

TEXTE

37/2018

# Analyse der Effizienz und Vorschläge zur Optimierung von Sammelsystemen der haushaltsnahen Erfassung von Leichtverpackungen und stoffgleichen Nichtverpackungen auf der Grundlage vorhandener Daten

Abschlussbericht



TEXTE 37/2018

Umweltforschungsplan des  
Bundesministeriums für Umwelt,  
Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3716 34 329 0  
UBA-FB 002643

## **Analyse der Effizienz und Vorschläge zur Optimierung von Sammelsystemen der haushaltsnahen Erfassung von Leichtverpackungen und stoffgleichen Nichtverpackungen auf der Grundlage vorhandener Daten**

von

Jörg Wagner, Marko Günther  
INTECUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management, Dresden

Hans-Bernhard Rhein, Peter Meyer  
Umweltkanzlei Dr. Rhein - Beratungs- und Prüfgesellschaft mbH, Sarstedt

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Impressum

### Herausgeber:

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
info@umweltbundesamt.de  
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt

### Durchführung der Studie:

INTECUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management  
Pohlandstr. 17  
01309 Dresden

Umweltkanzlei Dr. Rhein -  
Beratungs- und Prüfgesellschaft mbH  
Bahnhofstraße 17  
31157 Sarstedt

### Abschlussdatum:

November 2017

### Redaktion:

Fachgebiet III 1.6 Produktverantwortung  
Gerhard Kotschik

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4359

Dessau-Roßlau, Mai 2018

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

## Kurzbeschreibung

Auf der Basis vorliegender Sortieranalysen wurde die Effizienz unterschiedlicher Sammelsysteme für Leichtverpackungen (LVP) und stoffgleichen Nichtverpackungen (StNVP) analysiert und verglichen. Eine empirische Datenerhebung (bspw. Durchführung von Sortieranalysen) war nicht Gegenstand des Vorhabens. Besonderer Wert wurde im Rahmen der Betrachtung auf die werkstoffliche Verwertung der Materialfraktionen Kunststoffe, Metalle und Verbunde gelegt. Verglichen wurden folgende Systeme:

- ▶ Gelbe Tonne (städtisch und ländlich)
- ▶ Wertstofftonne (städtisch und ländlich)
- ▶ Gelber Sack (ländlich)
- ▶ Wertstoffsack (ländlich)
- ▶ Depotcontainer ohne StNVP
- ▶ Wertstoffhof ohne StNVP (als Hauptsystem)

Es wurden zum einen die Aufwendungen für die Erfassung und die Sammlung (inkl. des Individualtransports) und den Transport (sowohl zwischen Umschlaganlage und Sortieranlage als auch zwischen Sortieranlage und Aufbereitungsanlage) und zum anderen die Aufwendungen für Sortierung und Aufbereitung analysiert. Für die Sortierung wurden ein IST-Szenario und ein ZUKUNFT-Szenario (Betrieb der Sortieranlagen nach dem Stand der Technik) berücksichtigt.

Im Ergebnis wurden Vorschläge zur Optimierung der Sammelsysteme und der Sortierung erstellt.

Dagegen erwies sich die Ableitung quantitativer und qualitativer Mindestanforderungen an die Effizienz von Sammelsystemen, die geeignet sind, ggf. später auch als rechtliche Vorgaben für Sammelsysteme zu dienen, aufgrund der für einige Sammelsysteme für diese Zwecke unzureichenden Datenbasis, als nicht durchführbar.

## Abstract

On the basis of existing sorting analyses, the efficiency of different collection systems for light packaging (LVP) and non-packaging from the same material (StNVP) was analyzed and compared. An empirical data collection (e.g. conduct of sorting campaigns) was not subject of this study. During its implementation, special emphasis was placed on the utilization of the fractions plastics, metals and composites. Following collection arrangements were investigated: 'Yellow bin' (urban and rural)

- ▶ 'Yellow bin' (urban and rural)
- ▶ Recyclables bin (urban and rural)
- ▶ 'Yellow sack' (rural)
- ▶ Recyclables sack (rural)
- ▶ Depot container without non-packaging from the same material (StNVP)
- ▶ Recycling centre without StNVP (as the main system)

The expenses for material capture, collection (including private deliveries to different collection points) and transports (both between the transfer station and the sorting facility as well as between the sorting facility and the recycling plant) on the one hand, and the costs for sorting and recycling on the other hand were analyzed. For the sorting, a scenario representing common business practice (IST scenario) and a FUTURE scenario (sorting plants operating according to the state of the art) were taken into account.

As a result, proposals to optimize the collection arrangements and sorting were developed.

Minimum requirements regarding the quantitative and qualitative efficiency of collection systems would have been welcomed/desirable as a result of this study as they could eventually serve as legal provisions for collection systems in the future. However, due to the insufficient database for some collection systems this intention turned out to be not feasible.

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	10
Tabellenverzeichnis .....	12
Abkürzungsverzeichnis .....	15
Glossar .....	17
Verzeichnis der standardisierten LVP-Outputfraktionen .....	19
Zusammenfassung.....	20
Summary.....	35
1 Einleitung .....	52
2 Stand von Erfassung, Sammlung und Transport in Deutschland.....	52
3 Bilanzraum und Schnittstellen .....	55
4 Auswahl und Beschreibung der zu betrachtenden Sammelsysteme .....	56
4.1 Auswahl der Sammelsysteme.....	56
4.2 Beschreibung der Sammelsysteme.....	57
4.2.1 Gelbe Tonne .....	57
4.2.1.1 Ist-Stand .....	57
4.2.1.2 Aufkommen .....	57
4.2.1.3 Prozesskette .....	57
4.2.1.4 Behältergestellung und Sammelturnus .....	58
4.2.2 Wertstofftonne .....	58
4.2.2.1 Ist-Stand .....	58
4.2.2.2 Aufkommen .....	58
4.2.2.3 Prozesskette .....	59
4.2.2.4 Behältergestellung und Sammelturnus .....	59
4.2.3 Gelber Sack.....	59
4.2.3.1 Ist-Stand .....	59
4.2.3.2 Aufkommen .....	60
4.2.3.3 Prozesskette .....	60
4.2.3.4 Behältergestellung und Sammelturnus .....	60
4.2.4 Wertstoffsack .....	61
4.2.4.1 Ist-Stand .....	61
4.2.4.2 Aufkommen .....	61
4.2.4.3 Prozesskette .....	61
4.2.4.4 Behältergestellung und Sammelturnus .....	61
4.2.5 Depotcontainer .....	62

4.2.5.1	Ist-Stand	62
4.2.5.2	Aufkommen	62
4.2.5.3	Prozesskette	62
4.2.5.4	Behältergestaltung und Sammeltournus	62
4.2.6	Wertstoffhof als Hauptsammelsystem .....	63
4.2.6.1	Ist-Stand	63
4.2.6.2	Aufkommen	63
4.2.6.3	Prozesskette	64
4.2.6.4	Behältergestaltung und Sammeltournus	64
4.3	Datenerhebung der Sammelsystemspezifischen LVP-Zusammensetzung .....	65
4.4	Diskussion der Datenerhebung zum Aufkommen .....	66
5	Modellierung der Teilprozesse Individualtransport, Sammlung und Transport .....	69
5.1	Individualtransport .....	69
5.2	Beschreibung des Teilprozesses Sammlung .....	70
5.2.1	Methodik .....	70
5.2.2	Anzahl Sammeltouren .....	72
5.3	Transport .....	72
5.4	Kostenansätze .....	73
5.4.1	Behälter .....	73
5.4.2	Individualtransport .....	74
5.4.3	Sammlung .....	74
5.4.4	Transport .....	74
6	Ergebnisse für die Teilprozesse Individualtransport, Sammlung und Transport .....	75
6.1	Einwohnerbezogene Kosten .....	75
6.2	Massebezogene Kosten .....	76
6.3	Vergleich mit anderen Kostenberechnungen .....	77
6.4	Optimierungspotenziale .....	79
6.4.1	Einfluss Miterfassung StNVP .....	79
6.4.2	Einfluss der Erfassung weiterer Wertstoffe auf dem Wertstoffhof .....	79
6.4.3	Einfluss der Streckung des Sammeltournus .....	80
7	Sortierung und Bereitstellung zur Verwertung .....	83
7.1	Vernetzung der Prozesse von der Erfassung zur Verwertung .....	83
7.2	Beschreibung der Einflussgrößen auf den Sortierprozesses .....	84
7.2.1	Technische Möglichkeiten der Sortierung .....	84
7.2.2	Wirtschaftliche Indikatoren .....	87

7.2.3	Rechtliche Rahmenbedingungen .....	88
7.3	Auswertungen der Mengenstromnachweise dualer Systeme .....	88
7.4	Ausgewählte Sammelsysteme und Modellparameter .....	91
7.4.1	Schritt 1: Differenzierung der Erfassungsmengen .....	92
7.4.2	Schritt 2: Verteilung des Wareneingangs auf die Sortierfraktionen (Warenausgang).....	96
7.4.3	Schritt 3: Berechnung der aus den einzelnen Sammelsystemen sortierten Mengen (Ausbringung Sortieranlage, Warenausgang) .....	102
7.4.4	Schritt 4: Berechnung des jeweils erzeugten Rezyklats aufgrund der Zuführungsrate zur werkstofflichen Verwertung und der Produktionsrate .....	104
7.5	Bereitstellung zur Verwertung.....	109
7.6	Zusätzliche Auswertungen und Variation der Sammelsysteme .....	116
7.6.1	UBA-Planspiele zur Fortentwicklung der Verpackungsverordnung .....	116
7.6.2	Potenzial nicht erfasster Wertstoffe .....	117
7.6.3	Wertstoffanteile in den zulässigen Störstoffanteilen der Sortierfraktionen .....	118
7.7	Kostenberechnung für Sortierung und Verwertung .....	120
7.7.1	Angesetzte Marktpreise .....	120
7.7.2	Übersicht der Gesamtkosten für Sortierung und Verwertung der gesammelten Massen aus den einzelnen Sammelsystemen .....	122
7.8	Auswertung der Sortierergergebnisse aus den Szenarien „IST“ und „ZUKUNFT“ .....	124
7.8.1	Auswirkungen der Zusammensetzungen der Sammelsysteme auf den Sortieranlageneingang.....	124
7.8.2	Vergleich der Szenarien anhand der Mischkunststoffe und Sortierreste/EBS .....	125
8	Gesamtbewertung .....	128
8.1	Zusammenfassung der Erkenntnisse der Wertschöpfungskette Sammlung- Verwertung.....	128
8.1.1	Kostenbetrachtung.....	128
8.1.2	Ökologische Bewertung .....	135
8.1.2.1	Methodik .....	135
8.1.2.2	Ergebnisse .....	139
9	Konsequenzen und Empfehlungen .....	149
9.1	Gesamtbewertung der Teilprozesse Individualtransport, Sammlung und Transport im Vergleich .....	149
9.1.1	Sammelmenge und Sammelqualität .....	149
9.1.2	Logistikkosten.....	149
9.2	Gesamtbewertung der Sortierung im Vergleich.....	150
9.2.1	Technische Möglichkeiten der Sortierung und Verwertung .....	150

9.2.2	Wirtschaftliche Indikatoren .....	152
9.2.3	Rechtliche Rahmenbedingungen .....	153
9.3	Gesamtbewertung der Systeme im Vergleich .....	154
9.3.1	Schlussfolgerungen auf Basis der ökologischen Auswirkungen.....	154
9.3.1.1	Klimaerwärmungspotenzial	154
9.3.1.2	Primärenergieaufwand	154
9.3.2	Schlussfolgerungen auf Basis der Gesamtkosten.....	155
9.4	Abschließende Empfehlungen .....	155
10	Quellenverzeichnis.....	158
11	Anlagen .....	160

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Jährliche Logistikkosten bezogen auf 1 Mio. Einwohner.....	22
Abbildung 2:	Logistikkosten bezogen auf 1 kg anfallende LVP-Masse .....	23
Abbildung 3:	Gesamtkosten der einzelnen Sammelsysteme bezogen auf 1 Mio. Einwohner im IST-Szenario .....	29
Abbildung 4:	Vergleich der spezifischen Systemkosten je Sammelsystem bezogen auf die Erfassungsmenge im IST-Szenario .....	30
Abbildung 5:	Ergebnis der Bilanzierung des Global Warming Potenzials im IST-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner .....	31
Abbildung 6:	Ergebnis der Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes im IST-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner .....	32
Figure 7:	Annual logistics costs in relation to 1 million inhabitants .....	37
Figure 8:	Logistics costs in relation to 1 kg of collected LVP material .....	38
Figure 9:	Total costs for the individual scenarios in relation to 1 million inhabitants in the IST-scenario .....	46
Figure 10:	Comparison of the specific system costs per collection arrangement in relation to the collected quantity in the IST scenario .....	47
Figure 11:	Balance of the global warming potential based on 1 million inhabitants in the IST scenario .....	48
Figure 12:	Balance of the cumulative energy demand based on 1 million inhabitants in the IST scenario .....	49
Abbildung 13:	Bilanzraum und Schnittstellen .....	55
Abbildung 14:	Jährliche Logistikkosten bezogen auf 1 Mio. Einwohner.....	75
Abbildung 15:	Logistikkosten bezogen auf 1 kg anfallende LVP-Masse .....	76
Abbildung 16:	Vergleich der deutschlandweiten Logistikkosten der Sammelsysteme mit Literaturwerten .....	78
Abbildung 17:	Logistikkosten bezogen auf 1 kg anfallende LVP-Masse, ergänzt um das variierte Sammelsystem Wertstoffhof.....	80
Abbildung 18:	Logistikkosten, bezogen auf 1 kg anfallende LVP-Masse, für das Sammelsystem Wertstofftonne ländlich, ergänzt um das variierte Sammelsystem mit verlängertem Sammeltturnus .....	82
Abbildung 19:	Schema der Prozessvernetzung von der Erfassung zur Verwertung.....	83
Abbildung 20:	Schematische Darstellung Stand der Sortiertechnik .....	86
Abbildung 21:	Sortierebenen des Dateninputs.....	92
Abbildung 22:	Gesamtkosten der einzelnen Sammelsysteme bezogen auf 1 Mio. Einwohner im IST-Szenario .....	129
Abbildung 23:	Vergleich der einwohnerspezifischen Systemkosten je Sammelsystem im IST-Szenario .....	130

Abbildung 24:	Vergleich der spezifischen Systemkosten je Sammelsystem bezogen auf die Erfassungsmenge im IST-Szenario .....	131
Abbildung 25:	Vergleich der spezifischen Systemkosten je Sammelsystem bezogen auf die Rezyklatausbeute im IST-Szenario .....	132
Abbildung 26	Vergleich der spezifischen Systemkosten je Sammelsystem bezogen auf die Rezyklatausbeute im ZUKUNFT-Szenario .....	133
Abbildung 27:	Ergebnis der Bilanzierung des Global Warming Potenzials im IST-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner .....	141
Abbildung 28:	Ergebnis der Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes im IST-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner .....	142
Abbildung 29:	Ergebnis der Bilanzierung des Global Warming Potenzials im ZUKUNFT-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner .....	143
Abbildung 30:	Ergebnis der Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes im ZUKUNFT-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner .....	144

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Charakteristik der LVP-Sammelsysteme .....	54
Tabelle 2:	Anzahl der betrachteten Vertragsgebiete je Sammelsystem .....	56
Tabelle 3:	Einwohnerspezifisches Aufkommen für die Sammelsysteme Gelbe Tonne städtisch/ ländlich.....	57
Tabelle 4:	Behältergestaltung und Sammeltturnus für ein Modellgebiet mit 1 Mio. Einwohnern .....	58
Tabelle 5:	Einwohnerspezifisches Aufkommen für die Sammelsysteme Wertstofftonne städtisch/ ländlich .....	59
Tabelle 6:	Behältergestaltung und Sammeltturnus .....	59
Tabelle 7:	Einwohnerspezifisches Aufkommen für das Sammelsystem Gelber Sack ländlich .....	60
Tabelle 8:	Befüllte Säcke und Sammeltturnus.....	60
Tabelle 9:	Einwohnerspezifisches Aufkommen für das Sammelsystem Wertstoffsack.....	61
Tabelle 10:	Befüllte Säcke und Sammeltturnus.....	61
Tabelle 11:	Einwohnerspezifisches Aufkommen für das Sammelsystem Depotcontainer.....	62
Tabelle 12:	Behältergestaltung und Sammeltturnus .....	63
Tabelle 13:	Einwohnerspezifisches Aufkommen für das Sammelsystem Wertstoffhof .....	64
Tabelle 14:	Behältergestaltung und Sammeltturnus - Wertstoffhof .....	65
Tabelle 15:	Datengrundlage LVP-Zusammensetzung nach Differenzierungsebenen .....	65
Tabelle 16:	Mittleres, maximales und minimales Aufkommen der betrachteten Vertragsgebiete je Sammelsystem .....	67
Tabelle 17:	Aufkommensberechnung auf Basis der Aufkommensentwicklung 2010-2015.....	68
Tabelle 18:	Parameter zur Quantifizierung des Individualtransports und Berechnung.....	70
Tabelle 19:	Definition und Abhängigkeiten logistischer Kennzahlen .....	70
Tabelle 20:	Zeitbedarf für die Sammlung für die Sammelsysteme .....	71
Tabelle 21:	Anzahl der Sammeltouren für die einzelnen Sammelsysteme.....	72
Tabelle 22:	Ergebnisse der Expertenbefragung .....	72
Tabelle 23:	Aufwendungen Transport zu Sortieranlagen .....	73
Tabelle 24:	Jährliche Kosten Sammelbehälter .....	74
Tabelle 25:	Kosten Sammelfahrzeuge .....	74
Tabelle 26:	Kostenvergleich bei Miterfassung der StNVP .....	79

Tabelle 27:	Mittlere Sammelturnusse und Sammelturnusse variiert .....	81
Tabelle 28:	Zuführungsmengen aus LVP dualer Systeme zur Verwertung 2014 auf MSN-Basis nach Bothe [2016] .....	89
Tabelle 29:	Differenzierung der Kunststoffverpackungen aus der Zuführung zur Verwertung im MSN 2014 nach Bothe [2016].....	90
Tabelle 30:	Fraktionen zur Ermittlung der LVP-Zusammensetzung nach Differenzierungsebenen .....	93
Tabelle 31:	Auszug aus der Darstellung des Wareneingangs „Wertstofftonne städtisch“, Fraktionen prozentual, Erfassungsdetaillierung Ebene 2.....	95
Tabelle 32:	Auszug aus der Darstellung des Wareneingangs „Wertstofftonne städtisch“, Fraktionen prozentual, Erfassungsdetaillierung Ebene 1.....	95
Tabelle 33:	Aufschlüsselung des (nicht LVP-zugehörigen) PPK-Anteils im Wareneingang am Beispiel der Wertstofftonne städtisch .....	96
Tabelle 34:	Beispiel 1 (Angaben gerundet): .....	96
Tabelle 35:	Beispiel 2 (Angaben gerundet) .....	96
Tabelle 36:	Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion Fe-Metalle/Weißblech .....	97
Tabelle 37:	Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion NE-Metalle .....	98
Tabelle 38:	Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion Folien >DIN A4.....	98
Tabelle 39:	Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion Hohlkörper >5 l.....	98
Tabelle 40:	Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion PE/PP .....	98
Tabelle 41:	Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion PET.....	99
Tabelle 42:	Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion PS.....	99
Tabelle 43:	Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion FKN .....	99
Tabelle 44:	Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion Mischkunststoffe.....	100
Tabelle 45:	Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion PPK .....	100
Tabelle 46:	Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion Sortierreste .....	101
Tabelle 47:	Reduzierte Darstellung der Zuordnung des Sortieranlageneingangs zu den bereitgestellten Ballenfraktionen.....	102
Tabelle 48:	Szenarien-Vergleich Output Sortieranlage am Beispiel „Wertstofftonne städtisch“ .....	103
Tabelle 49:	Zuführungsquoten zur (werk)stofflichen Verwertung .....	105
Tabelle 50:	Verwendete Rezyklatausbeuten der einzelnen werkstofflichen Verfahren.....	106
Tabelle 51:	Rezyklatausbeuten im Szenario IST bei „Wertstofftonne städtisch“ .....	108
Tabelle 52:	Rezyklatausbeuten im Szenario ZUKUNFT bei „Wertstofftonne städtisch“ .....	109
Tabelle 53:	Sortenreinheiten bzw. maximale Störstoffanteile der Sortierfraktionen zur Verwertung nach wme.fact [2016] .....	110

