach [VDZ 2013] ermittelt und der Gutschrift zugrunde gelegt. Demnach ist die Verteilung der Brennstoffe sowohl nach Mengen als auch nach Energiegehalt etwa

50:50. Für die Ermittlung des Brennstoffmixes sind die Energiegehalte von Bedeutung. Hier liegt der Anteil der Sekundärbrennstoffe bei gut 48 %. Bei der Berechnung des Emissionsfaktors konnten nur die Fraktionen berücksichtigt werden, für die alle Daten für eine Verbrennungsrechnung vorlagen. Diese wurden in den Mengen so verteilt, dass das Verhältnis zwischen Primär- und Sekundärbrennstoffen der Aufstellung des VDZ entspricht (vgl. Tabelle 46). In der Basisvariante und in Variante 1 werden keine SBS-Fraktionen zur Verwertung im Zementwerk bilanziert. Hier wirkt sich diese Sensitivität demzufolge nicht aus.

Tabelle 46. Der Bilanz zugrunde gelegter Mix aus Primär- und Sekundärbrennstoffen und deren Energiegehalt

	Gesamtenergie GJ
Reifen	8.017.169
Altöl	1.929.494
Fraktionen aus Industrie-/Gewerbeabfällen	
- Zellstoff, Papier, Pappe	280.561
- Kunststoff	10.947.930
Tiermehle- und -fette	3.347.443
Aufbereitete Fraktionen aus Siedlungsabfällen	5.388.452
Lösungsmittel	2.338.311
Klärschlamm	1.182.634
Summe Sekundärbrennstoffe	33.431.993
Steinkohle	10.001.714
Braunkohle	23.715.289
Petrolkoks	2.117.078
Summe Primärbrennstoffe	35.834.081

Für die Gutschrift für die vermiedene Verbrennung von Primärbrennstoffe gehen neben den Verbrennungsbedingungen (insbesondere Gehalt an fossilem C in Relation zum Heizwert) auch die Belastungen aus der Gewinnung und dem Transport der Rohstoffe ein.

Tabelle 47. Sensitivität 3 - SBS-Brennstoffmix im Zementwerk statt Steinkohle als Gutschrift (ZW\_SBS)

	Aufwendung	Gutschrift	Netto-Gutschrift
spezifisches GWP		kg CO <sub>2</sub> /Mg	
Steinkohle	1.013	-2.231	-1.219
SBS-Mix	1.013	-1.282	-269
Gesamtergebnis	Basisvariante	Variante 1	Variante 2
ohne Holzschonung		Mg CO <sub>2</sub> /a	
Steinkohle	-579.044	-945.746	-2.950.388
SBS-Mix	-315.122	-457.694	-1.529.660
mit Holzschonung		Mg CO <sub>2</sub> /a	
Steinkohle	-663.647	-1.133.143	-3.550.314
SBS-Mix	-399.725	-645.091	-2.129.586

Aufgrund der deutlich geringeren Nettogutschrift gegenüber Steinkohleersatz, weist diese Sensitivität eine deutliche Reduktion des Gesamtbeitrags auf. In allen drei Varianten reduziert sich das Endergebnis (mit Holzschonung) ungefähr um den Faktor 1,7. In der Tendenz ändert dies nichts am Endergebnis; die Variante 2 bleibt trotz der Einbußen mit großem Abstand führend (vgl. Tabelle 47). Der große Einfluss auf das Gesamtergebnis zeigt auch auf, wie wichtig es ist, geeignete Verwertungswege für die heizwertreichen Fraktionen zu finden, so dass möglichst ausschließlich oder zumindest überwiegend Primärbrennstoffe mit hohem Wirkungsgrad ersetzt werden können.

#### Sensitivität 4

In Sensitivität 4 wird der Einfluss der Wahl des Strommixes als Gutschrift für den Verbrauch und die Bereitstellung von Strom geprüft. In allen Varianten wird Strom für die Sortierung und Aufbereitung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle oder einzelner Fraktionen daraus gebraucht. Außerdem wird gewonnener Strom aus der Verbrennung von Holz (auch im Rahmen der Holzschonung), EBS und aus MVAen bereitgestellt. In Variante 2 ist der Anteil an verbrauchtem Strom am höchsten und der aus energetischer Nutzung von EBS bereit gestellte Strom am geringsten (vgl. Tabelle 40).

Der für die Basisvariante gewählte Strommix nach [ecoinvent V3 2013] ergibt einen relativ hohen Emissionsfaktor, der nach [BMU 2012] etwa dem des fossilen Anteils des deutschen Strommixes 2012 entspricht.

Tabelle 48. Sensitivität 4 - Reduktion des Strommixes - [UBA 2013] statt [ecoinvent V3 2013] (Strom\_601)

	Aufwendung
spezifisches GWP	kg CO <sub>2</sub> /MWh
Strommix ecoinvent	666
Strommix UBA 2013	601

Gesamtergebnis	Basisvariante	Variante 1	Variante 2
ohne Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a		
Strommix ecoinvent	-579.044	-945.746	-2.950.388
Strommix UBA 2013	-369.834	-822.332	-2.942.694
mit Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a		
Strommix ecoinvent	-663.647	-1.133.143	-3.550.314
Strommix UBA 2013	-454.437	-1.009.729	-3.542.620

Erwartungsgemäß zeigt diese Sensitivität negative Auswirkungen beim Klimaschutzbeitrag der Basisvariante (um 46 % geringer) und der Variante 1 (um 11 % geringer). Der Beitrag von Variante 2 reduziert sich allerdings nur geringfügig (um 0,2 %). Diese Sensitivität zeigt auch, dass Variante 2 weitaus besser den Auswirkungen der Entwicklungen auf dem Energiemarkt im Zeichen der CO<sub>2</sub>-Minderungsziele, wonach bis 2050 die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Energiegewinnung mindestens um 95 % reduziert werden, als die beiden anderen Varianten angepasst ist.

#### Sensitivität 5

Sensitivität 5 zeigt den Einfluss der Gutschriften für die energetische Nutzung des durch Recycling (insbesondere PPK) geschonten Holzes auf. Beispielhaft wurde eine deutlich verringerte Gutschrift am Beispiel des Verbleibs des Holzes im Wald nach [Öko-Institut/IFEU 2010] gewählt (vgl. hierzu Kapitel 12.2.4). Ein ähnliches Ergebnis würde ein Szenario aufweisen, bei dem die Gutschriften der energetischen Nutzung entsprechend reduziert würden.

Tabelle 49. Sensitivität 5 - Holz aus Holzschonung durch PPK-Recycling verbleibt im Wald statt energetischer Nutzung (Holz\_Wald)

	Aufwendung	Gutschrift	Netto-Gutschrift
spezifisches GWP	kg CO <sub>2</sub> /Mg		
energetische Nutzung	45	-1.128	-1.083
verbleibt im Wald	0	-414	-414
Gesamtergebnis	Basisvariante	Variante 1	Variante 2
ohne Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a		
energetische Nutzung	-579.044	-945.746	-2.950.388
verbleibt im Wald	-579.044	-945.746	-2.950.388
mit Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a		
energetische Nutzung	-663.647	-1.133.143	-3.550.314
verbleibt im Wald	-579.165	-946.015	-2.981.161

Die prozentualen Änderungen betragen bei der Basisvariante 13 %, bei Variante 1 17 % und bei Variante 2 16 %. Die Gesamttendenz der Ergebnisse bleibt erhalten.

#### Sensitivität 6

Einen wesentlichen Beitrag zum Endergebnis leistet auch die energetische Verwertung von EBS in EBS-Heizkraftwerken, insbesondere gilt dies bei der Basisvariante und bei Variante 1. Bei Variante 2 geht der Anteil zugunsten des Einsatzes von SBS in der Co-Verbrennung zurück. Mit dieser Sensitivität wird die Auswirkung einer effizienteren Nutzung des EBS geprüft. Hierzu wird angenommen, dass der Wirkungsgrad im EBS-HKW bei der Nutzung der Wärme von 16 % auf 32 % gesteigert werden kann.

Tabelle 50. Sensitivität 6 - Höherer Nettowirkungsgrad für Wärme von 0,32 statt 0,16 (EBS\_WG\_0,32)

	Aufwendung	Gutschrift	Netto-Gutschrift
spezifisches GWP	kg CO <sub>2</sub> /Mg		
Nettowirkungsgrad Wärme 0,16			
EBS im HKW	731	-767	-37
Schwerfraktion	488	-520	-32
Nettowirkungsgrad Wärme 0,32			
EBS im HKW	731	-947	-216
Schwerfraktion	488	-642	-154
Gesamtergebnis	Basisvariante	Variante 1	Variante 2
ohne Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a		
Nettowirkungsgrad Wärme 0,16	-579.044	-945.746	-2.950.388
Nettowirkungsgrad Wärme 0,32	-1.034.004	-1.354.505	-3.191.362
mit Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a		
Nettowirkungsgrad Wärme 0,16	-663.647	-1.133.143	-3.550.314
Nettowirkungsgrad Wärme 0,32	-1.118.607	-1.541.902	-3.791.289

Der Einfluss auf das Endergebnis ist bei der Basisvariante (mit Holzschonung) mit einer Steigerung des Entlastungsbeitrags um 69 % am größten. In Variante 1 nimmt der Beitrag zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen mit 36 % auch noch deutlich zu. Das Gesamtergebnis bei Variante 2 wird nur um 7 % gesteigert.

#### Sensitivität 7

Die Sensitivität 7 zeigt das Gesamtergebnis unter der Annahme, dass der gesamte Gewerbeabfall in einer MVA verwertet wird. Neben dem Aufwand der Verbrennung und der Gutschrift für Strom und Wärme, werden nur das Recycling der Fe-Metalle und des Aluminiums aus der Schlacke betrachtet. Die Mengen der Metalle werden für die Sensitivität aus dem Verhältnis „Abfallinput in die MVA“ zu „Metall Output aus der MVA“ aus der Basisvariante berechnet. Aus diesem Grund kam es

in der Sensitivität zu einer Erhöhung der insgesamt recycelten Metallmenge: Insgesamt wurden 11.540 Mg Fe-Metalle und 6.133 Mg Aluminium mehr als in der Standardbilanz recycelt.

Tabelle 51. Sensitivität 7 – Gesamter Abfall geht in MVA (MVA\_100)

	Aufwendung	Gutschrift	Netto-Gutschrift
spezifisches GWP	kg CO <sub>2</sub> /Mg		
Standard	731	689	42
nur MVA	731	689	42
Gesamtergebnis	Basisvariante	Variante 1	Variante 2
Ohne Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a		
Standard	-579.044	-945.746	-2.950.388
nur MVA	-121.274		
Mit Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a		
Standard	-663.647	-1.133.143	-3.550.314
nur MVA	-121.274		

Die rein thermische Verwertung in der MVA führt zu einem deutlich schlechteren Gesamtergebnis, als eine Kombination aus verschiedenen Verwertungswegen. So verschlechtert sich das Gesamtergebnis der Sensitivität in der Basisvariante um 81%. Wird in der Standardbilanz die Wertstoffausbeute erhöht (wie in Variante 1 und 2), erhöht sich die Differenz zur Sensitivität noch erheblicher. Das Gesamtergebnis der Sensitivität in Variante 1 verschlechtert sich gegenüber der Standardbilanz um 89% und in Variante 2 um 97%.

### Sensitivität 8

In Sensitivität 8 wird der Einfluss der Wahl eines fossilen Strommixes des sogenannten Verdrängungsmixes als Gutschrift für die Bereitstellung von Strom durch MVA, EBS- und Holz-HKW geprüft. Der dafür angesetzte Wert nach [BMU 2012] beträgt 760 kg CO<sub>2</sub>eq/MWh. Der verdrängte fossile Mix setzt sich aus 6 % Braunkohle, 64 % Steinkohle und 31 % Erdgas zusammen.

Tabelle 52. Sensitivität 8 – Fossiler Verdrängungsmix als Stromgutschrift (fos\_StromM)

	Aufwendung	Gutschrift	Netto-Gutschrift
spezifisches GWP	kg CO <sub>2</sub> /Mg		
Standard MVA	731	689	42
Strom fossil	731	749	-19
Standard EBS HKW	731	767	-37
Strom fossil	731	851	-120
Standard Schwerfraktion-EBS HKW	488	520	-32
Strom fossil	488	576	-89
Standard Holz-HKW	115	766	-652
Strom fossil	115	845	-730

Gesamtergebnis	Basisvariante	Variante 1	Variante 2
ohne Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a		
Standard	-579.044	-945.746	-2.950.388
Strom fossil	-906.489	-1.173.423	-3.062.257
mit Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a		
Standard	-663.647	-1.133.143	-3.550.314
Strom fossil	-991.092	-1.360.820	-3.662.183

Durch die Gutschrift des Verdrängungsmixes verbessert sich das Gesamtergebnis vor allem in der Basisvariante und in Variante 1, in geringerem Umfang auch in Variante 2. Dies erklärt sich in erster Linie dadurch, dass in der Basisvariante und Variante 1 etwa die doppelte Menge an Abfällen in MVAen bzw. EBS-HKW gehen als in Variante 2. An der Grundaussage, dass Variante 2 mit Abstand den größten Beitrag zum Klimaschutz leistet ändert sich hierdurch nichts.

#### Sensitivität 9

In Sensitivität 9 werden die Auswirkungen der Abfallzusammensetzung auf die Variante 2 geprüft, um zu sehen, ob ein geringerer Wertstoffgehalt im Abfallinput diese Variante, die bezüglich der

Abtrennung von Wertstoffen für das Recycling optimiert wurde, den Vorteil dieser Variante überkompensiert.

Dazu wurden in dieser Sensitivitätsanalyse „- 25% Wertstoffe“ bei allen Wertstoffen 25 Ma.% abgezogen. Die abgezogenen Mengen wurden in der MVA verbrannt. In der Sensitivität „+ 25% Wertstoffe“ wurden zusätzlich 25 Ma.% von jedem Wertstoff aussortiert und dem Recycling zugeführt. Dadurch wurde dem EBS die entsprechende Menge abgezogen.

Damit wird aufgezeigt, welchen Einfluss die Heterogenität der Abfallzusammensetzung auf das Ergebnis hat.

Tabelle 53. Sensitivität 9 – Veränderte Abfallzusammensetzung (+25% und -25%)

Gesamtergebnis	Variante 2
ohne Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a
Standard	-2.950.388
+ 25% Wertstoffe	-3.665.083
- 25% Wertstoffe	-2.199.050
mit Holzschonung	Mg CO <sub>2</sub> /a
Standard	-3.550.314
+ 25% Wertstoffe	-4.414.991
- 25% Wertstoffe	-2.648.995

Die Erhöhung des Wertstoffanteils im Gesamtinput führt zu einer Verbesserung des Gesamtergebnisses (ca. 25%), während die Verringerung zu einem in gleicher Größenordnung schlechteren Ergebnis führt. Damit wird gezeigt, dass aus dem Blickwinkel des Klimaschutzes auch geringere Wertstoffgehalte im Abfallinput die Optimierungsvariante nicht in Frage stellen.

#### Zusammenfassende Gegenüberstellung der Sensitivitätsanalysen

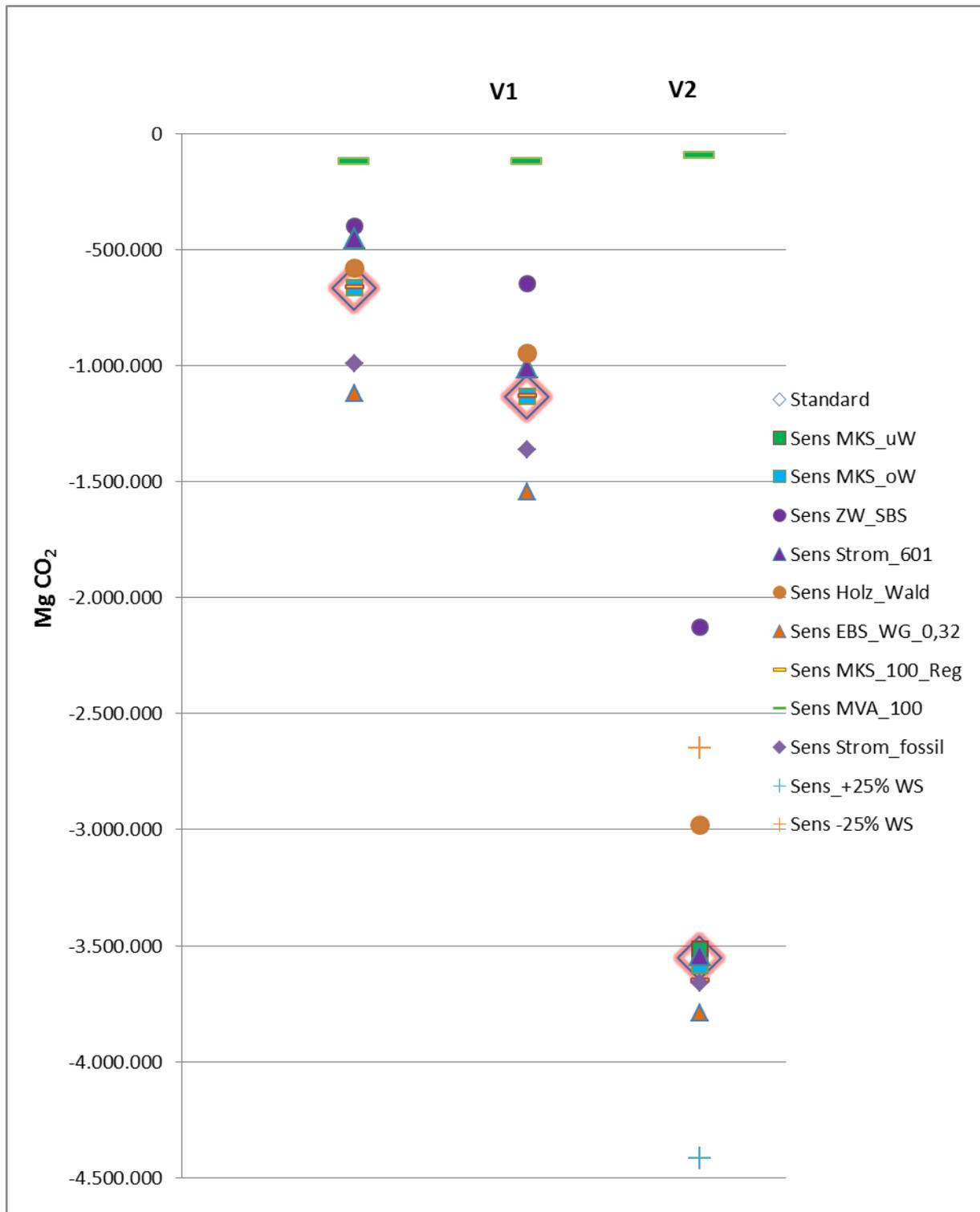
Die folgende Abbildung zeigt die Zusammenschau aller untersuchten Sensitivitäten im Vergleich zur Standardbilanz. Relevanten Einfluss auf das Gesamtergebnis zeigen nur folgende Sensitivitäten:

- ▶ Bei allen drei Varianten führt die Steigerung des Wirkungsgrads der EBS-Nutzung (Sens 6) zu deutlichen Verbesserungen.
- ▶ Bei der Basisvariante und bei Variante 1 führt ein reduzierter Emissionsfaktor für Strom (Sens 4) zu relevanten Verschlechterungen.

- ▶ Bei der Variante 2 führen die Sensitivitäten geschontes Holz verbleibt im Wald (Sens 5) und die Anrechnung des durchschnittlichen Brennstoffmixes in Zementwerken (Sens 3) zu relevanten Verschlechterungen.

Insgesamt zeigt sich aber deutlich und auch im konservativsten Abgleich zwischen der schlechtesten Sensitivität bei Variante 2 und der besten in Variante 1 immer noch ein relevanter Vorteil von Variante 2. Damit werden die ökologischen Vorteile des hochwertigen Recyclings auch in der Gesamtschau der Sensitivitätsanalysen bestätigt.

Abbildung 81: Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen im Überblick für die Varianten mit Holzschonung



## 13 Einflussfaktoren auf eine hochwertige Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle

Das Ergebnis der ökobilanziellen Bewertung zeigt für die untersuchten Umweltkriterien Treibhauseffekt (GWP), Schonung/Verbrauch fossiler energetischer Ressourcen (KEA), Versauerung und Eutrophierung folgende Rangfolge der betrachteten Entsorgungsvarianten auf:

- ▶ Durch eine gesteigerte Aussortierung von Wertstoffen und eine gezielte Stoffstromsteuerung der verbleibenden Sortierreste gemäß der Variante 2 kann in allen Wirkungskategorien eine Zunahme der Entlastungen erreicht werden. Die Variante 2 kann deshalb als Ziel eines geänderten Umgangs mit gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen definiert werden.
- ▶ Die reine Vorbehandlungspflicht aller anfallender gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (Variante 1) ohne Verbesserung der derzeitigen Ausbeuten und Selektivitäten bezüglich der aussortierten Wertstoffe erreicht bei der die Wirkungskategorie Treibhauseffekt (GWP) bei weitem nicht die hohen Entlastungen wie die Variante 2. Für die Kategorien Schonung/Verbrauch fossiler energetischer Ressourcen (KEA) und Versauerung ist gegenüber dem Ist-Zustand ein geringer Rückgang der Entlastungen ermittelt worden, für die Wirkungskategorie Eutrophierung wird für den Pfad „Summe ohne Holzschonung“ im Endergebnis eine Belastung festgestellt.
- ▶ Die Basisvariante, die den derzeitigen Status quo widerspiegelt, nutzt im Vergleich mit der Variante 2 nicht die in den gemischten gewerblichen Abfällen enthaltenen Potentiale zur Umweltentlastung.

Die in der Basisvariante dargelegte derzeitige Entsorgung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle steht im Übrigen im Widerspruch zum Kreislaufwirtschaftsgesetz und kann deshalb nicht unverändert als künftige Handlungsmaxime gelten. Gemäß der Abfallhierarchie des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (§ 6 KrWG) sind Abfälle vorrangig zu vermeiden, nicht vermeidbare Abfälle sind für eine Wiederverwendung vorzubereiten. Ist eine Wiederverwendung nicht möglich, sind anfallende Abfälle dem Recycling zu zuführen. Die energetische Verwertung steht erst an vierter Stelle der Abfallhierarchie vor der Abfallbeseitigung. Diese Prioritätenfolge wurde in der Variante 2 abgebildet.

Im Folgenden wird untersucht, welche Einflussfaktoren eine stärkere Nutzung der Entlastungspotentiale bei der Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle derzeit noch behindern.

### 13.1 Wirtschaftlichkeit der Abfallvorbehandlung

Der Preis ist in der abfallwirtschaftlichen Betriebspraxis der maßgebende Faktor für die Frage, ob gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle ohne Vorbehandlung energetisch oder nach einer Vorbehandlung recycelt und energetisch verwertet werden.

Können durch die Vorbehandlung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen keine Preisvorteile gegenüber einer Verbrennung dargestellt werden, gelangt der Abfall vollständig in die energetische Verwertung, es sei denn, die gesetzlichen Rahmenbedingungen stehen dem entgegen. Zu untersuchen sind also die Kosten einer Vorbehandlungsanlage mit hoher Ausbeute an Sekundärrohstoffen und die Preise für eine direkte energetische Verwertung.

In dem UFOPLAN-Projekt zum „Aufkommen, Verbleib und Ressourcenrelevanz von Gewerbeabfällen“ wurden mit Stand 2010 Gesamtkosten für eine Aufbereitung in Sortieranlagen als Kombination aus Wertstoffgewinnung und Herstellung von Ersatzbrennstoffen im Bereich von 80 bis 90 €/Mg ermittelt [Dehne et al. 2011].

Die Betriebskosten haben sich nach Aussagen von Anlagenbetreibern u.a. durch steigende Energiekosten in den letzten 2-3 Jahren erhöht und können durch den möglichen Wegfall der Stromsteuerbegünstigung<sup>43</sup> [SIS Verlag 2013] nochmals ansteigen. Konnte für eine Sortieranlage, die ca. 15 bis 20 Ma.-% Wertstoffe aussortiert, im Jahr 2010 noch ein mittlerer spezifischer Kapital- und Betriebskostensatz von ca. 44 €/Mg (ohne Kosten bzw. Erlöse für die Entsorgung der Outputströme) angesetzt werden, werden diese Kosten zwischenzeitlich mit ca. 50 bis 55 €/Mg angegeben.

Für die der Variante 2 zugrunde gelegte komplexe Sortieranlage mit 40 Ma.-% Wertstoffausbeute kann, sofern eine Nachrüstung geeigneter Bestandsanlagen erforderlich wird, ein zusätzlicher Invest in Höhe von 2 bis 3 Mio. € veranschlagt werden. Verbunden mit einem verstärkten Personaleinsatz für die manuelle (Nach-) Sortierung errechnet sich ein spezifischer Kapital- und Betriebskostensatz von 65 bis 70 €/Mg. Hinzuzurechnen sind Erlöse für die erzeugten Wertstoffe und Kosten für die energetische Verwertung der verbliebenen brennbaren Abfälle.

Die Erlössituation variiert je nach Wertstoff. Auf der Basis von Marktpreisberichten und Literaturdaten kann das in der folgenden Tabelle zusammengestellte mittlere Erlösniveau angegeben werden. Berücksichtigt wurde, dass die aussortierten Fraktionen mit Störstoffen verunreinigt sind; entsprechend wurden vorsorglich Preisabschläge gegenüber getrennt erfassten Fraktionen vorgenommen.

Bei der energetischen Verwertung unvorbehandelter gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle ist das Marktgeschehen seit einigen Jahren von niedrigen Preise der Müllverbrennungsanlagen geprägt. Während sich die Entsorgungspreise für kommunale Siedlungsabfälle in den letzten Jahren auf vergleichsweise hohem Niveau halten (nur bei Neuvergaben im Jahr 2013 sanken bei Einzelverträgen die Preise), sind die Preise für gewerbliche Abfälle zurückgegangen. Für Spotmengen liegen die Preise mitunter auch nur im zweistellig Euro-Bereich. Insbesondere im Osten Deutschlands wurden in den Jahren 2012/2013 Preise zwischen 30 und 90 €/Mg bekannt, wobei das Gros der Gewerbeabfälle für Preise zwischen 40 und 50 €/Mg entsorgt werden dürfte [EUWID 2012, EUWID 2013]. Auf der anderen Seite werden hochkalorische „brennbare Abfälle“ mitunter von einigen Zementwerkbetreibern geringfügig vergütet, da andernfalls der höhere Aufwand der Hersteller zur EBS-Konfektionierung nicht kompensiert werden kann.