Tabelle 54:	Poteniale „nicht erfasster Wertstoffe“ gegenüber dem Sammelsystem mit der höchsten festgestellten Sammelmenge .....	118
Tabelle 55:	Mögliche wertstoffhaltige Störstoffanteile in Sortierfraktionen.....	119
Tabelle 56:	Verwertungskosten bzw. –erlöse für einzelne DS-Fraktionen: .....	121
Tabelle 57:	Kostenanteile der verschiedenen Sammelsysteme für Sortierung und Verwertung nach dem IST-Szenario .....	123
Tabelle 58:	Kostenanteile der verschiedenen Sammelsysteme für Sortierung und Verwertung nach dem ZUKUNFT-Szenario.....	123
Tabelle 59:	Verteilung des Sammelguts auf die Sortierfraktion 0350 Mischkunststoffe .....	125
Tabelle 60:	Summe der Sortierprodukte 0361, 0365 und 0830 im Vergleich IST/ZUKUNFT in kg/(EW*a).....	126
Tabelle 61:	Absenkung des Sortierrestanteils von ZUKUNFT gegenüber IST.....	127
Tabelle 62:	Zusammenstellung der Kosten je Sammelsystem (soweit in der Spalte „Kostenposition“ nicht anders vermerkt in EUR/1 Mio. Einwohner*a) .....	134
Tabelle 63:	Verwendete GWP-Faktoren (Netto-Emissionsfaktoren) .....	136
Tabelle 64:	Verwendete KEA-Faktoren .....	138
Tabelle 65:	Detailergebnis der Bilanzierung des Global Warming Potenzials im IST-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner [kg CO <sub>2</sub> -Äq.] .....	145
Tabelle 66:	Detailergebnis der Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes im IST-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner [GJ].....	147
Tabelle 67:	Erhöhung der Zuführung zur stofflichen Verwertung durch Anwendung des Standes der Technik.....	151

## Abkürzungsverzeichnis

<b>CO<sub>2</sub>-Äq.</b>	CO <sub>2</sub> -Äquivalent
<b>DC s-l</b>	Depotcontainer städtisch-ländlich
<b>EW</b>	Einwohner
<b>EBS</b>	Ersatzbrennstoff
<b>EPS</b>	Expandiertes Polystyrol
<b>FKN</b>	Fachverband Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel e.V. (wird häufig als Synonym und Abkürzung für Flüssigkeitskartonagen verwendet).
<b>GJ</b>	Gigajoule
<b>GWP</b>	Global Warming Potential
<b>HSI</b>	Hyper Spectral Imaging
<b>KEA</b>	Kumulierter Energieaufwand
<b>KEG</b>	Kunststoffe zur Energiegewinnung
<b>kg</b>	Kilogramm
<b>km</b>	Kilometer
<b>KRA</b>	Kumulierter Rohstoffaufwand
<b>KrWG</b>	Kreislaufwirtschaftsgesetz
<b>KS</b>	Kunststoff
<b>kWh</b>	Kilowattstunde
<b>LKW</b>	Lastkraftwagen
<b>LVP</b>	Leichtverpackungen
<b>Mg</b>	Megagramm („Tonne“)
<b>MGB</b>	Müllgroßbehälter
<b>MGB/l</b>	Gelbe Tonne ländlich
<b>MGB/s</b>	Gelbe Tonne städtisch
<b>MKS</b>	Mischkunststoffe
<b>MPO</b>	Gemischte Polyolefin-Artikel
<b>MSN</b>	Mengenstromnachweise
<b>NE-</b>	Nichteisen-
<b>NIR</b>	Nahinfrarot
<b>NStNVP</b>	Nichtstoffgleiche Nichtverpackungen
<b>NV</b>	Nichtverpackung/Nichtverpackungen
<b>PE</b>	Polyethylen
<b>PET</b>	Polyethylenterephthalat
<b>P.km</b>	Personenkilometer

<b>PKW</b>	Personenkraftwagen
<b>PO</b>	Polyolefine
<b>PP</b>	Polypropylen
<b>PPK</b>	Papier, Pappe, Karton
<b>PS</b>	Polystyrol
<b>PVC</b>	Polyvinylchlorid
<b>Sack/l</b>	Gelber Sack ländlich
<b>StNVP</b>	stoffgleiche Nichtverpackungen
<b>t.km</b>	Tonnenkilometer
<b>Verb.</b>	Verbund
<b>VerpackG</b>	Verpackungsgesetz
<b>VerpackV</b>	Verpackungsverordnung
<b>VP</b>	Verpackungen
<b>ULB</b>	Umleerbehälter
<b>WB</b>	Weißblech
<b>WSack/l</b>	Wertstoffsack ländlich
<b>WST/l</b>	Wertstofftonne ländlich
<b>WST/s</b>	Wertstofftonne städtisch
<b>WSTH</b>	Wertstoffhof

## Glossar

<b>Ausbringen</b>	Aussortierter Anteil einer Stofffraktion in der Sortieranlage in Bezug auf die in einem Sammelgemisch enthaltene Gesamtmasse dieser Fraktion
<b>Ausbeute</b>	Verhältnis Produkt(e)/Edukte, zumeist angegeben in Prozent
<b>Bringsystem</b>	Sammelsystem für Abfälle und Wertstoffe aus Haushalten, bei dem die Abfälle/Wertstoffe individuell zu zentralen Behälter-Standplätzen außerhalb des Grundstücks transportiert werden
<b>Entleerfahrtzeit</b>	Benötigte Zeit für die Entleerung des Sammelfahrzeugs an der Umschlag-/Verwertungsanlage, gemessen von der Abfahrt vom letzten gekippten MGB bis zur Ankunft am ersten zu kippenden MGB bzw. bis zur Ankunft auf dem Betriebshof
<b>Anfall</b>	Abfallentstehung im Haushalt
<b>Erfassung</b>	Bezeichnung des Prozesses von der Abfallentstehung in den Haushalten bis zur Bereitstellung der LVP für die Sammlung an der Grundstücksgrenze
<b>Fehlwürfe</b>	Stofffremde Materialien in der LVP-Erfassungsmenge
<b>Gesamterfassungsmenge an Verkaufsverpackungen</b>	Summe der beim privaten Endverbraucher erfassten Verkaufsverpackungen aus PPK, Glas, Kunststoff, Aluminium, Weißblech und Verbunde und anderen Abfällen/Wertstoffen, die in das Erfassungssystem eingebracht werden
<b>Glas-Erfassung</b>	Erfassung der Verkaufsverpackungen aus Glas (Hohl- und Behälterglas) i. d. R. über Depotcontainersammlung
<b>Holsystem</b>	Sammelsystem für Abfälle und Wertstoffe aus Haushalten, bei dem die Abfälle/Wertstoffe auf dem Grundstück oder an der Grundstücksgrenze zur Sammlung bereitgestellt werden
<b>Ladezeit</b>	Zeit, die das Sammelfahrzeug am Ladepunkt zum Zwecke des Ladens steht
<b>Leichtverpackungen (LVP)</b>	Verpackungen aus Kunststoff, Aluminium, Weißblech und Verbunden
<b>LVP-Erfassungsmenge = LVP Material</b>	Summe der über das LVP-Erfassungssystem gesammelten Abfälle (LVP + StNVP + NStNVP)
<b>LVP-Erfassungssystem</b>	Für die Erfassung von Leichtverpackungen vorgesehene Sammelsystem (Gelber Sack, Gelbe Tonne, Wertstoffhof, Depotcontainer und Sondersammelsysteme)
<b>Nichtstoffgleiche Nichtverpackung (NStNVP)</b>	Stofffremde Materialien, die die Verwertung der LVP nicht behindern
<b>PPK-Erfassung</b>	Erfassung des kommunalen Altpapiers einschließlich der enthaltenen Verkaufsverpackungen aus Papier/Pappe/ Kartonagen (PPK)
<b>Produkt</b>	Ein (vor-)definiertes Erzeugnis, das aus einem technischen Verarbeitungsprozess entsteht
<b>Rezyklat</b>	Produkt eines werkstofflichen Verwertungsprozesses; Recyclingprodukt
<b>Sammelgut</b>	Im Holsystem eingesammeltes Material und von Bürgern zum Wert-

	stoffhof gebrachtes Material (siehe Abbildung 19)
<b>Sammelzeit</b>	Zeit, in der die eigentliche Sammlung erfolgt; Summe aus Ladezeit und Zwischenfahrtzeit
<b>Sammlung</b>	Bezeichnung der Prozesse von der Abholung (Holsystem)/Benutzertransport (Bringsystem) bis zur Umladeanlage bzw. direkt zur Sortieranlage
<b>Sonderzeit</b>	sonstige Zeiten (Arbeitsorganisation, tägliche Wartung/Reinigung, Betanken)
<b>Sortiergut</b>	Inputmaterial für die Sortieranlage (siehe Abbildung 19)
<b>Sortierprodukt</b>	Spezifikationsgerechter Sortieranlagenoutput (siehe Abbildung 19)
<b>Stofffremde Materialien</b>	Materialien, die aufgrund der Sammelvorgaben nicht in dem LVP-Erfassungssystem gesammelt werden sollen (z. B. Papier, Holz, Keramik)
<b>Stoffgleiche Nichtverpackungen (StNVP)</b>	Sammelbegriff für Wertstoffe, die die gleiche Materialart wie die Leichtverpackungen aufweisen und in gleicher Art und Weise verwertet werden (es entstehen keine negativen technisch-ökologischen Effekte bei gemeinsamer Sortierung und Verwertung).
<b>Störstoff</b>	Stofffremde Materialien in der Erfassungsmenge, die die Verwertung der LVP erschweren oder verhindern (z. B. Windeln, Bioabfall etc.)
<b>Tourzeit</b>	Zeit vom Start auf dem Betriebshof bis zum Tourende auf dem Betriebshof abzüglich der Pausenzeit
<b>Transport</b>	Prozess der Beförderung der LVP von der Umladeanlage zur Sortieranlage
<b>Umfahrtzeit</b>	Zeitabschnitte <ul style="list-style-type: none"> <li>- Betriebshof-Ladegebiet,</li> <li>- Betriebshof-Umschlag-/Verwertungsanlage,</li> <li>- Umschlag-/Verwertungsanlage -Ladegebiet</li> </ul> sowie alle Fahrtzeiten zwischen Ladepunkten >5 min
<b>Vertragsgebiet</b>	Von den dualen Systemen festgelegte organisatorische und flächige Einheiten, für die die Sammelleistung ausgeschrieben wird; häufig identisch mit den Gebieten der öffentlich rechtlichen Entsorgungsträger; Vertragsgebiete verfügen in der Regel über ein einheitliches Sammelsystem
<b>Zwischenfahrtzeit</b>	Fahrtzeit zwischen den einzelnen Ladepunkten im Sammelgebiet < 5 min

## Verzeichnis der standardisierten LVP-Outputfraktionen

Fraktionsnummer	Bezeichnung	Definition	Beispiele
310	Folie	Verpackungsabfälle aus Kunststofffolie	Beutel, Tragetaschen
320	Gemischte Kunststoff-Flaschen	Hohlkörperverpackungen aus Kunststoff <5 l.	Getränke-, Waschmittel-, Haushaltsreinigerflaschen
322	Kunststoff-hohlkörper	Hohlkörperverpackungen aus Kunststoff >5 l.	Eimer, Kanister
323	Gemischte Polyolefinartikel (MPO)	Kunststoffverpackungsabfälle aus PE und PP	Becher, Schalen
324	PP	formstabile Kunststoffverpackungsabfälle aus Polypropylen	Becher, Schalen
328-	Misch-PET	formstabile Kunststoffverpackungsabfälle aus Polyethylenterephthalat. <5 l	Flaschen transparent: Spülmittelflaschen, Getränkeflaschen Sonst. PET-Artikel: Becher, Schalen
329	PE	formstabile Kunststoffverpackungsabfälle aus Polyethylen <5l	Flaschen, Schalen
331	PS	Kunststoffverpackungsabfälle aus Polystyrol <5 l	Becher, Schalen
340	EPS	formstabile Kunststoffverpackungsabfälle aus expandiertem Polystyrol	Schutzmaterial aus expandiertem Polystyrol (z. B. zum Schutz von Monitoren und Fernsehern)
350	Mischkunststoffe	formstabile Kunststoffverpackungsabfälle aus PET, PP, PS, PET	Becher, Schalen
361	MPO-Beiprodukt (KEG)	Kunststoffhaltige Verpackungsabfälle	Getränke-, Konservendosen, Eimer
410/412	Weißblech	Eisenhaltige Verpackungsabfälle (verzinkt) einschl. Weißblechverbunden	Konservendosen
420	Aluminium	Aluminium- und Aluminiumhaltige Verpackungsabfälle	Schalen, Folie, Aluminiumverbunde
510	Flüssigkeitskartons	Verpackungsabfälle aus Kartonverbundmaterialien i.d.R. Verbund aus Papier/Polyethylen/Aluminium, teilweise auch ohne Aluminium	Milch- und Saftkartons
550	PPK aus LVP	Verpackungsabfälle aus Papier, Pappe oder Karton sowie Verbunde auf PPK Basis	Faltschachteln
831	Sortierreste	Durch den Sortierprozess gegangenes Material, das keiner Sortierfraktion zugeordnet werden konnte	Mineralik, organisches Material

## Zusammenfassung

### Veranlassung und Datenmodell

Das Umweltbundesamt hat die unterschiedlichen Sammelsysteme für Leichtverpackungen (LVP) und stoffgleichen Nichtverpackungen (StNVP) im vorliegenden Forschungsprojekt hinsichtlich ihrer Effizienz analysieren und vergleichen lassen. Hierbei standen insbesondere die Kriterien Quantität (Erfassungsmenge) und Qualität (Zusammensetzung der erfassten Wertstoffe) im Vordergrund. Ziele des Vorhabens waren die Entwicklung einer Bewertungsmethodik, die Ableitung von verschiedenen Kennzahlen sowie Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Effizienz der Sammelsysteme hinsichtlich der zu bewertenden Kennzahlen. Die Bewertung erfolgt auf Basis der Mengen, Kosten und der Umweltauswirkungen anhand des GWP und KEA.

Der Bilanzraum umfasst die Teilprozesse

- ▶ Individualtransport,
- ▶ Sammlung,
- ▶ Transport,
- ▶ Sortierung und
- ▶ Verwertung.

Folgende Sammelsysteme wurden zum Vergleich ausgewählt:

- ▶ Wertstofftonne städtisch (mit StNVP)
- ▶ Wertstofftonne ländlich (mit StNVP)
- ▶ Gelbe Tonne städtisch (ohne StNVP)
- ▶ Gelbe Tonne ländlich (ohne StNVP)
- ▶ Gelber Sack ländlich (ohne StNVP)
- ▶ Wertstoffsack ländlich (mit StNVP)
- ▶ Depotcontainer (ohne StNVP)
- ▶ Wertstoffhof (ohne StNVP) als Hauptsammelsystem

Diese Sammelsysteme bilden als Haupt- oder Nebensammelsysteme nahezu 100 % der in Deutschland genutzten Sammelsysteme für LVP.

Am häufigsten kommen die Holsysteme Gelbe Tonne als das am weitesten verbreitete LVP-Sammelsystem und der Gelbe Sack zur Anwendung. In den Sammelsystemen Wertstofftonne bzw. Wertstoffsack werden in den genannten Systemen zusätzlich StNVP erfasst. Diese Systeme werden gegenwärtig nur in wenigen Vertragsgebieten genutzt.

Als Bringsysteme werden die Sammelsysteme Depotcontainer und Wertstoffhof betrachtet. Mit Ausnahme des Wertstoffhofes erfolgt die Sammlung als Mehrkomponentengemisch.

Auf Basis der Abstimmungsvereinbarungen der dualen Systeme mit den beauftragten Entsorgern und den Erfassungsmengen der Vertragsgebiete erfolgt die Festlegung der Randbedingungen der Sammelsysteme. Dies schließt insbesondere die Parameter

- ▶ Behältercharakteristik und Bestand,
- ▶ Sammeltturnus,
- ▶ Aufkommen und
- ▶ Standplatzdichte

ein.

Als Behältersystem findet in den Holsystemen das MGB-System mit Behältergrößen von 120-1.100 l bzw. Säcke mit einem Volumen von 90 l Anwendung. Für die Bringsysteme werden je nach Sammel-  
fraktion Behälter mit einem Fassungsvermögen von 3 bis 5 m<sup>3</sup> eingesetzt.

Die Bestimmung der Zusammensetzung der LVP für die einzelnen Sammelsysteme erfolgte auf Basis von Sortieranalysen.

Der Teilprozess des Individualtransportes, hat bei den Bringsystemen Depotcontainer und Wertstoffhof eine hohe Relevanz und wird deshalb mitbetrachtet. Im Datenmodell wurden nur die Individualanfahrten per PKW berücksichtigt, da sich diese erheblich auf den Umweltvergleich der Sammelsysteme auswirken. Wesentlich sind dafür die Masse je Anliefervorgang, die Anlieferstrecke und der Anteil der Fahrten zum Zwecke der LVP-Anlieferung. Vornehmliche Datengrundlage bilden Literaturwerte denen eine Befragung zugrunde lag.

Für die tiefere Untersuchung der ökonomischen Aspekte wurde der Teilprozess der Sammlung mit der Methode der Zerlegung einer Sammeltour in charakteristische Zeitabschnitte untersucht. Die Werte für die einzelnen charakteristischen Zeitabschnitte entstammen realen Untersuchungen von INTECUS und wurden unter Dokumentation der Randbedingungen des jeweiligen Untersuchungsgebietes durch Tourenbegleitungen und/oder durch Tracking bzw. Registrierung von logistisch relevanten Ereignissen aufgenommen. Die Mittelwerte der charakteristischen Zeitabschnitte bilden die logistischen Kennzahlen.

Für den Teilprozess Transport wurden die relevanten Kennzahlen (Anteil zu transportierender LVP, einfache Transportentfernung, mittlere Zuladung, Anteil Rückfracht, Be-/Entladezeit) mittels Expertenbefragung erhoben. Als Experten wurden Mitarbeiter von mehreren dualen Systemen interviewt, die mit den Transportvorgängen vertraut sind.

Als Grundlage für die Kalkulation der Kosten der Teilprozesse Individualtransport, Sammlung und Transport wurden Fahrzeugkosten je km (Individualtransport), Behälterkosten und Fahrzeugkosten für Sammlung und Transport herangezogen. Die Kostensätze sind INTECUS-Projekten entnommen.

Neben den Kosten wurden die ökologischen Auswirkungen der unterschiedlichen Sammelsysteme auf Basis des Global Warming Potentials (GWP) und des Kumulierten Energieaufwandes (KEA) untersucht.

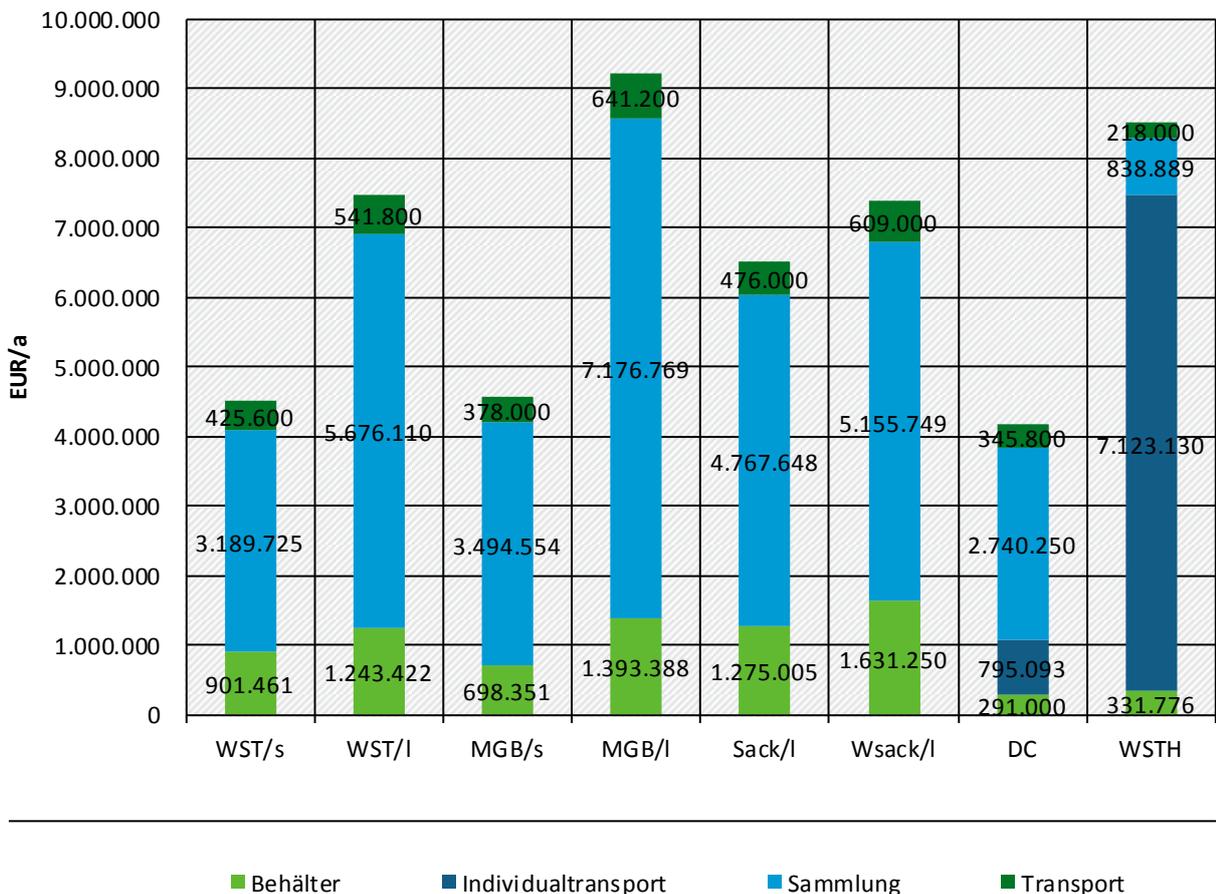
### **Systemvergleich für die Teilprozesse Individualtransport, Sammlung und Transport**

Der Kostenvergleich der Teilprozesse Sammlung und Transport für die Holsysteme zeigt, dass die Sammelkosten den mit Abstand größten Anteil erbringen, gefolgt von den Behälterkosten. Den geringsten Anteil machen die Transportkosten aus (siehe nachfolgende Abbildung 1).