---

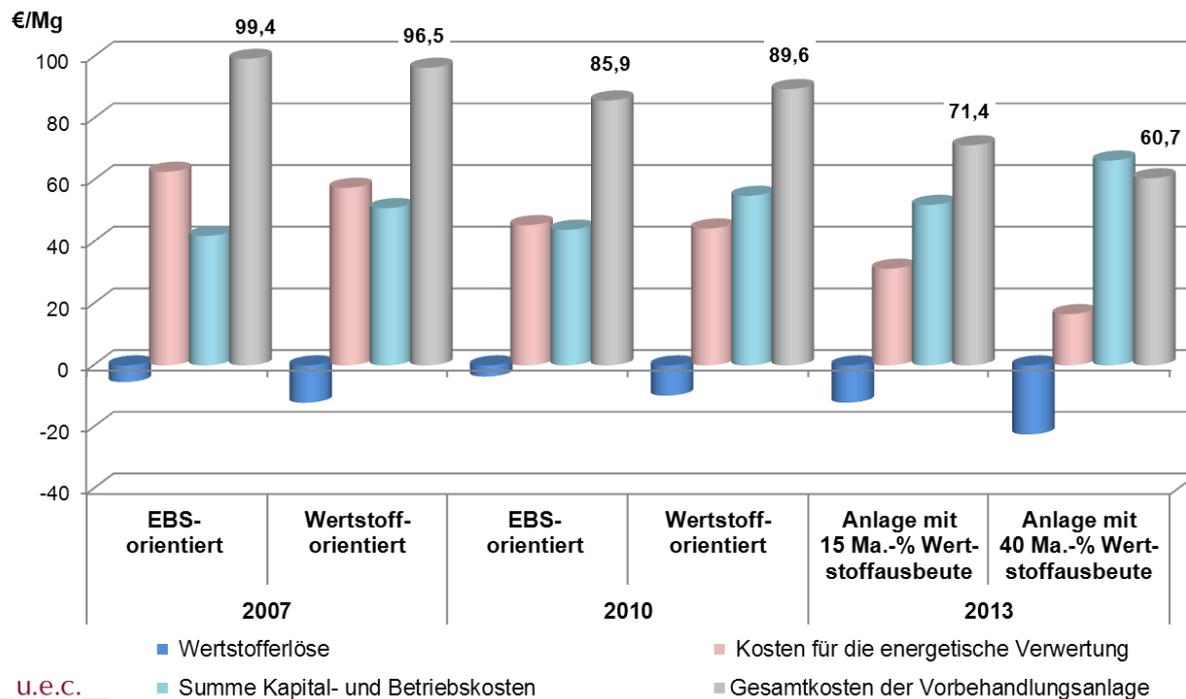
<sup>43</sup> Der Bundesfinanzhof hat in einem Urteil vom 16.04.2013 entschieden, dass einem Unternehmen, das Ersatzbrennstoffe für die thermische Verwertung in Kraftwerken herstellt, keine Stromsteuerbegünstigung gewährt wird.

Tabelle 54. Erlöse (-)/Kosten (+) für verschiedene Wertstofffraktionen und „brennbare Abfälle“ bzw. unvorbehandelte gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle (Stand 2013) [EUWID, Henkes 2013]

Fraktion	€/Mg, netto
Kunststoffe	-80,00 - -270,00
PPK	-20,00- -40,00
Holz	0,00 – -10,00
Metalle	-100,00 – -250,00
unvorbehandelte gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle für MVA	+30,00 – +130,00
„Brennbarer Abfall“ für EBS-Kraftwerk	+30,00 – +75,00
„Brennbarer Abfall“ für Zementwerk	0,00 – -20,00

Wie die Erlöse für die generierten Wertstoffe einerseits und die Kosten für die Verbrennung der „brennbaren Abfälle“ andererseits die Gesamtkosten der Sortieranlagen beeinflussen, wurde für die Stoffströme der Varianten 1 und 2 ermittelt. Basierend auf den Outputströmen (Anhang 19 und Anhang 21) wurden Gesamtkosten (ohne Wagnis und Gewinn) von rund 71 €/Mg für die Variante 1 und rund 61 €/Mg für die Variante 2 ermittelt. Zum Vergleich wird die Kostensituation der Jahre 2007 und 2010 aufgezeigt. Ansteigende Wertstoff Erlöse einerseits und fallende Kosten für die Verbrennung der „brennbaren Abfälle“ andererseits haben dazu geführt, dass trotz der angestiegenen Aufbereitungskosten die Gesamtkosten seit 2010 gesunken sind (Abbildung 82).

Abbildung 82: Erlöse (-)/Kosten (+) der Abfallvorbehandlung (Angaben in €/Mg Input) [Dehne et al. 2011], ohne Wagnis und Gewinnzuschläge

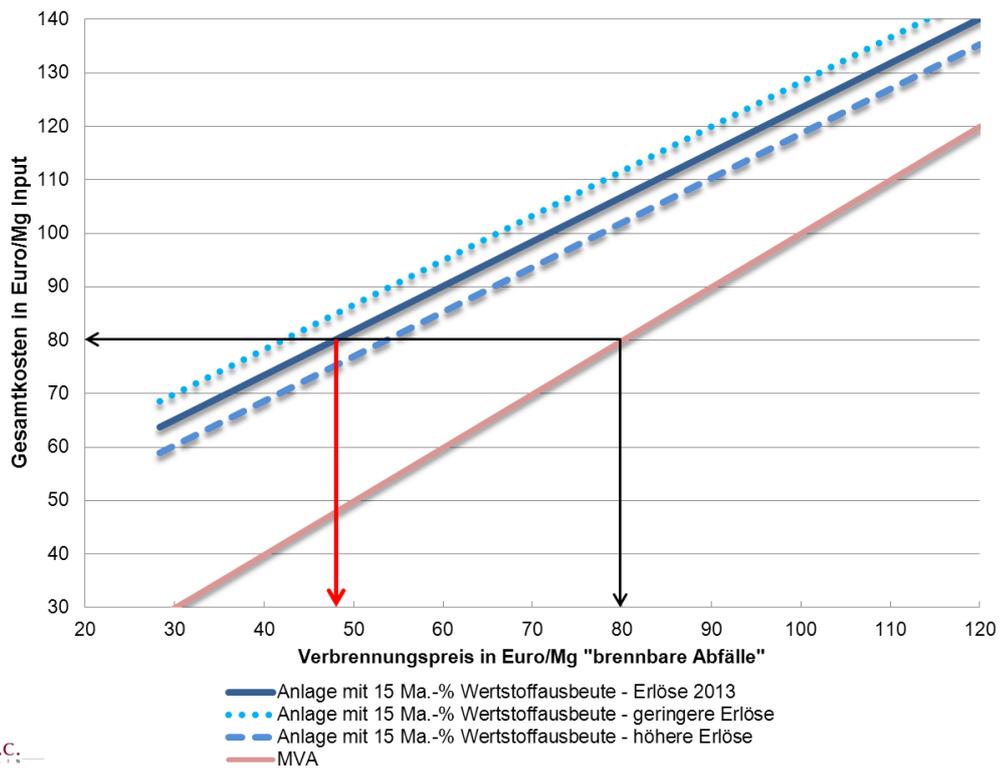


Dies Ergebnis wirft die Frage auf, weshalb die Betreiber von Sortieranlagen nicht die Kostenvorteile einer intensiveren Wertstoffausbeute nutzen und in eine Nachrüstung der Anlagen investieren. Dazu muss auf die Wettbewerbssituation zwischen Sortieranlagen und Müllverbrennungsanlagen eingegangen werden.

In der nachfolgenden Grafik sind zur Erläuterung einerseits die Gesamtkosten der Sortieranlagen für verschiedene Fallkonstellationen als auch die Preise für die direkte Müllverbrennung abgetragen (Abbildung 83).

Um mittels Sortierung einen Preis für die energetische Verwertung unvorbehandelter gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle in Müllverbrennungsanlagen von durchschnittlich ca. 80 €/Mg [EUWID 2012] unterschreiten zu können, kann ein Sortieranlagenbetreiber bei ansonsten konstanten Kapital- und Betriebskosten sowie Erlösen für die aussortierten 15 Ma.-% Wertstoffe nicht mehr als 48 €/Mg für die energetische Verwertung der „brennbaren Abfälle“ aufwenden. Können die brennbaren Abfälle nur zu höheren Preisen entsorgt werden, würden die Gesamtkosten den Vergleichspreis von 80 €/Mg überschreiten. Ein vergleichbares Problem tritt auf, wenn die Erlöse fallen oder bei den Entsorgungskosten für brennbare Abfälle keine Unterschiede mehr zwischen den behandelten oder unbehandelten Abfällen gemacht werden würden.

Abbildung 83: Gesamtkosten von Sortieranlagen mit 15 Ma.-% Wertstoffausbeute im Vergleich zu Kosten der Müllverbrennung in Abhängigkeit von Verbrennungspreisen für „brennbare Abfälle“ und Wertstoff Erlösen

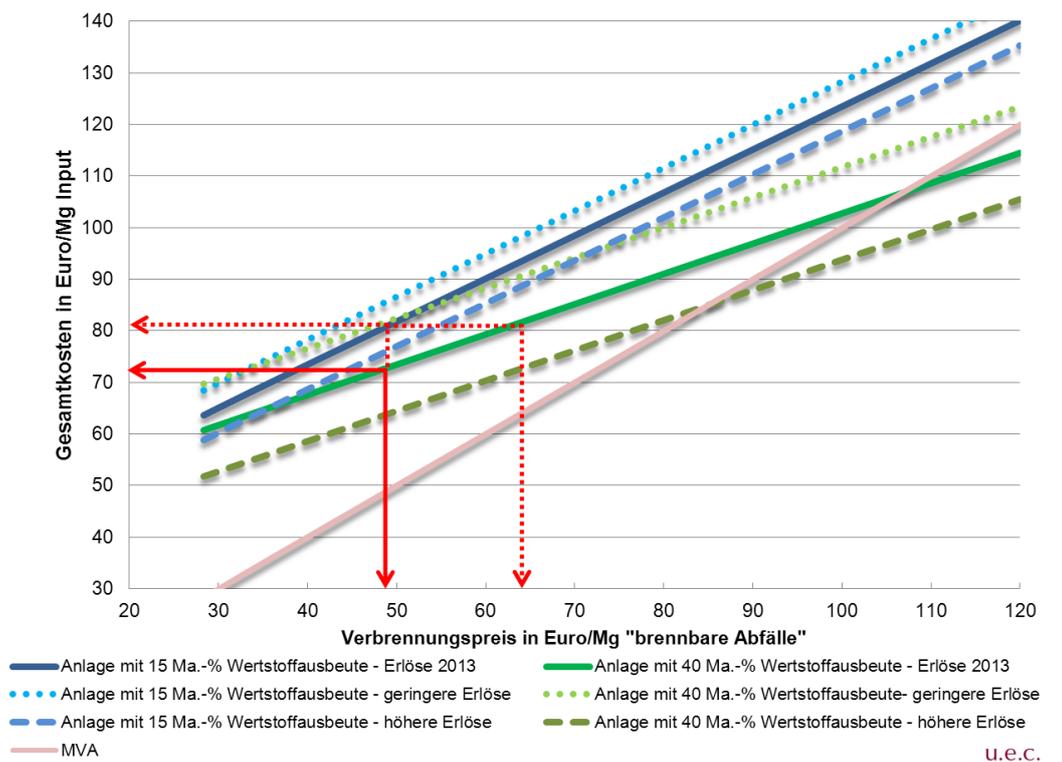


u.e.c.  
ANALYSE

Die Gesamtkostenbetrachtung für Sortieranlagen mit einer Wertstoffausbeute von 40 Ma.-% zeigt ein anderes Bild. Durch zusätzliche Investitionen von 2 bis 3 Mio. € und den verstärkten Personaleinsatz steigen zwar die Kapitel- und Betriebskosten um ca. 25 % an. Die höheren Erlöse und die niedrigeren Verbrennungskosten für die „brennbaren Abfälle“ führen in Summe jedoch zu geringeren Vorbehandlungskosten (Abbildung 82). Auf der anderen Seite haben die Volatilitäten der Erlöse für die verschiedenen generierten Wertstoffe, verbunden mit der größeren Wertstoffmenge, einen deutlich größeren Einfluss auf die Gesamtkosten.

Das Beispiel aus Abbildung 83 aufgreifend, führen Kosten für die energetische Verwertung der „brennbaren Abfälle“ aus der Sortieranlage von 48 €/Mg zu Gesamtkosten der Abfallvorbehandlung in Höhe von 72 €/Mg (Abbildung 84). Somit erzielt die höhere Wertstoffausbeute einen Kostenvorteil von 8 bis 9 €/Mg. Sinken jedoch die Erlöse oder steigen die Verbrennungspreise, so liegen die Gesamtkosten im Bereich der Sortieranlage mit 15 Ma.-% Wertstoffausbeute. Mit anderen Worten: der Betreiber einer Sortieranlage vergrößert mit einer Nachrüstungsinvestition erheblich sein betriebswirtschaftliches Risiko. Da Betreiber von (nicht ausgelasteten) Müllverbrennungsanlagen für gemischte gewerbliche Abfälle derzeit keine Vollkosten ansetzen, können sie im Übrigen auch leicht auf die geänderte Wettbewerbssituation reagieren.

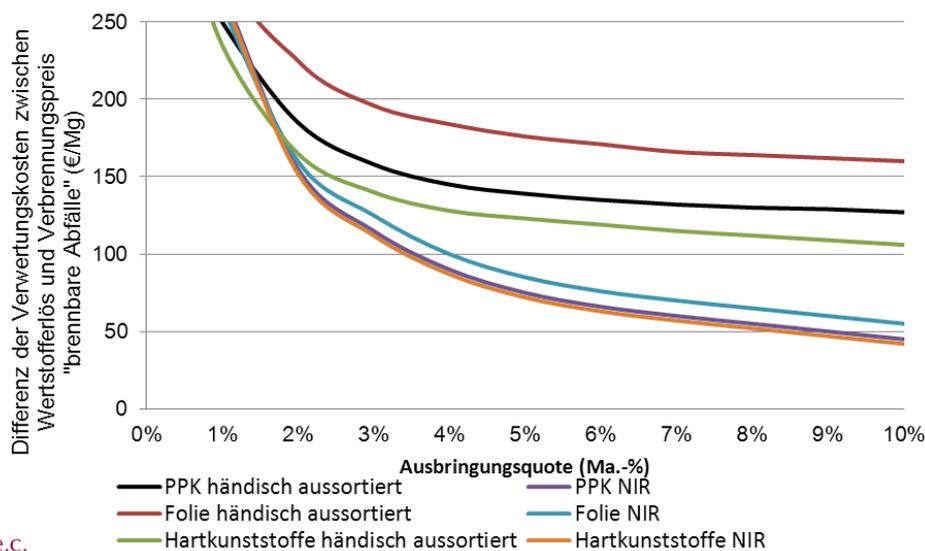
Abbildung 84: Gesamtkosten von Sortieranlagen mit 40 Ma.-% Wertstoffausbeute in Abhängigkeit von Verbrennungspreisen und Erlössituation



Mit Hilfe von Modellrechnungen hat [Helftewes 2012] Grenzkosten für eine wirtschaftliche Wertstoffausbeute dargestellt. Der grafischen Auswertung können wertstoffspezifische Quoten für die jeweiligen Ausbringungsmenge entnommen werden, die zur Kostengleichheit mit der alternativen energetischen Verwertung des Wertstoffes als „brennbarer Abfall“ führt. So ist für eine Ausbringungsquote von PPK mittels NIR-Trenner von 5 Ma.-% eine Preisdifferenz zwischen Wertstoffereisen und der Alternative „Verbrennung“ von ca. 75 €/Mg ausreichend, während für die gleiche Ausbringungsquote von händisch sortiertem PPK eine Preisdifferenz von ca. 140 €/Mg erforderlich ist. Bei Überschreitung einer Mindestquote ist es für den Sortieranlagenbetreiber wirtschaftlicher, den jeweiligen Wertstoff aus dem Gemisch auszusortieren als ihn in den „brennbaren Abfällen“ zu belassen. Die Ergebnisse zeigen, dass

- ▶ unabhängig von der Art der Ausbringung (händisch oder mittels NIR) mit zunehmender Preisdifferenz die kostendeckende Mindestausbringungsmenge sinkt,
- ▶ die Wertstoffausbringung mittels NIR kostengünstiger als die manuelle Sortierung ist.

Abbildung 85: Grenzkosten der händischen Sortierung bzw. automatischen Ausbringung mittels NIR von Wertstoffen [nach Helftewes 2012]



Wie sich die Preise für die energetische Verwertung unbehandelter gemischter Siedlungsabfälle künftig entwickeln, ist schwierig vorherzusagen. Tendenziell gehen Marktteilnehmer zwar mittelfristig von einer Stabilisierung des Verbrennungsmarktes aus. Der preisliche Abwärtstrend kann sich aber, so beispielsweise MVV Umwelt, noch weiter fortsetzen. Befürchtet wird ein Preisrückgang für die Verbrennung von Gewerbeabfällen von aktuell 70 €/Mg auf unter 50 €/Mg im Jahr 2030 [EUWID 2014]. Damit geraten auch die Sortieranlagen noch weiter unter Druck.

Für die Mehrzahl der noch am Markt agierenden Betreiber von Sortieranlagen würde dieser Preisrückgang bei sonst gleichen Randbedingungen (Wertstoffmenge, Wertstofflöse) angesichts der aufgezeigten Kostensituation das wirtschaftliche Aus bedeuten. Anstatt das Recycling und die damit verbundenen Umweltentlastungseffekte zu stärken und auszubauen, wäre dann das Gegenteil der Fall.

### 13.2 Technische Einflussfaktoren

Generell ist der Anteil der Wertstoffausbringung am Gesamtoutput nicht allein von der Anzahl installierter Aggregate, sondern in hohem Maße von den Betriebsbedingungen und der Anordnung einzelner Trennaggregate im Verfahrensstammbaum abhängig. Am Beispiel von Fe-Metallabscheider soll die installierte Verfahrenstechnik und die Aufbereitungsqualität anhand der Parameter Ausbeute, Selektivität und Reinheit diskutiert werden (Tabelle 55).

Die Ausbeute der Fe-Metallfraktion bei den untersuchten Sortieranlagen mit drei Metallabscheidern liegen zwischen 68% bis 113 %; in einer vierten Sortieranlage mit vier Fe-Metallabscheidern ist die Ausbeute mit 62 % am geringsten. Auch für die Selektivität lässt sich keine Abhängigkeit von der Anzahl der eingesetzten Aggregate ableiten. Nicht die Sortieranlage mit vier Fe-Metallabscheidern weist die höchste Selektivität auf, sondern zwei Sortieranlagen mit drei Abscheidern.

Tabelle 55. Installierte Fe-Metallabscheider und die gemessenen verfahrenstechnischen Kennzahlen Ausbeute, Selektivität und Reinheit der Fe-Metalle

Anlage	Anzahl der Geräte	Ausbeute	Selektivität	Reinheit
1	3	68%	53%	81%
2	3	91%	92%	93%
3	3	113%	97%	82%
4	4	62%	76%	94%

Die Anlage Nr. 3 trennt somit mit drei Fe-Metallabscheidern aufgrund der Selektivität von 97 % die meisten Fe-Metalle aus dem Inputmaterial ab. Bei einer Reinheit des abgetrennten Materials von 82 % ist im Zuge der Vermarktung mit Preisabschlägen zu rechnen. Der abgetrennte Fe-Metallanteil der Sortieranlage Nr. 2 ist zwar geringer, aufgrund der höheren Reinheit werden die Preisabschläge geringer ausfallen, so dass die Anlage Nr. 2 ein wirtschaftlich besseres Ergebnis erzielen könnte. Die Sortieranlage Nr. 4 hat trotz vier installierten Fe-Metallabscheidern eine zu geringe Selektivität, die auch durch die hohe Reinheit nur bedingt wirtschaftlich kompensiert werden kann.

Die Ursachen für unterschiedliche Selektivitäten aussortierter Stofffraktionen sind vielfältig und liegen in technischer Hinsicht also weniger in der reinen Anzahl eingesetzter Aggregate, sondern u.a. auch im Verfahrensablauf der Anlage, im Vorhandensein der Aggregate, der individuellen Einstellung der installierten Technik, bei der Überfrachtung der Förder- und Sortierbänder, einem zu breit gewählten Kornspektrum, dem Verzicht auf die Besetzung einer manuellen Nachsortierung einzelner Fraktion. Einer Optimierung dieser Faktoren stehen oft jedoch übergeordnete wirtschaftliche Überlegungen entgegen – anstatt beispielsweise den Durchsatz auf das Auslegungsniveau anzupassen, werden im Gegenteil eher zu hohe Durchsätze gefahren.

Eine vermehrte Wertstoffausbringung für ein anschließendes Recycling ist somit nach Einschätzung von Anlagenbetreibern in erster Linie kein technisches Problem. Weiterentwickelte Aggregate und Trennverfahren, die verschiedene Anlagenhersteller auf dem Markt anbieten, werden wegen der damit verbundenen betriebswirtschaftlichen Kostenrisiken nicht nachgefragt. Aus diesem Grund soll nachfolgend nur kurz auf neue technische Entwicklungen und Forschungsvorhaben eingegangen werden.

Die Ausbringung von Fe-Metallen gehört zu den am stärksten verbreiteten Aufbereitungstechniken bei der mechanischen Abfallvorbehandlung und führt dazu, dass rund 90 % der Fe-Metalle des Inputs aus den gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen abgetrennt werden. Neben den zur FE-Metallabscheidung gebräuchlichen Überbandmagneten und Magnetbandrollen/-trommeln werden mittlerweile auch sog. Neodymrollen eingesetzt, mit denen auch schwachmagnetische und kleinstückige Metalle aus dem Materialstrom abtrennbar sind. Knapp 9 % der im Input der Sortieranlagen enthaltenen Fe-Metalle verbleiben dann nach der Abfallaufbereitung in den „brennbaren Abfällen“ und werden größtenteils entweder im Zuge einer anschließenden EBS-Aufbereitung oder der Schlackeaufbereitung separiert.

Wirbelstromscheider zur Aushaltung von NE-Metallen werden aus Kostengründen vorwiegend in Sortieranlagen hoher Komplexität installiert. Hervorgerufen durch die Preisentwicklung und erhöhte Nachfrage nach NE-Metallen in den letzten Jahren haben Sortieranlagenbetreiber und Betreiber von MBA-Anlagen die eingesetzte Maschinenteknik um NE-Metallabscheider nachgerüstet. Bei dieser mechanischen Abtrennung mittels Wirbelstromscheider wird ein Gemisch verschiedener NE-Metalle (vorwiegend Aluminium, aber auch Kupfer, Zink etc.) erzeugt.

Andere Trenner arbeiten auf der Basis elektromagnetischer Sensoren oder Röntgenfluoreszenzspektroskopie [Uepping 2013]. Diese Geräte werden vorwiegend in der Schrottaufbereitung eingesetzt, d.h. in einem Einsatzfeld, in dem bereits eine metallangereicherte Fraktion vorliegt.

Verschiedene aktuelle Untersuchungen widmen sich der Intensivierung der NE-Metallrückgewinnung, von denen hier einige exemplarisch benannt werden:

- ▶ Im Rahmen eines Forschungsvorhabens, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, wird die Identifizierung und der Separierung nichtferritischer Wert- und Edelmetalle sowie Seltener Metalle aus der Haus- und Gewerbeabfallbehandlung bzw. aus Sortierresten der Wertstoffsartierung untersucht [Verbundprojekt NE-Rec 2012]. Das Projekt greift die unterschiedlichen Ausbeute/Selektivitäten hinsichtlich der Aushaltung verschiedener NE-Metalle auf und setzt bei der weitgehenden Abtrennung von Störstoffen und einer weiteren Erhöhung der Konzentration der Zielmaterialien an. Im Ergebnis des gesamten Aufbereitungsprozesses sollen Wertmetalle (insbesondere Aluminium, Kupfer, Zink, Zinn und Blei) als quantitativ größte Fraktionen neben Edelmetallen und Seltenen Metalle in einer aufkonzentrierten hohen Qualität vorliegen. Das Projekt soll 2015 abgeschlossen werden.
- ▶ Zur Steigerung der Recyclingpotentiale von Fe- und NE-Metallen aus der Schlacke wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes der Universität Duisburg die Verteilung metallischer Komponenten einer frischen MVA-Schlacke auf verschiedenen Korngrößenklassen (< 12 mm, insbesondere < 2 mm) analysiert und charakterisiert. Die Ergebnisse der Analysen zeigen,
  - dass es Elemente wie z.B. Aluminium und Kupfer in der Feinschlacke gibt, die mehr oder weniger gleichmäßig über die Korngrößenklassen verteilt sind,
  - dass sich Elemente wie z.B. magnetische Eisenoxide und Zink in den kleinen Korngrößenklassen anreichern [Deike 2012].
- ▶ Die nassmechanische Aufbereitung von frischer MVA-Asche wird zurzeit auch in einem Pilotprojekt im Land Sachsen-Anhalt vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des „Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand“ gefördert. Hierbei wird ein Teilstrom mit Feinstpartikeln abgetrennt, in dem sich Metalle angereichert haben. Ferner werden die NE-Metalle (vor allem sind dies Aluminium und Kupfer) mittels Wirbelstromabscheidern in drei Korngrößen abgetrennt [Holm 2013]. Mit Ergebnissen ist im Jahr 2015 zu rechnen.
- ▶ Im Labormaßstab kann gezeigt werden, dass mit Hilfe der elektrodynamischen Fragmentierung aus MVA-Schlacke u.a. eine magnetische Fraktion (z.B. Eisenoxide, Messing) und eine NE-Metallfraktion freigelegt werden können [Thome et al. 2013].

Andere verfahrenstechnische Weiterentwicklungen betreffen beispielsweise:

- ▶ die Verbesserung der Sortiereffizienz durch eine frühzeitige Aushaltung flächiger, großer Folien mittels Unterdruck-Trenner. Diese wurden bislang nur bei LVP-Sortieranlagen nachgerüstet, können sich aber auch für die Sortierung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen eignen.
- ▶ die Verbesserung der automatischen Klaubung, um beispielsweise künftig auch dunkle und schwarze Kunststoffe abtrennen zu können.
- ▶ die verbesserte Abtrennung von Störstoffen aus EBS mittels Wirbelschichttrenner [Wirtz et.al. 2012].

Auch im Bereich des Recyclings der aussortierten Fraktionen werden neue Wege beschritten. So lassen sich aus gemischten Kunststofffraktionen mittels Hochgeschwindigkeits-Laserspektroskopie Gutmaterialien in einem Kunststoff-Flake- oder Granulatstrom anhand seines spezifischen optoelektronischen Spektrums identifizieren und pneumatisch abtrennen. Das System ist auch für kleinste Partikelgrößen sowie farbige und schwarze Materialien einsetzbar [Unisensor 2013].

### 13.3 Stoffqualität

Derzeit werden aus den gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen von der Potentialmenge für PPK, Kunststoffe, Metalle und Holz von in Summe 3,75 Mio. Mg im Jahr 2010 nur knapp 15 Ma.-% recycelt. Unter optimierten Bedingungen für eine Aufbereitung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle in einer Modellanlage (Variante 2) steigt diese Menge auf 40 Ma.-% (rund 2,39 Mio. Mg/a (incl. Störstoffe)) an. Um diese gesteigerte Menge zu recyceln, muss die Qualität den Anforderungen der Abnehmer entsprechen.

- ▶ Qualität der aussortierten Wertstoffe

Mit zunehmender Recyclingmenge kann die Qualität der aussortierten Wertstoffe sinken. An den Beispielen PPK und Kunststoffe soll die Veränderung der aussortierten Wertstoffqualität aufgezeigt werden.

- ▶ Qualität der „brennbaren Abfälle“

Ein wesentlichen Faktor für die Qualität und die Verwendungsmöglichkeit „brennbarer Abfälle“ ist deren Heizwert.

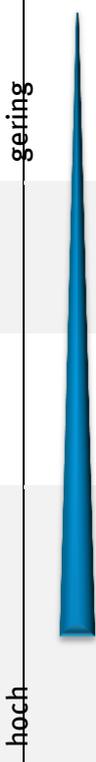
- ▶ Nicht recycelbare Fraktionen

Hierzu zählt die Feinfraktion, Textilien, Verbundstoffe, Organik etc..

#### 13.3.1 Qualität der aussortierten PPK-Fraktion

Bei der Sortierung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle können je nach Gestaltung der Sortierung verschiedene Altpapiersorten erzeugt werden, so die Altpapiersorte 1.02 (Sortiertes gemischtes Altpapier), 1.04 (Kaufhauspapier) und 1.11 (Deinkingware) (Tabelle 56).

Tabelle 56. Definitionen von Altpapiersorten [Altpapier 2000]

Altpapiersorte		Definition	Altpapierqualität
1.01 (B 10)	unsortiertes gemischtes Altpapier, unerwünschte Stoffe entfernt	Eine Mischung verschiedener Papier- und Pappesorten ohne Begrenzung der Anteile an kurzfasrigem Material.	
1.02 (B 12)	Sortiertes gemischtes Altpapier	Eine Mischung verschiedener Papier- und Pappqualitäten, die maximal 40% an Zeitungen und Illustrierten enthält.	
1.04 (B 19)	Kaufhausaltpapier	Gebrauchte Papier- und Kartonverpackungen, die mindestens 70% Wellpappe enthalten, Rest Vollpappe und Packpapier.	
1.11 (D 39)	Deinkingware	Sortiertes grafisches Papier aus haushaltsnaher Erfassung, Zeitungen und Illustrierte mit einem Mindestanteil von 40% <sup>44</sup> .  Der prozentuale Anteil von nicht deinkbarem Papier sollte im Laufe der Zeit auf 1,5% reduziert werden.	

in Klammern: alte Bezeichnung der Altpapiersorte

Händisch aussortierte PPK lassen sich problemlos definierten Altpapiersorten, wie

- ▶ für Pappen und Kartonagen der Altpapiersorte 1.04 (B 19) (Kaufhauspapier),
- ▶ für Zeitungen und Illustrierte oder andere Deinking geeignete PPK der Altpapiersorte 1.11 (D 39) (Deinkingware) oder
- ▶ für Deinking ungeeignete PPK der Altpapiersorte 1.02 (B12), zuordnen.

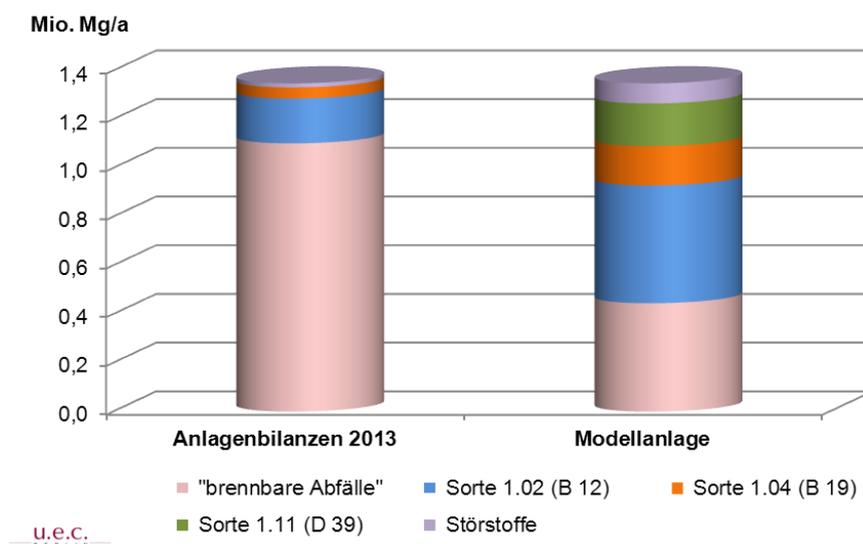
Verschmutztes oder feuchtes Papier verbleibt bei händischer Sortierung im Materialstrom für die „brennbaren Abfälle“. Anders verhält es sich bei mechanisch abgetrennten PPK-Fractionen, die aufgrund ihrer Inhomogenität als unsortiertes gemischtes Altpapier (Altpapiersorte 1.02 (B 12)) einzustufen sind.

Derzeit werden in Sortieranlagen Pappen und Kartonagen (Altpapiersorte 1.04 (B 19)) händisch und gemischtes Altpapier (Altpapiersorte 1.02 (B 12)) mittels NIR-Trenner aussortiert. Über 80 Ma.-% bzw. 1,1 Mio. Mg/a des PPK-Potentials verbleibt in den „brennbaren Abfällen“ (Anhang 24).

<sup>44</sup> Gemeint ist „je 40 %“; in Summe muss die Deinkingware aus mindestens 80 % Druckerzeugnissen bestehen.

Demgegenüber werden unter optimierten Aufbereitungsbedingungen in der Variante 2 alle vier PPK-Einzelfractionen (Pappen und Kartonagen, Druckerzeugnisse, sonstige PPK 1 (Deinking geeignet) und sonstige PPK 2 (Deinking ungeeignet) – siehe Tabelle 3) händisch aussortiert und die mittels Trenner aussortierte Altpapiermenge gesteigert. Dieses führt im Ergebnis dazu, dass von dem PPK-Potential des Inputs rund 60 Ma.-% aussortiert werden. Der Rest (0,53 Mio. Mg/a) verbleibt in den „brennbaren Abfällen“ bzw. wird als Störstoff in anderen Wertstofffraktionen ausge-tragen.

Abbildung 86: Gegenüberstellung des Verbleibs des PPK-Potentials der Anlagenbilanzen 2013 und der Modellanlage

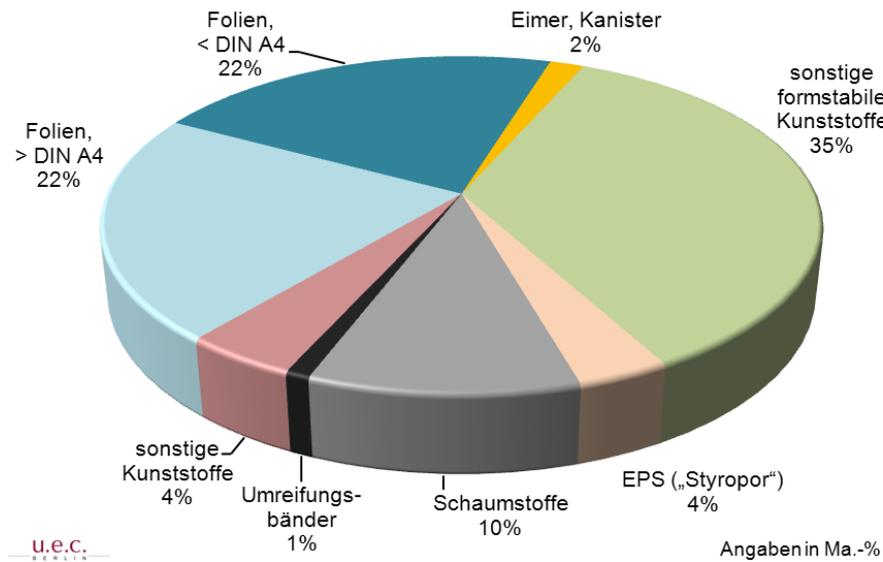


Mit der Erhöhung der Recyclingmenge geht voraussichtlich auch eine Mengenerhöhung der, wirtschaftlich gesehen, minderen Papierqualitäten einher. Das bedeutet, dass dieses Material ggfs. in einer Altpapiersortieranlage nachsortiert werden muss.

### 13.3.2 Qualität der aussortierten Kunststofffraktion

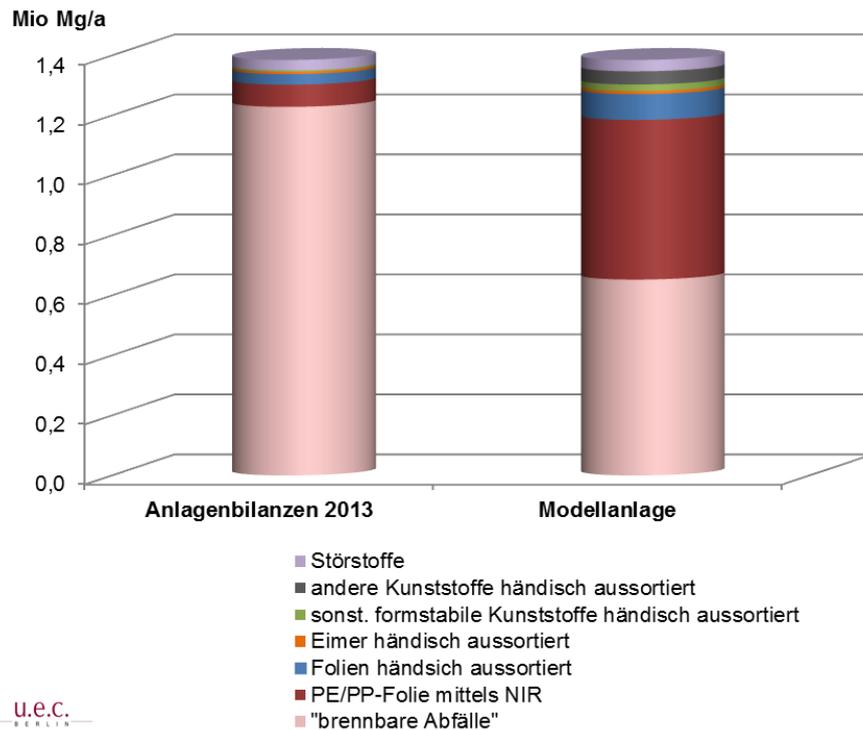
Die Fraktion Kunststoffe im Input (1,39 Mio. Mg/a) setzt sich aus acht Kunststoffeinzelfractionen zusammen (siehe auch Kapitel 7.4), wovon die größten Massenanteile auf die Fraktionen Folien (44 Ma.-%) sowie Eimer und sonstige formstabile Kunststoffe (37 Ma.-%) entfallen.

Abbildung 87: Zusammensetzung der Fraktion Kunststoffe der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (n=4)



Von diesem Potential wurden in den im Jahr 2013 untersuchten Sortieranlagen vorwiegend Folien > DIN A 4, Eimer und sonstige formstabile Kunststoffe händisch und/oder mittels NIR-Trenner aussortiert. Knapp 89 Ma.-% bzw. 1,23 Mio. Mg/a der Kunststoffe verbleiben in den „brennbaren Abfällen“ (Anhang 25).

Abbildung 88: Gegenüberstellung des Verbleibs des Kunststoff-Potentials der Anlagenbilanzen 2013 und der Modellanlage



Unter optimierten Aufbereitungsbedingungen in der Variante 2 werden rund 50 Ma.-% der Kunststoffe dem Recycling zugeführt, der größte Anteil entfällt auf die PE/PP-Fraktion, die mittels NIR-Trenner generiert wird. Im Gegensatz zu händisch aussortierten Folien, die während der Sortierung direkt nach Farbe getrennt werden können, liegt nach einem NIR-Trenner ein buntes PE/PP-Gemisch vor. Dies hat Auswirkungen auf die erzielbaren Erlöse, nicht aber auf die prinzipielle Recyclingfähigkeit.

Abbildung 89: Beispiele aussortierter Kunststofffraktionen [Fotos u.e.c. Berlin]

mittels NIR abgetrennte Kunststofffolien:



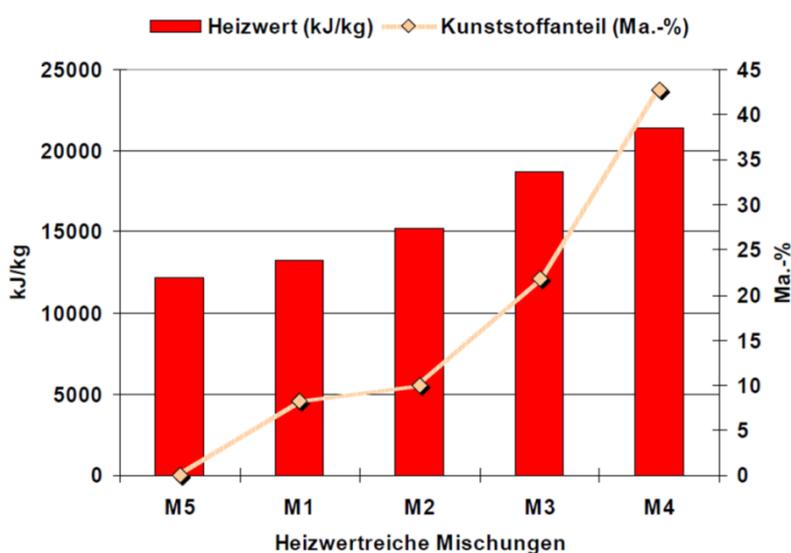
manuell aussortierte Kunststofffolien:



### 13.3.3 Qualität der „brennbaren Abfälle“

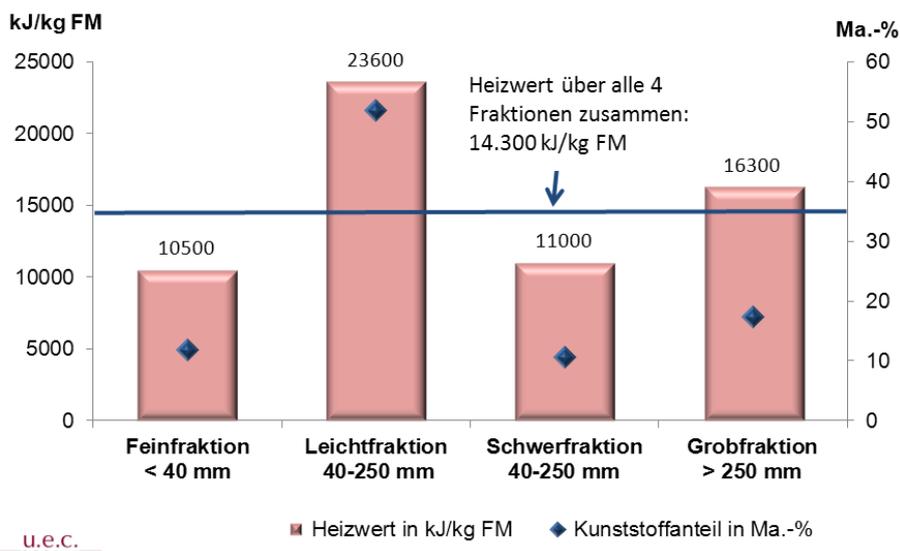
„Brennbare Abfälle“ werden in unterschiedlicher Qualität entsprechend der Abnehmerkonditionen hergestellt. Neben den Anforderungen an Stückigkeit, Feinanteil, Metallgehalt o.ä. ist der Heizwert das maßgebliche Kriterium für den weiteren energetischen Verwertungsweg. Um einen Brennstoff hochwertig als Substitut für Steinkohle einsetzen zu können, ist ein hoher Heizwert erforderlich, der nur erzielt werden kann, wenn den „brennbaren Abfällen“ nicht alle heizwertreichen Bestandteile entzogen werden. Den generellen qualitativen Einfluss der Kunststofffraktion auf heizwertreiche Abfälle verdeutlicht die nachfolgende Abbildung, wonach Kunststoffanteile > 40 Ma.-% in den heizwertreichen Abfällen ein Garant für hohe Heizwerte sind.

Abbildung 90: Einfluss des Kunststoffanteils auf den Heizwert von Ersatzbrennstoffen [Seeger 2009]



Im Zuge der Modellierung in der Variante 2 werden vier verschiedene Qualitäten der „brennbaren Abfälle“ mit unterschiedlichen Heizwerten erzeugt (Abbildung 91, siehe auch Anhang 22). Auch hier zeigt sich deutlich der Einfluss der Kunststofffraktion in der Leichtfraktion 40-250 mm.

Abbildung 91: Heizwerte und Kunststoffmassenanteile der „brennbaren Abfälle“ der Modellanlage (Variante 2)



Trotz der Steigerung der Recyclingmengen kann also aus den verbleibenden „brennbaren Abfällen“ ein heizwertreicher SBS für eine hochwertige energetische Verwertung erzeugt werden.

### 13.3.4 Grenzen der Sortierung

Abgesehen davon, dass jeder Trennprozess mit verfahrenstechnischen Verlusten einhergeht und auch die Wertstofffraktionen unter qualitativen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht vollständig in vermarktbar Bestandteile zerlegt werden können, enthält das Sammelgemisch auch Bestandteile, die aufgrund der Korngröße, des geringen Anteils im Gemisch oder der komplexen Zusammensetzung nicht oder nur teilweise als Wertstoff aussortiert werden können. Im Ergebnis führt das dazu, dass von dem Wertstoffpotential, das in einem Gemisch enthalten ist, Stofffraktionen gar nicht oder nur anteilige stoffspezifische Massenanteile aussortiert werden können.

#### Glas, Textilien, Verbunde

Glas liegt in den gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen vorwiegend als Glasbruch vor. Dies erschwert die manuelle Aussortierung. Gleichwohl die mechanische Aussortierung kein technisches Problem darstellt, wird dieses vor dem Hintergrund der geringen Wertstoffmenge von knapp 80.000 Mg/a (bzw. 1,5 Ma.-% des Inputs) in den Sortieranlagen nicht durchgeführt.

Im Jahr 2008 wurden in Deutschland Altbekleidung und gebrauchte Haustextilien zu 43 % wiederverwendet (Second-Hand-Kleidung), zu 16 % als Putzlappen weiterverwendet, zu 21 % als Recyclingmaterial eingesetzt, zu 10% der energetische Nutzung zugeführt und zu 10 % als Abfall beseitigt [BVSE 2008]. Das Material aus der haushaltsnahen Altkleidersammlung ist aber nicht mit den Textilien in den gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen vergleichbar. Diese Textilien umfassen Putzlappen, Teppichreste, in geringem Umfang auch Kleidung und andere Textilien. Diese Materialien sind verschmutzt und für ein Textilrecycling nicht nutzbar, so dass sie nicht aussortiert werden, sondern als „brennbare Abfälle“ energetisch verwertet werden.

Die Fraktion Verbunde macht 5 bis 6 Ma.-% der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle aus und ist ein vielfältiges Gemisch aus Verbundverpackungen, Möbeln, Kfz-Teilen, sonstige Verbunden, Elektroschrott und EDV-Geräte. Eine händische Aussortierung wurde in der Variante 2 für die

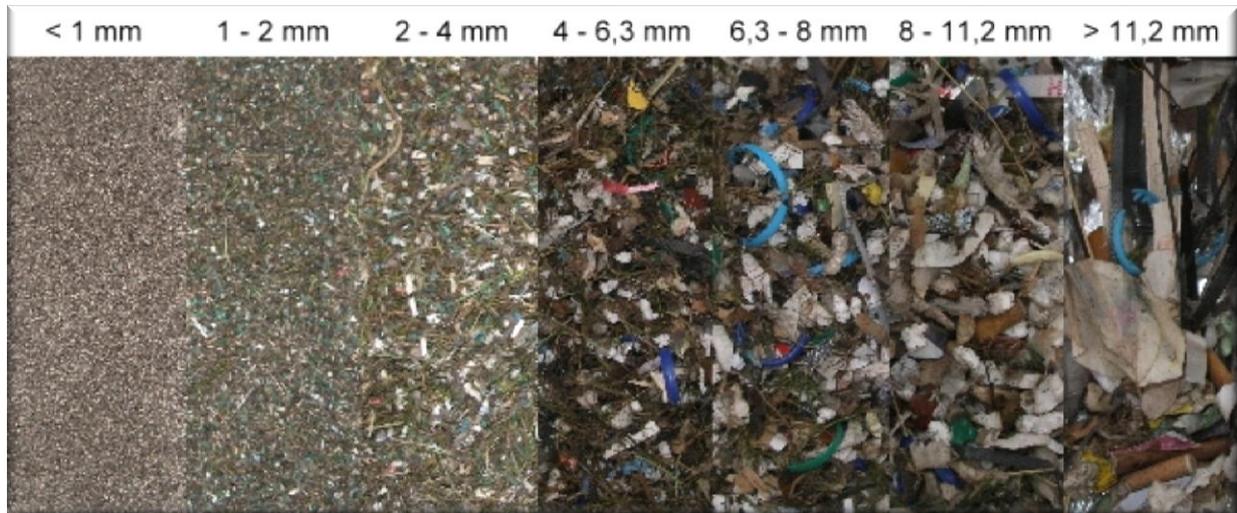
Fraktionen Elektroschrott und EDV-Geräte unterstellt, die übrigen Bestandteile sind nach unserer Einschätzung nicht recycelbar.

#### Feinfraktion

7,6 Ma.-% (rund 440.000 Mg/a) der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle entfallen auf eine Feinfraktion kleiner 10 mm. Diese Feinfraktion wird in den Sortieranlagen in aller Regel nach einer Zerkleinerung, Siebung und Entschrottung als „brennbare Abfälle“ entsorgt. In Bezug auf die Feinfraktion aus der Aufbereitung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle ist es in den vergangenen Jahren gelungen, deren Stoffcharakteristik näher zu beschreiben und in der Folge die Einstufung als „mineralische“ Abfallfraktion mit anschließender Verwertung als Deponiebaumaterial oder Verfüllmaterial zurückzudrängen [u.e.c. Berlin 2010]. Einen optischen Eindruck der Feinfraktion gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle vermitteln die nachfolgenden Abbildungen von Siebfractionen. Deutlich ist bereits bei diesen kleinen Korngrößen der Einfluss des nicht mineralischen Anteils.

Abbildung 92: Einzelne Siebfractionen von Feinfraktionen gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle und eines vorsortierten Material aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen und gemischten Bau- und Abbruchabfällen [Krause 2010]

Input gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle



Input vorsortiertes Material aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen und Bauabfällen



Um zu verdeutlichen, dass gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle und gemischte Bau- und Abbruchabfälle zwei unterschiedliche Stoffgemische darstellen, wird zum Vergleich die Siebfractionen einer Feinfraktion von gemischten Bau- und Abbruchabfällen aufgezeigt.

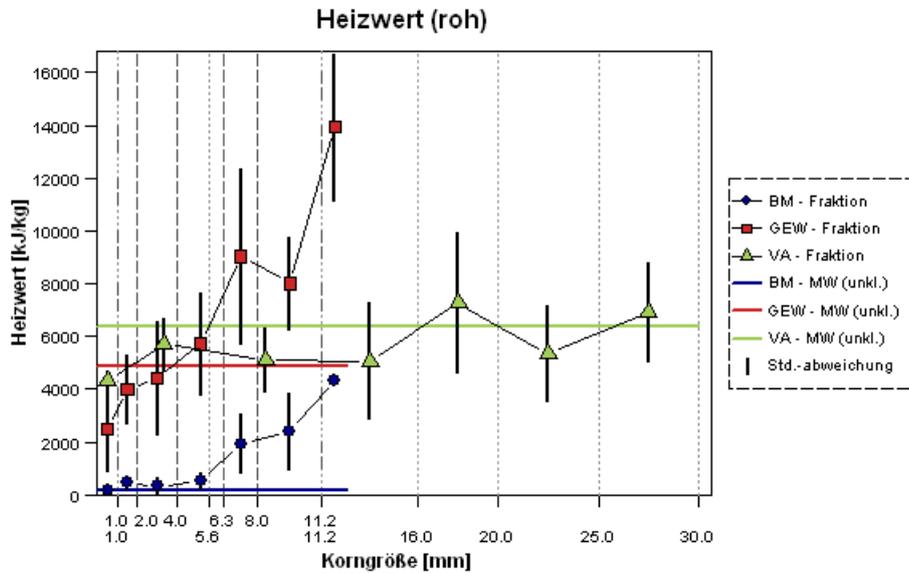
Abbildung 93: Einzelne Siebfractionen einer Feinfraktionen gemischter Bau- und Abbruchabfällen [Krause 2010]

---



Auch die Heizwerte der Feinfraktionen, die in Abhängigkeit von Inputmaterial und Trennkorngröße schwankt, spiegeln die unterschiedlichen Zusammensetzung wieder. Die Heizwertuntersuchungen unklassierter Feinfraktionen aus der mechanischen Aufbereitung von gemischten Bau- und Abbruchabfällen (BM), gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen (GEW) sowie voraufbereiteten Abfällen zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen (VA) zeigen, dass die GEW - Feinfraktion < 10 mm mit einem Heizwert von rund 4.900 kJ/kg FM und die VA - Feinfraktion < 25 mm mit ca. 6.400 kJ/kg FM deutlich über dem Heizwert von ca. 200 kJ/kg FM der BM - Feinfraktion < 10 mm liegen. Die Untersuchung der einzelnen Siebfractionen lässt mit steigender Korngröße eine Zunahme des Heizwertes erkennen.

Abbildung 94: Heizwerte von Feinfraktionen gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (GEW), eines vorsortierten Material aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen und gemischten Bau- und Abbruchabfällen (VA) sowie gemischten Bau- und Abbruchabfällen (BM) (Einzelfraktionen und unklassierte Proben) [Krause 2010]



## 14 Ziele und Maßnahmen für eine hochwertige Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle

In Gewerbebetrieben anfallende Abfälle werden, unter anderem abhängig vom Abfallanfall und damit auch von der Betriebsgröße, in der Praxis auf drei verschiedenen Wegen entsorgt:

- ▶ Wertstoffe wie Metalle, PPK und Kunststoffe wird bei ausreichend großem Aufkommen von Gewerbebetrieben getrennt erfasst und dem Recycling zugeführt. Welche Mengen insgesamt von Gewerbebetrieben bereits getrennt erfasst werden, ist allerdings nicht genau bekannt. Statistische Informationen werden nur auf Basis einer Stichprobe von nicht mehr als 20.000 Betrieben aus verschiedenen Wirtschaftsbereichen mit mehr als 50 Beschäftigten erhoben. Zumindest zeigen die Daten für diese Stichprobe, dass bezogen auf eine bilanzierte Abfallmenge in Höhe von 65,3 Mio. Mg im Jahr 2010<sup>45</sup>, mit 1,55 Mio. Mg nur ein vergleichsweise geringer Anteil der Gewerbeabfälle als gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle entsorgt wird [STBA 2012c].
- ▶ Sind die Wertstoffmengen für eine getrennte Erfassung aus logistischen oder anderen Gründen zu gering, werden diese Betriebe die Wertstoffe als Wertstoffgemisch entsorgen. Gemäß Gewerbeabfallverordnung kann die Entsorgung über Vorbehandlungsanlagen oder in Anlagen zur energetischen Verwertung erfolgen, sofern die erzeugten Gemische bestimmte Anforderungen erfüllen.
- ▶ Sind die angefallenen Abfälle oder Anteile davon nicht verwertbar, sind sie über die sogenannte Pflichttonne der Abfallbeseitigung<sup>46</sup> durch die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger zuzuführen. Da die Sammelgefäße der Pflichttonne i.d.R. zusammen mit Hausmüll, also in einer Tour, geleert und abgefahren werden, sind die mittels Pflichttonne erfassten Mengenströme nicht bekannt.

Die Untersuchungen im vorliegenden Bericht befassen sich ausschließlich mit den gemischt anfallenden gewerblichen Siedlungsabfällen. Die Untersuchungsergebnisse zum Mengenaufkommen zeigen zunächst, dass das Aufkommen der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle nur geringen Mengenschwankungen unterliegt und es derzeit keinen eindeutigen Trend in Richtung Mengenabnahme oder –zunahme gibt.