Abbildung 1: Jährliche Logistikkosten bezogen auf 1 Mio. Einwohner

### Jährliche Logistikkosten

bezogen auf 1 Mio. Einwohner



Quelle: Eigene Darstellung

Anders sieht es bei den Bringsystemen aus. Einwohnerspezifisch entfallen im Sammelsystem Wertstoffhof über 80 % der Logistikkosten auf den Individualtransport. Diese Kosten finden sich bei den Bringsystemen nicht in den kalkulatorischen Kosten der Systembetreiber oder der Abfallwirtschaftsbetriebe wieder und werden somit zusätzlich zu den Lizenzentgelten der dualen Systeme auf die Endverbraucher übertragen. Die anderen Kostenbestandteile liegen absolut unter denen der Holsysteme.

Der Anteil der bedeutendsten Kostenbestandteile Sammlung und Individualtransport für das Sammelsystem Depotcontainer liegt zwischen dem der Holsysteme und dem Sammelsystem Wertstoffhof.

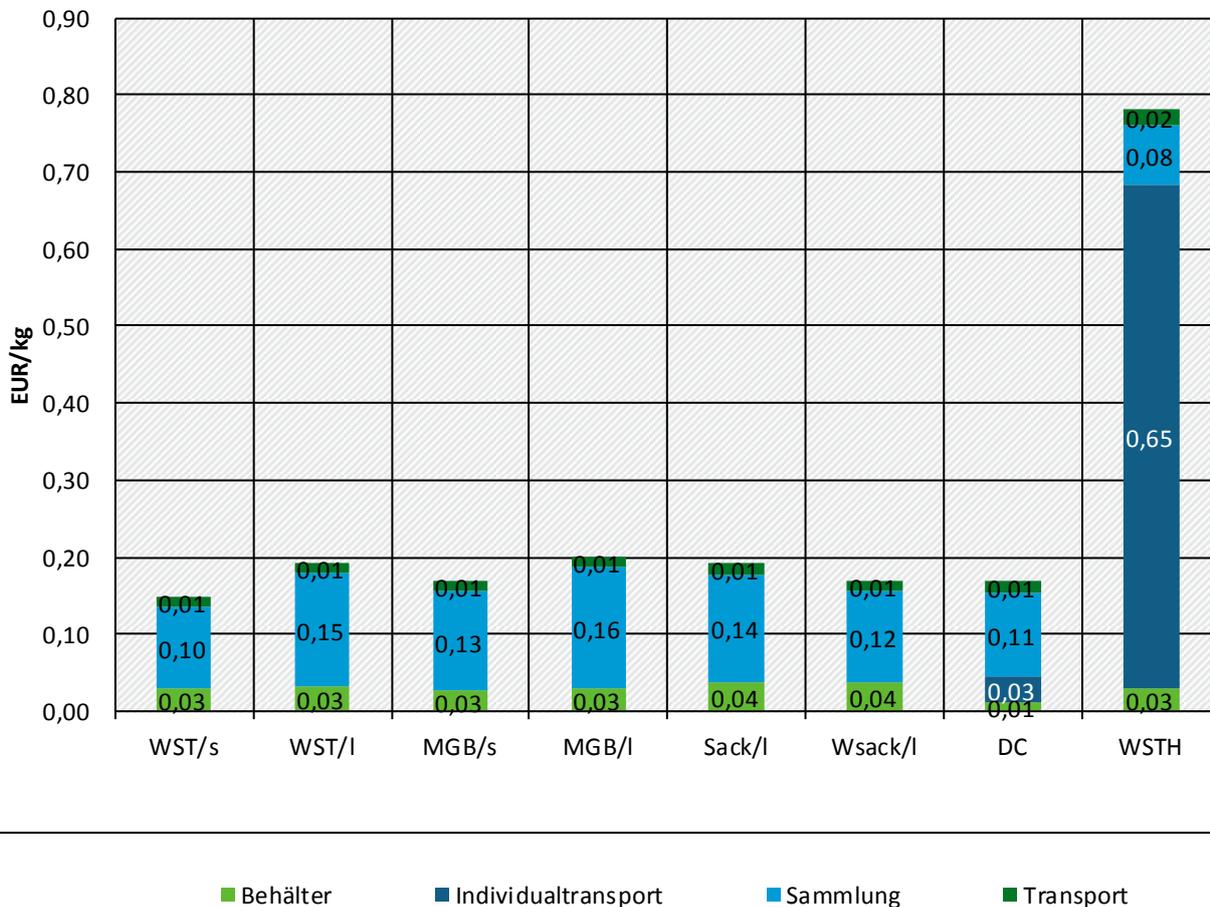
Die einwohnerspezifischen Logistikkosten liegen je nach Sammelsystem zwischen 4,2 Mio. EUR und 9,2 Mio. EUR pro 1 Mio. Einwohner bzw. 4,2 EUR/(EW\*a) und 9,2 EUR/(EW\*a). Die höchsten einwohnerspezifischen Kosten entfallen auf das Sammelsystem Gelbe Tonne ländlich, gefolgt vom Sammelsystem Wertstoffhof.

Setzt man die Logistikkosten hingegen ins Verhältnis zur erfassten Masse ändert sich das Bild deutlich. Die massespezifischen Gesamtkosten liegen je nach Sammelsystem zwischen 0,15 und 0,78 EUR/kg (siehe nachfolgende Abbildung 2).

Abbildung 2: Logistikkosten bezogen auf 1 kg anfallende LVP-Masse

### Logistikkosten

bezogen auf 1 kg anfallende LVP-Masse



Quelle: Eigene Darstellung

Die höchsten massespezifischen Logistikkosten fallen für das Sammelsystem Wertstoffhof an. Dabei liegen die Kostenbestandteile Behälter, Sammlung und Transport im Bereich oder unterhalb der Kosten für die Holsysteme. Mit Abstand größter Kostenbestandteil ist der Individualtransport.

Die massespezifischen Logistikkosten liegen für die Holsysteme in etwa auf demselben Niveau. Die geringsten Logistikkosten fallen für das Sammelsystem Wertstofftonne städtisch an bedingt durch die relativ geringe Anzahl von anzufahrenden Standplätzen sowie den höchsten Anteil an für die Sammlung besonders effizienten MGB 1.100 im Behälterbestand. Die Erfassung von LVP gemeinsam mit stoffgleichen Nichtverpackungen in einem vergleichbaren Sammelsystem schneidet hingegen bezogen auf die Sammelmasse immer kostengünstiger ab. So ist die Wertstofftonne städtisch günstiger als die Gelbe Tonne städtisch, die Wertstofftonne ländlich günstiger als die Gelbe Tonne ländlich und der Wertstoffsack ländlich günstiger als der Gelbe Sack ländlich.

Beim Vergleich der ländlichen Sammelsysteme fallen die geringsten massespezifischen Logistikkosten für das Sammelsystem Wertstoffsack ländlich an.

Die massespezifischen Logistikkosten für das Sammelsystem Depotcontainer liegen im Bereich der Kosten für die Holsysteme, wobei die Einsparungen durch die geringeren Behälterkosten in etwa den Mehr-aufwendungen durch den Individualtransport entsprechen.

Die Betrachtung des Optimierungspotenzials der Sammelsysteme erfolgt anhand der Optionen

- ▶ Einfluss der Miterfassung der StNVP,
- ▶ Einfluss der Erfassung weiterer Wertstoffe auf dem Wertstoffhof und
- ▶ Einfluss der Streckung des Sammelturnus.

Durch die Miterfassung der StNVP im Vergleich zu den Sammelsystemen ohne Miterfassung der StNVP ist eine geringfügige Verringerung der massespezifischen Kosten zwischen 4 % (Wertstofftonne ländlich im Vergleich zur Gelben Tonne ländlich) und 12 % (Wertstofftonne städtisch im Vergleich zur Gelben Tonne städtisch) zu erwarten. Hauptgrund ist der Einsatz tendenziell größerer Sammelbehälter bzw. die bessere Auslastung vorhandener Behälter.

Für das vorliegende Datenmodell ist das Sammelsystem Wertstoffhof aufgrund der hohen Kosten für den Individualtransport massespezifisch deutlich teurer als die anderen Sammelsysteme. Grund dafür ist vor allem die Annahme, dass 94 % der Anlieferungen auf dem Wertstoffhof den Leichtverpackungen zuzuordnen sind. Die Erfassung weiterer Wertstoffe auf dem Wertstoffhof würde den Anteil der Anlieferfahrten, die den LVP zuzurechnen sind, um 39 %, verringern. Auch das variierte Sammelsystem würde noch immer die mit Abstand höchsten massespezifischen Logistikkosten verursachen.

Das Optimierungspotenzial bei Streckung des Sammelturnus liegt vor allem in einer erhöhten Erfassungsmenge pro Standplatz und Turnus. Für die Variation des Sammelturnus im Sammelsystem Wertstofftonne ländlich wurde bei Streckung des Sammelturnus für MGB 1.100 von 1,9 zu 2 Wochen und für MGB 120-240 von 2,9 auf 4 Wochen ein Optimierungspotenzial von 7 % berechnet. Für die städtischen Sammelsysteme wird das Optimierungspotenzial voraussichtlich etwas höher ausfallen, da dort zwischen dem Ist-Turnus und der Variation größere Unterschiede bestehen und mit dem Wegfall der MGB 120 vor allem mit dem verstärkten Einsatz der logistisch effizienteren MGB 1.100 zu rechnen ist.

### **Szenarienvergleich für die Teilprozesse Sortierung und Verwertung**

Die Betrachtung des Teilschrittes der LVP-Sortierung und anschließenden Verwertung erfolgt anhand von zwei Szenarien:

1. Das IST-Szenario bewertet den aktuellen Zustand der Sortierung, die zu etwa 50 % in Anlagen erfolgt, die mit >12 NIR-Trennern im Wesentlichen dem Stand der Technik entsprechen. Die übrigen Anlagen verfügen über keine oder nur deutlich geringere Trennstufen der Kunststoffartentrennung. Die verwendeten Ausbringungsraten basieren insgesamt auf den realen Ergebnissen der Mengenstromauswertungen aller dualen Systeme 2014.
2. Das ZUKUNFT-Szenario basiert auf der Annahme einer Sortiertechnik in Deutschland, die zu 100 % dem Stand der Technik entspricht.

Beim Vergleich der Szenarien zur Abschätzung von Potenzialen durch umfassend verbesserte Sortiertechnik ist grundsätzlich einschränkend zu beachten, dass

1. erhebliche Unterschiede beim Umfang der Datenbasis bestehen (2 untersuchte Vertragsgebiete beim Wertstoffsack ländlich bis 25 Vertragsgebiete beim Gelben Sack ländlich),
2. nicht zwingend in den herangezogenen Sortieranalysen die gleiche Sortiertiefen/-kriterien angewendet wurden,
3. einer Sortieranlage i.d.R. nicht das homogene Sammelgut aus einem Sammelsystem, sondern die Mischung verschiedener Vertragsgebiete und damit Sammelsysteme zugeführt wird; durch die Betrachtung einer hypothetischen „Musterzusammensetzung“ wurde dieser Umstand berücksichtigt
4. ein Vergleich zwischen Holsystemen und Bringsystemen (Depotcontainer, Wertstoffhöfe) nur eingeschränkt möglich ist, zumal Wertstoffhöfe in der Regel ohne Sortieranlagen die Verwerter direkt beliefern.

Ein Vergleich der Sammelsysteme und die Bewertung der Ergebnisse werden anhand technischer, wirtschaftlicher und rechtlicher Einflussfaktoren vorgenommen.

Hierzu werden die vorliegenden Sortiererergebnisse aus den einzelnen Sammelsystemen jeweils als gegebener Anlageninput definiert; im Falle der „Musterzusammensetzung“ als anteilige Mischung aus verschiedenen Vertragsgebieten bzw. Sammelsystemen.

Ausgangslage für das Jahr 2014 ist eine Gesamtmenge von 2.405.093 Mg LVP, die erfasst und sortiert wurden. Die Auswertung der Mengenstromnachweise aller dualen Systeme ergibt einen sortierten Anteil von 47 % Kunststoffen und 32,1 % Sortierresten und EBS-Vorprodukten incl. MPO-Beiprodukten, die energetisch verwertet werden. Bedenkt man weiterhin, dass von den Kunststoffen zwar die sortenreinen Kunststoffarten mit regelmäßig  $\gg 90$  % werkstofflich verwertet werden, so ist dies bei nahezu 2/3 der im Sammelgut enthaltenen Kunststoffe, die als Mischkunststofffraktion (MKS) anfallen nur zu 5,3 % der Fall. Damit ergibt sich für den 47-%igen Kunststoffanteil im LVP nur eine werkstoffliche Verwertungsquote von 37,5 %.

Die Hauptpotenziale einer erhöhten werkstofflichen Verwertung liegen also zum einen in der Sortierfraktion der Mischkunststoffe (0350) und zum anderen in den werkstofflich verwertbaren Anteilen der Sortierreste, EBS-Vorprodukte und MPO-Beiprodukte, die bislang ebenso wie über 85 % der Mischkunststoffe energetisch verwertet werden.

Unter realistischer Annahme werkstofflich verwertbarer Anteile aus den genannten Fraktionen ergibt sich ein Potenzial von etwa 650.000 Mg oder 8,1 kg/(EW\*a) an theoretisch zusätzlich werkstofflich verwertbaren Kunststoffen und Kunststoffverbunden.

### **Potenziale zur Verbesserung der Rezyklatausbeuten oder Sortierproduktausbeuten**

Bei gleichbleibenden Sammelmengen, unveränderten Vorgaben für das Verpackungsdesign (Verbundwerkstoffe!) und nicht optimierten Sammel- und Erfassungssystemen sind die Möglichkeiten zur Potenzialhebung im Rahmen der Sortierung zu betrachten. Diese konzentrieren sich auf die Verbesserung der Sortiertechnik und der Produktqualität der Sortierprodukte.

Hierzu werden zunächst die einzelnen Bestandteile des LVP-Sammelgemisches in den einzelnen Sammelsystemen anhand der vorliegenden Analysen quantifiziert und zu Materialgruppen verdichtet.

Diese Inputfraktionen müssen mit den gängigen Sortierfraktionen (klassifiziert anhand der branchenüblichen DS-Spezifikationen) in Einklang gebracht werden. Hierzu wird zweistufig vorgegangen: zunächst werden die Inputfraktionen anhand der tatsächlichen Sortiererergebnisse des MSN 2014 zugeordnet und dann in Kenntnis der Sortiertechnik eine Projizierung der Sortieranalysen des Inputs auf die Zielfraktion des Sortieranlagenoutputs vorgenommen.

Die Einzelergebnisse sind im Text jeweils exemplarisch anhand der Ergebnisse eines Sammelsystems erläutert; die Einzelauswertungen finden sich für alle Sammelsysteme in beiden Szenarien in den umfangreichen Exceltabellen im Anhang des Gutachtens.

Die beschriebene Projizierung der tatsächlichen Zuordnung des Wareneingangs auf den Warenausgang der Sortierung verschiebt z. B. die Folienfraktion <DIN A4 im Zukunftsmodell um 5 % aus den energetischen Fraktionen 361/365/830 in die Mischkunststofffraktion 0350. Dies hat im Sinne einer Erhöhung der werkstofflichen Quote nur dann Erfolg, wenn Mischkunststoffe verstärkt werkstofflich verwertet werden. Für Folien >DIN A4 stellt sich die Situation anders dar. Bei vollständiger Sortierung nach dem Stand der Technik erhöht sich die PE-Fraktion 0310 um 5 %, die Mischkunststoffe reduzieren sich aber um 13 %. In der Bilanz des Modells wird jedoch unterstellt, dass neben 90 % 0310 noch 10 % Reste in 0830 gelangen. Insgesamt ergibt sich für alle Kunststofffraktionen eine Verschiebung zu den sortenreinen Fraktionen, die zu etwa 90-98 % werkstofflich verwertet werden; die Sortierreste und EBS-Vorprodukte nehmen deutlich ab.

Die einzelnen Annahmen für die Projizierung/Verteilung im Zukunft-Modell werden im Gutachten erläutert.

Im nächsten Betrachtungsschritt werden die Sortierprodukte im Warenausgang der Sortieranlage wiederum anhand realer Mengenstromdaten mit den Zuführungsraten für eine werkstoffliche Verwertung multipliziert sowie mit den einzelnen Produktionsraten, so dass für die werkstofflichen Verwertungen eine Rezyklatausbeute zwischen 65 und 75 % resultiert. Für Weißblech ergibt sich 80 %, für Aluminium aufgrund des hohen Verbundanteils nur 38 %. Für Sortierreste und EBS wird 0 % werkstoffliche Verwertung angesetzt, das Potenzial dieser Fraktionen wird bereits über die projizierte Umverteilung der Materialanteile ausgeschöpft.

In der Folge dieser Berechnungen lässt sich für jedes Sammelsystem die Rezyklatausbeute in Mg oder prozentual zur Sammelmenge angeben. So ergibt sich für die Wertstofftonne städtisch bei einem Aufkommen von 30,4 kg/(EW\*a) eine Rezyklatausbeute von 6,6 kg/(EW\*a) im IST-Modell und 10,6 kg/(EW\*a) im ZUKUNFT-Modell, mithin eine Steigerung der Rezyklatmenge um über 60 %.

### **Qualitätsvorgaben und nicht erfasste Sammelmengen im Systemvergleich**

Einen wesentlichen Einfluss auf die Rezyklatherstellung bzw. werkstoffliche Verwertung stellen die Vorgaben zur Sortenreinheit bzw. die maximalen Störstoffanteile der Sortierprodukte dar.

Für reine Kunststofffraktionen werden i.d.R. bis zu 6 % Fremd-/Störstoffe akzeptiert, für Mischkunststoffe oder FKN und sonstige Verbunde sowie EBS-Vorprodukt sogar 10 %. Bis zu 15 % sind für MPO und bis zu 20 % für formstabile Kunststoffe erlaubt. Eine Ausnahme stellt Weißblech dar, für das eine Abweisungsgrenze von 67 % gilt, abschlagsfrei muss der Metallgehalt mindestens 82 % betragen.

Insgesamt bestehen bei den Qualitätsvorgaben noch deutliche Spielräume.

Bei einem Vergleich der betrachteten Sammelsysteme fällt auf, dass diese untereinander deutlich in den Erfassungsmengen voneinander abweichen und eine Bandbreite von 10,9 kg/(EW\*a) (Wertstoffhof) über 24,7 kg/(EW\*a) (Depotcontainer), beide ohne stoffgleiche Nichtverpackungen, bis hin zu 45,8 kg/(EW\*a) (Gelbe Tonne ländlich) aufweisen. Bei der Interpretation der Unterschiede der einzelnen Holsysteme ist aber Vorsicht geboten, insbesondere wegen der unterschiedlichen Datenbasis, d.h. Anzahl der zum jeweiligen Sammelsystem erhobenen Untersuchungen. Setzt man das System mit der höchsten Erfassungsmenge als Benchmark, so lassen sich aus der Differenz gegenüber diesem Maximalwert ein Potenzial nicht erfasster Sammelmengen und damit ein Wertstoffpotenzial ermitteln. Dieses „Potenzial“ wird als vorhanden, aber in den Systemen mit geringeren Erfassungsmengen als den Benchmark als nicht erfasst angesehen. Damit belasten diese Differenzmengen offensichtlich andere Entsorgungssysteme wie die Resthausmüllentsorgung. Es wäre näher zu untersuchen, wie diese Mengen über ein optimiertes Sammelsystem erfasst werden könnten. Trotz aller Einschränkungen einer generellen Schlussfolgerung wird im Gutachten eine ergänzende Betrachtung der dadurch entstehenden Kosten vorgenommen. Dazu wurde eine Kostenbelastung in Höhe von 105 EUR/Mg für die Annahme einer Hausmüllverbrennung für die jeweiligen Differenzmengen gegenüber der Wertstoffsammlung eingerechnet.

### **Kostenanalyse der Teilprozesse Sortierung und Verwertung**

Es wird deutlich, dass der Kostenblock nicht getrennt gesammelter Wertstoffmengen (gemessen am Benchmark) nicht vernachlässigbar ist und volkswirtschaftlich insbesondere bei den geringen Erfassungsmengen bei den Bringsystemen eine hohe Kostenbelastung darstellt.

Die Sortierkosten wurden im Vergleich mit durchschnittlich 80 EUR/Mg angesetzt.

Kostenbestimmend sind für die sortierten Mengen insbesondere die stark schwankenden Marktpreise der Verwertung.