Von den Möglichkeiten, auf eine Getrennthaltung ganz oder teilweise zu verzichten und stattdessen Gemische gemäß § 4 bzw. § 6 der GewAbfV zu erzeugen, wurde und wird also in etwa gleichbleibendem Maß Gebrauch gemacht. Ob wirtschaftliche Faktoren wie z.B. die gesamtwirtschaftliche Situation oder schwankende Erlöse für Wertstoffe tatsächlich Einfluss auf den Abfallanfall ha-

---

<sup>45</sup> Rund 69 % des Gesamtmengenaufkommen der Stichprobe entfällt auf Abfälle aus Verbrennungsprozessen (AS 10), Abfällen aus Landwirtschaft, Gartenbau, Teichwirtschaft, Forstwirtschaft, Jagd und Fischerei sowie der Herstellung und Verarbeitung von Nahrungsmitteln (AS 02), Abfälle aus der Holzbearbeitung und der Herstellung von Platten, Möbeln, Zellstoffen, Papier und Pappe (AS 03) sowie von Bau- und Abbruchabfällen (AS 17) und Verpackungen (AS 15).

<sup>46</sup> § 7 Satz 4 GewAbfV definiert eine widerlegliche Vermutung und eine daran anschließende Beweislastregel. Danach müssen Abfallerzeuger und -besitzer einen Restabfallbehälter des örE vorhalten, es sei denn sie würden im Einzelfall nachweisen, dass bei ihnen keine Beseitigungsabfälle anfallen.

ben, kann anhand der in Kapitel 5 dargelegten statistischen Daten nicht verifiziert und/oder quantifiziert werden.

Vieles spricht dafür, dass die in der Gewerbeabfallverordnung verankerte Getrennthaltungspflicht von größeren Betrieben weitgehend umgesetzt wird; so wurden im Rahmen der bundeweiten Erhebung über die Abfallerzeugung von den befragten Betrieben im Jahr 2010 insgesamt 2,49 Mio. Mg Siedlungsabfälle gem. GewAbfV getrennt erfasst [STBA 2012c]. Bei einer Vielzahl mittlerer, vor allem aber bei kleinen Betrieben scheint dies nicht in gleichem Maß der Fall zu sein, möglicherweise weil hier die Voraussetzungen für eine effiziente und wirtschaftliche Getrennthaltung von Monofraktionen nicht gegeben sind.

Deshalb ist bei ansonsten gleichbleibenden Rahmenbedingungen zu erwarten, dass Gewerbebetriebe - neben einer erheblichen Menge an bereits getrennt erfassten und dem Recycling zugeführten Wertstoffen - auch in Zukunft wertstoffhaltige gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle im Bereich von 6 Mio. Mg/a erzeugen.

Die Untersuchung der Entsorgungswege zeigte, dass bislang nur rund 45 Ma.-% dieser Gemische der Sortierung zugeführt werden, der Hauptstrom wird entweder Verbrennungsanlagen oder anderen Behandlungsanlagen wie z.B. MBA-Anlagen zugeführt. Beide Entsorgungswege sind nach geltender Gewerbeabfallverordnung zulässig, wenn die Gemische bestimmte Voraussetzungen erfüllen. So dürfen gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle, die direkt energetisch verwertet werden, gemäß § 6 GewAbfV kein Glas, keine Metalle, keine mineralischen Abfälle und keine biologisch abbaubaren Abfälle<sup>47</sup> enthalten. Zudem sind organische Abfälle wie bereits ausgeführt immer getrennt zu erfassen; eine Anforderung, die nach den in Kapitel 7 dargestellten Ergebnissen zur Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle in der Praxis nicht eingehalten wird.

Die ökobilanziellen Untersuchungen zeigen, dass die Auswirkungen der Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle auf die Wirkungskategorien Treibhausgase, kumulierter Energieaufwand, Versauerung und Eutrophierung deutlich reduziert werden können, wenn die Wertstoffe intensiver als bislang recycelt und die dann noch verbleibenden „brennbaren Abfälle“ effizient energetisch verwertet werden. Ausgangspunkt für die Diskussion einer anstehenden Optimierung ist also eine konsequente Ausrichtung der Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle an den Prinzipien der fünfstufigen Abfallhierarchie<sup>48</sup>. Insbesondere

- ▶ die Erhöhung der dem Recycling zugeführten Wertstoffe und
- ▶ eine energetisch optimierte Verwertung der nach Recycling verbleibenden „brennbaren Abfälle“/Sortierreste

sind die entscheidenden Optimierungsansätze.

Dass trotz der seit mittlerweile 12 Jahren in Kraft befindlichen Gewerbeabfallverordnung das Wertstoffpotential der einer Sortierung zugeführten Gemische nicht annähernd genutzt wird und zu-

---

<sup>47</sup> biologisch abbaubare Abfälle: biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle, biologisch abbaubare Garten- und Parkabfälle und Marktabfälle (§ 6 GewAbfV)

<sup>48</sup> Im Focus dieses Projektes stehen das Recycling und die sonstige Verwertung. Zur Abfallvermeidung und Wiederverwendung siehe u.a. das Abfallvermeidungsprogramm des Bundes sowie die zugehörigen wissenschaftlichen Grundlagenarbeiten [BMU 2013].

dem ein erheblicher Massenstrom gar nicht erst sortiert sondern direkt verbrannt wird, hat wie gezeigt vor allem betriebswirtschaftliche Ursachen. Nach wie vor entscheidet der Preis über den Verbleib der Abfälle, eine stoffstromlenkende Wirkung hin zu mehr Recycling geht weder von den Preisen für die Verbrennung noch von der gültigen Gewerbeabfallverordnung aus. Ohne gezielte Maßnahmen wird sich an dieser Situation auch nichts gravierend ändern.

Im Folgenden werden unter Einbeziehung der Ergebnisse des UFOPLAN-Vorhabens zum „Aufkommen, Verbleib und Ressourcenrelevanz von Gewerbeabfällen“ [Dehne et al. 2011] die Ziele und aus unserer Sicht notwendigen Maßnahmen zur Neuausrichtung der Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle diskutiert.

### 14.1 Stärkung der innerbetrieblichen getrennten Erfassung von Wertstoffen

Die geltende Gewerbeabfallverordnung verpflichtet in § 3 Absatz 1 die Gewerbebetriebe zur Getrennthaltung der Wertstoffe Pappe/Papier (AS 200101), Glas (AS 200102), Kunststoffe (AS 201039), Metalle (AS 200140) und biologisch abbaubare Abfälle (AS 200108, AS 200201 und AS 200302)<sup>49</sup>.

Dass der sparsame Umgang mit Ressourcen als auch die innerbetriebliche getrennte Erfassung einzelner Wertstoffe einer Erfassung und Sortierung von Gemischen prinzipiell überlegen ist, ist unbestritten. Insofern ist der getrennten Erfassung von Wertstoffen der Vorrang vor anderen Maßnahmen einzuräumen.

Es stellt sich jedoch die Frage, ob es Instrumente gibt, die bislang nicht getrennt erfassten Mengen stärker als bislang üblich innerbetrieblich getrennt zu erfassen und zu recyceln. Zu diskutieren wäre in diesem Zusammenhang ordnungsrechtliche (Kontrollen) und wirtschaftliche Maßnahmen (z.B. direkte oder indirekte Verteuerung alternativer Entsorgungswege).

Die geltende Gewerbeabfallverordnung geht davon aus, dass eine Kontrolle der Betriebe auf Einhaltung der Getrennthaltungspflichten möglich ist und definiert auch entsprechende Ordnungswidrigkeitstatbestände. Entsprechend der bisherigen Erfahrungen erscheint eine regelmäßige Kontrolle und Überwachung der mehr als 3,6 Millionen abfallerzeugenden Gewerbebetriebe auf Einhaltung von Trennvorschriften mit vertretbarem Kostenaufwand schwer vorstellbar - so zumindest die Meinung verschiedener Mitglieder eines Fachbeirates (siehe auch Kapitel 13, Stärken und Schwächen der Gewerbeabfallverordnung, in [Dehne et al. 2011]). Bekannt geworden sind nur Kontrollen bei Gewerbebetrieben, die gegen die Einführung einer Pflichttonne vorgegangen sind; d. h. nur ein äußerst geringer Prozentsatz der Gesamtanzahl der Betriebe. Eine Beschränkung der Kontrollen auf größere Unternehmen erscheint ebenso nicht zielführend, da gerade bei diesen Unternehmen von einer weitgehend getrennten Erfassung ausgegangen werden kann.

Denkbar ist ferner, dass eine Veränderung der betriebswirtschaftlichen Rahmenbedingungen, insbesondere eine Verteuerung der Entsorgung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen, auch eine Stärkung der getrennten Erfassung<sup>50</sup> bewirkt. Eine solche Kostenerhöhung würde sich

---

<sup>49</sup> biologisch abbaubare Küchen- und Kantinenabfälle (AS 200108), biologisch abbaubare Garten- und Parkabfälle (AS 200201) und Marktabfälle (AS 200302).

<sup>50</sup> Eine getrennte Erfassung von Wertstoffen muss nicht zwingend betriebswirtschaftlich günstiger als die Entsorgung von Gemischen sein, da beispielsweise die Logistikkosten im Vergleich höher sind.

einstellen, wenn die direkte Lenkung nicht vorbehandelter Gemische in die energetische Verwertung (§ 6 GewAbfV) nicht mehr zulässig wäre. Damit würde der Preiswettbewerb zwischen getrennter Erfassung, Vorbehandlung von Gemischen und energetischer Verwertung von Gemischen beendet werden.

Nach Einschätzung der Gutachter sollte die Möglichkeit, Gemische für eine nachträgliche Sortierung zu erzeugen, erhalten bleiben, da andernfalls eine Umgehung der Ziele einer novellierten Gewerbeabfallverordnung durch Stoffstromverschiebung größeren Ausmaßes in die Pflichttonne und damit in die Beseitigung möglich bliebe – eine Lösung, die konträr zu den Zielen des Kreislaufwirtschaftsgesetzes wäre und die ökobilanzielle Situation verschlechtern würde (siehe hierzu auch die Sensitivitätsbetrachtungen in Kapitel 12).

Zusammenfassend sind Maßnahmen zur Stärkung der getrennten Erfassung sinnvoll; mögliche Instrumente müssen insbesondere auf eine bessere Wettbewerbssituation bzw. den Ausgleich von Preisnachteilen abzielen.

## 14.2 Steigerung des Recyclings gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle

Sofern eine innerbetriebliche Getrennthaltung ausgewählter Wertstoffe nicht möglich ist, sind die mindestens von biologisch abbaubaren Abfällen weitestgehend freien gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle einer Sortierung mit dem Ziel zuzuführen, die enthaltenen Wertstoffe möglichst weitgehend dem Recycling zur Verfügung zu stellen. Um dies zu erreichen, sind alle Gemische zu sortieren und darüber hinaus Vorgaben für das Wertstoffausbringen zu definieren.

Die geltende Gewerbeabfallverordnung bietet die Möglichkeit, Gemische auch unmittelbar einer energetischen Verwertung zuzuführen. Dieser Ansatz unterstellt eine Gleichwertigkeit von Recycling und sonstiger (energetischer) Verwertung – eine Annahme, die durch die ökobilanziellen Betrachtungen widerlegt wird. Würden stattdessen stoffstromlenkende Maßnahmen zur vollständigen Sortierung greifen, kann die dem Recycling zur Verfügung gestellte Menge für PPK, Kunststoffe, Metalle und ggf. Holz allein durch eine Vorbehandlungspflicht von derzeit knapp 500.000 Mg/a auf rund 840.000 Mg/a gesteigert werden.

Die Zuweisung von Gemischen in die Sortierung ist für sich genommen jedoch noch keine hinreichende Maßnahme, sondern muss um Ziele zur Ausbeute und Selektivität der Sortierung ergänzt werden.

Die Sortierung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen wird, im Gegensatz zu Wertstoffgemischen aus der haushaltsnahen Sammlung (LVP), bislang nicht gezielt stoffstromlenkend geregelt. Es bleibt bislang dem Anlagenbetreiber überlassen, ob und, wenn ja, in welchem Maß er dem Gemisch Wertstoffe entnimmt. Zwar ist in § 5 GewAbfV eine Verwertungsquote für Sortieranlagen implementiert, diese differenziert allerdings nicht nach Recycling und energetischer Verwertung.

Wie diese Untersuchung zeigt, kann unter optimierten Aufbereitungsbedingungen in Sortieranlagen hoher Komplexität, wie in der Variante 2, bis zu 2,3 Mio. Mg/a PPK, Kunststoffe, Metalle und Holz dem Recycling zugeführt werden. Dass mit dem Ansatz, 40 Ma.-% des Inputs zu recyceln, ein ambitioniertes Ziel verfolgt wird, zeigt beispielhaft eine Zielvorgabe für das Land Berlin. Angestrebt wird eine dem Recycling zuzuführende Masse in Höhe von 20 % des Input; die sich aller-

dings auf Gemische aus gewerblichen Siedlungsabfällen und gemischte Bau- und Abbruchabfälle bezieht [IFEU 2012, IFEU 2013].

Tabelle 57. Zielvorgaben für massenbezogene Wertstoffausbringung

Wertstofffraktion	Modellanlage in Variante 2 (für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle)	Berlin 2020 (für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle und gemischte Bau- und Abbruchabfälle) [IFEU 2012]
	Ma.-%	Ma.-%
PPK	14,9	6
Kunststoffe	13,7	4
Metalle	5,5	3
Holz	6,3	7
Summe	40,4	20

Die Bereitstellung von Wertstoffen durch eine verbesserte Sortierung ist dann sinnvoll, wenn die Mehrmengen auch vermarktet oder ein Markt geschaffen werden kann. Ob zum Ausbau insbesondere des Kunststoffrecyclings weitere ergänzende Maßnahmen erforderlich sind, ist Gegenstand eines in Bearbeitung befindlichen UBA-Forschungsvorhabens zur „Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen - mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe“. Das Forschungsvorhaben verfolgt das Ziel, die Hemmnisse, die einer Steigerung der werkstofflichen Verwertung derzeit entgegenstehen, zu identifizieren und darüber hinaus praxisnahe sowie umsetzbare Maßnahmen und Instrumente zur Steigerung des Einsatzes zu entwickeln [Wilts et al. 2014].

### 14.3 Steigerung einer hochwertigen energetischen Verwertung der „brennbaren Abfälle“/Sortierreste

Für die nach der Wertstoffentnahme in einer Sortieranlage verbleibenden „brennbaren Abfälle“/Sortierreste zeigt sich, dass die Erzeugung hochwertiger und schadstoffarmer Sekundärbrennstoffe als Ersatz für fossile Energieträger ein weiterer Ansatzpunkt zur ökologischen Optimierung ist. Soll dies Optimierungspotential genutzt werden, muss der nach der Wertstoffentnahme verbleibende „brennbare Abfall“ gezielt aufbereitet und in Anlagen mit einem hohen Substitutionspotential energetisch verwertet werden. Voraussetzung für den Einsatz der Sekundärbrennstoffe ist eine gleichbleibende Beschaffenheit, die sich zudem durch höhere Heizwerte (je nach Einsatzzweck 11 bis 26 MJ/kg), niedrige Schad- und Störstoffgehalte und je nach Einsatzzweck variierenden Korngrößen auszeichnet.

Welcher Massenanteil der „brennbaren Abfälle“/Sortierreste bzw. des Inputs beispielsweise die erforderlichen hohen Heizwerte erreicht, wurde im Rahmen dieser Untersuchung betrachtet. Unter den optimierten Bedingungen der Modellanlage werden danach zwei Fraktionen „brennbarer Ab-

fälle“ mit Heizwerten  $> 16.300$  kJ/kg FM erzeugt; auf diese beiden Fraktionen entfallen rund 1,47 Mio. Mg/a. (Anhang 22) bzw. rund 25 Ma.-% der Summe der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle.

#### **14.4 Energetische Verwertung verbleibender „brennbarer Abfälle“/Sortierreste**

Die hohe Nutzung des Recyclingpotentials für Metalle, Kunststoffe, PPK und Holz sowie die Erzeugung eines hochkalorischen und schadstoffarmen Sekundärbrennstoffes führt dazu, dass ein Brennstoff als Sortierrest verbleibt, der Heizwerte um  $11.000$  kJ/kg FM aufweist. Diese „brennbaren Abfälle“/Sortierreste (rund 1,92 Mio. Mg/a) sind für eine energetische Verwertung z.B. in EBS-Rostfeuerungsanlagen oder in Müllverbrennungsanlagen geeignet.

#### **14.5 Weitere flankierende Maßnahmen**

Die zuvor beschriebenen Maßnahmen stellen auf eine kombinierte Stärkung der getrennten Erfassung und eine an ökologischen Zielen und der Abfallhierarchie des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ausgerichtete Stoffstromlenkung für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle ab. In diesem Kontext sind zwei weitere Maßnahmen hervorzuheben, die die Umsetzung und Zielerreichung unterstützen:

- ▶ Verbesserung der Stoffstromtransparenz

Es muss ein klares, verlässliches Regelwerk entwickelt werden, um die aus Gewerbebetrieben stammenden gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle transparent darstellen und monitoren zu können. Durch die Schaffung eines einheitlichen Bilanzierungssystems, z.B. auf freiwilliger Basis, kann zudem der behördliche Überwachungsaufwand reduziert werden.

- ▶ Schaffung verlässlicher Investitionsbedingungen

Kurze Vertragslaufzeiten, schwankende Wertstofflöhne und die Konkurrenz der Sortieranlagen mit Spotmarktpreisen der Verbrennungsanlagen sind die Ursachen für das zu beobachtende innovationsfeindliche und risikobehaftete Investitionsklima im Bereich der Vorbehandlung. Hier muss so weit wie möglich gegengesteuert werden, wenn das Recycling auch für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle verbessert werden soll.

Im folgenden Kapitel 15 wird dargelegt, mit welchen Instrumenten die aufgezeigten Maßnahmenkomplexe und Ziele erreicht werden können.

## 15 Instrumente zur Erzielung einer hochwertigen Verwertung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen

Zur Stoffstromlenkung und Ausschöpfung des ermittelten ökologischen Optimierungspotentials können nach Auffassung der Forschungsnehmer unterschiedliche Instrumente genutzt werden, die sich in ihrer Wirksamkeit unterscheiden. In der folgenden Übersicht werden solche Instrumente zunächst in die Kategorien Recht, fiskalische Instrumente (Abgaben/finanzielle Anreize), Kooperationen und Informationen/Beratungsansätze eingeteilt.

Tabelle 58. Ausgewählte Instrumente zur Optimierung der Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle [Oetjen-Dehne et al. 2008, überarbeitet]

Instrumentenkategorie/ Angesprochene Akteure	Instrumente
Recht	
Bund/Länder	Novelle der Gewerbeabfallverordnung mit stoffstromlenkenden Teilinstrumenten; Stoffstrombezogene Verordnungen: z.B. Kunststoffverwertungsverordnung
Länder	Verwaltungsvorschriften zur Beschaffung der öffentlichen Hand (Berücksichtigung stoffstromlenkender Maßnahmen bei der öffentlichen Beschaffung)
Fiskalische Instrumente (Abgaben/finanzielle Anreize)	
EU, Bund	Verbrennungsabgabe, z.B. auf nicht sortierte gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle
Bund	Verringerter Umsatzsteuersatz z.B. für Recyclingprodukte aus der Sortierung
Bund, Länder	Investitionsförderung/verbilligte Zinskonditionen
Bund, Länder	Forschungsförderung zur Entwicklung beispielhafter Vorbildlösungen/Förderung von Modellprojekten
Kooperationen	
Land/Entsorgungswirtschaft	Wettbewerb zur Hervorhebung von hochwertigen stofflichen Verwertungslösungen Ermittlung und Veröffentlichung von stofflichen Verwertungsquoten der Vorbehandlungsanlagen

Instrumentenkategorie/ Angesprochene Akteure	Instrumente
Land/Branchenverbände	Gezielte freiwillige Vereinbarung nach dem Muster von Umweltallianzen

Informationen/Beratungsansätze

Umweltverwaltung, IHK	Betriebsberatungen, z. B. Unterrichtung im Gaststättengewerbe zur getrennten Erfassung von organischen Abfällen
IHK, Entsorgungswirtschaft	Aktualisierung und Ausbau des Informationsangebotes
Umweltverwaltung	Ermittlung und Veröffentlichung von stofflichen Verwertungsquoten der Vorbehandlungsanlagen

Rechtliche Instrumente, wie Gebote und Verbote, schreiben bestimmte Verhaltensweisen vor und können auch Fehlverhalten geeignet sanktionieren. Solchen Instrumenten wird üblicherweise eine hohe Wirksamkeit und Zielgenauigkeit zugewiesen. Bezogen auf gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle zeigten sich bei einer Stärken-/Schwächenanalyse der Gewerbeabfallverordnung in [Dehne et al. 2011] zwar Probleme auf unterschiedlichen Ebenen (fehlende Stoffstromlenkung, geringe Vollzugstauglichkeit). Das spricht jedoch nicht generell gegen eine Gewerbeabfallverordnung, sondern für deren zielgerichtete Novellierung, die im Weiteren vorrangig diskutiert wird.

### 15.1 Implementierung einer Vorbehandlungs-/Sortierpflicht bei der Novelle der Gewerbeabfallverordnung

Die Erfahrungen mit der Umsetzung eines Deponierungsverbotes für unbehandelte Abfälle zeigt, dass eine klar formulierte rechtliche Regelung auch eine direkte und stoffstromlenkende Wirkung entfaltet. Um gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle stärker als bislang zu recyceln, ist es beispielsweise in diesem Kontext sinnvoll, die derzeit noch mögliche unmittelbare Verbrennung eines gemischten gewerblichen Siedlungsabfalls auszuschließen und stattdessen eine explizite Vorbehandlungs-/Sortierpflicht einzuführen (Streichung des § 6 GewAbfV).

Das Instrument einer Vorbehandlungs-/Sortierpflicht kann, da mit steigenden Entsorgungskosten einhergehend, sowohl eine Stärkung der innerbetrieblichen Getrennthaltung als auch eine Erhöhung des Wertstoffausbringens aus gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen bewirken.

Allerdings wird eine Vorbehandlungspflicht im Sinne einer Sortierpflicht ohne zusätzliche Instrumente nur bedingt für eine Steigerung des Recyclings sorgen (die Recyclingmenge würde nur aufgrund der größeren Inputmenge ansteigen – siehe Variante 1). Beispielsweise gibt es in Deutschland „Einfachst-Anlagen“, die immissionsschutzrechtlich als Sortieranlagen eingestuft sind, in denen der angelieferte Abfall jedoch lediglich entgegengenommen, Wertstoffe allenfalls in geringem Maß per Greifbagger und/oder manuell entnommen und der verbleibende Abfall wieder zum Transport zur (unspezifischen) energetischen Verwertung bereitgestellt wird.

Deshalb ist es unabdingbar, zur Stoffstromlenkung und Stärkung des Recyclings auch weitergehende Anforderungen an Vorbehandlungs-/Sortieranlagen zu definieren. Über die Sinnhaftigkeit und positive Wirkungsweise einer Sortierpflicht besteht bei verschiedenen Akteuren zwar Einigkeit. In der Frage, wie die Vorbehandlungspflicht dann mit Anforderungen an die Stoffstromlenkung ausgestaltet werden sollte, gehen die Meinungen jedoch auseinander. Deshalb werden im Folgenden vier verschiedene denkbare Lösungsansätze unterschieden.

#### 15.1.1 Vorbehandlungspflicht und Stand der Technik

Dieser Vorschlag zielt darauf ab, dass die gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle nur solchen Vorbehandlungsanlagen zugewiesen werden, für die ein gewisser noch festzulegender technischer Mindeststandard definiert wird. Basis einer solchen Definition könnte beispielsweise das 2006 veröffentlichte und in der Überarbeitung befindliche BVT-Merkblatt Abfallbehandlung sein.

Gegen diesen Lösungsansatz spricht, dass eine Definition des Standes der Technik zwar die Zuweisung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle an Umschlaganlagen und Einfachst-Sortieranlagen verhindern kann. Den Betrieben, die den dann definierten Stand der Technik nicht aufweisen, bliebe eine Nachrüstung der Anlagentechnik offen. Solange jedoch keine Vorgaben zur Ausbeute/Selektivität der Produkte der Sortierung gemacht werden, ist die Erreichung der aufgezeigten quantitativen und qualitativen Optimierungsmöglichkeiten nicht sichergestellt. Im Gegenteil ist eher davon auszugehen, dass die derzeitigen Sortierquoten wie bisher je nach Marktlage schwanken und ggf. auch sinken.

Diese Instrumentenkombination führt deshalb zusammenfassend zwar zu steigenden Umsätzen bei Sortieranlagen und ggf. zu einer Erhöhung der Recyclingmenge, eine darüber hinaus anzustrebende Stärkung bzw. der Ausbau des Recyclings wird jedoch nicht zuverlässig erreicht.

#### 15.1.2 Vorbehandlungspflicht und qualitative Quotierung

Um die Abfallhierarchie (Recycling vor sonstiger Verwertung) zu operationalisieren, kann eine bewertende Quotierung eingeführt werden, die das Recycling fördert, die Erzeugung hochwertiger Ersatzbrennstoffe aber nicht unberücksichtigt lässt. Diese Quote soll den Sortieranlagen aber auch einen Spielraum ermöglichen, um auf die heterogene Zusammensetzung der Inputstoffe reagieren zu können. Ein Lösungsansatz besteht darin, die in der jetzigen Gewerbeabfallverordnung verankerte ausschließlich massenbezogene Gesamtquote in die folgende kombinierte qualitative und quantitative Quote abzuändern.

Bei diesem Modell wird die Vorbehandlungspflicht aller gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle mit einer Quotierung für die Fraktionen Kunststoffe, PPK, Metalle und Holz verknüpft, die gleichzeitig die Abfallhierarchie und die ökologischen Vorteile in der Reihenfolge Recycling - Sekundärbrennstoff - Ersatzbrennstoff berücksichtigt. Das Modell wurde im Rahmen des UFOPLAN-Projektes „Aufkommen, Verbleib und Ressourcenrelevanz von Gewerbeabfällen“ erstmalig vorgestellt und wird im Zuge dieses Projektes fortgeschrieben.

Der Output (Recyclingmengen für Kunststoffe, PPK, Metalle und Holz, hochkalorische „brennbare Abfälle“ (SBS) oder mittelkalorische „brennbare Abfälle“ (EBS)) wird mit verschiedenen Bewertungsfaktoren (Bf) belegt. Vor dem Hintergrund der heterogenen Zusammensetzung der Inputstoffe wird bei der Recyclingmenge nicht auf die einzelnen Wertstofffraktionen bezogen, sondern es wird der summarische Ansatz über die vier Wertstofffraktionen Kunststoffe, PPK, Metalle und Holz gewählt.

$$\text{Bewertungsquote} = \frac{m_{\text{Recycling}} * Bf_{\text{Recycling}} + m_{\text{SBS}} * Bf_{\text{SBS}} + m_{\text{EBS}} * Bf_{\text{EBS}}}{m_{\text{Anlageninput}}}$$

$$\text{Bewertungsquote} \geq 30$$

wobei:

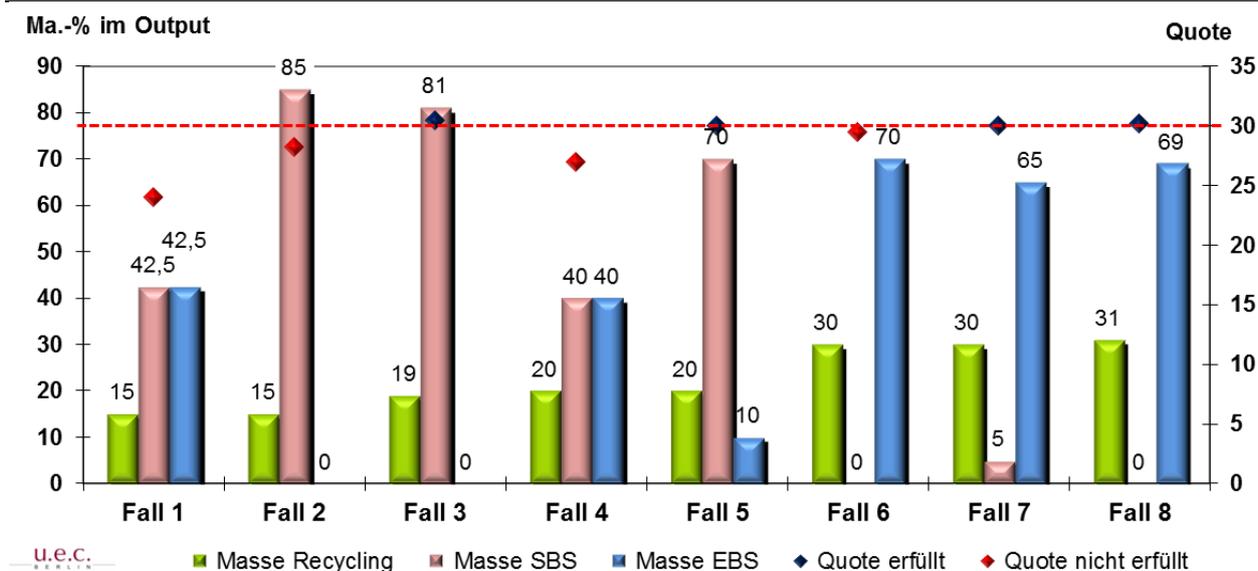
m	Masse
Bf	Bewertungsfaktor
Recycling	Σ aussortierter Kunststoffe, PPK, Metalle und Holz
SBS	hochkalorische „brennbare Abfälle“
EBS	mittelkalorische „brennbare Abfälle“
Bewertungsfaktor <sub>Recycling</sub>	= 75
Bewertungsfaktor <sub>SBS</sub>	= 20
Bewertungsfaktor <sub>EBS</sub>	= 10

Um Manipulationen bei dieser anlagenbezogenen Quotierung auszuschließen, sind auf einer Sortieranlage mitverarbeitete Monofractionen, wie z.B. AS 200101 (getrennt gesammeltes PPK aus dem Haushaltsbereich), im Output vollständig herauszurechnen.

Die zu erreichende Bewertungsquote und die Bewertungsfaktoren sind so gewählt, dass im Rahmen der Vorbehandlung die aussortierte Recyclingmenge gesteigert werden muss. Diese Stärkung des Recycling hat dazu geführt, dass, abweichend von der ursprünglichen Bewertungsquote der Bewertungsfaktor<sub>Recycling</sub> auf 75 geändert wird.

Die nachfolgenden Fallstudien zeigen, dass die heutige Vorbehandlung der gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle (aussortiertes Recyclingmaterial ca. 15 Ma.-%, Rest „brennbare Abfälle“) nicht ausreichend wäre, um die Bewertungsquote von mindestens 30 zu erzielen (siehe Fall 1 oder Fall 2 in Abbildung 95). Eine geringfügige Steigerung der Recyclingmenge bei gleichzeitiger Steigerungen der hochkalorischen SBS-Mengen auf > 80 Ma.-% könnte zwar bereits zu Errichtung der Bewertungsquote von 30 Punkten führen, allerdings ist ein so hoher SBS-Anteil aufgrund der Heizwerte auch nicht zu erwarten. Werden in den Sortieranlagen keine hochkalorischen „brennbaren Abfälle“ erzeugt, ist die die Recyclingmenge auf > 30 Ma.-% zu steigern (Fall 8).

Abbildung 95: Beispiele für die Berechnung der Bewertungsquote für eine hochwertige und schadlose Entsorgung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle



Sollte es in der Praxis schwierig sein, eine klare Trennung zwischen den hochkalorischen „brennbaren Abfällen“ (SBS) und den mittelkalorischen „brennbaren Abfällen“ (EBS) zu ziehen, kann, wie auch schon die der Vorgängerstudie erwähnt, zur Bewertung der Hochwertigkeit der energetischen Nutzung beispielsweise auf das Energieeffizienzkriterium der Abfallrahmenrichtlinie abgestellt werden. Für Müllverbrennungsanlagen hat die ITAD Ende 2008 die benötigten Daten (Strom<sub>prod</sub>, Strom<sub>exp</sub> sowie Wärme<sub>exp</sub>) abgefragt und ausgewertet [Spohn 2009]. Vergleichbare Erkundigungen dürften auch bei den EBS-Kraftwerken kein Problem sein. Werden die in der Vorbehandlungsanlage produzierten „brennbaren Abfälle“ in Zementwerken oder Mitverbrennungsanlagen eingesetzt, könnte ein Wert für die Substitution fossiler Energieträger herangezogen werden. Letztendlich kann mit dieser Vorgehensweise eine Liste aller energetischen Verwertungsanlagen erarbeitet werden, die Aufschluss über deren Hochwertigkeit gibt und die Anlagen in äquivalent zur vorgeschlagenen Differenzierung nach SBS und EBS in mindestens zwei Kategorien einordnet.

### 15.1.3 Vorbehandlungspflicht und zeitlich differenzierte massenbezogene Quoten

Dieses Modell kombiniert die Vorbehandlungspflicht mit Sortier-/Recyclingquoten<sup>51</sup>, wie sie beispielsweise in der Verpackungsverordnung für die Sortierung von LVP-Wertstoffgemischen definiert sind.

Wird ein solches Modell auf die Sortierung von Gewerbeabfällen übertragen, sollten drei Besonderheiten nicht außer Acht gelassen werden:

- Für LVP-Gemische als Anlageninput wird eine gleichbleibende Zusammensetzung unterstellt. Entsprechende Untersuchungen zeigen, dass es natürlich Schwankungen der Zusammensetzung gibt, diese jedoch vergleichsweise gering ausfallen. Bei gemischten Ge-

<sup>51</sup> Die bislang gesetzlich definierten Quoten stellen immer auf den Output der ersten Anlage ab. Die danach noch auftretenden Aufbereitungsverluste, die den Anteil des dem Markt zur Verfügung gestellten Sekundärrohstoffes senken, werden nicht mitbilanziert.

werbeabfällen ist auch im Ergebnis dieser Untersuchung von einer deutlich größeren Streubreite auszugehen.

- ▶ LVP-Gemische sind wertstoffangereicherte Gemische, die nur geringe Anteile anderer Stoffe enthalten - vorausgesetzt, stoffgleiche Nichtverpackungen werden als Wertstoffe betrachtet. Beispielsweise kann der Anteil enthaltener Organikfehlwürfe auf Werte zwischen 3 und 5 Ma.-% beziffert werden [u.e.c. Berlin 2011], der gesamte Anteil von Nichtverpackungen kann zwischen 16 und 22 Ma.-% variieren. Demgegenüber liegt der Wertstoffanteil in gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen niedriger, deshalb sind die massenbezogenen Verwertungsquoten geeignet anzupassen.
- ▶ Bei gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen schwanken nicht nur die Wertstoffanteile stärker und sind auch im Gemisch anteilig geringer anzutreffen, es schwankt auch die Zusammensetzung innerhalb einer Wertstoffart stärker (beispielweise das Verhältnis von Folien zu formstabilen Kunststoffen als Bestandteile der Wertstofffraktion Kunststoffe). Dies ist ebenfalls bei der Festlegung von Quoten zu berücksichtigen.

Im Vergleich zu LVP-Gemischen ist also zusammenfassend von einer höheren Variabilität des Inputmaterials auszugehen, entsprechend ist die Festlegung von Sortier-Quoten für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle schwieriger. Wenn zur Ergänzung der Vorbehandlungspflicht Quoten definiert werden, ist es aus unserer Sicht sinnvoll, diese in Stufen einzuführen und nach gegebener Zeit auch zu validieren. So könnte beispielsweise folgende Regelung implementiert werden:

- ▶ Im ersten Jahr nach Inkrafttreten müssen Sortieranlagenbetreiber eine Mindestquote bezogen auf alle Wertstoffe von 18-20 Ma.-% nachweisen. Nach einer Konsolidierungsphase mit einem Zeithorizont von jeweils 2 – 3 Jahren ist diese vergleichsweise gering ambitionierte Sortierquote dann zweimal um je 4-5 Ma.-% zu erhöhen.
- ▶ Zur Stärkung der energetische Verwertung kann eine weitere Quote definiert werden, die sich auf einen hochkalorischen, gütegesicherten Brennstoff beziehen muss.
- ▶ Spätestens nach der zweiten Erhöhung ist eine Validierung vorzunehmen, um über weitere Steigerungen fundiert entscheiden zu können.
- ▶ Die Erfüllung der Quoten ist über ein Kontroll- und Nachweise-System anlagenbezogen zu erbringen, der Verbleib der Wertstoffe ist von abnehmenden Anlagen oder Direktverwertern zu testieren.
- ▶ Auf eine Verfehlung der Quote kann mit abgestuften Sanktionsmechanismen reagiert werden.

#### 15.1.4 Vorbehandlungspflicht und massenbezogene selbstlernende Quoten

Dieses Modell greift die von Öko-Institut und HTP im Jahr 2012 vorgeschlagenen Maßnahmen zur Optimierung der Stoffstromlenkung bei der LVP-Sortierung auf. Unter anderem sollen damit die bisherigen „Verwertungsquoten“<sup>52</sup> an den Stand der Sortiertechnik für LVP-Gemische angepasst

---

<sup>52</sup> Verwertungsquoten setzen bislang den Sortieranlagenoutput incl. Verunreinigungen etc. in ein Verhältnis zu den lizenzierten Mengen. Die letztendlich dem Markt zur Verfügung gestellte Wertstoffmenge ist durch nachgeschaltete Aufbereitungsanlagen, so z .B. für Kunststoffe, geringer.

werden. Fe-Metalle sollen zu 95 Ma.-% der stofflichen Verwertung zugeführt werden, ebenfalls hohe Quotenvorgaben betreffen NE-Metalle (72 Ma.-%), kunststoffbeschichtete Kartonverpackungen (80 Ma.-%) und Kunststoffe (Quote 90 %, davon sind 60 Ma. % werkstofflich zu verwerten = 54 Ma.-%) sind zu recyceln [Öko-Institut/HTP 2012].

Das vorgeschlagene Quotenmodell soll darüber hinaus „selbstlernend“ gestaltet werden, da fixe Vorgaben nach Auffassung der Autoren „nach Überschreiten der Quote ihre Lenkungsfunktion verlieren, ohne dass bereits optimale Verhältnisse erreicht wurden. Quoten, die sich selbständig nachregulieren, können diesen Mangel beheben. Dabei würden alle Quoten und quantitative Vorgaben nur als Mindestvorgaben definiert, die dann ihre Gültigkeit verlieren, wenn sie im Vorjahr überschritten wurden. An ihre Stelle tritt dann der Vorjahreswert, den z.B. die drei besten dualen Systeme bei der Verwertungsquote erreicht haben. Auf diese Weise wäre nicht nur - wie bei starren Vorgaben - sichergestellt, dass es in der Praxis der Abfallverwertung keine Rückschritte gibt; es würden vielmehr Impulse zur ständigen Optimierung der Verwertung gesetzt“ [Öko-Institut/HTP 2012]. Im Weiteren werden auch Sanktionen bei Nichterfüllung andiskutiert, so z.B. der nach § 6 Abs. 6 VerpackV vorgesehene Widerruf der Feststellung für einzelne Materialien oder eine massenproportionale Sanktionierung (Bußgeldbewehrte Ordnungswidrigkeit oder Einbringen von Strafzahlungen in eine Stiftung zur Förderung von Investitionen in Recyclingtechnologien).

Für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle kann dieses Modell beispielhaft wie folgt angepasst werden.

- ▶ Adressat

Quotenvorgaben können sich nur an die Betreiber von Sortieranlagen, nicht aber an die Erzeuger gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle, richten, da die erforderlichen Kontrollen und Vorgaben auf eine überschaubare Anzahl von Sortieranlagen bezogen werden können und der dafür entstehende Aufwand vertretbar erscheint.

- ▶ Bilanzkreis

In zeitlicher Hinsicht werden die Quoten für ein Kalenderjahr ermittelt. Die Bilanzierung und damit auch die Nachweisführung erfolgt auf Ebene der einzelnen Sortieranlagen. Mittels Wägung sind sowohl die zur Sortierung gelangenden Gemisch-Mengen als auch die Outputproduktströme zu erfassen und mittels weiterer Analysen (siehe unten) ergänzende Daten für jede Sortieranlage zu erheben.

- ▶ Zu quotierende Materialien

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann die Quotierung auf die Materialien Nichteisenmetalle, Kunststoffe, PPK sowie Holz begrenzt werden; Eisenmetalle werden bereits weitestgehend separiert und können ggf. außer Ansatz bleiben. Angesprochen werden nur Materialgruppen, eine weitere Untergliederung ist angesichts der großen Variabilität des Inputmaterials nicht sinnvoll.

- ▶ Bezugsgröße für Quoten

Die materialspezifischen Quoten könnten als Verhältnis der Produktfraktion zum Gesamtinput festgelegt werden; dies würde aber unter anderem bedeuten, dass eine mittlere Zusammensetzung bekannt und für jede Sortieranlage als zutreffend unterstellt werden könnte. Da dies angesichts der starken Schwankungen der Inputzusammensetzung jeder Sortieranlage nicht der Fall ist, muss die

materialspezifische Quote als Massenausbringen definiert und deshalb regelmäßig der Massenanteil der jeweiligen Materialfraktion am Input und in der Produktfraktion analysiert werden.

Möglich ist diese Untersuchung analog zu den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Anlagenbilanzen. Hierbei wären die Produktfraktionen<sup>53</sup> und „brennbaren Abfällen“/Sortierreste zu beproben und deren jeweiligen Anteil an quotierten Materialien zu ermitteln. Die Quote kann dann als Massenausbringen anhand folgender Formel (hier beispielhaft für Kunststoffe) für die einzelnen Produkte definiert werden.

$$\text{Kunststoffquote} = \frac{m_{\text{Produkt Kunststoff}}}{m_{\text{Produkt Kunststoff}} + m_{\text{Rest}}}$$

wobei:

m	Masse
Produkt Kunststoff	Masse der aussortierten und dem Recycling zugeführten Kunststoffe
Rest	Masse der Kunststoffe, die in den „brennbaren Abfällen“ oder in einem Sortierrest verbleiben

► Häufigkeit der Beprobung

Bei der Ausgestaltung eines Kontrollregimes kann bezüglich der Häufigkeit der Beprobung und Analyse auf Erfahrungen mit der Beprobung von Ersatzbrennstoffen und Kompost angeknüpft werden. Deren Untersuchungshäufigkeit ist u.a. durchsatzbezogen festgelegt worden, da bei einem zeitlich definiertem Beprobungszyklus (z.B. monatlich) unbillige wirtschaftliche Härten auftreten könnten. Die Regelungen in § 9 GewAbfV, die u.a. eine Sichtkontrolle jeder Abfallanlieferung vorsehen, können im Gegenzug entfallen.

► Verwertungsnachweis

Analog zur Situation bei Leichtverpackungen, bei der eine zertifizierte Letztempfängeranlage die Verwertung massenbezogen bescheinigt, wird es auch bei gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle erforderlich sein, die Verwertung bis zur letzten Aufbereitungsanlage transparent zu gestalten. Hierzu kann auf die Detailregelungen für Produkte aus der Sortierung von Leichtverpackungen zurückgegriffen werden. Auch die Verwertung im Ausland kann so zertifiziert erfolgen.

Quotierung von hochkalorischen „brennbaren Abfälle“ (SBS)

Die Untersuchung zeigt, dass der Ersatz fossiler Brennstoffe, sei es durch Anlagen zur Mitverbrennung oder durch Anlagen zur industriellen Energieversorgung beispielsweise von Papierfabriken, einen zusätzlichen positiven Umwelteffekt ausüben kann. Wünschenswert und grundsätzlich denkbar ist es deshalb, die materialspezifische Quotierung um eine Quotierung für die „brennbare Abfälle“ zu ergänzen, damit ein Anteil der „brennbaren Abfälle“ in eine hochwertige energetische

<sup>53</sup> Im Gegensatz zu den Produkten aus der Sortierung von LVP gibt es für die Produkte aus der Sortierung gemischter gewerblicher Abfälle bislang keine allgemein verbindlichen Qualitätskriterien bzw. eine verbindliche Begrenzung von Störstoffen. Deshalb erscheint es uns unverzichtbar, auch den Anteil des Zielmaterials im jeweiligen Produkt (also z.B. der Kunststoffanteil im Produkt Kunststoff) zu bestimmen.

Verwertung gelenkt wird. Zur Berechnung und Quotierung kann ein Mindestprozentsatz der hochkalorischen „brennbaren Abfälle“ definiert werden, der einer entsprechend als hochwertig definierten energetischen Verwertungsanlage zugeführt werden muss.

- Vorschläge für die Quotierung

Die nachfolgende Tabelle zeigt die derzeit für Leichtverpackungen geltenden bzw. diskutierten Quoten im Vergleich zu den Quoten für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle auf. Letztere basieren auf den zuvor dargelegten Untersuchungsergebnissen zu den momentanen und technisch machbaren Stoffströmen.

Tabelle 59. Vergleich der Verwertungsquoten für LVP und der Verwertungsquoten für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle [Öko-Institut/HTP 2012]

Parameter	Verpackungsverordnung	Öko-Institut/HTP 2012	Vorschläge für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle
Inputmaterial	Leichtverpackungen aus haushaltsnaher Erfassung	Leichtverpackungen und stoffgleiche Nichtverpackungen aus haushaltsnaher Erfassung	gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle

Quotierung

Bezugsrahmen	Aussortierte Masse in Bezug zur lizenzierten Masse	Aussortierte Masse in Bezug zur Gesamtmasse	Aussortierte Masse in Bezug zur Inputmasse
--------------	--	---	--

Produktanforderungen (als Start- bzw. Mindestvorgabe)

Fe-Metalle	70 % (Weißblech)	95 Ma.-%	95 Ma.-%
NE-Metalle	60 % (Aluminium)	72 Ma.-%	60 Ma.-%
Kunststoffe	36 % (werkstofflich zu verwerten)	54 Ma.-% (werkstofflich zu verwerten)	50 Ma.-%
PPK	Im LVP-Gemisch keine Zielfraktion	Im LVP-Gemisch keine Zielfraktion	60 Ma.-%
Holz	Keine Quote, geringer Massenanteil vom Input	Keine Quote, geringer Massenanteil vom Input	55 Ma.-%
Energetische Verwertung der Sortierreste	Keine stoffstromlenkenden Vorgaben	Keine stoffstromlenkenden Vorgaben	40 Ma.-% des Input sind hochwertig energetisch zu verwerten

Werden die o.g. Verwertungsquoten für die gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle zum Ansatz gebracht, würde rund 34 Ma.-% des Gesamtaufkommens dem Recycling zugeführt werden.

► Top-Runner-Ansatz/Selbstlernende Quoten

Der so genannte Top-Runner-Ansatz wurde ursprünglich zur Energie-Effizienzsteigerung bei Produkten entwickelt. So wurde in Japan bereits 1999 ein Top-Runner-Ansatz implementiert, um den maximalen Energieverbrauch energieintensiver Produkte zu senken; die effizientesten Produkte werden zum Maßstab für kommende Produktgenerationen, gleichzeitig dürfen ineffiziente Produkte nicht mehr angeboten werden. Auch auf EU-Ebene wird dieses Steuerungsinstrument genutzt, z.B. Ökodesign-Richtlinie, Energieverbrauchskennzeichnung [Richtlinie 2009/125/EG, Richtlinie 2010/30/EU], weitere Vorschläge sind in der Diskussion [IFEU 2012a]

Die von Öko-Institut/HTP vorgeschlagene „selbstlernende Quote“ nimmt diesen Ansatz auf und erweitert diesen für die LVP-Verwertung. Ob sich in der Praxis tatsächlich nennenswert höhere Quoten einstellen werden, ist schwer vorhersehbar. Zumindest wird es mit einem solchen Modell keine Rückschritte geben, wenn die Mindestvorgaben geeignet gewählt wurden.

Ein solcher Ansatz kann auch für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle in Frage kommen. Dazu müssten die Bilanzdaten der Sortieranlagen zentral erfasst und jeweils für ein Jahr statistische Kennwerte der erreichten Quoten gebildet werden; die errechneten Kennwerte (z.B. Percentilwerte oder Median-Werte) würde dann die bisherigen Quotenvorgaben ersetzen.

Eine gewisse flexible Anpassung von Quoten im Sinne einer Erhöhung könnte auch dadurch erreicht werden, dass in einem festzulegendem Zeitraum nach Inkrafttreten einer novellierten Gewerbeabfallverordnung (z.B. nach 3 Jahren) ein Monitoring erfolgt und im Ergebnis dann für das Folgejahr bzw. mit einem ausreichenden Zeitraum für die Anpassung neue Quoten festgelegt werden.

► Sanktionsmechanismus

Die geltende Gewerbeabfallverordnung definiert für diverse Tatbestände eine Ordnungswidrigkeit, die bei entsprechender Ahndung mit einem Bußgeld belegt ist. So kann beispielsweise ein Betrieb, der entgegen § 4 Absatz 1 Satz 1 Abfälle einem Abfallgemisch zuführt, mit einem Bußgeld zwischen 200 und 25.000 € belegt werden [Richtlinie 2008]. Nicht als Ordnungswidrigkeit erfasst ist aber die Unterschreitung der in § 5 GewAbfV definierten Verwertungsquote für Vorbehandlungsanlagen. Vorgeschlagen wird, die bisherigen Ordnungswidrigkeitstatbestände zu prüfen, mindestens aber für die Verfehlung der Mindestquoten einen Sanktionsmechanismus neu einzuführen.

Die Vorbehandlungspflicht wird also nach diesem Modell mit umfangreichen stoffstromlenkenden, massenbezogenen Quoten für auszusortierende Wertstoffe als auch für die „brennbaren Abfälle“ / Sortierreste kombiniert. Die Quoten können flexibilisiert werden, zudem sind umfangreiche Instrumenten zur Kontrolle und Sanktionierung vorzusehen.

## 15.2 Steigerung der Nachfrage nach hochwertigen Lösungen

Während die zuvor andiskutierten ordnungsrechtlichen Modelle auf Push-Effekte setzen, setzen andere und teilweise ergänzende Instrumente auf eine Pull-Strategie. Ziel ist es, die Nachfrage durch geeignete Maßnahmen und Instrumente zu erhöhen bzw. zu aktivieren.

Ein realisiertes Beispiel dafür ist eine im Land Berlin geltende Verwaltungsvorschrift, die für die verschiedenen Verfahren der Abfallentsorgung verbindliche Umweltschutzanforderungen auführt, die bei Ausschreibungen der öffentlichen Hand zu berücksichtigen sind. Diese Vorschrift enthält folgende Anforderungen für gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle und Bauabfälle [Verwaltungsvorschrift 2012]:

#### „Kapitel 5.1: Verwertung von gemischten gewerblichen Siedlungs- und Bauabfällen

- ▶ Zur Stärkung der stofflichen Verwertung ist die unmittelbare Verbrennung dieser Gemische unzulässig.
- ▶ Diese Gemische sind Vorbehandlungsanlagen zuzuführen, die prioritär stofflich verwertbare Abfallfraktionen und in zweiter Linie hochwertige, schadstoffarme und heizwertreiche Ersatzbrennstoffe erzeugen.
- ▶ Die Ersatzbrennstoffe sind mit einem Energienutzungsgrad von mindestens 60 % energetisch zu verwerten. Der Energienutzungsgrad ist durch eine Energiebilanz zu dokumentieren.
- ▶ Die stoffliche und energetische Verwertung der Abfallarten ist in einem Stoffflussdiagramm (Art, Menge und Verbleib) zu dokumentieren.“

Weitere Überlegungen in Zusammenhang mit einer Pull-Strategie betreffen die Steigerung der Nachfrage nach Sekundärrohstoffen. Wie sich selbst bei seltenen Erden zeigen lässt, ist die These, dass durch steigende Weltmarktpreise ein Pull-Effekt auf die Abfallwirtschaft entsteht und deshalb u.a. keine regulativen Ansätze mehr notwendig sind, bislang nicht zu verifizieren.

### 15.3 Fiskalische Instrumente

Fiskalische Instrumente stellen meist ein indirekt wirkendes Instrument dar, entsprechend liegt die Wirksamkeit unterhalb der rechtlichen Instrumente. Eine Deponie- oder/und Verbrennungsabgabe wurde beispielsweise zur Stoffstromlenkung in einigen europäischen Ländern, u.a. in Dänemark und den Niederlanden, eingeführt. In anderen Ländern hat sich dieser Ansatz nicht bewährt, so wurde in Norwegen und Schweden eine Verbrennungsabgabe nach einigen Jahren wieder aufgehoben. Auch in Deutschland wurde eine Abgabe – hier als Deponieabgabe – Anfang der 2000er Jahre in Fachkreisen diskutiert, um den damals existierenden Preisunterschied zwischen Verbrennungsanlagen und Deponien auszugleichen [Kummer et al. 2002]. Bekanntlich hat die Umsetzung einer Vorbehandlungspflicht/Deponieverbots Organik haltiger Abfälle diese Diskussion obsolet gemacht.

Im vorliegenden Fall könnte eine von verschiedenen Interessenvertreter geforderte Verbrennungsabgabe gezielt auf gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle erhoben werden, um damit den Kostennachteil der Sortieranlagenbetreiber gegenüber Verbrennungsanlagen möglichst auszugleichen. Eine solche Abgabe ist allerdings schwer zielgerichtet zu bemessen, denn das finanzielle Delta zwischen den erforderlichen Entsorgungskosten für die Sortierung und der direkten Verbrennung ist allenfalls der Größenordnung nach bekannt, zudem sind künftige Preisentwicklungen beider Verfahrenswege nicht vorhersehbar. Weitere Aspekte, wie z.B. die Umgehung der Abgabe

durch „Fehldeklaration/Fehleinstufung/ Umschlüsselung“ des Abfalls hat auch in anderen Ländern letztlich dazu geführt, keine abfallspezifischen Verbrennungsabgabe zu implementieren, sondern wenn überhaupt, dann nur die verbrannte Abfallmenge insgesamt mit einer Abgabe zu belegen [Fischer 2001]. Wenn zusammenfassend eine Verbrennungsabgabe auf gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle nicht zielführend oder praktikabel ist, andererseits aber steigende Preise auch Einfluss auf eine stärkere Getrennthaltung haben, müssen die Disparitäten mit anderen Instrumenten ausgeglichen werden. Ein solcher Ansatz wurde mit der Vorbehandlungspflicht gekoppelt mit unterschiedlichen Quotenregelungen bereits vorgestellt.

Unabhängig davon können prinzipiell auch fiskalische Anreize genutzt werden, um ein gewolltes Verhalten zu induzieren. Der Adressat muss darauf jedoch nicht eingehen, Sanktionsmechanismen gibt es nicht. Auch finanzielle Vergünstigungen wie die nachfolgend beispielhaft angesprochene Mehrwertsteuersenkung stellen eine „weichere“ Form der fiskalischen Instrumente dar.