Unter Berücksichtigung der Kosten bzw. Erlöse für

- ▶ die Sortierung,
- ▶ die Verwertung,
- ▶ den Transport zum Verwerter und
- ▶ die Entsorgungskosten für „nicht getrennt erfasste Wertstoffe bzw. Sammelmengen“

ergibt sich ein Gesamtbild anhand aktueller Marktpreiserhebungen, das zu spezifischen Kosten für die der Verwertung zugeführten Sortierprodukte der betrachteten Sammelsysteme im IST-Szenario zwischen 0,44 EUR/kg (Wertstoffsack ländlich) und 0,97 EUR/kg (Gelbe Tonne städtisch) führt. Die Kosten für die Erfassung über Wertstoffhöfe mit 0,79 EUR/kg bestimmen sich bei 0 EUR/kg Sortierkosten vor allem aus dem hohen, nicht erfassten Sammelmengen gegenüber allen anderen Sammelsystemen und belasten die Kostenbilanz der Wertstoffhoferfassung.

Im ZUKUNFT-Szenario sinken die spezifischen Sortierproduktkosten wegen der höheren Wertstoffausbeute auf 0,30 bis 0,57 EUR/kg, allein beim Wertstoffhof hat dies keinen Einfluss, so dass bei diesem Sammelsystem die spezifischen Sortierproduktkosten mit 0,79 EUR/kg gleich bleiben.

Die vorgenommene Kostendarstellung für Sortierung und Verwertung erlaubt eine gute Differenzierung der Sammelsysteme:

- ▶ die Holsysteme liegen in den spezifischen Sortierproduktkosten ziemlich eng beieinander, Unterschiede sind vor allem auf die unterschiedlichen Fehlwurfanteile zurückzuführen (z. B. städtische Sammlungen über Behälter gegenüber ländlichen Sammlungen in Säcken; ländliche Erfassungssysteme weisen z. B. im ZUKUNFT-Szenario Rezyklatausbeuten zwischen 12,4 und 16,2 kg/(EW\*a) aus gegenüber städtischen Erfassungssystemen zwischen 9,3 und 10,6 kg/(EW\*a))
- ▶ der Depotcontainer als Bringsystem, aber mit anschließender Sortierung, zeigt ähnliche Rezyklatausbeuten wie die städtischen Holsysteme und liegt mit den spezifischen Kosten mit 0,47 EUR/kg beim ZUKUNFT-Szenario im Mittelfeld
- ▶ das reine Bringsystem Wertstoffhof verzichtet zwar i. d. R. auf eine Sortierung und liefert die getrennten Sammelfractionen direkt an die Verwerter (hohe Sortenreinheit), bei einer geringen Rezyklatausbeute von 4,8 kg/(EW\*a) ergeben sich aber durch die hohen Fehlmengen gegenüber anderen Sammelsystemen deutlich höhere spezifische Rezyklatkosten von 0,79 EUR/kg.

Während die Sortier-, Verwertungs- und Transportkosten unmittelbar in die Kalkulation der Beteiligungsentgelte der dualen Systeme eingehen, entstehen die Kosten für die Entsorgung nicht erfasster Wertstoffe beim Bürger (Hausmüllentsorgung) bzw. volkswirtschaftlich bei der Allgemeinheit (Littering, öffentliche Entsorgungskostenumlage). Daraus ließe sich die These ableiten, dass Wertstoffhöfe zur Kostenentlastung der dualen Systeme und der Produktverantwortung der Hersteller zu Lasten der Allgemeinheit beitragen.

### **Mischkunststofffraktion als Senke für werkstoffliche Verwertung**

Wie bereits dargestellt wurde, erweisen sich die Mischkunststoffe und die Sortierreste/EBS als die größten Potenzialträger für eine verbesserte Wertstoffausbeute zum Recycling.

Das Gutachten vergleicht deshalb konsequenterweise die beiden Szenarien insbesondere anhand dieser Sortierprodukte. Es zeigt sich, dass Mischkunststoffe (0350) im IST-Szenario in Mengen zwischen 5,3 kg/(EW\*a) (Gelbe Tonne städtisch) und 12,0 kg/(EW\*a) (Wertstoffsack ländlich) als Sortierprodukte erzeugt werden. Im ZUKUNFT-Szenario lässt sich durch konsequentes Aussortieren der folgenden Fraktionen die Mischkunststofffraktion 0350 auf 3,7 bis 8,5 kg/(EW\*a) aus den vorgenannten Sammelsystemen senken; dies entspricht einer Reduzierung der Mischkunststoffe um etwa 30 % durch Bereitstellung von

- ▶ Kunststoffeimern und -kanistern,
- ▶ Folien >DIN A4,
- ▶ PE,
- ▶ PP und
- ▶ PS

jeweils als Verpackungs- und Nicht-Verpackungsmaterial zur werkstofflichen Verwertung. Hinzu kommt noch eine 5 %ige Verschiebung von Folien <DIN A4 zur zusätzlichen werkstofflichen Verwertung. Damit sind aber auch die aktuellen Möglichkeiten für eine Generierung der sortenreinen Kunststoffe LDPE/HDPE, PP und PS ausgeschöpft. Eine weitere Generierung werkstofflich verwertbarer Anteile aus den MKS erfordert die Sortierung und Verwertung von Kunststoffarten, für die derzeit keine Nachfrage besteht wie Kunststoffverbunde und Misch-PET aus MKS.

Gerade der hohe Verbundmaterialanteil in den MKS lässt sich nur über Maßnahmen beim Verpackungsdesign („Recyclingfähigkeit“) reduzieren.

Zusammengefasst lassen sich also im ZUKUNFT-Szenario aus den Mischkunststoffen bis zu 30 % in Fraktionen für eine werkstoffliche Verwertung überführen und damit der energetischen Verwertung entziehen. Auch ist zu beachten, dass die derzeitige Verbunddefinition nur Materialverbindungen mit mehr als 5 Massen-% erfassen. Anteile unterhalb gelten nicht als Verbund und werden grundsätzlich mit der Hauptmaterialkomponente verwertet.

### **Werkstoffliche Potenziale in den „Restfraktionen“**

Als weiteres relevantes Wertstoffpotenzial befasst sich das Gutachten mit den „energetischen Fraktionen“ 0361 MPO-Beiprodukt, 0365 EBS-(Vor)produkt und 0830 Sortierrest.

Diese Fraktionen sollten grundsätzlich gemeinsam betrachtet werden, da eine Aufteilung in den Sortieranlagen relativ willkürlich erfolgt.

Die genannten „Restfraktionen“ kommen im IST-Szenario in den einzelnen Sammelsystemen (ohne Wertstoffhof) mit Anteilen von 7,8 bis 22,6 kg/(EW\*a), entsprechend 32 bis 49 % der Sammelmenge, vor. Im ZUKUNFT-Szenario lässt sich der Anteil dieser Fraktionen auf 6,4 bis 18 kg/(EW\*a), entsprechend 26 bis 39 % senken. Dies entspricht einer Reduzierung der Fraktionen 0361, 0365 und 0830 um 6 bis 10 Prozentpunkte. Gleichzeitig lässt sich die Rezyklatmenge – abhängig vom Sammelsystem – um zusätzliche 2,5 bis 5,1 kg/(EW\*a) erhöhen.

### **Bewertung der Gesamtkosten der einzelnen Sammelsysteme**

Zur kostenseitigen Bewertung der einzelnen Sammelsysteme wurden folgende Kosten innerhalb der Bilanzgrenzen betrachtet:

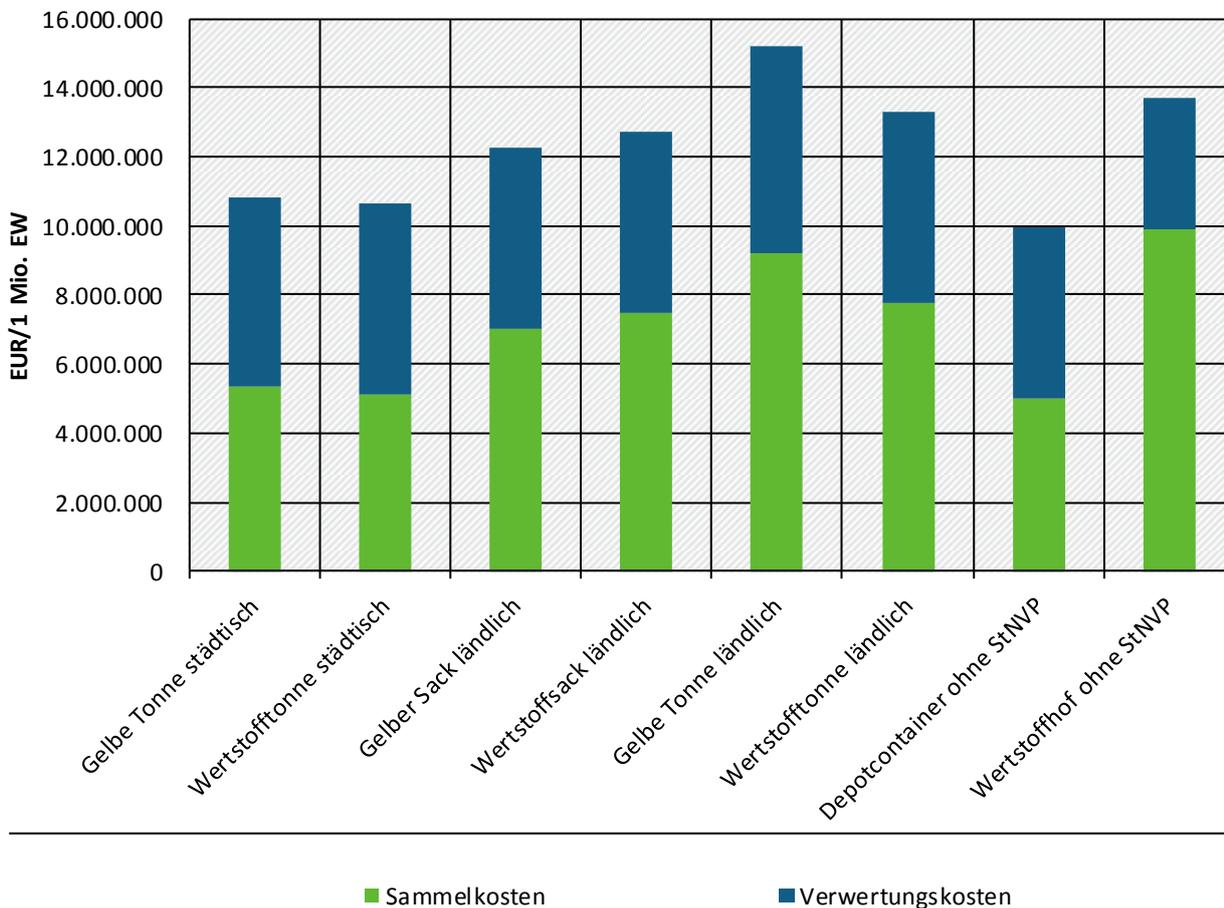
- ▶ Behälterkosten,
- ▶ Kosten des Individualtransports,
- ▶ Sammelkosten,
- ▶ Transportkosten zur Sortieranlage,
- ▶ Sortierkosten,
- ▶ Transportkosten zur Verwertungsanlage,
- ▶ Verwertungskosten bzw. -erlöse,
- ▶ Sammel- (40 EUR/Mg) und Entsorgungskosten (90 EUR/Mg) für nicht erfasste und mit dem Restabfall entsorgte LVP und StNVP.

Die Kosten für die einzelnen Sammelsysteme aufgeteilt in Sammelkosten und Verwertungskosten auf Basis von 1 Mio. Einwohner zeigt das Diagramm in Abbildung 3.

Abbildung 3: Gesamtkosten der einzelnen Sammelsysteme bezogen auf 1 Mio. Einwohner im IST-Szenario

**Gesamtkosten der einzelnen Sammelsysteme im IST-Szenario**

bezogen auf 1 Mio. Einwohner



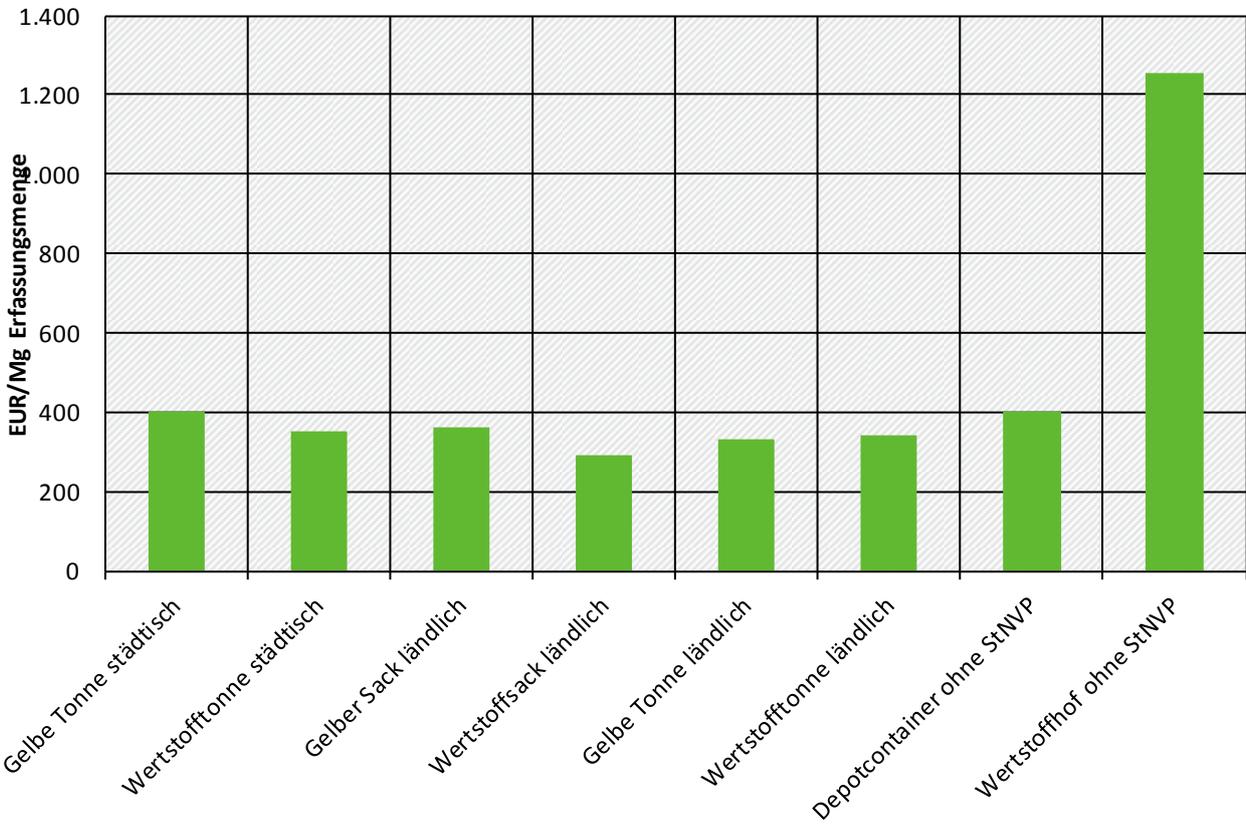
Quelle: Eigene Darstellung

Der Anteil der Sammelkosten an den Gesamtkosten schwankt zwischen 48 % (Sammelsystem „Wertstofftonne städtisch“) und 72 % (Sammelsystem „Wertstoffhof ohne StNVP“). Bei dieser Betrachtung werden die spezifischen Kosten durch die Sammelmenge beeinflusst. Um den Einfluss der Sammelmenge auszuschließen erfolgt in Abbildung 4 die Kostendarstellung bezogen auf die Sammelmenge.

Abbildung 4: Vergleich der spezifischen Systemkosten je Sammelsystem bezogen auf die Erfassungsmenge im IST-Szenario

**Vergleich der spezifischen Systemkosten je Sammelsystem im IST-Szenario**

bezogen auf die Erfassungsmenge



Quelle: Eigene Darstellung

Hier wird deutlich, dass der Wertstoffhof mit über 1.250 EUR/Mg erfasster LVP und StNVP das mit Abstand teuerste System ist. Grund dafür sind die hohen, durch die Haushalte aufzuwendenden Kosten für den Individualtransport zum Wertstoffhof, die sich auf 52 % der Gesamtkosten belaufen. Die Kosten der anderen Systeme liegen zwischen ca. 300 und 400 EUR/Mg erfasster LVP und StNVP.

**Bewertung der ökologischen Auswirkungen der betrachteten Sammelsysteme**

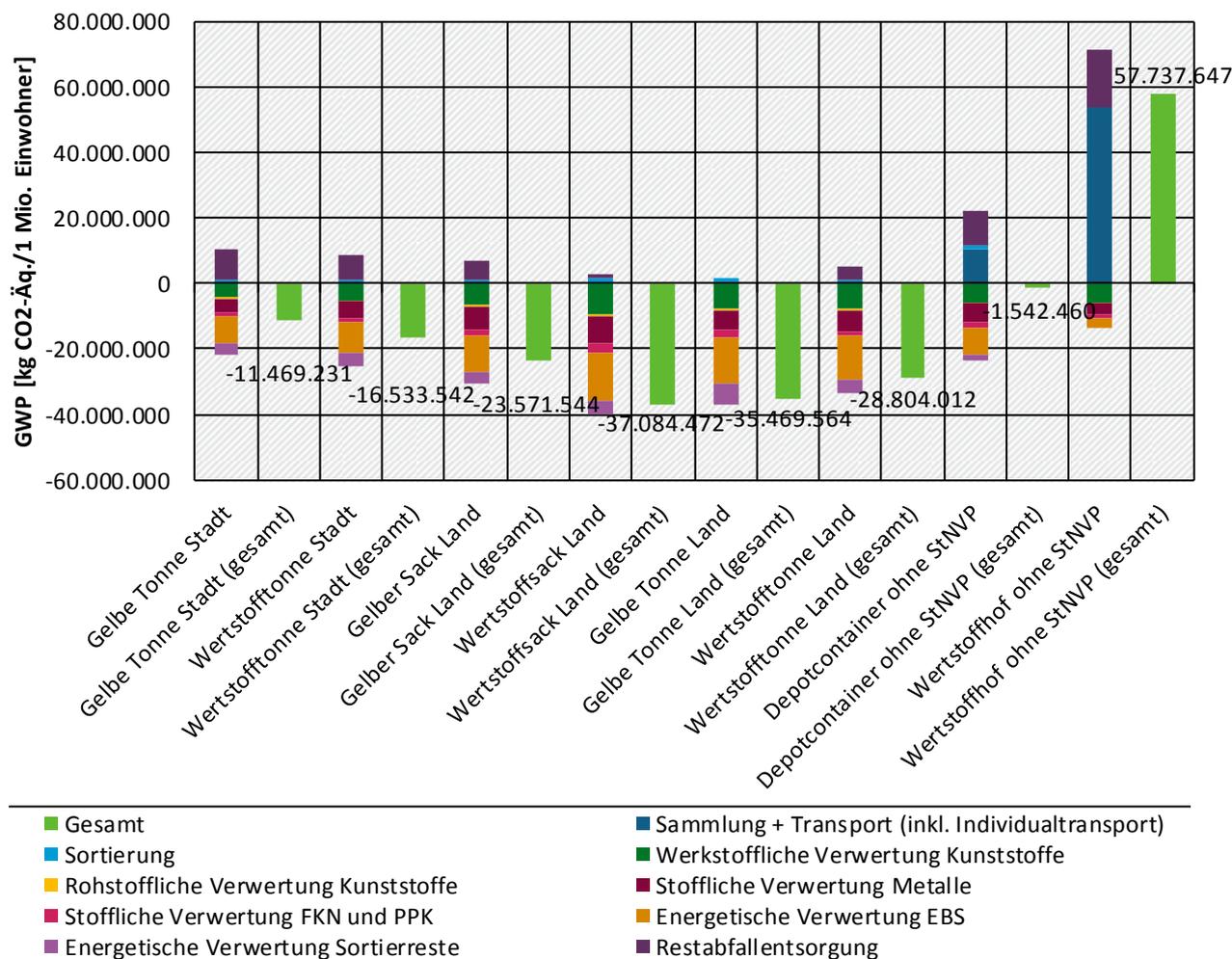
Die ökologischen Auswirkungen wurden mit Hilfe des Global Warming Potentials (GWP) sowie des Kumulierten Energieaufwandes (KEA) bewertet.

Das Diagramm in Abbildung 5 zeigt den Beitrag der einzelnen Sammelsysteme zum GWP bezogen auf 1 Mio. Einwohner.

Abbildung 5: Ergebnis der Bilanzierung des Global Warming Potenzials im IST-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner

### Ergebnis der Bilanzierung des Global Warming Potenzials im IST-Szenario

bezogen auf 1 Mio. Einwohner



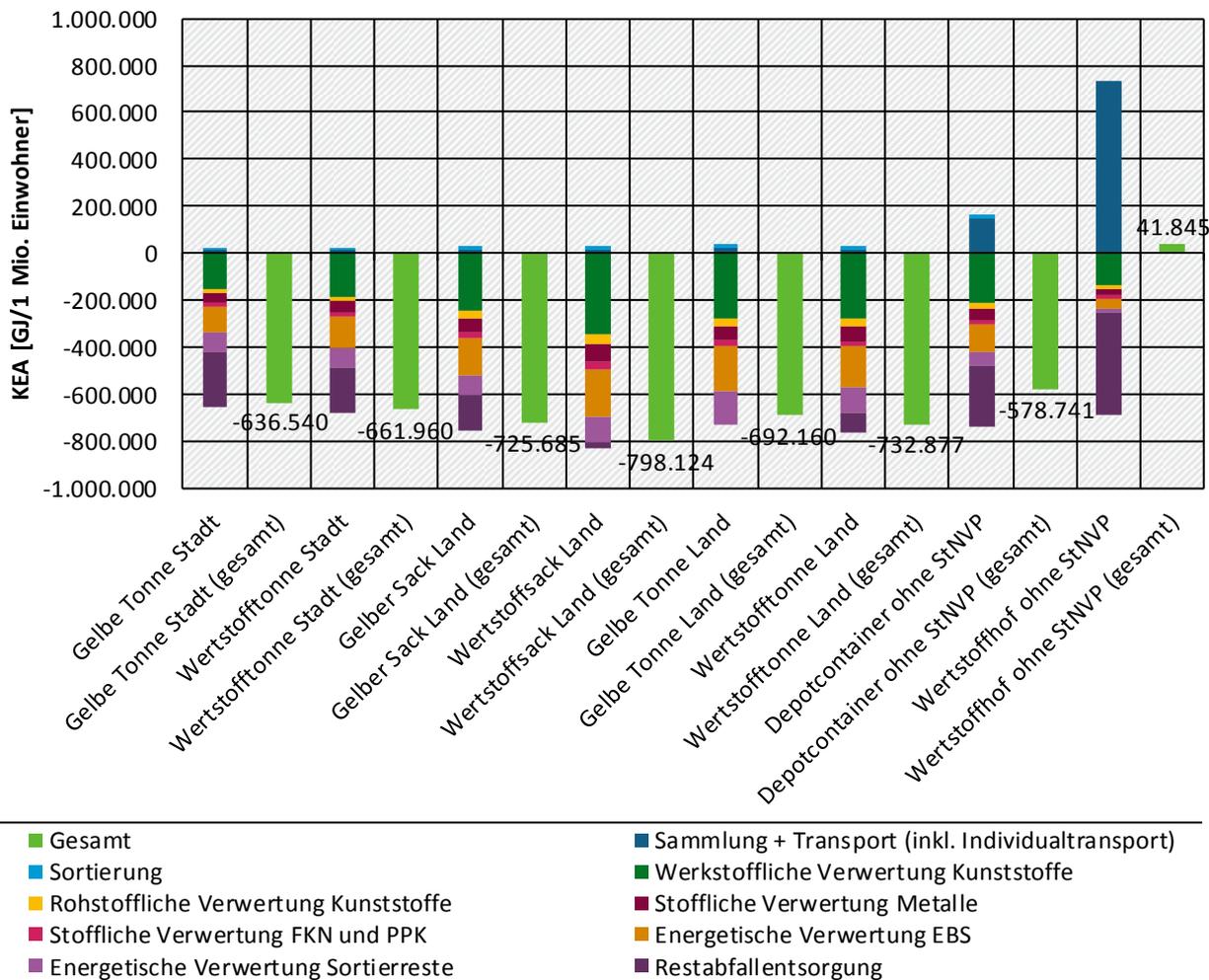
Es wird deutlich, dass der Wertstoffhof als einziges System eine klimarelevante Belastung erzeugt. Ausschlaggebend ist der Individualtransport, der den wesentlichen Beitrag zu diesem Ergebnis leistet. Hinzu kommen vergleichsweise geringe Entlastungen aufgrund der geringen Sammelmenge in diesem System. Eine ähnliche Situation findet sich, wenn auch in abgeschwächter Form und mit einer insgesamt entlastenden Wirkung beim Depotcontainersystem, welches lediglich einen sehr geringen Beitrag zum Klimaschutz leistet. Für die anderen Systeme ist kennzeichnend, dass die Systeme, die hohe Sammelmengen in hoher Qualität erzeugen (Wertstoffsack ländlich, Gelbe Tonne ländlich), das Klima am deutlichsten entlasten. An dieser Stelle wäre auch die „Wertstofftonne ländlich“ zu nennen, für welche die zur Verfügung stehende Datenbasis allerdings eine niedrige Sammelmenge ausgewiesen hat und welche deshalb geringere Bewertungen erhalten hat.

Das Ergebnis für den KEA zeigt das Diagramm in Abbildung 6.

Abbildung 6: Ergebnis der Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes im IST-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner

### Ergebnis der Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes im IST-Szenario

bezogen auf 1 Mio. Einwohner



Quelle: Eigene Darstellung

Auch hier wird der belastende Einfluss des Individualtransports deutlich, welcher dazu führt, dass auch hier das System Wertstoffhof am schlechtesten abschneidet. Im Falle des KEA erzeugt auch die Verwertung der nicht erfassten und mit dem Restabfall entsorgten LVP und StNVP in Müllverbrennungsanlagen eine Gutschrift. Aber auch hier wird deutlich, dass hohe Sammelmengen mit hoher Qualität über die werkstoffliche Verwertung hohe Energieeinsparungseffekte erzeugen (siehe Wertstoffsack ländlich). Im Vergleich des IST- und des ZUKUNFT-Szenarios zeigt sich beim KEA deutlich, dass eine optimierte Sortierung mit verbesserter Rezyklatausbeute die KEA-Gutschrift erhöht und damit deutliche ökologische Vorteile aufweist.

### Abschließende Empfehlungen

Grundsätzlich ist die Erfassung von LVP gemeinsam mit StNVP aus Sicht der ökologischen und ökonomischen Effizienz empfehlenswert, da mit der gemeinsamen Erfassung die erfassten Mengen gesteigert werden und damit auch die Effizienz steigt.

Auch wenn die Erfassung mit dem System „Depotcontainer“ bei Nichtberücksichtigung der Kosten des Individualtransports sehr kosteneffizient erscheint, kann eine Neueinrichtung derartiger Systeme nicht empfohlen werden, da die Sammelmenge der Holsysteme mit diesem System nicht erreicht wer-

den kann. In Gebieten, in denen diese Systeme etabliert sind, kann eine Optimierung hinsichtlich der Steigerung der Sammelmengen (bspw. durch bürgerfreundlichere Ausgestaltung und intensivierete Öffentlichkeitsarbeit) sinnvoll sein.

Holsysteme sind bei der Erfassung grundsätzlich zu bevorzugen, da sie sowohl ökologisch als auch ökonomisch (hier zumindest im Vergleich zum System „Wertstoffhof“) deutliche Vorteile aufweisen.

Sacksammlungen besitzen gegenüber Behältersammlungen Vorteile bei der Erfassungsqualität. In ländlichen Gebieten kann deren Einsatz insofern sinnvoll sein und sollte unter Berücksichtigung der vorhandenen Nachteile (insbesondere Ortsbild, Verwehungen, Zerstörung von Säcken durch Tiere) abgewogen werden. Durch entsprechende Ausgestaltung der Erfassung (bspw. zentrale Sammelpunkte) sowie durch intensivierete Öffentlichkeitsarbeit (bspw. Sensibilisierung der Bevölkerung für den optimalen Zeitpunkt der Bereitstellung) können diese Nachteile minimiert werden.

Bei der Behältersammlung ist insbesondere in städtischen Gebieten durch verstärkte Öffentlichkeitsarbeit (ggf. auch durch Sanktionierung fehlgefüllter Behälter) auf eine Verbesserung der Erfassungsqualität hinzuwirken.

Die ökonomischen Optimierungspotenziale in der Logistik (bspw. durch Streckung des Sammelturnus) sind im Vergleich zur derzeitigen Praxis eher gering. Auch die Akzeptanz solcher Maßnahmen ist als gering anzusehen. Ob sich die Nachteile mit den geringen Vorteilen rechtfertigen lassen sollte abgewogen werden.

Die analysierten Zusammenhänge der Sortierung und Verwertung mit Blick auf eine erhöhte Wertstoffausbeute bei gegebenem Sammlungsinput wurden vor dem Hintergrund geeigneter erscheinender technischer, wirtschaftlicher und rechtlicher Maßnahmen diskutiert und hieraus Empfehlungen abgeleitet.

Die Materialzusammensetzung (Verbundanteile) ist teilweise für ein werkstoffliches Recycling schwierig. Dies kann aber nur auf der Ebene des Verpackungsdesigns gelöst werden. Bei Sortierung und Verwertung gibt es folgendes Optimierungspotential.

Empfehlungen für die Sortierung und Verwertung:

1. Konsequenter Ausbau der Sortieranlagen in Deutschland nach dem Stand der Technik. Damit lässt sich bei gegebener Sammelgutzusammensetzung die Zuführung zur werkstofflichen Verwertung zwischen 25 und 56 % gegenüber dem IST-Stand (MSN 2014) erhöhen. Dies entspricht (ohne Wertstoffhof) 3,2 bis 10,3 kg/(EW\*a) zusätzlich werkstofflich verwertbarer Sammlungsanteile bzw. einer durchschnittlichen Steigerung des Outputs an Rezyklat um 70 bis 72 %.
2. Reduzierung der bisher energetisch verwerteten Fraktionen 0361, 0365 und 0830 durch verbesserte Wertstoffsartierung zur werkstofflichen Verwertung (z. B. Senkung der Feinkornengrenze und/oder Verbesserung der Nachsortierung über die Metallabscheidung hinaus, Begrenzung des EBS/Sortierreste-Anteils auf unter 30 % des Inputs),
3. Möglichst vollständige Kunststoffartentrennung, zumindest an HDPE/LDPE, PP, PS und Reduzierung der Mischkunststoffe.
4. Reduzierung der Folienanteile in der Weißblechfraktion. Die bis zu 12 % Folien in der Weißblechfraktion gehen unmittelbar für eine werkstoffliche Verwertung verloren.
5. Einführung weiterer technischer Maßnahmen zur Verbesserung der Qualität und damit der Verwertung bzw. Vermarktbarkeit:
  - a. Trennung schwarzer Kunststoffe,
  - b. Verbesserte Verfahrensabläufe z. B. durch Nachsortierung von Rückläufen schlecht aufgeschlossener Teilströme,
  - c. Optimierung der Einstellung der NIR-Trennung,

- d. Angemessene Anlagendurchsätze. Die Festlegung einer Durchsatzbegrenzung von Sortieranlagen anhand von Qualitätszielen sollte vorrangig verfolgt werden.
6. Die Verbesserung der Ausgangsqualität der Sortierprodukte kann von den dualen Systemen durch Absenkung der zulässigen Störstoffanteile in den DS-Spezifikationen erzwungen werden. So sollte die Erhöhung der Sortenreinheit von Kunststoffarten wie PE, PP oder PS auf 98 % anstatt 94 % angehoben werden. Dies ermöglicht eine direktere werkstoffliche Verwertung ohne erneute Vorabtrennung von Fremdstoffen.

Die Realisierung der vorgenannten Maßnahmen hängt von einer Reihe von wirtschaftlichen und rechtlichen Randbedingungen ab.

1. Die Menge erzeugter Mischkunststoffe, die derzeit mit etwa 85 % energetisch verwertet werden lässt sich bei Anwendung des Standes der Technik und bei derzeitiger Zusammensetzung lediglich um 30 % zugunsten sortenreiner Kunststoffarten senken. Weitere Reduzierungen des MK-Anteils bedürfen Änderungen des Sammelgutes bzw. der Verpackungsmaterialien, die die Zusammensetzung des Sammelgutes bestimmen. Am Beispiel der Aluminiumverwertung (nur 38 % Rezyklat aufgrund des hohen Verbundanteils) lässt sich zeigen, wie stark ein hoher Verbundanteil die Rezyklatausbeute senkt.
2. Wirtschaftliche Gründe sind eine wesentliche Ursache für den Betrieb von Sortieranlagen nach dem Stand der Technik weit unterhalb ihrer Möglichkeiten. Dem Kostendruck von Zuzahlungen bei der Verwertung wird häufig mit Erhöhung des Anlagendurchsatzes entgegen gesteuert. Zukunftsinvestitionen werden regelmäßig nur getroffen, wenn eine hinreichende Langfristigkeit durch stabile gesetzliche Vorgaben und dadurch eine gewisse Preis- und damit Kostenstabilität zu erwarten ist. Direkter würden sich ökonomische Anreize auf die Nachfragesituation nach Rezyklaten auswirken (z.B. Förderung von Rezyklatanteilen bei Neuprodukten insbesondere im Verpackungskreislauf). Schwierigkeiten ergeben sich aber unter anderem aufgrund der schwer möglichen qualitativen und quantitativen Bestimmbarkeit dieser Anteile bzw. aus welcher Quelle sie stammen.
3. Ein ernsthaftes Problem stellen die (derzeitigen) Preise für energetische Verwertung in Deutschland dar. Da Mischkunststoffe bei der energetischen Verwertung mit 60 EUR/Mg Zuzahlung belastet sind, die werkstoffliche Verwertung aber mit 90 EUR/Mg, geht diese Fraktion vornehmlich in die energetische Verwertung.
4. Die rechtlichen Vorgaben (Verwertungsquoten) werden mit dem neuen Verpackungsgesetz deutlich angehoben. Es dürfte künftig schwerer fallen, die Quoten allein aufgrund der Lücke zwischen Lizenzmenge (= in Verkehr gebrachte Menge) und Sammelmenge zu erfüllen.
5. Die Spezifikationen der Sortierprodukte sollten qualitativ erhöht werden, um größere Mengen höherwertige Sortierprodukte bereitzustellen und damit die erwartete höhere Nachfrage nach derartigen Produkten aufgrund der erhöhten gesetzlichen Verwertungsquoten zu befriedigen.

## Summary

### Study purpose and data model

The German Environment Agency through the present study initiated that different collection systems for light packaging (LVP) and non-packaging of similar material composition (StNVP) were to be analyzed and compared with regard to their efficiency. The main focus was on the criteria quantity (quantity collected) and quality (composition of the collected recyclables). Principal objectives of the research were the development of a rating methodology and to derive various key indicators and recommendations for the purpose to get the efficiency of the collection systems with regard to the assessed key indicators improved. The assessment basis is formed by the collected quantities, costs and environmental impact expressed by the global warming potential (GWP) and cumulative energy demand (KEA) of the different arrangements.

Following processes fall under the system boundaries:

- ▶ Private deliveries to the points of collection
- ▶ Collection
- ▶ Transports
- ▶ Sorting
- ▶ Utilization/ recycling of the collected amounts

The following collection arrangements have been selected for a comparison:

- ▶ Recyclables bin in urban areas (including non-packaging from the same material)
- ▶ Recyclables bin in rural areas (including non-packaging from the same material)
- ▶ 'Yellow bin' in urban areas (without non-packaging from the same material)
- ▶ 'Yellow bin' in rural areas (without non-packaging from the same material)
- ▶ 'Yellow sack' in rural areas (without non-packaging from the same material)
- ▶ Recyclables sack in rural areas (including non-packaging from the same material)
- ▶ Depot container (without non-packaging from the same material)
- ▶ Recycling centre (without non-packaging from the same material) as the main system approach.

These arrangements represent either as the main or secondary collection system almost 100 % of the collection systems used for light packaging in Germany.

Most frequently used are the pickup systems 'Yellow bin' as the most widely adopted LVP collection system and the 'Yellow sack'. Arrangements using the recyclables bin or recyclables sack also include the collection of non-packaging from the same material. These systems are currently applied only in a few territories.

The depot container and the recycling center characterize the arrangements which are considered as bring systems. With the exception of the recycling center, collection takes place as a multi-component mixture.

Based on coordinated agreements between the compliance scheme for packaging recovery (dual systems), the commissioned disposal companies and the quantities collected in the contract areas, boundary conditions of the scenarios are defined. This includes in particular the parameters:

- ▶ container stock and characteristics,
- ▶ collection frequency,
- ▶ material volume and
- ▶ density of collection points.

Characteristic for pickup systems is the container-based collection with mobile bins (MGB) in sizes from 120 to 1,100 liters or the use of sacks with a volume of 90 liters. For the bring systems, containers with a capacity of 3 to 5 m<sup>3</sup> are used, depending on the collected material fraction.

The composition of LVP for the individual arrangements was determined on the basis of sorting analyses.

An individual or private delivery of the waste material to the point of collection is highly relevant for the bring systems and is therefore also considered in the two options depot container and recycling centre. In the data model, only the individual trips by car were taken into account, as they have a significant impact on the environmental comparison of the collection arrangements. The number of trips for the purpose of LVP delivery, the mass delivered per trip and the delivery distance make up the essential parameters in this case. The values from a published survey generated the main data source.

For a more thorough investigation of the economic aspects, the collection process was examined with the method of breaking down a collection tour into characteristic segments. The values describing these characteristic segments originate from real investigations of INTECUS. They have been recorded by tour escorts and tracking or by registration of logistically relevant events. The documentation of the conditions in the respective study area was taken into account. The mean values of each characteristic time period form the logistic key figures.

Relevant key figures for the transport processes (proportion of LVP in the transported goods, simple transport distance, average cargo load, proportion of return freight, loading/unloading time) were obtained by means of a survey among experts. Interviewed experts were the employees of several companies who are familiar with the transportation processes of the different dual systems.

Vehicle costs per km (private drivers), container expenses and truck costs were used as the basis for calculating the costs of the individual deliveries, collection and transport processes. The cost rates are taken from various projects INTECUS has conducted before.

Beside these costs, the ecological effects of the different scenarios expressed by the Global Warming Potential (GWP) and the cumulative energy demand (KEA) were examined.

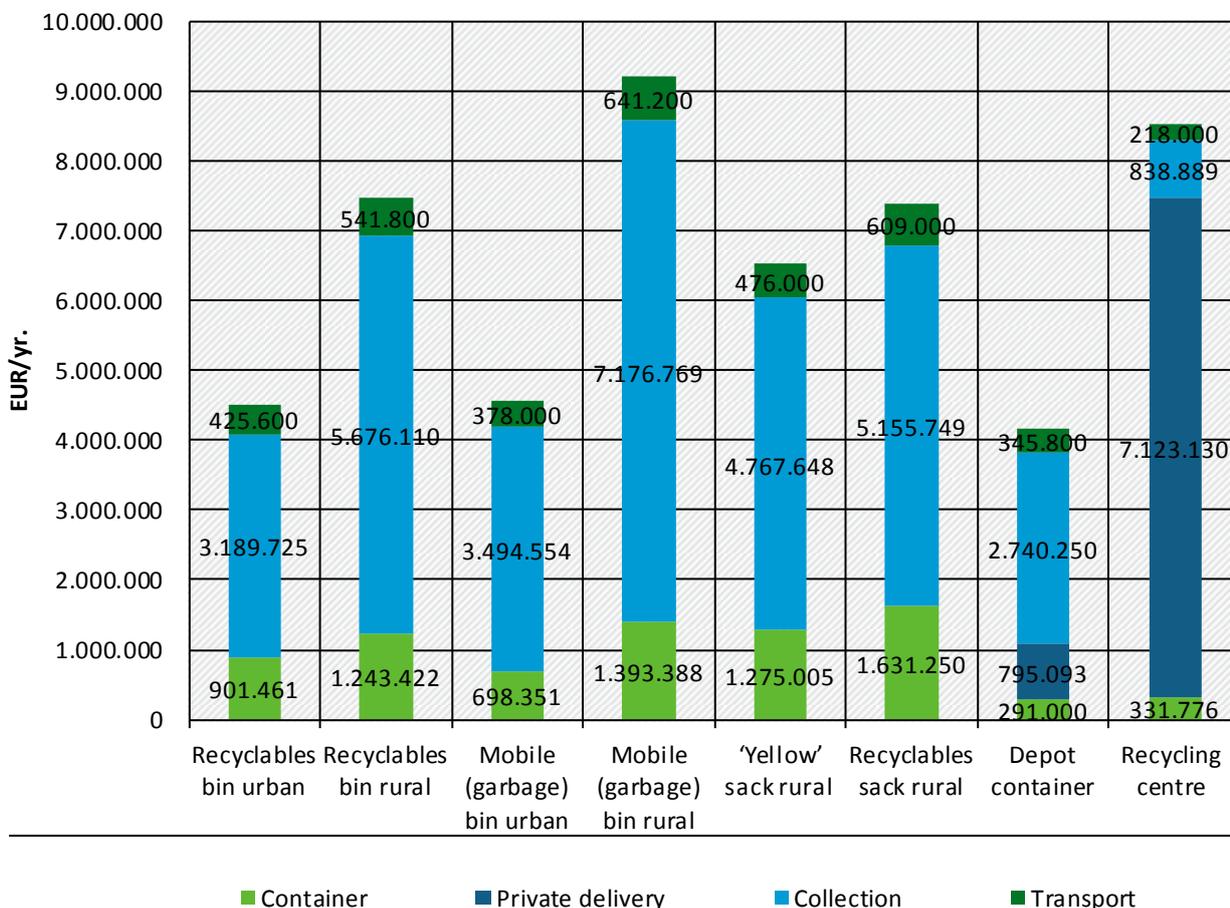
### **Scenario comparison for the sub-processes private deliveries, collection and transport**

The comparison of costs for the collection and the transport process in pickup systems shows, that the collection expenses contribute by far the highest amount to the total costs, followed by container costs. The lowest amount is made up by the transportation expenses (see the following figure).

Figure 7: Annual logistics costs in relation to 1 million inhabitants

**Annual logistics costs**

in relation to 1 million inhabitants



Quelle: own research

Bring systems give a different picture. On a per capita basis, over 80 % of the logistic costs in arrangements using recycling centres are incurred from private deliveries. These expenses are not reflected in the costs calculated for bring systems from the system operators or the waste management companies and are therefore transferred to the end users in addition to the license fees for the dual systems. The other cost components are lower in absolute terms than those observed for the pickup systems.