#### 15.3.1 Mehrwertsteuersatz für Recyclingprodukte aus Sortieranlagen senken

Eine Senkung des Mehrwertsteuersatzes für Recyclingprodukte aus Sortieranlagen würde zwar vordergründig zu einer ökonomischen Besserstellung der Sortieranlagen gegenüber den energetischen Verwertungsanlagen führen. Jedoch können diese Kostenvorteile z.B. steigende Energiekosten nicht kompensieren. Dieses fiskalische Instrument kann allenfalls unterstützend wirken, eine Steigerung der Recyclingmengen muss sich jedoch nicht einstellen. Zudem würde sich dadurch auch eine Benachteiligung getrennt erfasster Recyclingprodukte ergeben. Somit ist dieses Instrument nicht zielführend.

#### 15.3.2 Fördermaßnahmen

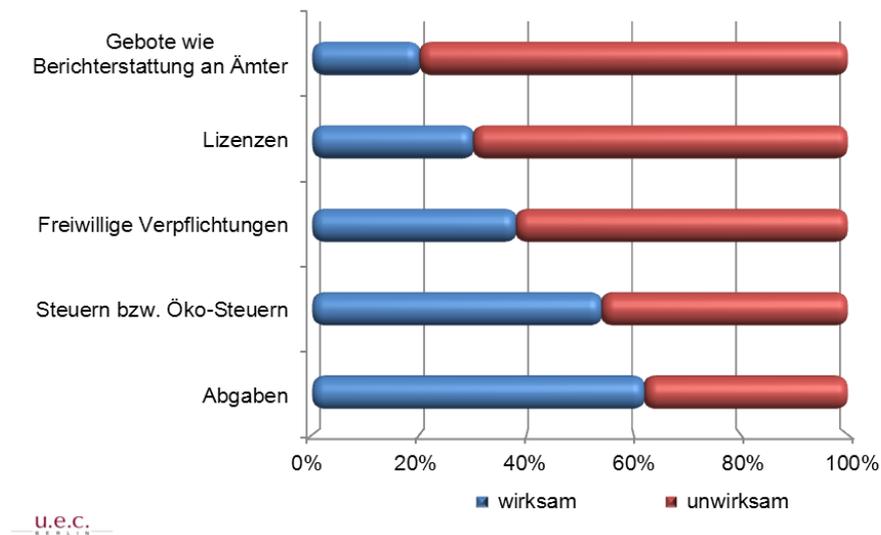
Fördermaßnahmen wie zinsverbilligte Kredite oder verlorene Zuschüsse können das Investitionsrisiko bei der Anpassung bestehender Sortieranlagen an den Stand der Technik reduzieren.

Sinnvoll ist ein solches Instrument als Ergänzung einzusetzen, um beispielsweise gezielt die Sortiertechnik im Betriebsmaßstab weiterzuentwickeln. Beispielsweise könnte auf diesem Weg eine Forschungsanlage zur Erprobung und Überführung neuer Aggregate/Verfahren in die Marktreife („Leuchtturmprojekt“) gefördert werden.

### 15.4 Kooperationen und informatorische Instrumente

Freiwillige Maßnahmen zwischen den Akteuren führen oftmals nicht oder nur langsam zum gewünschten Ziel. So werden in einer Befragung ausgewählter Betriebe auch freiwillige Verpflichtungen, Gebote oder Berichte an Behörden, als unwirksame Maßnahmen zur Verhaltenssteuerung für ein umweltfreundliches Handeln von Unternehmen benannt.

Abbildung 96: Wirksamkeit verschiedener Instrumente, um umweltfreundliches Handeln der Unternehmen zu bewirken (Mehrfachnennungen möglich) [Grabowska 2013]



Nichtsdestotrotz ist es für die Fortentwicklung einer hochwertigen Verwertung erforderlich, die Ziele zu kommunizieren und den Betrieben entsprechende Informationsangebote zu machen. Ob darüber hinaus Kooperationen nützlich sind, wird vor allem von der Frage abhängen, wie stringent die aufgezeigten prioritären rechtlichen Instrumente umgesetzt werden.

## 16 Anhang

Vorbemerkung: In den nachfolgenden Tabellen auftretende Abweichungen bei der Summenbildung sind auf Rundungsfehler zurückzuführen.

Anhang 1:	Kurzprotokoll der 1. Fachbeiratssitzung am 18.02.2013 .....	231
Anhang 2:	Kurzprotokoll der 2. Fachbeiratssitzung am 29.11.2013 .....	233
Anhang 3:	Kurzprotokoll des abschließenden Fachgespräches am 01.04.2014 .....	234
Anhang 4:	Abfallentsorgung 2010 [STBA 2012a] und daraus resultierende Neuberechnung des AS 20030102 .....	238
Anhang 5:	Neuberechnung der Anlagenanzahl 2010.....	242
Anhang 6:	Übersicht über die eingesetzte Anlagentechnik der untersuchten Sortieranlagen .....	243
Anhang 7:	Theoretisches Wertstoffpotential der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle für ökobilanziellen Betrachtung im Jahr 2010 .....	244
Anhang 8:	Verteilung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (AS 20030102) und der Verpackungsgemische (AS 15010600) auf die Entsorgungsanlagen in den Jahren 2007 bis 2010 [STBA 2007-2010] .....	245
Anhang 9:	Branchenspezifische Zusammensetzung von Gewerbeabfällen [Helftewes 2013] .....	246
Anhang 10:	Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (Ergebnis der Anlagenbilanzierungen + eine weitere Analyse) (Angaben in Ma.-%) .....	247
Anhang 11:	Input in die Sortieranlagen 2010 [STBA 2012a] .....	249
Anhang 12:	Output der Sortieranlagen 2010 [STBA 2012a] .....	250
Anhang 13:	Geschätzter Output verschiedener „Mono-Sortieranlagen“ 2010.....	251
Anhang 14:	Bereinigter Output der Sortieranlagen 2010.....	252
Anhang 15:	Vereinfachter Verfahrensablauf einer MBA.....	253
Anhang 16:	Herleitung der Outputstoffströme der MVA.....	254
Anhang 17:	Herleitung der Outputstoffströme der EBS-Rostfeuerungsanlagen .....	254
Anhang 18:	Feste Outputströme der Erstbehandlungsanlagen (Basisvariante).....	255
Anhang 19:	Feste Outputströme der Sortieranlagen (Variante 1).....	256
Anhang 20:	Aufteilung des Inputs auf die Outputfraktionen der Modellanlage im Ergebnis des Rechenmodells zur Stoffstrommodellierung (Daten zum Sankey-Diagramm) .....	257
Anhang 21:	Feste Outputströme der Modellanlage (Variante 2) .....	259

Anhang 22:	Zusammensetzung und Heizwerte der „brennbaren Abfälle“ der Modellanlage (Variante 2).....	260
Anhang 23:	Selektivitäten der Stofffraktionen der Modellanlage (Variante 2) .....	262
Anhang 24:	Gegenüberstellung des Verbleibs des PPK-Potentials der Anlagenbilanzen 2013 und der Modellanlage .....	263
Anhang 25:	Gegenüberstellung des Verbleibs des Kunststoff-Potentials der Anlagenbilanzen 2013 und der Modellanlage.....	264
Anhang 26:	Heizwert, Gehalt $C_{\text{gesamt}}$ und Anteil $C_{\text{fossil}}$ .....	264

## Anhang 1: Kurzprotokoll der 1. Fachbeiratssitzung am 18.02.2013

---

Zusammenfassung der Ergebnisse der Diskussion und der Stellungnahmen der Teilnehmer:

Gegenstand der Untersuchung sind hausmüllähnliche Gewerbeabfallgemische, die getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt werden sowie Verpackungsabfallgemische gewerblicher Herkunft. Somit die Abfallschlüssel 20030102 und 15010600. Eine weitere Unterscheidung in überlassungspflichtige und nicht überlassungspflichtige Abfälle ist für eine bundesweite Untersuchung auch aufgrund fehlender Datenlage nicht zielführend.

Anhand der statistischen Daten können keine auf den Untersuchungsgegenstand Gewerbeabfälle bezogenen bundesweiten Informationen zur Zusammensetzung und den aus Gewerbeabfällen erzeugten Sekundärrohstoffen generiert werden. Ebenso fehlen notwendige Informationen zur Qualität der Sekundärrohstoffe. Aus diesem Grund ist geplant, 4 Anlagenbilanzierungen beispielhaft durchzuführen, anhand derer (ohne Anspruch auf Repräsentativität) Daten zur Zusammensetzung, zur Stoffstromverteilung bei der Sortierung und zur Qualität der Sekundärrohstoffe nach der Sortierung ermittelt werden. Bislang konnten, unterstützt von Mitgliedern des Fachbeirates, drei Anlagenbetreiber gewonnen werden, die zur kostenlosen Mitwirkung bereit sind; die Anlagen befinden sich in Thüringen, Baden-Württemberg und Hamburg. Nach Auskunft des RP Köln werden in seinem Gebiet keine Gewerbeabfälle sortiert, in den dortigen Sortieranlagen erfolgt - wenn überhaupt - nur eine Aufbereitung zu Brennstoffen. Regionale Besonderheiten (z. B. Entsorgungspreis und dessen Auswirkungen auf das Trennverhalten und damit auf die Zusammensetzung) können auch aufgrund der beschränkten Mittel nur bedingt berücksichtigt werden. Es wurde darauf hingewiesen, dass die Anlagenbetreiber auf freiwilliger Basis und kostenfrei ihre Sortieranlagen und die generierten Informationen für die Untersuchung zur Verfügung stellen. Mit Hilfe der Anlagenbilanzierung wird die stoffliche Qualität der erzeugten Sortierfraktionen ermittelt. Der Untersuchungsumfang beinhaltet keine Bestimmung der Heizwerte und der fossilen Kohlenstoffgehalte. Heizwerte werden auf rechnerischem Weg ermittelt. Durch Containerdienste sowie den Umschlag von Abfällen können werthaltige Fraktionen bereits vor der eigentlichen Sortierung die Entsorgungskette verlassen. Dieser Aspekt, der alle nachgeschalteten Entsorgungswege betrifft, ist weder statistisch erfassbar, noch können die Anlagenbetreiber diese Fraktionen quantitativ bewerten. Bei den o.g. Untersuchungen wird geprüft, ob es sich um beraubte Anlieferungen handelt.

Hinsichtlich der Aufbereitung von MVA-Schlacke sind auch neue Verfahren einzubeziehen; die Verwertung der Schlacke ist ebenfalls in der ökobilanziellen Betrachtung zu berücksichtigen.

Holz, welches infolge des Papierrecyclings nicht für die Papierherstellung eingesetzt werden muss, wird im Rahmen der ökobilanziellen Betrachtung ebenfalls berücksichtigt. Zwei Ansätze sind möglich und sollen beide berechnet werden:

das Holz verbleibt im Wald (C-Speicherung/C-Senke: Ansätze für diese Bilanzmethode sind nicht so abgesichert wie beispielsweise Klima oder Versauerung)

das Holz wird zur Energiebereitstellung genutzt (gutgeschrieben werden der europäische Strom- und Wärmemix.)

Die Emissionen der Holzverbrennung werden berücksichtigt, falls die Untersuchungen zeigen, dass hierdurch relevante Unterschiede zwischen den Szenarien verursacht werden.

Die Schonung energetischer Ressourcen wird bei den anderen zu untersuchenden Materialien durch die Ausweisung des kumulierten Energieaufwands (KEA) berücksichtigt.

Falls weitere Ressourcenfragen (z. B. Metallerze) als ergebnisrelevant eingestuft werden, werden diese halbquantitativ oder qualitativ bewertet.

Im Rahmen der ökobilanziellen Betrachtungen werden bei unklarer Datenlage oder bei Spannbreiten Sensitivitätsanalysen vorgenommen. Gleiches gilt für die Verwertung der Sekundärrohstoffe im Ausland.

Die Bewertung der stofflichen Verwertung von Mischkunststoffen (sofern diese in der Sortierung erzeugt werden) erfolgt konkret für einzelne Produkte. Untersucht wird die Substitution von Holz, Beton und Kunststoffen minderer Qualität. Zu beachten ist, dass sich insbesondere bei einem Ersatz von Holz und Beton aufgrund der längeren Haltbarkeit von Kunststoff (z. B. Holzpfahl vs. Kunststoffpfahl) Substitutionsfaktoren  $> 1$  ergeben können. Der Aspekt der Haltbarkeit wird im Rahmen einer Sensitivitätsbetrachtung berücksichtigt.

Die ökobilanziellen Betrachtungen fokussieren auf die wesentlichen Umweltauswirkungen (Versauerung, Eutrophierung, KEA (fossil und gesamt), Treibhauseffekt). Sind weitere Kriterien (z. B. Hg-Emissionen) in die Betrachtung mit einzubeziehen, werden diese qualitativ dargestellt.

Wirtschaftliche Effekte sind nicht Gegenstand der ökobilanziellen Betrachtung. Ökonomische Einflussfaktoren werden allerdings im Rahmen der Beurteilung der Verwertungsoptionen betrachtet.

Falls die Deponierung der MBA-Reste sich als ein ergebnisrelevanter Aspekt erweist, werden die Ergebnisse hierfür mit und ohne Berücksichtigung der C-Senke ermittelt und dargestellt.

## Anhang 2: Kurzprotokoll der 2. Fachbeiratssitzung am 29.11.2013

---

Zusammenfassung der Ergebnisse der Diskussion und der Stellungnahmen der Teilnehmer:

Die Ergebnisse der Anlagenbilanzierungen wurden in zusammengefasster Form präsentiert. Eine detailliertere Darstellungsweise der Analysenergebnisse und Anlagenkonfigurationen, als die aufgezeigte, ist aus Gründen des Datenschutzes nicht möglich.

Die IST-Analyse zum Aufkommen und Verbleib der gemischten Gewerbeabfälle - Abfallschlüssel 20030102 und 15010600 bildet im Rahmen der ökobilanziellen Betrachtung der Entsorgung dieser Abfälle die Basisvariante. In der Basisvariante werden die Stoffströme über alle Entsorgungswege bilanziert. Insofern erfolgt auch die Mitbetrachtung der Verbrennung, der Schlackennutzung und des Recyclings der Metalle aus der Schlackenaufbereitung.

Für die Beantwortung der Frage, welcher Entsorgungsweg (stofflich/energetisch) der aus ökologischer Sicht hochwertigste und am besten geeignetste für die Entsorgung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle darstellt, werden auf der Grundlage von Erfahrungen aus der Planung und dem Bau von Sortieranlagen, aus Anlagenbilanzen sowie der BREF-Dokumentation für Anlagen zur Behandlung von Gewerbeabfall zwei weitere Varianten untersucht (Variante 1: Vorbehandlungspflicht, Variante 2: Vorbehandlungspflicht und gesteigerte Ausbeute).

Der Anstieg der aussortierten Metall-Bruttomengen - ausgehend von der Basisvariante bis hin zu Variante 2 (Vorbehandlungspflicht und technische Optimierung) - ist auf einen erhöhten Störstoffanteil im Gesamtstoffstrom der Metalle zurückzuführen. Dies ist im Wesentlichen ein Resultat der Vorbehandlungspflicht für die Gesamtmenge der gemischten Gewerbeabfälle.

Teil Ökobilanz:

Überarbeitung der Annahmen der gemittelten Transportentfernungen entsprechend der Kommentare und Rückmeldungen aus dem Fachbeirat.

Angenommener Einsatzort der Rezyklate ist Deutschland.

Berechnung einer weiteren Sensitivität zum Strommix, bei der als Gutschrift für die Strombereitstellung ein fossiler Mix auf der Grundlage aktueller UBA-Werte gerechnet wird.

In einer weiteren Sensitivität wird der Einfluss einer anderen Zusammensetzung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle auf das Bilanzergebnis geprüft.

### Anhang 3: Kurzprotokoll des abschließenden Fachgespräches am 01.04.2014

---

Zusammenfassung der Ergebnisse der Diskussion und der Stellungnahmen der Teilnehmer:

Der ITAD und VKU bemängeln, dass eine Variante „optimierte MVA“ nicht betrachtet wurde. Die Entsorgung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle ausschließlich in einer MVA stand jedoch nie im Focus des Forschungsvorhabens, sondern vielmehr, ob, und wenn ja, welcher Nutzen mit einem intensivierenden Recycling (stoffliche Verwertung) einhergeht und mit welchen Maßnahmen und Instrumenten dieses Potential zur Umweltentlastung aktiviert werden kann.

Auf Anregung der Teilnehmer der 2. Fachbeiratssitzung wurden bei der ökobilanziellen Betrachtung

- ▶ die Transportentfernungen zu Papierfabriken von 500 km auf 200 km reduziert,
- ▶ Sensitivitäten zum Strommix bzgl. des fossilen Anteils auf Grundlage aktueller UBA- und BMUB- Werte sowie
- ▶ Sensitivitäten zur Abfallzusammensetzung bzgl. des Anteils der enthaltenen Wertstoffe (+/- 25 % gegenüber Standardbilanz) neu gerechnet und
- ▶ eine halbquantitative Betrachtung zu Quecksilberemissionen durchgeführt.

Bei der ökobilanziellen Betrachtung im Rahmen des Forschungsvorhabens geht um die Bewertung des ökologischen Nutzens hinsichtlich einer Steigerung der gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz vorrangigen stofflichen Verwertung (Recycling) für die betrachteten Szenarien (Basisvariante: jetzige Situation; Variante 1: Vorbehandlungspflicht, Variante 2: Vorbehandlungspflicht & gesteigerte Ausbeute) und nicht um einen Verfahrensvergleich unterschiedlicher Entsorgungsmöglichkeiten (Sortierung, MBA, MVA).

Das Ökoinstitut präsentierte den Einfluss der Änderung der Transportentfernungen auf die Ergebnisse der Standardbilanz für GWP. Im Ergebnis hat die Änderung der Transportentfernung keinen Einfluss auf Grundaussagen zum THG-Entlastungspotenzial (Basis < V1 < V2).

Mit Hilfe der neu gerechneten Sensitivitäten bzgl. des zugrunde gelegten Strommixes und des geänderten Wertstoffanteils (+/- 25 % gegenüber Standardbilanz) konnte das Ökoinstitut die Robustheit des Ökobilanzergebnisses abermals bestätigen. Die beste Sensitivität der Variante 1 ist schlechter als die schlechteste Sensitivität der Variante 2.

ITAD und VKU bemängeln, dass die Modellbildung auf Durchschnittswerte für MVA in Deutschland abstellt und nicht hochwertigere Lösungen, wie z.B. in der MVA Amsterdam realisiert, unterstellt. Andere Teilnehmer des Fachbeirates geben zu bedenken, dass investitionsbedürftige Optimierungen der MVA-Technik vor dem Hintergrund der bestehenden Überkapazitäten sich in Deutschland nicht aufdrängen, in den letzten Jahren sei in der Praxis eher ein Entwicklungsstillstand zu verzeichnen. Zudem wurde der Einfluss der Energieeffizienz separat analysiert.

Für die Betrachtung der Hg-Emissionen wurden die zur Verfügung gestellten Daten der Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e.V. und des Vereins Deutscher Zementwerke zugrunde gelegt.

Ob bei der Sortierung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle Hg freigesetzt wird, konnte in Ermangelung entsprechender Daten nicht berücksichtigt werden; Grenzwerte für die Abluft aus Sortieranlagen existieren nur für Staub, nicht aber für Hg.

Bei der Entwicklung der Untersuchungsvarianten für eine hochwertige Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle wurden wirtschaftliche Fragen zunächst ausgeblendet. Wirtschaftliche Effekte sind im Bericht, Kapitel 13, dargestellt.

u.e.c. Berlin präsentierte im zweiten Teil der Sitzung Ziele, Maßnahmen und Instrumente für eine hochwertige Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle.

Die Forschungsnehmer schlagen die Implementierung einer Vorbehandlungs-/ Sortierpflicht in der Novelle der Gewerbeabfallverordnung vor. Für das Erreichen des Ziels einer hochwertigen Verwertung konnten folgende Teilinstrumente identifiziert werden:

qualitative Quotierung,

zeitlich differenzierte massenbezogene Quoten und

massenbezogene selbstlernende Quoten.

Die Festlegung eines technischen Mindeststandards für die Sortierung ist als alleiniges Instrument nicht geeignet.

Fiskalische Instrumente (Mehrwertsteuersatz, Stromsteuervergünstigungen, Fördermaßnahmen, CO<sub>2</sub>-Emissionshandel) wirken allenfalls unterstützend.

Getrennte Erfassung / Bildung von Gemischen

Die innerbetriebliche getrennte Erfassung von Wertstoffen ist zu intensivieren und hat Vorrang vor der Bildung von Gemischen. In Zusammenhang mit der Einführung einer Vorbehandlungspflicht erwarten die Forschungsnehmer eine Kostensteigerung, die sich positiv auf eine Getrennthaltung auswirken kann.

Der Fachbeirat regt im Kontext mit der Novelle der Gewerbeabfallverordnung an zu prüfen, ob, vergleichbar zu Haushalten, nicht auch Betriebe zur Vorhaltung und Nutzung von Systemen zur getrennten Erfassung verpflichtet werden können.

Da voraussichtlich weiterhin Gemische anfallen, sollte die bisher schon geforderte Getrennthaltung von Bioabfällen beibehalten werden. Andere Anforderungen an die Gemische sind aus Sicht der Forschungsnehmer nicht erforderlich.

Vorbehandlungspflicht / Stand der Technik

Der Fachbeirat teilt mehrheitlich die Auffassung, dass günstige Verbrennungspreise zum einen der getrennten Erfassung und zum anderen dem Recycling von Wertstoffen, die in Gemischen enthalten sind, entgegenstehen. Die Entsorgung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen in MVA ohne Vorbehandlung der Abfälle sollten daher grundsätzlich unterbunden werden, auch das derzeit noch zulässige Gemisch zur energetischen Verwertung ist bei einer Novelle zu streichen.

→ Ziel einer künftigen Regelung ist neben der getrennten Erfassung eine verpflichtende Sortierung von gemischten gewerblichen Siedlungsabfällen mit hohem technischen Standard als zwingende Vorgabe ohne Escape-Klauseln.

Festlegung von Quoten

Bei einer auf den Gesamtmassenstrom bezogenen Verwertungsquote besteht die Gefahr des Missbrauchs. Um Manipulationen bei der Quotierung auszuschließen, ist der „Mitverarbeitung“ von

Monofractionen durch gesetzliche Regelungen vorzubeugen. Alternativ ist auf stoffstrombezogene Quoten abzustellen.

→ Einführung stoffstrombezogener, definierter Quoten

Um den Kontrollaufwand zu minimieren, kann ggf. auf Quoten für Metalle verzichtet werden.

Im Falle von Quotierungen für „brennbare Abfälle“ sind zweifelsfreie Anforderungen zur Unterscheidung verschiedener Qualitäten zu definieren. Eine Möglichkeit wäre es, auf Definitionen der Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e.V. zurückzugreifen.

Zudem ist ein System zu schaffen, dass mit wenig Verwaltungsaufwand verbunden ist und dennoch die Stoffstromtransparenz erhöht.

In der Diskussion angesprochene Sanktionen für Sortierbetriebe bei Nichteinhaltung der Quoten stellen kein unmittelbares Instrument mit stoffstromlenkender Wirkung dar. Ob und in welchem Umfang Sanktionen festzulegen sind, liegt im Ermessen des Gesetzgebers; eine Thematisierung erfolgte im Rahmen des Forschungsprojektes daher nicht.

Die im Bericht erläuterten Quoten beziehen sich wie derzeit in der Abfallwirtschaft üblich auf den Output der Sortierung. Andere Ansätze, z.B. Quoten zum Einsatz von aussortierten Stoffströmen (Beispiel: Quote zum Einsatz von Recyclaten), sind denkbar, beziehen sich dann aber auch auf andere Sekundärkunststoffe und wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes daher nicht mitbetrachtet. Ein laufendes UFOPLAN-Projekt zur „Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen - mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe“ greift diesen Aspekt auf.

Pro und Contra der Quotenvorgaben (Lenkungswirkung erfordert erheblichen Kontrollaufwand) wurden andiskutiert.

Marktkraft

Mitglieder des Fachbeirates vertreten die Auffassung, dass die Marktkräfte zur Steigerung des Recyclings ausreichen würden, sofern gleiche Bedingungen gegeben seien. Eben dies sei derzeit im Falle der MVA-Preise erkennbar nicht gegeben → Um dem entgegenzuwirken, wird eine Verbrennungsabgabe, ein Abbau von MVA-Kapazitäten oder/und zunehmende Müllimporte angeregt.

Die Rahmenbedingungen für eine Stoffstromlenkung in Richtung Recycling sind grundsätzlich vom Gesetzgeber vorzugeben, die Aufrechterhaltung dieses Rahmen muss jedoch über die Kraft des Marktes gewährleistet sein.

Es ist durchaus vorstellbar, dass ein absehbarer Anstieg der Entsorgungspreise für die Sortierung von Gemischen dazu führen, dass die Erzeuger (Betriebe) die getrennte Erfassung bereits am Anfallort intensivieren.

Zusammensetzung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle

ITAD und VKU bemängeln, dass es keine bundesweite Gewerbeabfalluntersuchung mit repräsentativen Daten für die Bundesrepublik gibt. Die Forschungsnehmer weisen darauf hin, dass, wie auch bei anderen Stoffströmen (z.B. Hausmüll) üblich, die verfügbaren Literaturdaten und die durchgeführten Anlagenbilanzierungen der Untersuchung zugrunde liegen. Damit liegen erstmals überhaupt Informationen zur Zusammensetzung, zur Stoffstromverteilung bei der Sortierung und zur Qualität der Sekundärrohstoffe nach der Sortierung vor. Zudem wurde im Rahmen der ökobilanzi-

ellen Betrachtung auch eine Sensitivität mit einer veränderten Abfallzusammensetzung (+25% und -25% generierte Wertstoffe) gerechnet; auch diese Sensitivität lieferte ein konsistentes Ergebnis.

#### Pflichttonne

Neben der vorrangigen getrennten Erfassung und der Erzeugung eines sortierfähigen Gemisches existiert in Form der kommunalen „Pflichttonne“ eine dritte Senke für die in Gewerbebetrieben anfallenden Abfälle.

Die über die Pflichttonne entsorgten Abfallmengen sind nicht bekannt, da sie gemeinsam mit Hausmüll über die öffentliche Müllabfuhr eingesammelt werden.

Bei der Novellierung der Gewerbeabfallverordnung ist mindestens darauf zu achten, dass die Pflichttonne nicht unbeabsichtigt zur Umgehung der Anforderungen an die getrennte Erfassung und die vorzubehandelnden Gemische genutzt wird. Herr Dr. Jung regt an, die Notwendigkeit und Rolle der Pflichttonne zu überdenken, da deren Inhalt größtenteils in die MVA gelangt und somit kein Recycling der Wertstoffe ermöglicht wird.

Der VKU vertritt die Auffassung, dass in Betrieben weiterhin Abfälle zur Beseitigung entstehen, die dem öRE anzudienen seien – unabhängig davon, dass diese dann insbesondere energetisch verwertet würden.

Es wurde seitens der Forschungsgeber ebenfalls wiederholt darauf hingewiesen, dass der Untersuchungsraum die Bundesrepublik Deutschland umfasst. Recyclingmethoden oder Aufbereitungsverfahren, die außerhalb Deutschlands zum Einsatz kommen sind nicht Bestandteil der ökologischen Betrachtung.