The most important cost components for the depot container arrangement, collection and private deliveries, are situated between the costs for the pickup systems and the recycling centre arrangement.

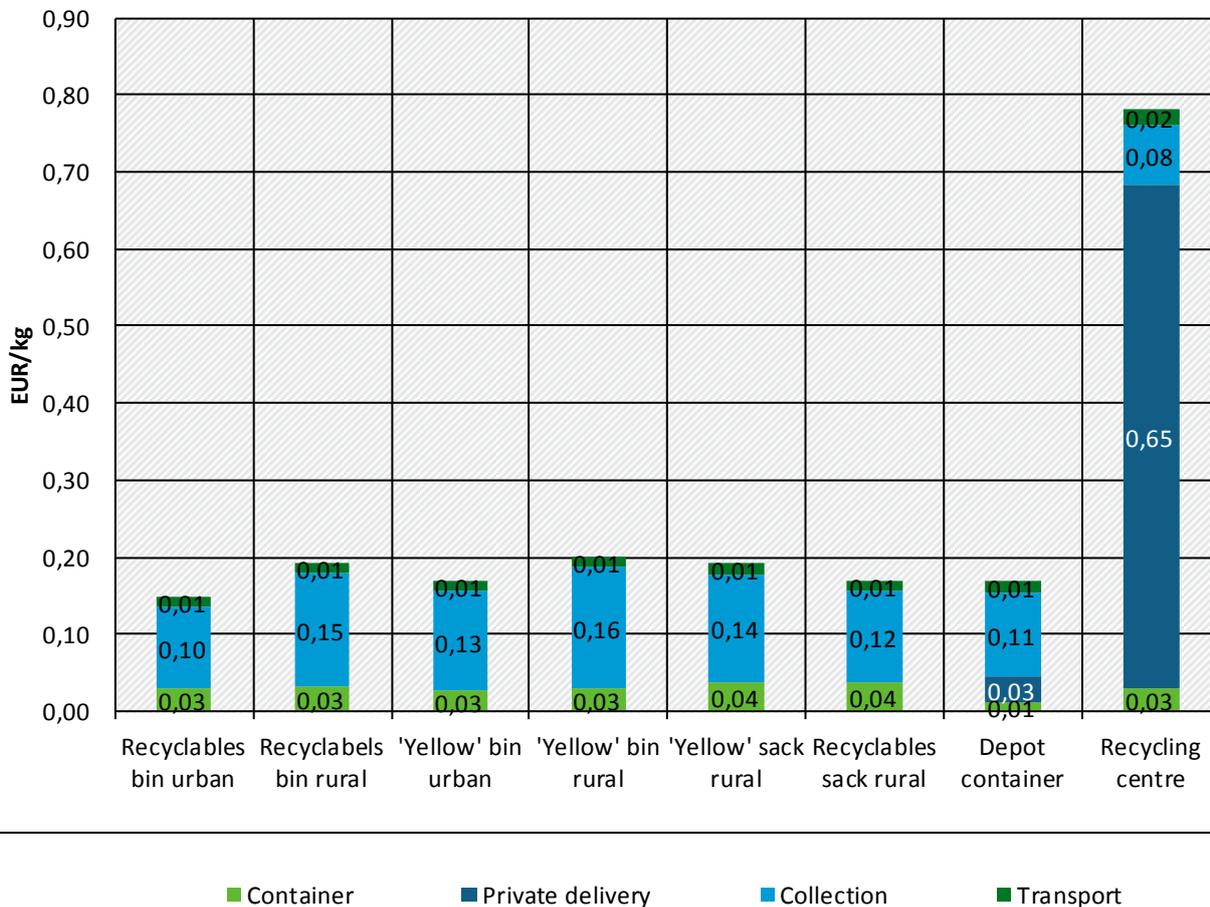
Depending on the scenario, the capita-specific logistics costs range between EUR 4.2 Million and EUR 9.2 Million per 1 Million inhabitants or EUR 4.2 / (cap. \* a) and EUR 9.2 / (cap. \* a). The highest capita-specific costs occur in the 'Yellow bin' arrangement in the rural environment, followed by the recycling centre arrangement.

Conversely, if the logistics costs are related to the collected quantity, the picture changes significantly. Depending on the scenario, the mass-specific total costs are between EUR 0.15 and EUR 0.78 per kilogram (see the following figure).

Figure 8: Logistics costs in relation to 1 kg of collected LVP material

**Logistic costs**

in relation to 1 kg of collected LVP material



Source: own research

The highest mass-specific logistics costs are incurred in an arrangement with recycling centres. The cost components of this arrangement for container, collection and transport are within the range of pickup systems or even below. By far the largest cost component is made up by the expenses for private deliveries.

The mass-specific logistics costs are nearly at the same level for the pickup systems. The lowest logistics costs are incurred for the recyclables bin used in urban settings. This results mainly from the relatively low number of container stands needed and the highest proportion of 1.100 liter mobile bins in the container stock, which is particularly efficient for the collection. Always more cost-effective in relation to the collected quantity is the collection of LVP together with non-packaging from the same material in a comparable collection system. Hence, the recyclables bin is the cheaper option compared to the 'Yellow bin' in the urban setting, likewise the recyclables bin is more cost efficient than an arrangement using the 'Yellow bin' in rural areas, the same applies to the recyclables sack when compared to the 'Yellow sack' in the same environment.

When comparing the rural scenarios, the lowest mass-specific logistics costs are incurred with the arrangement using the recyclables sack.

The mass-specific logistics costs for the depot container arrangement are at the level of the costs observed in pickup systems, whereby the savings resulting from the lower container expenses roughly correspond to the additional expenses incurred from private deliveries.

Optimization potentials of the collection arrangements are contemplated on the basis of the following options:

- ▶ influence of the joint collection of LVP and StNVP,
- ▶ influence of the collection of further recyclables at recycling centres and
- ▶ influence of the stretching of the collection interval.

By including StNVP in the collection in comparison to the arrangements without StNVP collection, a small reduction of the mass-specific costs between 4 % (for the recyclables bin versus the 'Yellow bin' in the rural setting) and 12 % (for the recyclables bin versus the 'Yellow bin' in the urban setting) can be expected. The main reason is the tendency of using container with a larger collection capacity and a better utilization of the provided container capacities.

According to the available data model, the arrangement with recycling centres has much higher mass-specific costs than all other arrangements due to the high expenses caused from private deliveries. The reason for this, above all, is the assumption, that 94 % of private deliveries at the recycling centres are referred to light packaging. The collection of additional recyclable materials at the recycling centre would significantly reduce the proportion of deliveries attributed to LVP by 39 %. Even a correspondingly modified scenario would still cause by far the highest mass-specific logistics costs.

The potential for optimization by a stretching of the collection intervals lies above all in an increased quantity of collected material per each container stand and collection tour. Changing the collection interval for the recyclable bin arrangement in the rural environment from 1.9 to 2 weeks for the 1,100 liter mobile bin and from 2.9 to 4 weeks for the 120 and 240 liter mobile bins leads to a calculated optimization potential of 7 %. For the urban scenarios, the potential for optimization is expected to be a bit higher, as a larger difference between the current and stretched collection cycles can be assumed and a reduction of the number of 120 liter mobile bins in favor of an increased use of the logistically more efficient 1,100 liter mobile bin is likely to take place. By including StNVP in the collection in comparison to the arrangements without StNVP collection, a small reduction of the mass-specific costs between 4 % (for the recyclables bin versus the 'Yellow bin' in the rural setting) and 12 % (for the recyclables bin versus the 'Yellow bin' in the urban setting) can be expected. The main reason is the tendency of using container with a larger collection capacity and a better utilization of the provided container capacities.

According to the available data model, the arrangement with recycling centres has much higher mass-specific costs than all other arrangements due to the high expenses caused from private deliveries. The reason for this, above all, is the assumption, that 94 % of private deliveries at the recycling centres are referred to light packaging. The collection of additional recyclable materials at the recycling centre would significantly reduce the proportion of deliveries attributed to LVP by 39 %. Even a correspondingly modified scenario would still cause by far the highest mass-specific logistics costs.

The potential for optimization by a stretching of the collection intervals lies above all in an increased quantity of collected material per each container stand and collection tour. Changing the collection interval for the recyclable bin arrangement in the rural environment from 1.9 to 2 weeks for the 1,100 liter mobile bin and from 2.9 to 4 weeks for the 120 and 240 liter mobile bins leads to a calculated optimization potential of 7 %. For the urban scenarios, the potential for optimization is expected to be a bit higher, as a larger difference between the current and stretched collection cycles can be assumed and a reduction of the number of 120 liter mobile bins in favor of an increased use of the logistically more efficient 1,100 liter mobile bin is likely to take place. By including StNVP in the collection in com-

parison to the arrangements without StNVP collection, a small reduction of the mass-specific costs between 4 % (for the recyclables bin versus the 'Yellow bin' in the rural setting) and 12 % (for the recyclables bin versus the 'Yellow bin' in the urban setting) can be expected. The main reason is the tendency of using container with a larger collection capacity and a better utilization of the provided container capacities.

According to the available data model, the arrangement with recycling centres has much higher mass-specific costs than all other arrangements due to the high expenses caused from private deliveries. The reason for this, above all, is the assumption, that 94 % of private deliveries at the recycling centres are referred to light packaging. The collection of additional recyclable materials at the recycling centre would significantly reduce the proportion of deliveries attributed to LVP by 39 %. Even a correspondingly modified scenario would still cause by far the highest mass-specific logistics costs.

The potential for optimization by a stretching of the collection intervals lies above all in an increased quantity of collected material per each container stand and collection tour. Changing the collection interval for the recyclable bin arrangement in the rural environment from 1.9 to 2 weeks for the 1,100 liter mobile bin and from 2.9 to 4 weeks for the 120 and 240 liter mobile bins leads to a calculated optimization potential of 7 %. For the urban scenarios, the potential for optimization is expected to be a bit higher, as a larger difference between the current and stretched collection cycles can be assumed and a reduction of the number of 120 liter mobile bins in favor of an increased use of the logistically more efficient 1,100 liter mobile bin is likely to take place. By including StNVP in the collection in comparison to the arrangements without StNVP collection, a small reduction of the mass-specific costs between 4 % (for the recyclables bin versus the 'Yellow bin' in the rural setting) and 12 % (for the recyclables bin versus the 'Yellow bin' in the urban setting) can be expected. The main reason is the tendency of using container with a larger collection capacity and a better utilization of the provided container capacities.

According to the available data model, the arrangement with recycling centres has much higher mass-specific costs than all other arrangements due to the high expenses caused from private deliveries. The reason for this, above all, is the assumption, that 94 % of private deliveries at the recycling centres are referred to light packaging. The collection of additional recyclable materials at the recycling centre would significantly reduce the proportion of deliveries attributed to LVP by 39 %. Even a correspondingly modified scenario would still cause by far the highest mass-specific logistics costs.

The potential for optimization by a stretching of the collection intervals lies above all in an increased quantity of collected material per each container stand and collection tour. Changing the collection interval for the recyclable bin arrangement in the rural environment from 1.9 to 2 weeks for the 1,100 liter mobile bin and from 2.9 to 4 weeks for the 120 and 240 liter mobile bins leads to a calculated optimization potential of 7 %. For the urban scenarios, the potential for optimization is expected to be a bit higher, as a larger difference between the current and stretched collection cycles can be assumed and a reduction of the number of 120 liter mobile bins in favor of an increased use of the logistically more efficient 1,100 liter mobile bin is likely to take place. By including StNVP in the collection in comparison to the arrangements without StNVP collection, a small reduction of the mass-specific costs between 4 % (for the recyclables bin versus the 'Yellow bin' in the rural setting) and 12 % (for the recyclables bin versus the 'Yellow bin' in the urban setting) can be expected. The main reason is the tendency of using container with a larger collection capacity and a better utilization of the provided container capacities.

According to the available data model, the arrangement with recycling centres has much higher mass-specific costs than all other arrangements due to the high expenses caused from private deliveries. The reason for this, above all, is the assumption, that 94 % of private deliveries at the recycling centres are referred to light packaging. The collection of additional recyclable materials at the recycling centre

would significantly reduce the proportion of deliveries attributed to LVP by 39 %. Even a correspondingly modified scenario would still cause by far the highest mass-specific logistics costs.

The potential for optimization by a stretching of the collection intervals lies above all in an increased quantity of collected material per each container stand and collection tour. Changing the collection interval for the recyclable bin arrangement in the rural environment from 1.9 to 2 weeks for the 1,100 liter mobile bin and from 2.9 to 4 weeks for the 120 and 240 liter mobile bins leads to a calculated optimization potential of 7 %. For the urban scenarios, the potential for optimization is expected to be a bit higher, as a larger difference between the current and stretched collection cycles can be assumed and a reduction of the number of 120 liter mobile bins in favor of an increased use of the logistically more efficient 1,100 liter mobile bin is likely to take place.

### **Scenario comparison for the sub-processes sorting and material utilization**

The analysis of the sorting of collected LVP and subsequent utilization of the material is based on two scenarios:

1. The scenario representing common business practice (IST scenario) assesses the current state of sorting, which basically takes place in about 50 % of the cases in facilities that are essentially operating according to state-of-the-art with > 12 NIR separators. The other facilities have no or significantly lower separation levels for the different types of plastic. Overall, the output rates used are based on the real results of the mass flow evaluations for all dual systems in 2014.
2. The FUTURE scenario is based on the assumption of a sorting technology in Germany that represents 100 % state of the art.

When comparing these scenarios in order to estimate the potentials of a comprehensively improved sorting, it is fundamental to note the following restrictions:

1. There are significant differences in the size of the database (data for the recyclables sack in the rural setting come from only 2 investigated territories whereas up to 25 contract areas could be checked for the 'Yellow sack' arrangement in that setting).
2. The sorting criteria and the accuracy are not necessarily equal in the used sorting analyses.
3. Sorting facilities in general do not receive the homogeneous material from a certain collection system, but a mixture from different contract areas and thus different collection systems; this circumstance was taken into account by considering a hypothetical "sample composition".
4. A comparison between pickup and bring systems (depot containers, recycling centres) has its limitations, especially since recycling centres usually forward their material without further sorting directly to the recyclers.

The scenarios are compared and the evaluation of the results is undertaken on the basis of technical, economic and legal factors.

For this purpose, the available sorting results from the individual collection arrangements are defined in each case as a given plant input; in the case of the "sample composition" as a pro rata mixture of different contract areas respectively collection systems.

The starting point for the year 2014 is given by a total amount of 2,405,093 Mg LVP collected from the private end consumer and sorted. The proven mass flow for all dual systems gives a sorted portion of 47 % plastics, and in addition a portion of 32.1 % made up from sorting residues and intermediates for refuse derived fuel production including mixed polyolefin by-products (MPO) which are energetically utilized. Considering the fact that pure plastics are commonly material recycled at rates above 90 %, this applies to 2/3 of the collected plastics whereas for only 5.3 % of the total mixed plastic fraction (MKS) found in collection. This results for the 47 % proportion of plastic components contained in the LVP in a material recycling rate of 37.5 % only.

The main potentials for increasing the material recycling of plastics therefore is in the sorting fraction of mixed plastics (fraction 0350) as well as in the recyclable material share that remains in the sorting residues, intermediates for refuse derived fuel production and MPO by-products, which is all recovered energetically like also 85 % of the mixed plastics.

Using a realistic assumption for the proportion that can be materially recycled from the aforementioned fractions a potential of about 650,000 Mg or 8.1 kg / (cap. \* a) of plastics and plastic composites that in theory could be recycled additionally can be derived.

### **Potential to improve the yields of recyclate and sorting output**

With consistent collection quantities, unchanged specifications for packaging design (composite products!) and non-optimized systems for material capture and collection, the possibilities to raise the recycling potential through sorting gains in importance. Here in the focus are the improvement of the sorting technology and quality of the sorting output.

To look at this, the various components of the collected LVP mixture in the individual collection systems are first quantified on the basis of the available analyses and further condensed into material groups.

These material groups give the input fractions which must be reconciled with the common sorting fractions (classified using the industry's DS specifications standard). This is done in two stages: first, the input fractions are allocated on the basis of the actual sorting results of the mass-flow verification for 2014. Based on the knowledge of the sorting technology, a projection of the sorting results from the input to the target fraction of the sorting output is conducted in the next step.

The individual results are explained in the text with example-based results for a collection system; the individual analyses can be found for all collection systems in both scenarios in the extensive excel spreadsheets supplied as an appendix to this report.

The described projection of the actual allocation of sorting input on the sorting output shifts, for example, the film fraction <DIN A4 in the FUTURE scenario by 5 % from the fractions 361/365/830 destined for energy recovery into the mixed plastic fraction 0350. This only leads to an increase in the recycled material rate if the mixed plastics are indeed recycled materially. For plastic film and foils >DIN A4, the situation is different. With a complete state of the art sorting, the PE fraction 0310 increases by 5 % while the amount of mixed plastics decreases by 13 %. In the balance of the model, however, it is assumed that in addition to 90 % PE fraction 0310, a share of 10 % remains in the fraction 0830. Overall, there is a shift for all plastic fractions towards the pure fractions which are material recycled to approximately 90-98 %; sorting residues and intermediates for refuse derived fuel production decrease significantly instead.

All about the assumptions used for the projection and material distribution in the FUTURE scenario is explained in detail in the report. In the next step, the product output from the sorting system is multiplied on the basis of the real mass flow data with the feedstock rates for material recycling and with the corresponding production rates, which in the end leads for the material recycling to a net yield of recyclate in the range of 65 % to 75 %. For tinplate the yield is 80 %, for aluminum only 38 % due to the high content of composite products in the input. For sorting residues and intermediates for refuse derived fuel production, a rate of 0 % material recycling is adopted, the recycling potential of these fractions is already being exploited through the projected redistribution of recyclable material shares.

As a result of these calculations, the yield of recyclate can be specified in Mg or as a percentage of the collected amount for each collection system. Thus, for the recyclable bin used in the urban setting, a recycled yield of 6.6 kg / (cap. \* a) from a collected amount of 30.4 kg / (cap \* a) can be obtained in the IST scenario and a recycled yield of 10.6 kg / (cap \* a) in the FUTURE scenario. The amount of recy-

plate consequently can be increased by more than 60 % when the shift from the IST to the FUTURE scenario is being accomplished.

### **Quality specifications and uncollected quantities in comparison of the different systems**

Of significant influence on the production of recyclate respectively the material recycling are the specifications set on material purity or maximum amount of impurities in the sorting output.

For pure plastic fractions, up to 6 % foreign matter or contaminants are generally acceptable, for mixed plastics or beverage carton and other composites as well as for intermediates for refuse derived fuel production a proportion of even 10 % impurities is allowed. In the polyolefin by-products an impurity rate of up to 15 % is possible and for dimensionally stable plastics up to 20 %. An exception is tinsplate where recycling facilities reject at a material limit of 67 %, the metal content must at least reach 82 %.

Overall, there is still quite a scope towards quality requirements.

When comparing the collection systems, it should be noted that these differ significantly from one another in the collection quantities which start from 10.9 kg / (cap. \* a) in the recycling centres, reach 24.7 kg / (cap. \* a) in depot container arrangements with and without non-packaging from the same material and go as high as 45.8 kg / (cap. \* a) in the 'Yellow bin' arrangement for the rural setting. However, caution should be exercised when interpreting the differences between the individual systems, in particular because of the different size of the database available for each collection system. If the system with the highest collected quantity is used as a benchmark, the difference to this maximum can be used to determine a potential of not separately collected amounts and thus a recyclable potential.

This "potential" is considered practically existent but unexploited in the systems with lower collection amounts than the benchmark. Hence, these differences apparently burden other waste collection systems such as the one for residual waste disposal. It would be of interest to understand how these quantities could be recovered through an optimized collection system. This study, despite all limitations inherent in general conclusions, has taken a complementary look on the resulting costs. For this purpose, a cost burden of EUR 105 per Mg was assumed for a domestic waste incineration which receives the difference amount not captured in the collection system for recyclables.

### **Cost analysis for the processes sorting and material utilization**

It becomes apparent that the costs for the not separately collected recyclable material (measured against the benchmark) is not negligible and represents, particularly with regard to the low quantities collected in bring systems, a high financial burden for the economic system.

Sorting costs, for the purpose of the comparison, were fixed at an average of EUR 80 per Mg.

A factor that influences in particular the costs for the sorted quantities is the heavily fluctuating price at the recycling markets.

Taking into account the costs and revenues for the

- ▶ sorting,
- ▶ material utilization,
- ▶ transports to the recycler and
- ▶ the disposal costs for not separately collected recyclables or uncollected quantities

gives an entire image which, based on current market prices, shows the specific costs for the sorted output forwarded from the different collection systems to recycling in a range between EUR 0.44 per kilogram (recyclables sack in the rural setting) and EUR 0.97 per kilogram ('Yellow bin' in the urban

setting) in the IST scenario. The expenses of EUR 0.79 per kilogram for the collection via recycling centers at zero costs for the sorting mainly get an explanation from the high uncollected quantities of source separated materials compared to all other collection systems. For the cost balance of the recycling centres this is a special burden.

In the FUTURE scenario, the specific costs for the sorting output declines to about EUR 0.30 to 0.57 per kilogram due to the higher yield in recyclable material but for the recycling centre this has no influence so that this collection arrangement stays at a cost level of EUR 0.79 EUR per kilogram sorting output.

The presentation of the costs for sorting and utilization provides a good differentiation of the collection systems:

- ▶ pickup systems are rather close together in their specific costs for the sorting output, differences mainly result from the different proportions in impurities (e.g. collection arrangements with bins in the urban areas compared to the rural environment; yields of recyclate in the FUTURE scenario range from 12.4 to 16.2 kg / (cap. \* a) in the rural setting compared with 9.3 to 10.6 kg / (cap. \* a) in the urban collection setting).
- ▶ the depot container as a bring system with subsequent sorting requirement provides a similar yield of recyclate as the urban pickup systems and with specific costs of EUR 0.47 per kilogram in the FUTURE scenario is in the middle range.
- ▶ the recycling centres as the other bring system, although in general subsequent sorting is not necessary here and the separately delivered fractions can directly be sent to the recycler, with 4.8 kg / (cap. \* a), has a rather low yield of recyclate whereas the large portion of recyclables that remain uncaptured compared to other collection systems raises the specific costs up to EUR 0.79 EUR per kilogram.

Sorting, utilization and transport expenses are included directly in the calculation of the participation fees the dual systems have to pay, whereas the costs for the disposal of not separately collected recyclables are incurred with the citizens (household waste disposal charges) or make up an economic burden to the general public (littering costs, included in the general cost allocation). Hence, the thesis can be derived, that recycling centres contribute to the cost reduction for the dual systems and manufacturers covered from a producer responsibility at the expense of the general public.

### **Material recycling of the mixed plastic fraction**

Mixed plastics, LVP sorting residues as well as the intermediates for refuse derived fuel production prove to offer the biggest potential for an improved recovery of recyclable material.

Hence, the report compares the two scenarios, in particular with regard to these output fractions from the sorting. It can be seen in the IST scenario, that mixed plastics (0350) make up a sorting output in the amount of 5.3 kg / (cap. \* a) as far as the 'Yellow bin arrangement in an urban setting is concerned.

From the recyclables bin in the rural environment these are 12.0 kg / (cap. \* a). In the FUTURE scenario, the mixed plastic fraction from the aforementioned collection arrangement can be reduced up to a quantity between 3.7 to 8.5 kg / (cap. \* a) which would correspond to a 30 % reduction of mixed plastics, provided that the following packaging and non-packaging plastics are consistently sorted out from the input for material recycling

- ▶ plastic buckets and canisters,
- ▶ film/foils >DIN A4,
- ▶ polyethylene (PE),
- ▶ polypropylene (PP) and
- ▶ polystyrene (PS).

Moreover, there is a 5 % shift of films and foils <DIN A4 additionally available for recycling. With that, however, the current possibilities for generating pure plastic fractions of LDPE / HDPE, PP and PS are fully exploited. A further generation of recyclable material from the mixed plastic input would require the sorting and recycling of plastic types for which there is currently no demand, such as plastic composites and mixed PET from mixed plastics.

Especially the high proportion of composite material in the mixed plastics can only be reduced by means of packaging redesign (enhancing recyclability through a design for recycling).

In summary, it can be stated that up to 30 % of the mixed plastics can be diverted as a material for recycling and thus removed from energy recovery if an enhanced sorting as depicted by the ZUKUNFT scenario would be applied. It should also be noted that the current definition for composites covers only material compounds with a share of different materials of more than 5 % in weight. Lower material shares are not considered as a composite and are always utilized together with the main material component.

### **Potentials for material recycling in the "residual fractions"**

The report also deals with the residual or so called "energy fractions", namely mixed polyolefin by-products (0361), intermediates for refuse derived fuel production (0365) and sorting residue (0830) as further relevant material with a recycling potential.

These fractions should, in principle, be considered jointly since sorting facilities usually tend to make arbitrary decisions about their division.

These "residual fractions" are found in the IST scenario in the different collection arrangements (except recycling centres) in quantities between 7.8 to 22.6 kg / (cap. \* a), which correspond to 32 to 49 % of the total collected quantity. In the FUTURE scenario, the whole proportion of these fractions can be reduced to an amount between 6.4 and 18 kg / (cap. \* a), which correspond to 26 to 39 % of the collection result. Consequently, this is a reduction of the fractions 0361, 0365 and 0830 through shifting from the IST to the FUTURE scenario by 6 to 10 percentage points. At the same time, depending on the collection arrangement, the amount of recyclate can be increased by an additional 2.5 to 5.1 kg / (cap. \* a).

### **Assessment of the total costs of the individual scenarios**

An evaluation of the scenario costs took the following expenses within the system borders into consideration:

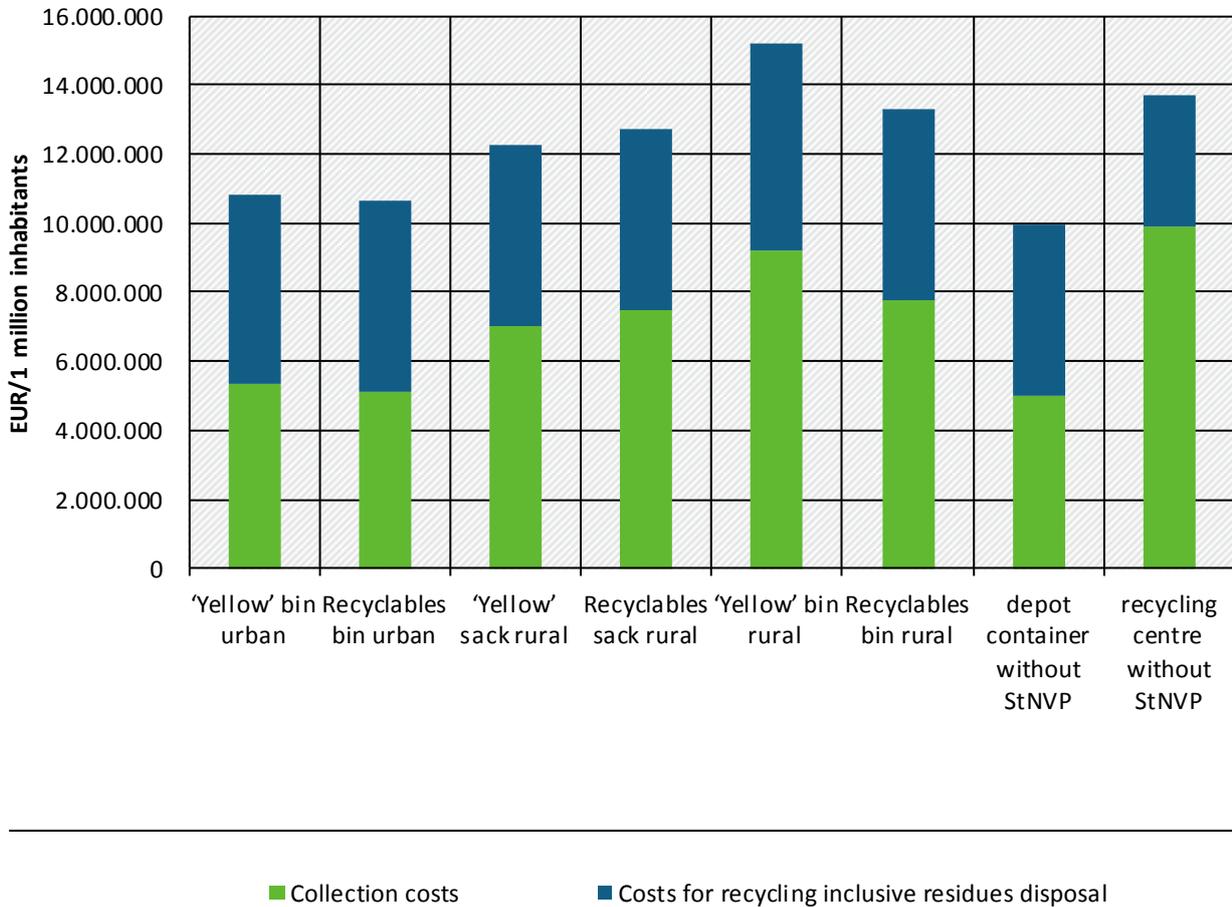
- ▶ container expenses,
- ▶ expenses for private deliveries,
- ▶ collection expenses,
- ▶ transportation costs to the sorting facility,
- ▶ sorting costs,
- ▶ transportation costs to the recycling facility,
- ▶ utilization costs and revenues,
- ▶ expenses for the collection (EUR 40 per Mg) and disposal (EUR 90 per Mg) for the not separately captured and via the residual waste collected LVP and StNVP.

The costs for the individual scenarios, divided into logistics costs and recycling costs in relation to 1 million inhabitants, are shown in the following diagram.

Figure 9: Total costs for the individual scenarios in relation to 1 million inhabitants in the IST-scenario

**Total costs for the individual collection systems in the IST-scenario**

in relation to 1 million inhabitants

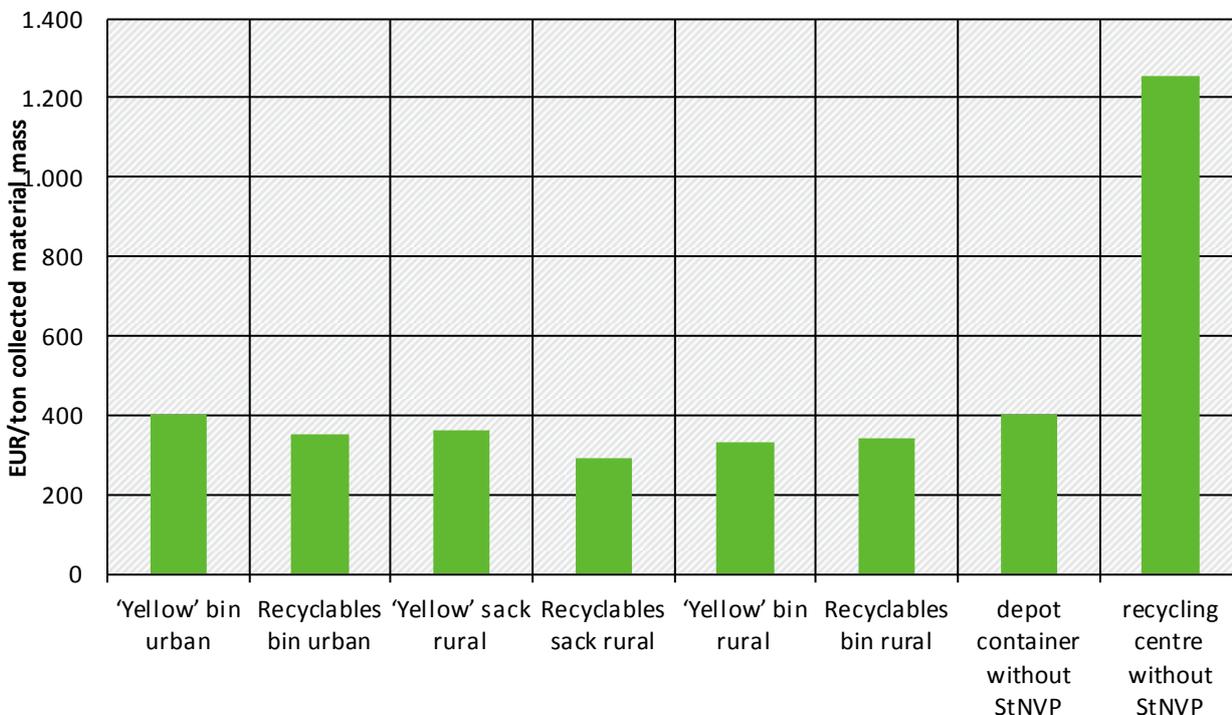


Source: own research

The share of logistics costs in the total costs varies between 48 % (arrangement with recyclables bin in the urban setting) and 72 % (arrangement recycling centres without StNVP), respectively. In this analysis, the specific costs are still influenced by the collected quantity. In the following figure the costs are related to the collected quantity and therefore excluding this influence.

Figure 10: Comparison of the specific system costs per collection arrangement in relation to the collected quantity in the IST scenario

**Comparison of the specific system costs per collection arrangement in the IST scenario**  
in relation to the collected quantity



Source: own research

Hereby can be seen that the recycling centre with more than EUR 1,250 per Mg collected LVP and StNVP is by far the most expensive system. The main reason for this are the high expenses households have to bear for the private deliveries of the material to the recycling centre, which account for 52 % of the total costs. The costs of the other systems are between approx. EUR 300 and EUR 400 EUR per Mg of collected LVP and StNVP material.

**Assessment of the environmental impact of the scenarios**

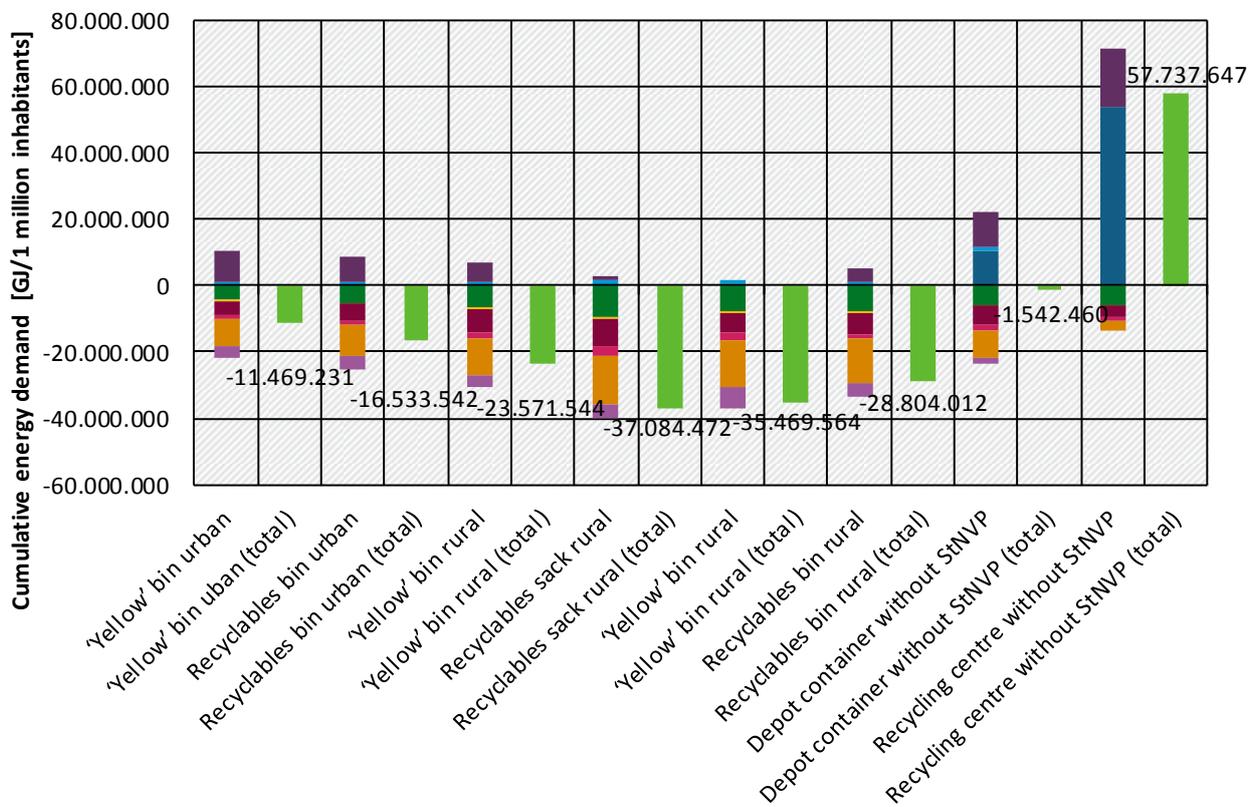
The ecological impacts of the scenarios were assessed using the Global Warming Potential (GWP) and the Cumulative Energy Demand (KEA).

The following diagram shows how much each scenario contributes to the GWP per 1 million inhabitants.

Figure 11: Balance of the global warming potential based on 1 million inhabitants in the IST scenario

**Balance of the cumulative energy demand in the IST scenario**

based on 1 million inhabitants



- Residual waste disposal
- Energetic utilisation of refuse-derived fuel
- Material utilisation of metals
- Material recycling of plastics
- Collection and transport (inclusive private deliveries)
- Energetic utilisation of sorting residues
- Material utilisation of beverage carton, paper/cardboard
- Feedstock recycling of plastics
- Sorting
- Total

Source: own research

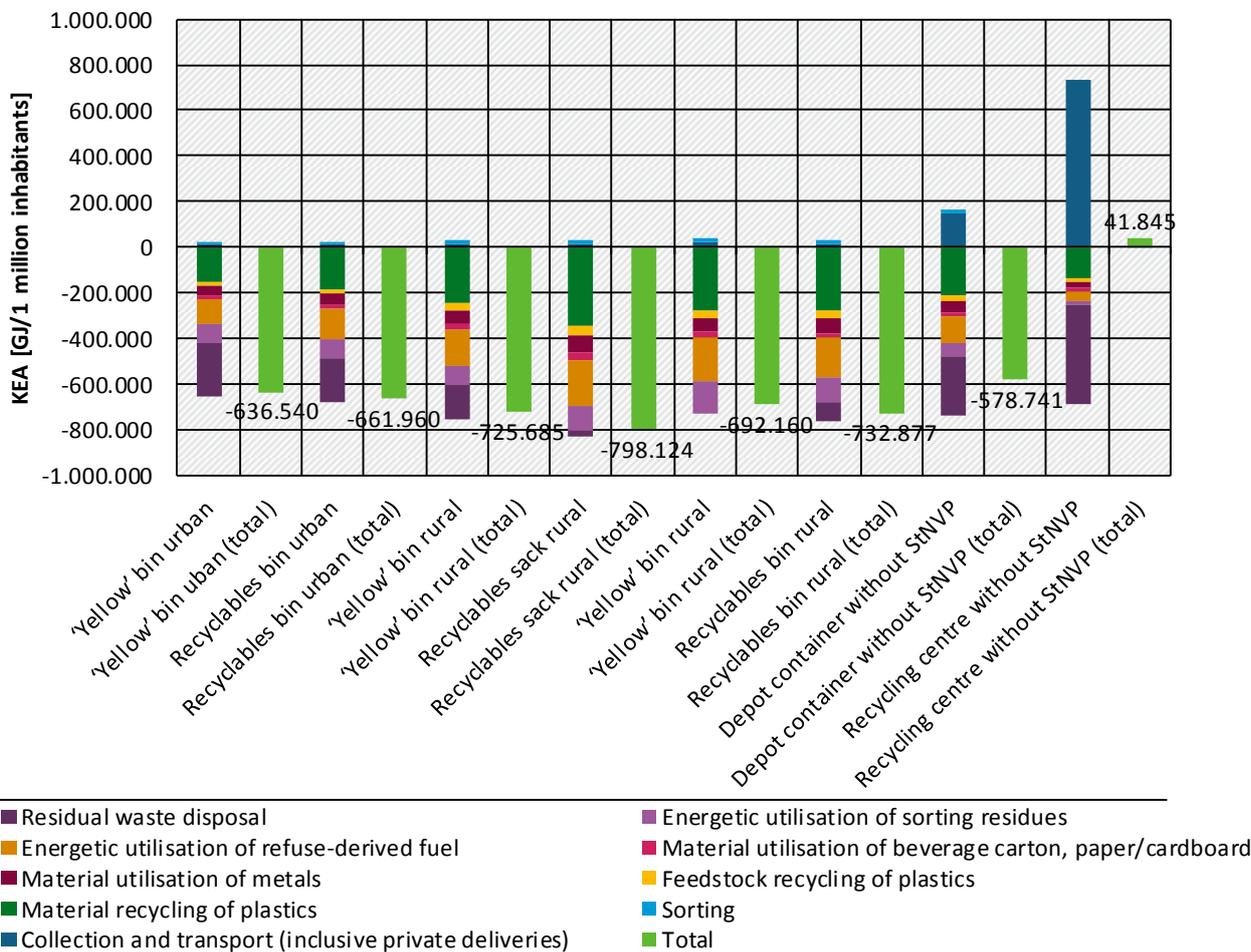
The results show that the recycling centre is the only arrangement that generates a climate-relevant burden. The decisive reason is the contribution from the private deliveries. Additionally the low collection quantities in this arrangement provide only a small relief for the climate. A similar situation can be noticed for the depot container arrangement, albeit in a weakened form and with an overall relieving effect. However, the resulting contribution to climate protection is very small. It is characteristic for the other arrangements, that those systems producing high collection volumes in high quality (recyclables sack and 'Yellow bin' in the rural setting), make the most significant contribution to climate protection. Also in this context it should be mentioned, that the recyclables bin in the rural setting, for which only low collection amounts could be obtained in the available database, and therefore a lower rating has been reached.

The result for the calculation of the KEA is shown in the following diagram.

Figure 12: Balance of the cumulative energy demand based on 1 million inhabitants in the IST scenario

**Balance of the cumulative energy demand in the IST scenario**

based on 1 million inhabitants



Source: own research

Once more clearly visible in this result is the burdening effect of private deliveries, which leads to the fact, that the recycling centres are again the worst performing arrangement. As far as the KEA is concerned, there is a positive credit also for the non-separately collected LVP and StNVP which are therefore disposed together with the residual waste in waste incineration plants. But here, it also becomes clear, that high collection volumes in combination with a high quality generate the highest energy-saving effects via the pathway of material recycling (see the result for the recyclables sack in the rural setting as an example). In comparison of the IST and the FUTURE scenarios, the KEA clearly shows, that optimized sorting with an improved yield of recycleate increases the KEA credit and thus provide a clear ecological benefits.