## Anhang 4: Abfallentsorgung 2010 [STBA 2012a] und daraus resultierende Neuberechnung des AS 20030102

	Abfallent- sorgungsan- lagen Anzahl	Input in deut- sche Ab- fallentsor- gungsanlagen 1.000 Mg	aus Produktion im gleichen Be- trieb entstan- ene Abfälle 1.000 Mg	angeliefert aus dem In- land 1.000 Mg	angeliefert aus dem Ausland 1.000 Mg
<b>AS 20030100 nicht differenziert</b>					
insgesamt	163	4.533,6*	15,9	4.341,7*	175,9
Deponien	6	18,9		18,9	
Thermische Abfallbe- handlungsanlagen	26	2.882,8	0,5	2.706,4	175,9
Biologische Behand- lungsanlagen	4	74,2		74,2	
MBA	8	274,3	6,8	267,5	
Shredderanlagen	7	43,1	8,5	34,7	
Sortieranlagen	85	589,4		589,4	
sonstige Anlagen	18	623,3	0,1	623,2	
Bauschuttzubereitungs- anlagen	6	17,5		17,5	
<b>AS 20030101 Hausmüll</b>					
insgesamt	109	11.154,1	51,8	11.058,6	43,8
<b>AS 20030102 Gewerbeabfall</b>					
insgesamt	359	2.582,5*	14,5	2.556,0*	12,0
Deponien	4	0,6	0,3	0,2	
Thermische Abfallbe- handlungsanlagen	51	1.261,7	11,0	1.238,9	11,9
Feuerungsanlagen	4	65,1	0,1	65,0	
MBA	33	218,6	2,8	215,9	
Shredderanlagen	4	10,7		10,7	
Sortieranlagen	257	998,0	0,3	997,6	0,1
sonstige Anlagen	5	23,1		23,1	

	Abfallent- sor- gungsan- lagen Anzahl	Input in deut- sche Ab- fallentsor- gungsanlagen 1.000 Mg	aus Produktion im gleichen Be- trieb entstande- ne Abfälle 1.000 Mg	angeliefert aus dem In- land 1.000 Mg	angeliefert aus dem Ausland 1.000 Mg
--	---	---	---	--	---

AS 200399 Siedlungsabfälle a.n.g.

insgesamt	32	83,9*		81,7*	2,2
Deponien	3	0,4		0,4	
Thermische Abfallbe- handlungsanlagen	14	71,3		69,1	2,2
MBA	3	0,3		0,3	
Sortieranlagen	9	11,3		11,3	

Abweichungen bei der Summenbildung sind auf Rundungsungenauigkeiten zurückzuführen.

\* Aus Datenschutzgründen keine genauere Aufteilung bei der Entsorgung

\*\* siehe Anhang 5

	Abfallent- sor- gungsan- lagen	Input in deut- sche Ab- fallentsor- gungsanlagen	aus Produktion im gleichen Be- trieb entstan- dene Abfälle	angeliefert aus dem In- land	angeliefert aus dem Ausland
	Anzahl	1.000 Mg	1.000 Mg	1.000 Mg	1.000 Mg

Neuberechnung AS 20030102 Gewerbeabfall

Für die Berechnung des Mengenaufkommens für die hausmüllähnlichen Gewerbeabfälle (getrennt vom Hausmüll angeliefert oder eingesammelt) werden die Mengen der undifferenzierten Abfallschlüssel AS 20030100 und AS 200399 summiert und in dem Verhältnis der AS 20030101 und 20030102 zueinander aufgeteilt. Die so erhaltene Abfallmenge (AS 2003 undifferenziert) wird der Abfallmenge 20030102 zuge-  
rechnet

Summe AS 20030100 nicht differenziert und AS 200399 Siedlungsabfälle a.n.g.

Insgesamt		4.617,5*	15,9	4.423,4*	178,1
Deponien		19,3		19,3	
Thermische Abfallbe- handlungsanlagen		2.954,1	0,5	2.775,5	178,1
Feuerungsanlagen					
Biologische Behand- lungsanlagen		74,2		74,2	
MBA		274,6	6,8	267,8	
Shredderanlagen		43,1	8,5	34,7	
Sortieranlagen		600,7		600,7	
sonstige Anlagen		623,3	0,1	623,2	
Bauschuttzubereitungs- anlagen		17,5			

Verhältnisses von AS 20030101  
Hausmüll und AS 20030102 Gewer-  
beabfall:

11.110.400 Mg (11.058.600 Mg + 51.800 Mg) zu  
2.570.500 Mg (2.556.000 Mg + 14.500 Mg)

→

81,2 Ma.-% zu 18,8 Ma.-%

	Abfallent- sorgungs- anlagen Anzahl	Input in deut- sche Ab- fallentsor- gungsanlagen 1.000 Mg	aus Produktion im gleichen Be- trieb entstan- dene Abfälle 1.000 Mg	angeliefert aus dem In- land 1.000 Mg	angeliefert aus dem Ausland 1.000 Mg
<b>AS 20030102 Gewerbeabfall Neuberechnet</b>					
insgesamt	529**	3.450,1*	17,5	3.387,1*	45,5
Deponien	13	4,2	0,3	3,8	0,0
Thermische Abfallbe- handlungsanlagen	71	1.816,7	11,1	1.760,4	45,4
Feuerungsanlagen	4	65,1	0,1	65,0	0,0
Biologische Behand- lungsanlagen	4	13,9	0,0	13,9	0,0
MBA	46	270,2	4,1	266,2	0,0
Shredderanlagen	11	18,8	1,6	17,2	0,0
Sortieranlagen	351	1.110,9	0,3	1.110,5	0,1
sonstige Anlagen	23	140,2	0,0	140,2	0,0
Bauschuttzubereitungs- anlagen	6	3,3	0,0	0,0	0,0

Abweichungen bei der Summenbildung sind auf Rundungsungenauigkeiten zurückzuführen.

\* Aus Datenschutzgründen keine Aufteilung bei der Entsorgung

\*\* siehe Anhang 5

Anhang 5: Neuberechnung der Anlagenanzahl 2010

	Abfallentsorgungsanlagen						
	AS 20030100	AS 20030101	AS 20030102	Maximum aus AS 20030101 und 20030102	AS 200399	berechnete Summe	korrigierte Anlagenanzahl
	(a)	(b1)	(b2)	(b)	(c)	(a)+(b)+(c)	
insgesamt	160	103	358	370	29	559	529
Deponien	6		4	4	3	13	13
Thermische Abfallbehandlungsanlagen	26	56	51	56	14	96	71*
Feuerungsanlagen			4	4		4	4
Biologische Behandlungsanlagen	4		0	0		4	4
MBA	8	40	33	40	3	51	46*
Shredderanlagen	7		4	4		11	11
Sortieranlagen	85	7	257	257	9	351	351
sonstige Anlagen	18		5	5		23	23
Bauschuttzubereitungsanlagen	6			0		6	6

\* Für mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlagen und thermische Behandlungsanlagen wird die tatsächliche Anlagenanzahl in Deutschland im Jahr 2010 gewählt.

Anhang 6: Übersicht über die eingesetzte Anlagentechnik der untersuchten Sortieranlagen

	Sortieranlage			
	A	B	C	D
Vorzerkleinerung	x	x	x	x
Klassierung	x	x	x	x
Fe-Metallabscheider	x	x	x	x
NE-Metallabscheider	x	x		x
Windsichter	x	x	x	x
verschiedene NIR-Trenner	x	x	x	x
manuelle Sortierung von z.B. NE-Metallen, Folien, PPK, Holz	x	x	x	x
Nachzerkleinerung				x

Anhang 7: Theoretisches Wertstoffpotential der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle für ökobilanziellen Betrachtung im Jahr 2010

	Mittlere Zusammensetzung (n=4) Ma.-%	Menge 2010 für n=4 Mg/a
PPK	23,3%	1.348.100
Glas	1,5%	88.500
Kunststoffe	23,9%	1.385.300
Metalle	5,2%	299.400
Holz	8,6%	498.900
Textilien	9,6%	556.200
Verbunde	5,6%	325.300
Organik	6,9%	401.800
Inertes	3,8%	221.600
Problemabfall	0,0%	1.100
sonst. Stoffe	3,8%	222.300
Feinfraktion < 40 mm	7,6%	437.400
Summe	100%	5.785.900

**Anhang 8: Verteilung der gemischten gewerblichen Siedlungsabfälle (AS 20030102) und der Verpackungsgemische (AS 15010600) auf die Entsorgungsanlagen in den Jahren 2007 bis 2010 [STBA 2007-2010]**

	2007	2008	2009	2010
	1000 Mg	1000 Mg	1000 Mg	1000 Mg
<b>gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle (AS 20030102)</b>				
Sortieranlagen	1.343,5	1.266,1	1.111,5	1.110,9
Feuerungsanlagen	0,0	0,0	3,0	65,1
Thermische Anlagen	2.555,1	1.993,7	1.824,8	1.816,7
MBA	334,0	305,6	279,1	270,2
sonstige Anlagen	53,8	41,7	270,5	140,2
Summe andere Anlagen	44,6	36,4	42,3	40,3
<b>Verpackungsgemische (AS 15010600)</b>				
Sortieranlagen	1.426,9	1606,5	1.452,9	1.501,2
Feuerungsanlagen	93,2	89,7	105,7	147,5
Thermische Anlagen	353,6	425,0	524,5	576,2
MBA	23,7	32,1	40,9	41,3
sonstige Anlagen	149,4	90,3	111,9	116,6
Summe andere Anlagen	31,7	26,4	12,3	9,7
<b>Summe gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle (AS 20030102) und Verpackungsgemische (AS 15010600)</b>				
Sortieranlagen	2.770,4	2.872,6	2.564,4	2.612,1
Feuerungsanlagen	93,2	89,7	108,7	212,6
Thermische Anlagen	2908,7	2418,7	2349,3	2.392,9
MBA	357,7	337,7	320,0	311,5
sonstige Anlagen	203,2	132,0	382,4	256,8
Summe andere Anlagen*	76,3	62,8	54,6	50,0
* Abfallmenge bleibt im Rahmen dieser Untersuchung unberücksichtigt				

## Anhang 9: Branchenspezifische Zusammensetzung von Gewerbeabfällen [Helftewes 2013]

Fraktionen	Gastro- nomie	Gesund- heit	Lebens- mittel	Handwerk	Verwal- tung	Bran- chenmittel
	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%
Metall	6,1	3,5	1,4	3,9	5,1	4,0
PPK	31,4	22,1	25,8	11,3	26,1	23,3
Kunststoffe	19,9	14,6	22,9	23,0	20,3	20,1
Verbunde	6,9	6,8	4,2	3,2	5,6	5,3
Holz	0,4	1,0	1,1	3,2	5,1	2,3
Textilien	5,0	2,8	1,9	3,3	1,4	2,9
Organik	15,0	20,0	16,1	2,9	7,4	12,3
Steine/Glas	5,6	1,9	5,2	16,7	14,8	8,8
Sonstiges	2,1	18,8	1,7	2,0	5,3	6,0
Feinfraktion < 40 mm	7,6	8,5	19,6	30,5	8,9	15,0
Summe	100,0	100,0	99,9	100,0	100,0	100,0

Anhang 10: Zusammensetzung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle (Ergebnis der Anlagenbilanzierungen + eine weitere Analyse) (Angaben in Ma.-%)

Fraktionen	Analyse 1	Analyse 2	Analyse 3	Analyse 4	Analyse 5
	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%	Ma.-%
PPK	41,6%	7,6%	15,3%	28,7%	36,8%
Glas	1,5%	0,3%	1,8%	2,5%	1,6%
Kunststoffe	22,3%	25,4%	28,7%	19,3%	17,5%
Metalle	2,1%	8,7%	4,8%	5,0%	1,8%
Holz	4,6%	12,2%	5,9%	11,8%	5,3%
Textilien	2,5%	27,9%	4,6%	3,6%	3,5%
Verbunde	3,5%	4,7%	9,4%	4,9%	3,3%
Organik	12,8%	0,1%	9,7%	5,1%	20,2%
Inertes	1,4%	2,7%	8,0%	3,2%	0,6%
Problemabfall	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%
sonst. Stoffe	1,3%	3,9%	1,8%	8,4%	2,2%
Feinfraktion < 40 mm	6,4%	6,5%	10,0%	7,4%	7,3%
Summe	100%	100%	100%	100%	100%

	Mittelwert Ma.-%	Maximum Ma.-%	Minimum Ma.-%	Median Ma.-%
PPK	26,0%	41,6%	7,6%	28,7%
Glas	1,5%	2,5%	0,3%	1,6%
Kunststoffe	22,6%	28,7%	17,5%	22,3%
Metalle	4,5%	8,7%	1,8%	4,8%
Holz	8,0%	12,2%	4,6%	5,9%
Textilien	8,4%	27,9%	2,5%	3,6%
Verbunde	5,2%	9,4%	3,3%	4,7%
Organik	9,6%	20,2%	0,1%	9,7%
Inertes	3,2%	8,0%	0,6%	2,7%
Problemabfall	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
sonst. Stoffe	3,5%	8,4%	1,3%	2,2%
Feinfraktion < 40 mm	7,5%	10,0%	6,4%	7,3%

## Anhang 11: Input in die Sortieranlagen 2010 [STBA 2012a]

Abfallfraktion	Input in alle Sortieranlagen
	1.000 Mg
Metalle	989,6
PPK	7.466,5
Glas	2.233,7
Kunststoffe	365,6
Organik	328,3
Holz	649,7
Textilien	115,5
Mineralstoffe	1.188,7
andere Abfallarten	1.074,6
sonstige Abfälle (AS 191212)	3.356,3
LVP	2.250,1
Sperrmüll	1.064,0
Hausmüll	615,6
gemischte Bau- und Abbruchabfälle	2.018,8
Summe	23.717,0
Summe gemäß [STBA 2012a]	24.058,6
Bilanzlücke <sup>54</sup>	1,4 %

<sup>54</sup> Aus datenschutzrechtlichen Gründen werden die Abfallmengen nicht vollständig abfallschlüsselscharf veröffentlicht. Daraus ergeben sich Bilanzlücken zwischen der Aufsummierung der Einzelfraktionen und der veröffentlichten Gesamtsumme.

Anhang 12: Output der Sortieranlagen 2010 [STBA 2012a]

Abfallfraktion	Output aller Sortieranlagen 1.000 Mg
Metalle	1.678
PPK	7.687
Glas	2.161
Kunststoffe	1.615
Organik	248
Holz	1.681
Textilien	37
Mineralstoffe	1.971
„brennbare Abfälle“	5.934
andere Abfallarten	328
Summe	23.340
Summe gemäß [STBA 2012a]	23.815
Bilanzlücke <sup>55</sup>	2%

<sup>55</sup> siehe Fußnote 54

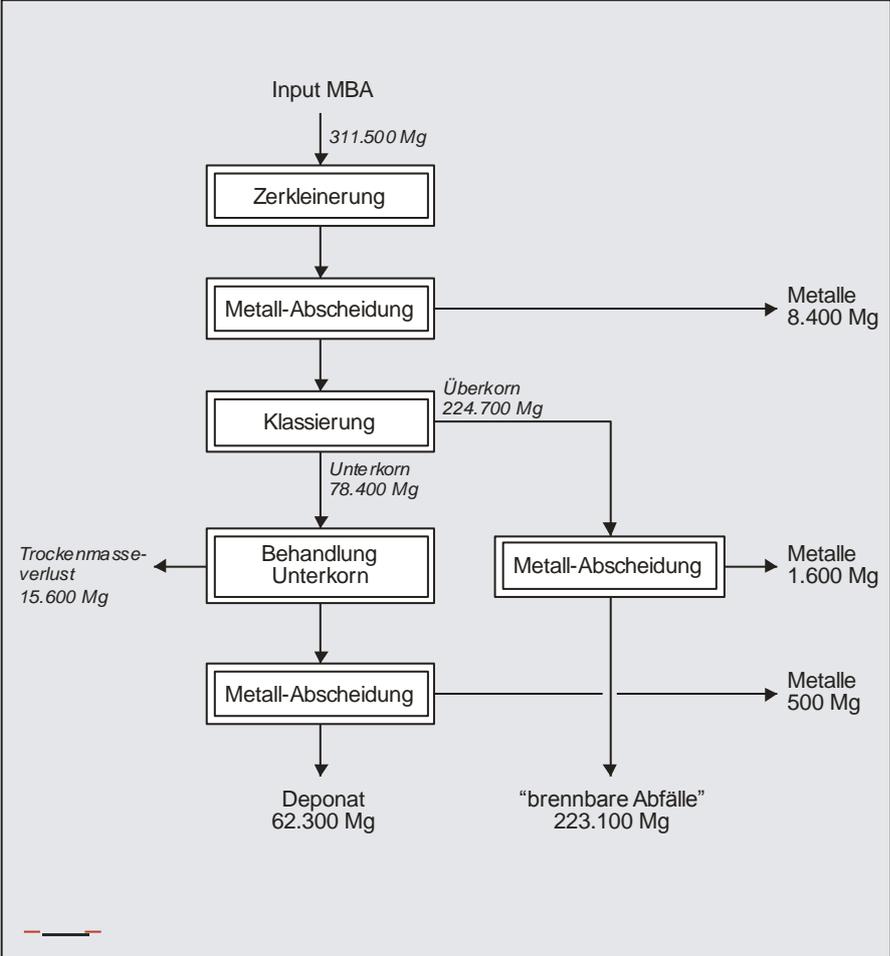
Anhang 13: Geschätzter Output verschiedener „Mono-Sortieranlagen“ 2010

Abfallfraktion	Output PPK-Sortieranlagen	Output Altglassortieranlage	Output LVP-Sortieranlage	Output Metallaufbereitungsanlage	Output mineralische Aufbereitungsanlage	Output Aufbereitung gemischter Bau- und Abbruchabfälle	Output Sperrmüllaufbereitung	Summe Output
	1.000 Mg	1.000 Mg	1.000 Mg	1.000 Mg	1.000 Mg	1.000 Mg	1.000 Mg	1.000 Mg
Fe-Metalle		10	259	850	78	100	50	1.418
NE-Metalle		5	64		2			
PPK	7.000		216			50	15	7.281
Altglas		1.950						1.950
Kunststoffe		5	1.005			40	10	1.060
Holz					10	550	270	830
mineralische Fraktionen					1.085	520		1.605
„brennbare Abfälle“	370	30	726	150	25	740	720	2.761
Summe	7.370	2.000	2.270	1.000	1.200	2.000	1.065	16.905

## Anhang 14: Bereinigter Output der Sortieranlagen 2010

Abfallfraktion	Output aller Sortieranlagen (Anhang 12)	Summe Output Monoanlagen (u.a. siehe Anhang 13)	bereinigter Output Sortieranlagen für gemischte Abfälle
	1.000 Mg	1.000 Mg	1.000 Mg
Metalle	1.678	1.418	260
PPK	7.687	7.281	406
Glas	2.161	1.950	211
Kunststoffe	1.615	1.060	555
Organik	248	248	0
Holz	1.681	830	851
Textilien	37		37
Mineralstoffe	1.971	1.605	366
„brennbare Abfälle“	5.934	2.761	3.173
andere Abfallarten	328		328
Summe	23.340	17.153	6.187

Anhang 15: Vereinfachter Verfahrensablauf einer MBA



**Anhang 16: Herleitung der Outputstoffströme der MVA**

	<b>1.000 Mg</b>	<b>Ma.-% vom Input</b>
Input gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle	2.392,9	
Rohschlacke	598	25
Fe-Metalle in der Rohschlacke	78	3,3
Fe-Metalle bei einem Abscheidegrad von 90 %	70,5	2,9
NE-Metalle in der Rohschlacke	34	1,4
NE-Metalle bei einem Abscheidegrad von 30 %	10,2	0,4
aufbereitete Schlacke	517,6	21,6

**Anhang 17: Herleitung der Outputstoffströme der EBS-Rostfeuerungsanlagen**

	<b>1.000 Mg</b>	<b>Ma.-% vom Input</b>
Input gemischte gewerbliche Siedlungsabfälle	213	
Rohschlacke	53,2	25
Fe-Metalle in der Rohschlacke	7,0	3,3
Fe-Metalle bei einem Abscheidegrad von 90 %	6,3	2,9
NE-Metalle in der Rohschlacke	3,0	1,4
NE-Metalle bei einem Abscheidegrad von 30 %	0,9	0,4
aufbereitete Schlacke	46,0	21,6

Anhang 18: Feste Outputströme der Erstbehandlungsanlagen (Basisvariante)

		Sortier- anlagen	EBS-Anlagen	MBA- Anlagen	MVA- Anlagen	Feuerungs- anlagen	Summe	Verbleib
		Fehler! Verweis- quelle konnte nicht ge- funden werden.	Fehler! Ver- weisquelle konnte nicht gefunden werden.	Fehler! Ver- weisquelle konnte nicht gefunden werden.	Fehler! Ver- weisquelle konnte nicht gefunden werden.	Fehler! Ver- weisquelle konnte nicht gefunden werden.		
		1.000 Mg						
Input		2.612,1	256,8	311,5	2.392,9	212,6	5.785,9**	
fester Output der Erstbehandlung	Fe-Metalle*	86,92	8,55	9,45	70,5	6,3	181,72	werkstoffliche Verwertung
	NE-Metalle*	15,14	1,49	1,05	10,2	0,9	28,78	
	Kunststoffe*	65,23					65,23	
	PPK*	127,85					127,85	
	Holz*	84,15	8,27				92,42	energetische Verwertung
	„brennbare Abfä- le“	2.178,38	233,16	223,12			2.634,66	
	aufbereitete Schlacke*				517,6	46,0	563,6	werkstoffliche Verwertung
	Mineralik*	54,42	5,35				59,77	

Deponat		62,30		62,3	Deponie
---------	--	-------	--	------	---------

\* incl. Störstoffe

\*\* Input in andere Anlagen: 50.000 Mg/a bleibt unberücksichtigt (siehe Anhang 8)

Anhang 19: Feste Outputströme der Sortieranlagen (Variante 1)

	Sortier- anlagen	EBS-Anlagen	MBA- Anlagen	MVA- Anlagen	Feuerungs- anlagen	Summe	Verbleib
1.000 Mg							
Input	5.785,9	0	0	0	0	5.785,9	
Fe-Metalle*	192,53	0	0	0	0	192,53	werkstoffliche Verwertung
NE-Metalle*	33,53	0	0	0	0	33,53	
Kunststoffe*	144,49	0	0	0	0	144,49	
PPK*	283,19	0	0	0	0	283,19	
Holz*	186,39	0	0	0	0	186,39	energetische Ver- wertung
„brennbare Abfälle“	4.825,26	0	0	0	0	4.825,26	
Mineralik*	120,54	0	0	0	0	120,54	werkstoffliche Verwertung

\* incl. Störstoffe

Anhang 20: Aufteilung des Inputs auf die Outputfraktionen der Modellanlage im Ergebnis des Rechenmodells zur Stoffstrommodellierung (Daten zum Sankey-Diagramm)

Outputfraktion	Ma.-%
EBS < 40 mm	14,97%
EBS 40-250 mm Leichtfraktion	9,24%
EBS 40-250 mm Schwerfraktion	18,30%
EBS >250 mm	16,14%
Fe-Metalle (händisch aussortiert)	0,51%
Fe-Abscheidung < 40 mm	1,24%
Fe-Abscheidung Schwerfraktion	2,46%
Fe-Abscheidung > 250 mm	0,23%
Aluminium (händisch aussortiert)	0,08%
sonstige NE-Metalle (händisch aussortiert)	0,05%
Metallverbunde (händisch aussortiert)	0,20%
NE-Abscheidung < 40 mm	0,28%
NE-Abscheidung Schwerfraktion	0,40%
Pappen, Kartonagen (händisch aussortiert)	2,80%
Druckerzeugnisse (händisch aussortiert)	1,44%
sonstige PPK 1, Deinking geeignet (händisch aussortiert)	1,59%
sonstige PPK 2, Deinking ungeeignet (händisch aussortiert)	0,68%
NIR PPK Leichtfraktion	8,39%
Folien, > DIN A4 (händisch aussortiert)	1,24%
Folien, < DIN A4 (händisch aussortiert)	0,25%
Eimer, Kanister (händisch aussortiert)	0,17%
sonstige formstabile Kunststoffe (händisch aussortiert)	0,38%
EPS („Styropor“) (händisch aussortiert)	0,15%
Schaumstoffe (händisch aussortiert)	0,44%
Umreifungsbänder (händisch aussortiert)	0,02%
sonstige Kunststoffe (händisch aussortiert)	0,14%

<b>Outputfraktion</b>	<b>Ma.-%</b>
NIR Folien Leichtfraktion	6,27%
NIR Mischkunststoffe Schwerfraktion	4,61%
naturbelassenes Holz (händisch aussortiert)	0,57%
sonstiges Holz (händisch aussortiert)	2,54%
NIR Holz Schwerfraktion	3,19%
Inertes (händisch aussortiert)	0,92%
Elektroschrott (händisch aussortiert)	0,07%
EDV-Geräte (händisch aussortiert)	0,05%

Anhang 21: Feste Outputströme der Modellanlage (Variante 2)

	Sortier- anlagen	EBS-Anlagen	MBA- Anlagen	MVA- Anlagen	Feuerungs- anlagen	Summe	Verbleib
	1.000 Mg						
Input	5.785,9	0	0	0	0	5.785,9	
Fe-Metalle*	257,28	0	0	0	0	257,28	werkstoffliche Verwertung
NE-Metalle*	47,15	0	0	0	0	47,15	
Metallverbunde, E- Schrott*	18,58					18,58	
Kunststoffe*	791,37	0	0	0	0	791,37	
PPK*	861,33	0	0	0	0	861,33	
Holz*	363,90	0	0	0	0	363,90	energetische Ver- wertung
„brennbare Abfälle“	3.393,11	0	0	0	0	3.393,11	
Mineralik*	53,20	0	0	0	0	53,20	werkstoffliche Verwertung

\* incl. Störstoffe



Anhang 22: Zusammensetzung und Heizwerte der „brennbaren Abfälle“ der Modellanlage (Variante 2)

	Einheit	EBS < 40 mm	EBS 40-250 mm Leichtfraktion	EBS 40-250 mm Schwerfraktion	EBS >250 mm	„brennbare Abfälle“ Gesamt
PPK	Ma.-%	13,0%	13,1%	2,0%	25,8%	13,1%
Glas	Ma.-%	2,0%	0,0%	6,0%	0,8%	2,6%
Kunststoffe	Ma.-%	11,8%	51,8%	10,6%	17,3%	19,2%
Metalle	Ma.-%	1,8%	0,0%	2,4%	0,4%	1,3%
Holz	Ma.-%	5,6%	4,5%	5,4%	4,8%	5,1%
Textilien	Ma.-%	3,1%	10,9%	18,3%	28,1%	16,0%
Verbunde	Ma.-%	1,8%	7,9%	13,8%	9,3%	8,6%
Organik	Ma.-%	9,3%	3,8%	21,2%	6,9%	11,5%
Inertes	Ma.-%	9,9%	0,0%	6,0%	1,4%	4,8%
Problemabfall	Ma.-%	0,0%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%
sonst. Stoffe	Ma.-%	2,4%	5,4%	11,9%	4,3%	6,3%
Feinfraktion	Ma.-%	39,2%	2,5%	2,3%	0,9%	11,4%
Summe	Ma.-%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Anteile am Output	Ma.-%	15,0%	9,2%	18,3%	16,1%	58,5%

Stoffstromorientierte Lösungsansätze für eine hochwertige Verwertung gemischter gewerblicher Siedlungsabfälle

	Einheit	EBS < 40 mm	EBS 40-250 mm Leichtfraktion	EBS 40-250 mm Schwerfraktion	EBS >250 mm	„brennbare Abfälle“ Gesamt
Heizwert	kJ/kg	10.500	23.600	11.000	16.300	14.300
Menge	Mg/a	865.900	534.900	1.058.700	933.700	3.393.200

## Anhang 23: Selektivitäten der Stofffraktionen der Modellanlage (Variante 2)

Stofffraktion	Selektivität
Metalle	84,8%
• Fe-Metalle	91,6%
• Aluminium	61,7%
• andere NE-Metalle	23,7%
• Metallverbunde	92,1%
PPK	60,9%
• Pappen und Kartonagen	72,2%
• Druckerzeugnisse	68,4%
• sonstige PPK 1, Deinking geeignet	68,4%
• sonstige PPK 1, Deinking ungeeignet	41,4%
Kunststoffe	50,1%
• <i>nur Folien</i>	65,4%
• Folien, > DIN A4	61,0%
• Folien, < DIN A4	69,8%
• <i>Eimer, Kanister und sonstige formstabile Kunststoffe</i>	47,9%
• Eimer, Kanister	54,0%
• sonstige formstabile Kunststoffe	47,6%

Stofffraktion	Selektivität
• <i>Summe andere Kunststoffe</i>	19,4%
• EPS („Styropor“)	18,0%
• Schaumstoffe	18,0%
• Umreifungsbänder	10,0%
• sonstige Kunststoffe	26,1%
Holz	63,4%
• naturbelassenes Holz	65,9%
• sonstiges Holz	62,8%

Anhang 24: Gegenüberstellung des Verbleibs des PPK-Potentials der Anlagenbilanzen 2013 und der Modellanlage

	Anlagenbilanzen 2013 Mg	Modellanlage Mg
Sorte 1.02 (B 12)	184.000	484.000
Sorte 1.04 (B 19)	46.000	162.000
Sorte 1.11 (D 39)	0	175.000
Störstoffe	17.000	82.000
"brennbare Abfälle"	1.102.000	445.000
Summe	1.348.000	1.348.000

**Anhang 25: Gegenüberstellung des Verbleibs des Kunststoff-Potentials der Anlagenbilanzen 2013 und der Modellanlage**

	Anlagenbilanzen 2013 Mg	Modellanlage Mg
PE/PP-Folie mittels NIR	74.000	532.000
Folien händisch aussortiert	35.000	86.000
Eimer händisch aussortiert	7.000	10.000
sonst. formstabile Kunststoffe händisch aussortiert	5.000	22.000
andere Kunststoffe händisch aussortiert	0	44.000
Störstoffe	35.000	38.000
"brennbare Abfälle"	1.229.000	653.000
Summe	1.385.000	1.385.000

**Anhang 26: Heizwert, Gehalt  $C_{gesamt}$  und Anteil  $C_{fossil}$**

	Heizwert (Hu) MJ/kg	$C_{gesamt}$ g/kg	$C_{fossil}$ % Anteil an $C_{gesamt}$
EBS (EBS-HKW und MVA)	15,90	375	51,0%
EBS-Schwerfraktion (EBS-HKW und MVA)	10,78	269	46,4%
SBS zur Mitverbrennung	18,96	437	57,8%

## 17 Quellenverzeichnis

- Altpapier 2000      Anonymous (2000): Liste der Europäischen Standardsorten und ihre Qualitäten
- Alwast et al. 2010      Alwast, H., Dr. Riemann, A. (2010): Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen, UBA-Texte 50/2010; Dessau
- ASA 2010      ASA GmbH (2010): MBA-Steckbriefe 2010/2011
- ASA 2012      ASA e.V. (2012): Stille Reserven Abfall – Ressourcen für die Zukunft; Ennigerloh
- Balhar 2014      Balhar, M. (2014): Ausweitung der Wertstofffassung und demografischer Wandel - Auswirkungen, Konsequenzen und Lösungsansätze für die mechanisch-biologische Abfallbehandlung, in: Wiemer, Kern, Raussen (Hrsg.): Bio- und Sekundärrohstoffverwertung IX, Witzenhausen
- Beckers et al. 2013      Beckers, R., Heidemeier, J., Hilliges, F.: Kohlekraftwerke im Fokus der Quecksilberstrategie; abgerufen im Februar 2013 unter [http://www.thru.de/fileadmin/SITE\\_MASTER/content/Dokumente/Downloads/Kohlekraftwerke\\_Hg.pdf](http://www.thru.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Dokumente/Downloads/Kohlekraftwerke_Hg.pdf)
- BGS 2014      Persönliche Informationen der Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e.V. (BGS e.V.), 2014
- BMU 2012      Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2012): Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung, Berlin
- BMU 2013      Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2012): Abfallvermeidungsprogramm des Bundes unter Beteiligung der Länder, Berlin
- BREF 2008      BDE – Bundesverband der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V. (Projektträger) (2008): BREF-Dokumentation – Anlagen zur Behandlung von Gewerbeabfall
- Bunge 2010      Bunge, R. (2010): Wertstoffgewinnung aus KVA-Rostasche, [http://umtec.hsr.ch/fileadmin/user\\_upload/umtec.hsr.ch/Dokumente/Doku-Download/Publikationen/2010\\_06\\_30\\_BAFU\\_WASTE\\_Bunge.pdf](http://umtec.hsr.ch/fileadmin/user_upload/umtec.hsr.ch/Dokumente/Doku-Download/Publikationen/2010_06_30_BAFU_WASTE_Bunge.pdf); abgerufen am 15. 07.2013
- BVSE 2008      bvse e.V. (2008): Kurzfassung der Studie „Textilrecycling in Deutschland“

- CML 2001 Centre of Environmental Science, Leiden University (CML) (2001): "Life cycle assessment. An operational guide to the ISO standard". Wirkfaktoren im Internet unter <http://www.leidenuniv.nl/cml/lca2/index.html>, Update vom September 2001
- CML 2004 Van Oers, L. (2004): "CML-IA – database containing characterization factors for life cycle impact assessment", Centre of Environmental Science (CML); download unter <http://www.leidenuniv.nl/interfac/cml/ssp/index.html>; Leiden
- Consultic 2012 Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH (2012): Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2011, Alzenau
- Dehne et al. 2011 Dehne, I. Kanthak, M. Oetjen-Dehne, R. (2011): Aufkommen, Verbleib und Ressourcenrelevanz von Gewerbeabfällen; UBA-Texte 19/2011; Dessau
- Deike 2012 Deike, R. (2012): Abschlussbericht zum Projekt „Recyclingpotenziale bei Rückständen aus der Müllverbrennung“ Uni Duisburg Essen
- DFIU 1998 Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU) Universität Karlsruhe (1998): Analyse der Schwermetallströme in Steinkohlefeuerungen – Einfluss der Kohlesorten und des Lastzustandes -; Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung (PEF), Karlsruhe
- DGAW 2014 DGAW e.V., Aktuelle Entwicklungen der Verwertung von Schlacken und Rauchgasreinigungsrückständen thermischer Abfallbehandlungsanlagen (MVA, EBS-Kraftwerke), 2.5.2014, [http://www.dgaw.de/files/uploaded/pressmessages/dgaw\\_stellungnahme\\_zur-aktuellen-entwicklung-der-verwertung-von-schlacken\\_1399022731.pdf](http://www.dgaw.de/files/uploaded/pressmessages/dgaw_stellungnahme_zur-aktuellen-entwicklung-der-verwertung-von-schlacken_1399022731.pdf)
- DIN 2006a DIN EN ISO 14040 (2006): „Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen“, Juli 2006
- DIN 2006b DIN EN ISO 14040 (2006): „Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen“, Oktober 2006
- Dinkel 2000 Dinkel, F.(2000): Projekt Altpapierverwertung – Fachbericht Logistik / Ökobilanz, Herausgeber: Baudirektion Kanton Zürich, Zürich
- Dinkel 2006 Dinkel, F: (2006): Möglichkeiten und Grenzen von Ökobilanzen, Vortrag an der FH Winterthur, Winterthur
- Dornbach 2013 Dornbach Baulexikon: <http://www.dornbach.com/de/baulexikon/Dichte-von-Beton.html>; abgerufen 09/2013

ecoinvent V3 2013	ecoinvent Version 3: <a href="http://www.ecoinvent.org/home/">http://www.ecoinvent.org/home/</a>
EdDE 2010	EdDE Dokumentation 13 (2010): Energieeffizienzsteigerung und CO <sub>2</sub> -Vermeidungspotenziale bei der Müllverbrennung – Technische und wirtschaftliche Bewertung; Köln
EUWID	EUWID Recycling und Entsorgung (2009 bis 2013)
EUWID 2012	EUWID Recycling und Entsorgung (2012): Entsorgungsmarkt für Siedlungsabfälle, Ausgabe 50.2012
EUWID 2012a	EUWID Recycling und Entsorgung (2012): Zementhersteller Holcim, Cemex und Lafarge können SBS-Einsatzquote 2012 weiter steigern, Ausgabe 15.2013
EUWID 2013	EUWID Recycling und Entsorgung (2012): Entsorgungsmarkt für Siedlungsabfälle, Ausgabe 51/52.2013
EUWID 2013a	EUWID Recycling und Entsorgung (2013): Mitverbrennung in Zementwerken nimmt in Europa bis 2020 weiter deutlich zu, Ausgabe 7.2013
EUWID 2014	EUWID Recycling und Entsorgung (2014): Stäblein: Schlussendlich hilft gegen Überkapazitäten nur eine Marktberreinigung, Ausgabe 6.2014
EUWID 2014a	EUWID Recycling und Entsorgung (2014): EEG-Umlage: Kunststoffrecycler warnen Regierung vor „verheerenden Folgen“, Ausgabe 6.2014
Fehrenbach et al. 2007	Fehrenbach; H., Giegrich J., Mahmood S. (2008): Beispielhafte Darstellung einer vollständigen, hochwertigen Verwertung in einer MVA unter besonderer Berücksichtigung der Klimarelevanz, UBA-Texte 16/2008, Dessau
Fischer 2001	Fischer, K. (2001): Strategien im Kreislaufwirtschafts- und Abfallrecht, Verlag C.F. Müller
Flamme 2002	Flamme, S. (2002): Energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen in industriellen Anlagen – Ableitung von Maßnahmen zur umweltverträglichen Verwertung, Dissertation, Wuppertal
Flamme 2014	Schreiben des BGS e.V. vom 22.05.2014
Fricke et al 2009	Fricke, K., Bahr, T., Thiel, T., Kugelstadt, O. (2009); Stoffliche oder energetische Verwertung – Ressourceneffizientes Handeln in der Abfallwirtschaft; Berlin
Fricke/ Kugelstadt 2010	Fricke, K., Kugelstadt, O. (2010); Abschlussbericht zur wissenschaftlich-technischen Begleitung der MBA Südniedersachsen; Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig

- Fruth et al. 1997 Fruth, F., Kranert, M. (1997): Durchführung und Ergebnisse einer visuellen Klassifizierung von Gewerbeabfall, Sperrmüll und kommunalen Abfällen der Stadt Braunschweig; Müll und Abfall 01/97
- GDH 2013 Gesamtverband Deutscher Holzhandel e.V.:  
<http://www.holzhandel.de/fachwissen-holz/rohlichte.html>; abgerufen 09/21013
- Gebhardt 2005 Gebhardt, P. (2005): Quecksilberemissionen durch die Müllverbrennung, Salzböden
- GEMIS 1994 „Umweltanalyse von Energie-, Transport- und Stoffsystemen – Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS) – Version 2.1, aktualisierter und erweiterter Endbericht“; Öko-Institut e. V., i. A. des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, und Bundesangelegenheiten, Darmstadt/Kassel 1994
- GewAbfV Verordnung über die Entsorgung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen (Gewerbeabfallverordnung – GewAbfV) vom 19. Juni 2002
- Grabowska 2013 Grabowska, J. M. (2013): Von der Abfallpolitik zu einer nachhaltigen Stoffstrompolitik - Gestaltungsmöglichkeiten im Zusammenspiel von Konsumenten, Unternehmen und Verwaltung am Beispiel ausgewählter EU-Staaten; Dissertation München
- Haeming 2012 Haeming, H. (2012): Schlacken aus Müllverbrennungsanlagen – Ersatzbaustoffe oder Abfälle zur Beseitigung?, IFAT 2012
- Helftewes 2012 Helftewes, M.(2012): Modellierung und Simulation der Gewerbeabfallaufbereitung von den Hintergrund der Outputqualität, der Kosteneffizienz und der Klimabilanz; Dissertation Rostock
- Helftewes 2013 Helftewes, M.(2013): Gewerbeabfallaufbereitung – Entscheidung: Wertstoff-, Brennstoffgewinnung oder direkt in die MVA? in. Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Band 15
- Henkes 2013 Henkes, W. (2013): Überkapazitäten belasten den Markt, in RECYCLING magazin 21/2013
- Holm 2013 Holm, O. (2013): Neues Verfahren zur Aufbereitung von Müllverbrennungsaschen wird erprobt,  
[http://www.bam.de/de/aktuell/presse/newsletter/newsletter\\_2013/nl\\_3\\_2013.htm#N100D7](http://www.bam.de/de/aktuell/presse/newsletter/newsletter_2013/nl_3_2013.htm#N100D7); abgerufen am 03.01 2014
- HTP 2013 Persönliche Mitteilung, HTP Umwelttechnik GmbH, 2013

IAA / Intecus 2011	IAA / Intecus GmbH (2011): Nutzung der Potenziale des biogenen Anteils im Abfall zur Energieerzeugung, UBA-Texte 33/2011; Dessau
IFEU 1998	IFEU (1998): Ökologische Bilanzen in der Abfallwirtschaft; Fallbeispiele: Verwertung von Altreifen und Haushaltskühlgeräten, UBA-Texte 10/99
Ifeu 2007	Ifeu (2007): Behandlungsalternativen für klimarelevante Stoffströme, UBA-Texte 39/2007, Heidelberg, Dessau-Roßlau
IFEU 2012	IFEU (2012): Maßnahmenplan zur Umsetzung einer vorbildhaften klimafreundlichen Abfallentsorgung im Land Berlin, Heidelberg
IFEU 2012a	Ifeu (2012): Mit nationalen Top-Runner-Instrumenten zum Stromsparziel der Bundesregierung, Studie im Auftrag des BUND, <a href="http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/energie/20120312_klima_energie_toprunner_studie.pdf">http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/energie/20120312_klima_energie_toprunner_studie.pdf</a> ; abgerufen am 03.02.2014
IFEU 2013	IFEU (2013): Stoffstrom-, Klimagas- und Umweltbilanzierung der Abfallentsorgung im Land Berlin 2012
IPCC 1996	Intergovernmental Panel on Climate Change „Climate Change 1995 – The Science of Climate Change“ Houghton, J. T. (Hg), Cambridge University Press, Cambridge 1996
IPCC 2007	Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): Contribution of Working Group I to the 4th Assessment Report: Climate Change 2007, <a href="http://www.ipcc.ch">www.ipcc.ch</a>
ITAD 2012	ITAD e.V. (2012): Pressemitteilung „Thermisches Recycling“; Würzburg
ITAD 2014	Schreiben der Verbände ITAD/ASA/VKU vom 17.05.2014
IVD 2003	Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Universität Stuttgart: Quecksilber und seine Verbindungen bei der Abfallverbrennung, Fachberichte LUA NRW 2/2003; Stuttgart, Essen 2003
IVD 2006	Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen, Universität Stuttgart: Verhalten von Quecksilber und seinen Verbindungen in staubhaltigen Rauchgasen, IVD-Berichte, Stuttgart Mai 2006
Kalvelage 2011	Kalvelage, M. (2011): EBS-Herstellung und Verwertung in Flensburg 2006 –2011; 23. Fachtagung des LLUR
Kersting 2012	Kersting, D. (2012): Innovative Schlackenaufbereitungstechniken; IFAT 2012

- Köser/Zeng 2013 Heinz Köser, Katharina Zeng: „Hg-Gehalte in fossilen und nachwachsenden Brennstoffen – Eine vergleichende Übersicht“, Uni Magdeburg, VDI Wissensforum, Düsseldorf 2013
- Krause 2010 Krause, P. (2010): Feinfraktionen aus der mechanischen Abfallaufbereitung, Diplomarbeit TU Berlin
- Kummer et al. 2002 Kummer, B., Brinkmann, R. (2002): Deponieabgabe als Steuerungsinstrument für eine hochwertige Kreislaufwirtschaft?, in: VKS-News, 06/2002,
- LANUV 2013 Wirkungen von Quecksilber, <http://www2.lanuv.nrw.de/gesundheit/schadstoffe/hg.htm>; abgerufen im Februar 2013
- LfU Bayern 2013 Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2013): Genutzte und ungenutzte Sekundärrohstoffe im Gewerbeabfall Stoffströme ermitteln und Potenzial abschätzen, Augsburg
- Löschau 2006 Löschau, M. (2006); Input-Output-Analyse als Methode zur stofflichen Bilanzierung komplexer Entsorgungssysteme, Dissertation Berlin
- Lübben 2013 Dr. Lübben, S (2013): Entwicklung des Schlackerecyclings am Beispiel der MVA
- Maerz et al. 2010 Maerz, P., Hoffmann, M., Jäger, J. (2010): Wertvolle Buntmetalle, in Resource 1/2010
- MKULNV NRW 2013 Merkblatt zur energetischen Verwertung von Abfällen in Mitverbrennungsanlagen für die Genehmigungs- und Überwachungspraxis in Nordrhein-Westfalen; [http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/abfall/energetische\\_verwertung/index.php](http://www.umwelt.nrw.de/umwelt/abfall/energetische_verwertung/index.php), abgerufen 2013
- Oerter 2013 Dr.-Ing. Martin Oerter, Forschungsinstitut der Zementindustrie GmbH: persönliche Mitteilung, 2013
- Oetjen-Dehne et al. 2007 Oetjen-Dehne, R.; Kalvelage, M.: Erfahrungen mit der Aufbereitung und Verwertung von Ersatzbrennstoffen aus Gewerbeabfällen, in: Kühle-Weidemeier, M. (Hrsg.): Internationale Tagung MBA 2007
- Oetjen-Dehne et al. 2008 Oetjen-Dehne, R., Dehne, I., Kanthak, M. (2008): Optimierung der Verwertung der gewerblichen Abfälle im Land Berlin bis 2020 im Auftrag der Senatsverwaltung für Gesundheit, Umwelt und Verbraucherschutz, Berlin

Öko-Institut 2008	Öko-Institut e.V. (2008): Optimierung der Abfallwirtschaft in Hamburg unter dem besonderen Aspekt des Klimaschutzes- „Abfallwirtschaft und Klimaschutz“. Darmstadt, 2008
Öko-Institut 2012	Öko-Institut (2012): Saving the EU Emissions trading scheme and raising climate ambition. Facts Measures and Implications. Berlin
Öko-Institut/HTP 2012	Dehoust, G., Christiani, J. (2012): Analyse und Fortentwicklung der Verwertungsquoten für Wertstoffe Sammel- und Verwertungsquoten für Verpackungen und stoffgleiche Nicht-verpackungen als Lenkungsinstrument zur Ressourcenschonung; UBA-Texte 40/2012, Dessau
Öko-Institut/IFEU 2010	Dehoust, G., Dr. Schüler, D., Vogt, R., Giegrich, J. (2010): Klimaschutzpotenziale der Abfallwirtschaft – Am Beispiel von Siedlungsabfällen und Altholz; UBA-Texte 06/2010; Dessau
Pretz 1999	Prof. Dr. Pretz, T. et al. (1999): Aufbereitung von Müllschlacken unter besonderer Berücksichtigung der Metallrückgewinnung, <a href="http://www.iar.rwth-aachen.de/www/upload/Publikationen/download/bis1999/v06_sfb525.pdf">http://www.iar.rwth-aachen.de/www/upload/Publikationen/download/bis1999/v06_sfb525.pdf</a> - abgerufen am 14.03.2013
Richtlinie 2008	Richtlinien für die Verfolgung und Ahndung von Zuwiderhandlungen gegen Bestimmungen des Umweltschutzes, RdErl. d. MU v. 9. 7. 2008 – 16-05130/3 – VORIS 28000, Stand 2008, Nds. MBl. 2008 Nr. 32, S. 864, ber. S. 1055
Richtlinie 2009/125/EG	Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG))
Richtlinie 2009/29/EG	Richtlinie 2009/29/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. April 2009 zur Änderung der Richtlinie 2003/87/EG zwecks Verbesserung und Ausweitung des Gemeinschaftssystems für den Handel mit Treibhausgasemissionszertifikaten
Richtlinie 2010/30/EU	Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Kennzeichnung von Fernsehgeräten in Bezug auf den Energieverbrauch (Energieverbrauchskennzeichnung (2010/30/EU))
SATURN 2012	Sensor-sorting Automated Technology for advanced Recovery of Non-ferrous metals, Public Information Report, Summary report on input waste streams for the Saturn process: Germany, the UK and Czech Republic as comparison examples

- Seeger 2009                    Seeger, H.: Bedeutung der Kunststofffraktionen für die EBS-Verwertung; [http://www.witzenhausen-institut.de/downloads/ks21\\_seeger.pdf](http://www.witzenhausen-institut.de/downloads/ks21_seeger.pdf); zuletzt geprüft am 02.11.2012
- SIS Verlag 2013                <http://www.sis-verlag.de/archiv/6427-bfh-keine-stromsteuerbeguenstigung-fuer-die-herstellung-von-brennstoffen-aus-kunststoffabfaellen-und-altholz>; abgerufen am 04.10.2013
- Spohn 2009                    Spohn, C. (2009): Waste-to-Energy – Steigerung der Energieeffizienz in: Umweltministerium Baden-Württemberg und VKS im VKU Landesgruppe Baden-Württemberg (Hrsg.): Abfall als Ressource, Ludwigsburg
- STBA 2005-2011                Statistisches Bundesamt: Abfallentsorgung der Jahre 2005 bis 2011, Wiesbaden
- STBA 2007-2010                Statistisches Bundesamt: Abfallentsorgung der Jahre 2007 bis 2010, Wiesbaden
- STBA 2009                    Statistisches Bundesamt: Abfallbilanz 2007, Wiesbaden Juni 2009
- STBA 2012a                    Statistisches Bundesamt: Abfallentsorgung 2010 (Fachserie 19 Reihe 1), Wiesbaden 2012
- STBA 2012b                    Statistisches Bundesamt: Abfallbilanz 2010 (vorläufig), Wiesbaden Mai 2012
- STBA 2012c                    Statistisches Bundesamt (2012): Erhebung über die Abfallerzeugung 2010; Wiesbaden 2012
- STMUG Bayern 2013            STMUG Bayern (2013): Information des STMUG Bayern zur Studie „Genutzte und ungenutzte Sekundärrohstoffe im Gewerbeabfall – Stoffströme ermitteln und Potenzial abschätzen“ vom 10.04.2013
- TEHG                            Gesetz über den Handel mit Berechtigungen zur Emission von Treibhausgasen (Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz – TEHG) vom 21. Juli 2011
- Thome et al. 2013                Thome, V., Seifert, S, Maier, M., Karlstetter, C. (2013): Blitzrecycling, in RECYCLING magazin 1/2013
- Thomé-Kozmiensky 1985            Thomé-Kozmiensky (1985): Verbrennung von Abfällen Berlin
- u.e.c. Berlin 2010                u.e.c. Berlin (2010): Überwachung von Abfallentsorgungsanlagen – Recherchen und Untersuchungen an Abfallbehandlungsanlagen in Sachsen-Anhalt und Abgrenzung der Abfallschlüssel 191209 und 191212, (Kurzfassung)

u.e.c. Berlin 2011	u.e.c. Berlin (2011): Untersuchungsbericht zur Aktualisierung der Datenlage für das Sammelsystem Gelbe Tonne <sup>plus</sup>
UBA 1999	Ökologische Bilanzen in der Abfallwirtschaft; Fallbeispiele: Verwertung von Altrefen und Haushaltskühlgeräten. Umweltbundesamt, Berlin 1999 (UBA-Texte 10/99)
UBA 2013	Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2012, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Mai 2013
Uepping 2013	Uepping, R. (2013): Sensorgestützte Sortiertechnik; in: Thomé-Kozmiensky, Goldmann (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Neuruppin
Unisensor 2013	Unisensor (2013): <a href="http://www.unisensor.de/produkte/product-details//powersort-200.html">http://www.unisensor.de/produkte/product-details//powersort-200.html</a> ; abgerufen am 24.10 2013
Urban 1983	Urban, A. (1983): Verfahrensvergleich am Beispiel von Aufbereitungsanlagen – Kriterien für die Auswahl, in: K.J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.): Materialrecycling durch Abfallaufbereitung
VDP	Verband deutscher Papierfabriken e.V.(VDP): Leistungsbericht Papier, jährliche Erscheinungsweise
VDZ 2012	Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2011, Düsseldorf, August 2012
VDZ 2013	Mitteilungen im Rahmen des begleitenden Projektarbeitskreises; VDZ 2013
Verbundprojekt NE-Rec 2012	Verbundprojekt NE-Rec (2012): Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Sortierung, Rückgewinnung und Aufbereitung von Wert-/ Edelmetallen und Seltenen Metallen aus Resten der Sortierung von Wertstoffsammelgemischen sowie aus Stoffströmen der Haus- und Gewerbeabfallbehandlung
Verwaltungsvorschrift 2012	Verwaltungsvorschrift Beschaffung und Umwelt Berlin – VwVBU vom 23. Oktober 2012, Anhang 1: Umweltschutzanforderungen bei der Beschaffung (Leistungsblätter)
Vorher/Kibat 2007	Vorher, W., Kibat, K.-D. (2007): Perspektiven der Holzversorgung unter Berücksichtigung der politischen Ziele zur Förderung erneuerbarer Energien in Deutschland.“ in Science and Technology 12/2007

- Wagner et al. 2012      Wagner, J., Heidrich, K., Baumann, J., Kügler, T., Reichenbach, J. (2012): 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; UBA-Texte 14/2012, Dessau
- Wiemer et al. 2002      Wiemer, K., Kern, M. (2002): Abfallwirtschaft und Klimaschutz von dem Hintergrund des Biomassepotenzials in Abfällen aus Industrie und Haushalten; Witzenhausen
- Wilts et al. 2014      Wilts, H., Ritthoff, M., Dehne, I., Oetjen-Dehne, R., Siegmund, N., Prof. Dr. Sanden, J. (2014): Entwicklung von Instrumenten und Maßnahmen zur Steigerung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen- mit Schwerpunkt Sekundärkunststoffe, UBA-Text (noch in Bearbeitung), Dessau
- Wirtz et.al. 2012      Wirtz, S., Krüger, B., Mrotzek, A., Marzi, T. (2012): EBS effizient aufbereiten; Bochum,  
[http://www.pua24.net/pi/index.php?forward=downloadPdf.php&p=mJ3rC2nsGxWFBanjU.jGmQF3Ccl\\_ExJnccClnMfiMg3pRU00V0jbEuPqmPg.G@@.BhB-kaNFnq@TkAh9wF\\_KCF6OoV.fcWch\\_IccF.y.mrAebp@jCFQCzU\\_eBHWWsFLipa@3wlv20&dd=0](http://www.pua24.net/pi/index.php?forward=downloadPdf.php&p=mJ3rC2nsGxWFBanjU.jGmQF3Ccl_ExJnccClnMfiMg3pRU00V0jbEuPqmPg.G@@.BhB-kaNFnq@TkAh9wF_KCF6OoV.fcWch_IccF.y.mrAebp@jCFQCzU_eBHWWsFLipa@3wlv20&dd=0)
- Zeschmar-Lahl et al. 2014      Zeschmar-Lahl, B., Tebert, C. (2014): Vom Winde verweht - Die Quecksilberemissionen aus Kohlekraftwerken in Deutschland könnten durch Einführung des Standes der Technik um die Hälfte reduziert werden; ReSource 2/2014