**Concluding recommendations**

Collecting LVP together with StNVP is basically recommended from the ecological and economic point of view, because the joint collection increases the recovered quantities and thus also the overall efficiency.

Even if the collection with the depot container arrangement seems to be very cost-effective as long as the expenses for private delivery remain unaccounted, it cannot be recommended to reestablish such systems, since this system cannot reach the collected quantities of the pickup system. In areas where

these systems are established, it may be useful to optimize them in terms of enhancing collection volumes (for example, through user-friendly design and intensified public education work).

Pickup systems should be preferred for the collection because of the clear advantages they provide, both ecologically and economically (at least in comparison to the recycling centre).

Sack collections have advantages in collection quality over bin collections. In rural areas, their use may be meaningful but it should be taken into account, that there also exist potential disadvantages (in particular the visual appearance, possible wind drifts and/or a destruction of the sacks by animals). Appropriate arrangement design (e.g. centralized collection points) as well as intensified public awareness work (e.g. sensitization of the public for the optimal time of providing) are suitable approaches to minimize these disadvantages.

In the case of bin collection, in particular in urban areas, increased public awareness work (possibly in combination with sanctioning mechanisms for incorrectly filled containers) should be undertaken to improve the collection quality.

The potentials for an optimization of the economics in logistics (e.g. by stretching the collection intervals) are rather low compared to current practice. The acceptance of such measures is considered to be low as well. In that case the potential benefits have to be weighed carefully against any disadvantages.

The analyzed correlations of sorting and utilization with regard to increasing the recyclable yield for a given collection input are discussed against the background of technical, economic and legal measures that seem appropriate in his context. Certain recommendations are formulated for that.

Product composition (share of composites and compounded material) is partly a very difficult issue for material recycling. That issue can only be solved on the level of the packaging design. Sorting and recycling have a number of potentials for optimization.

Recommendations concerning sorting and recycling:

1. Upgrading the sorting plants in Germany according to state of the art should be consistently pursued. For a given input composition, the product output destined to material recycling can be increased by between 25 and 56 % compared to the current status (MSN 2014). This corresponds to 3.2 to 10.3 kg / (cap. \* a) of additionally collected recycling material (except recycling centres) or an average increase in the yield of recycleate by 70 to 72 %.
2. Reducing the energetic utilization of the fractions 0361, 0365 and 0830 by improving the sorting of material for recycling (e.g. lowering the segregation limit for fine sized material and/or improvement of after-sorting beyond the metal separation, limiting the output stream of refuse-derived fuel and sorting residues below 30 % of the input),
3. Facilitating the highest plastic separation possible, at least for HDPE / LDPE, PP, PS and reducing the mixed plastics output.
4. Reducing the film content in the tinfoil fraction. Up to 12 % foils in the tinfoil fraction are immediately lost for material recycling.
5. Introducing further technical measures to improve material purity and thus marketability of the output by:
  - a. separation of black plastics,
  - b. improved processes e.g. by resorting the returns from badly separated material flows,
  - c. optimization of the settings for NIR separation,
  - d. ensuring reasonable plant throughputs. The determination of a throughput limit of sorting plants based on quality objectives should be given priority.
6. Improving the output quality of the sorting processes can be enforced by the dual systems by lowering the allowable impurity levels in the DS specifications. Thus, the increase in the purity of dif-

ferent varieties of plastics such as PE, PP or PS should be increased to 98 % instead of 94 %. This allows a more direct material recycling without a pre-separation of foreign substances.

The implementation of these measures depends on a number of economic and legal constraints.

1. The amount of mixed plastics produced, 85 % of them are currently used for energy generation, can be reduced only by 30 % in favor of pure types of plastic taking current composition and the available state of the art into account. Further reductions in the mixed plastic content require changes to the collected fractions or packaging materials that determine their composition. Taking the aluminum recycling (only 38 % recycle yield due to the high composite content) as an example it can be shown how strong a high composite content lowers the recycle yield.
2. Economic reasons are a major cause for the operation of sorting facilities far below their potential and the state-of-the-art. The cost pressure of accompanying payments for recycling is often counteracted by increasing the plant throughput. Future investments are only made on a regular basis if sufficient long-term stability can be expected due to stable legal provisions and thus a certain price and cost stability. Economic incentives (for example in form of a promotion of recycle or recycled content in new products, especially in the packaging market) would affect the demand for recycle more directly. However, difficulties arise, inter alia, because of the problems in the determination of the quality and quantities of these shares and the sources from which they originate.
3. The (current) prices for energy recovery in Germany represent a serious problem. Since mixed plastics are charged with an additional payment of EUR 60 per Mg for energy recovery, but material recycling is charged at a rate of EUR 90 per Mg, this fraction goes primarily in energy recovery.
4. The legal requirements, in particular the utilization rates, will be significantly tightened with the new Packaging Act. In the future it will be more difficult to meet the quotas simply because of the gap between the licensed quantity (= quantity put into circulation) and the quantity collected.
5. The specifications for the sorting output should be qualitatively increased in order to provide larger quantities of higher grade sorting products and thus to meet the higher demand for such products, which is expected due to the legal provisions for increased utilization rates.

## 1 Einleitung

Das Umweltbundesamt hat die unterschiedlichen Sammelsysteme für Leichtverpackungen (LVP) und stoffgleichen Nichtverpackungen (StNVP) im vorliegenden Forschungsprojekt hinsichtlich ihrer Effizienz analysieren und vergleichen lassen. Hierbei standen insbesondere die Kriterien Quantität (Erfassungsmenge) und Qualität (Zusammensetzung der erfassten Wertstoffe) im Vordergrund. Ziele des Vorhabens waren die Entwicklung einer Bewertungsmethodik, die Ableitung von verschiedenen Kennzahlen sowie Handlungsempfehlungen zur Verbesserung der Effizienz der Sammelsysteme hinsichtlich der zu bewertenden Kennzahlen.

Die gesetzliche Grundlage für die Betrachtung der getrennten Erfassung, Sortierung und Verwertung von Verkaufsverpackungen bildet die Verpackungsverordnung vom 21. August 1998 (BGBl. I S. 2379), in der im Jahr 2016 gültigen Fassung vom 17. Juli 2014 (BGBl. I S. 1058). Weitere übergeordnete Rechtsgrundlagen bilden die Grundsätze des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) sowie die Registerpflichten der Nachweisverordnung (NachwV).

Die Gesamterfassungsmenge der Sammelsysteme für Leichtverpackungen (LVP) in Deutschland belief sich im Jahr 2015 auf ca. 2,5 Mio. Mg und teilt sich folgendermaßen auf:

- ▶ Sammlung in Gelben Säcken: ca. 1.220.000 Mg
- ▶ Sammlung über Wertstofftonnen / Gelbe Tonnen : ca. 1.220.000 Mg
- ▶ Sammlung über reine Wertstoffhofsysteme: ca. 20.000 Mg
- ▶ Sammlung in sonstigen Sammelsystemen (z. B. Depotcontainer): ca. 80.000 Mg

Die über Gelbe Säcke, Gelbe Tonnen, Wertstoffhöfe und Sondersammelsysteme eingesammelten Mengen werden zwischen 10 dualen Systemen<sup>1</sup> auf der Grundlage der jeweiligen Marktanteile aufgeteilt (Stand 09/2016), die anschließend jeweils für die Organisation der Sortierung und Verwertung ihres Anteils verantwortlich sind.

## 2 Stand von Erfassung, Sammlung und Transport in Deutschland

Zur Erfassung/Sammlung benutzen alle dualen Systeme gemeinsam ein mit jeder Kommune jeweils abgestimmtes System. Dabei werden die Sammelfraktionen an den Anfallstellen des privaten Endverbrauchers oder in dessen Nähe deutschlandweit flächendeckend gesammelt. Das Sammelgebiet unterteilt sich in ca. 420 Vertragsgebiete für Leichtverpackungen. Die gemeinsam genutzten Sammelsysteme erfüllen die gleichen Voraussetzungen für alle Beteiligten und werden nach Sammelfraktionen wie folgt unterschieden:

- ▶ Leichtverpackungen (LVP) aus Aluminium, Weißblech, Kunststoff und Verbunden werden meist gemeinsam gesammelt (Mehrkomponentensammlung) und nach der Sammlung im Allgemeinen über Umschlaganlagen an Sortieranlagen geliefert.
- ▶ Getrennte Sammlung von Leichtverpackungen über Wertstoffhöfe
- ▶ Glasverpackungen werden über Depotcontainer gesammelt und direkt aus der Sammeltour oder über Umschlaganlagen an Glasaufbereiter geliefert.
- ▶ Verpackungen aus Papier, Pappe und Kartonagen (PPK) werden zusammen mit kommunalen PPK-Mengen gesammelt. Die PPK-Sammelmengen gelangen entweder zu PPK-Sortieranlagen oder werden ohne Sortierung (über Umschlaganlagen) an Papierfabriken geliefert.

Die Standard LVP-Sammelsysteme sind die Holsysteme „Gelber Sack“ und „Gelbe Tonne“. Häufig haben die Bürger zusätzlich die Möglichkeit, auf einer geringen Anzahl an Wertstoff- und Recyclinghöfen ihre

<sup>1</sup> Duales System Deutschland GmbH, INTERSEROH Dienstleistungs GmbH, Landbell AG, Reclay Systems GmbH (Duales System Redual, Duales System Vfw), Zentek GmbH & Co. KG, Veolia Umweltservice Dual GmbH, BellandVision GmbH, RKD Recycling Kontor Dual GmbH & Co. KG, ELS Europäische Lizenzierungs-Systeme GmbH, NOVENTIZ Dual GmbH

Leichtverpackungen auch direkt anzuliefern. Da in diesen Gebieten der weit überwiegende Teil der LVP über die Holsysteme erfasst werden, sind Vertragsgebiete, in denen die Bürger vollständig an den Gelben Sack oder die Gelbe Tonnen angeschlossen sind und zusätzlich die Möglichkeit besitzen, ihre Verpackungen an wenigen Wertstoffhöfen direkt abzugeben, ebenfalls als „reine Sack- oder Tonnengebiete“ eingestuft. In Süddeutschland werden unterschiedliche Arten von Wertstoffhöfen betrieben und nachfolgend am Beispiel von Bayern skizziert. In den „Informationen aus der Abfallwirtschaft“ des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (2014) [32] sind für die Erfassung von Leichtverpackungen der dualen Systeme 35 entsorgungspflichtige Körperschaften mit Bringsystem und 61 entsorgungspflichtige Körperschaften mit Holsystem ausgewiesen. Zu den 35 entsorgungspflichtigen Körperschaften mit Bringsystem zählen:

- ▶ Wertstoffhof (19 x)
- ▶ Wertstoffhof und Ergänzung Container bzw. Holsystem in Teilgebieten (1 x)
- ▶ Frei zugängliche Container (3 x)
- ▶ Frei zugängliche Container und Ergänzung Wertstoffhof bzw. Holsystem in Teilgebieten (12 x)

Zu den 61 entsorgungspflichtigen Körperschaften mit Holsystem zählen:

- ▶ Gelber Sack bzw. Tonne: (42 x)
- ▶ Gelber Sack bzw. Tonne und Ergänzung Bringsystem (19 x)

Die 35 entsorgungspflichtigen Körperschaften mit Bringsystem sind 26 Vertragsgebieten der dualen Systeme zuzuordnen, da die entsorgungspflichtigen Körperschaften teilweise zu Zweckverbänden zusammengeschlossen sind und den Vertrag mit den dualen Systemen abgeschlossen haben. Diese 26 Vertragsgebiete umfassen:

- ▶ sechs Vertragsgebiete, die Leichtverpackungen über Depotcontainer sammeln.
- ▶ 15 Vertragsgebiete, die Leichtverpackungen auf Wertstoffhöfen sortenrein als Aluminium, Weißblech, Flüssigkeitskartonagen, Kunststoffflaschen, Kunststoffbecher, Mischkunststoffe usw. erfassen. Diese Sammelfractionen werden anschließend vom Wertstoffhof zum Umschlag transportiert, verpresst und ohne weitere Sortierung der Endverwertung zugeführt (Wertstoffhof ohne Sack-System).
- ▶ vier Vertragsgebiete, die Leichtverpackungen in Säcken sammeln und die LVP-Säcke im Bringsystem an die Wertstoffhöfe liefern. Die in Säcken erfassten Anteile werden anschließend in Sortieranlagen sortiert.
- ▶ In einem Vertragsgebiet ist ein gemischtes Wertstoffhofsysteem (Kombination aus Wertstoff-Sack im Holsystem und sortenreine Erfassung auf dem Wertstoffhof) installiert.

Flankiert werden die Wertstoffhöfe in der Regel durch Depotcontainer für Weißblech und teilweise durch Wertstoff-Inseln in Hochhaus-Bebauungsstrukturen.

Deutschlandweit existieren darüber hinaus ca. acht weitere Sondersammelsysteme. Hierzu zählen z. B.:

- ▶ die gemeinsame Erfassung von PPK und LVP in einem Sammelbehälter,
- ▶ die getrennte Erfassung von „Flach“ und „Rund“. „Flach“ = PPK, Folien und expandiertes Polystyrol. „Rund“ = LVP (ohne Folien und ohne expandiertes Polystyrol) sowie Glas),
- ▶ die gemeinsame Erfassung von Kunststoff und Verbunden, aber ohne Metalle.

Der Anteil der über diese Sondersammelsysteme erfassten Leichtverpackungen beträgt in etwa 80.000 Mg und entspricht damit ca. 3 % der Gesamterfassungsmenge LVP.

In den letzten Jahren hat die Wertstofftonne als Sammelsystem für die gemeinsame Sammlung von Verpackungen und stoffgleichen Nichtverpackungen, teils zunächst auch mit Elektrokleingeräten, an Bedeutung gewonnen.

In Tabelle 1 sind die grundlegenden Charakteristika für die vier Grund-Sammelsysteme im Überblick dargestellt.

Tabelle 1: Charakteristik der LVP-Sammelsysteme

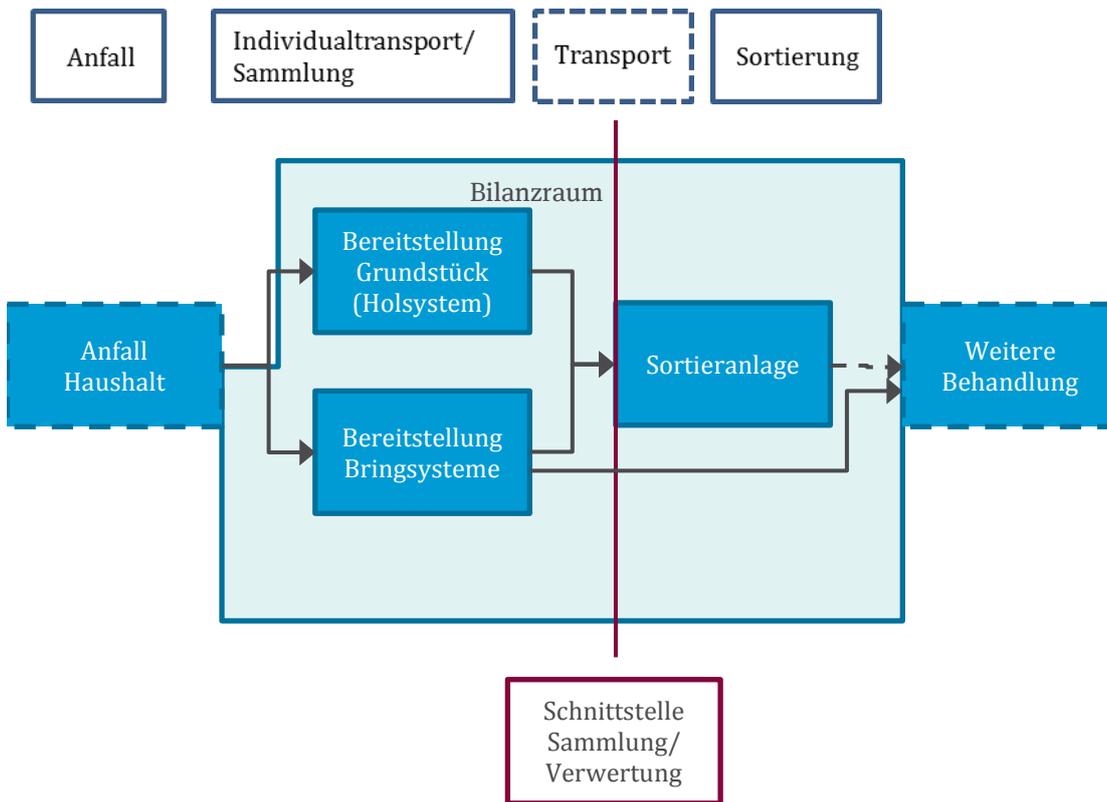
Charakteristik	Gelbe Tonne	Gelber Sack	Depotcontainer	Wertstoffhof
Hol-/Bringsystem	Holsystem	Holsystem	Bringsystem	Bringsystem
Anwendung nach Häufigkeit	häufig	häufig	sehr selten	selten
Anwendung nach Bebauung	eher städtisch	eher ländlich	eher städtisch	eher ländlich
Sammelbehälter	Meist MGB 120, 240 oder 1.100	Kunststoffsack, meist 90 l	Depotcontainer 1-7 m <sup>3</sup>	stoffspezifisch meist Umleerbehälter, gemischt verschiedene Formen
Sammelfahrzeug	Hecklader	Seiten-/Hecklader	Absetz-/Abrollcontainerfahrzeug	je nach Behältertyp; meist Hecklader
Einwohnerspezifisches Aufkommen	hoch	hoch	gering	sehr gering
Fehlwurfanteil	sehr hoch	hoch	gering	sehr gering
Stoffspezifische Sammlung	nein	nein	möglich	möglich

### 3 Bilanzraum und Schnittstellen

Der Bilanzraum des Forschungsvorhabens umfasst alle Sammel-, Transport- und Sortiervorgänge von der Grundstücksgrenze der Abfallverursacher bis zum Output der Sortieranlage.

Die Definition der einzelnen Vorgänge ist grundlegend im Glossar beschrieben und die Optionen in Abbildung 13 dargestellt.

Abbildung 13: Bilanzraum und Schnittstellen



## 4 Auswahl und Beschreibung der zu betrachtenden Sammelsysteme

### 4.1 Auswahl der Sammelsysteme

Dieser Abschnitt beschreibt die zum Systemvergleich ausgewählten Sammelsysteme. Sie sind Grundlage für die Kalkulation der Stoffströme, Kosten und Umweltauswirkungen.

Folgende Sammelsysteme wurden zum Vergleich ausgewählt:

- ▶ Wertstofftonne städtisch,
- ▶ Wertstofftonne ländlich,
- ▶ Gelbe Tonne städtisch,
- ▶ Gelbe Tonne ländlich,
- ▶ Gelber Sack ländlich,
- ▶ Wertstoffsack ländlich,
- ▶ Depotcontainer (ohne StNVP),
- ▶ Wertstoffhof (ohne StNVP) als Hauptsammelsystem.

Erste Datengrundlage sind Abstimmungsvereinbarungen von 94 Vertragsgebieten, die Informationen zu Behältergestaltung und im Fall von mehreren (konkurrierenden) Sammelsystemen Angaben zum jeweiligen Systemanteil liefern.

Die Auswahl der betrachteten Vertragsgebiete erfolgte nach folgenden Kriterien:

1. Berücksichtigung von Vertragsgebieten, für die die LVP-Zusammensetzung vorliegt (n=29)
2. Identifikation von Sammelgebieten mit Bringsystem, in denen über das Hauptsammelsystem mindestens 80 % des Aufkommens anfällt
3. Identifikation aller Sammelgebiete, in denen StNVP gemeinsam mit LVP erfasst werden
4. Bundesweite Auswahl der Sammelgebiete nach dem Zufallsprinzip

Weitere Datengrundlagen sind die Abfallbilanzen der Bundesländer und die DESTATIS-Daten zu Bevölkerung und Fläche der Vertragsgebiete.

Die Zuordnung der Vertragsgebiete zur ländlichen/städtischen Bebauung erfolgte auf Basis der Einwohnerdichte. Der Schwellenwert lag bei 700 Einwohner/km<sup>2</sup>.

Die 94 betrachteten Vertragsgebiete teilen sich wie folgt auf:

Tabelle 2: Anzahl der betrachteten Vertragsgebiete je Sammelsystem

Sammelsysteme	Anzahl
Wertstofftonne städtisch	8
Wertstofftonne ländlich	7
Gelbe Tonne städtisch	9
Gelbe Tonne ländlich	15
Gelber Sack ländlich	25
Wertstoffsack ländlich	2
Depotcontainer	5
Wertstoffhof	10
Nicht berücksichtigt <sup>2</sup>	13

<sup>2</sup> Aufgrund nicht eindeutiger Zuordenbarkeit zu einem der ausgewählten Sammelsysteme

## 4.2 Beschreibung der Sammelsysteme

Für das Datenmodell wurden als Bezugsgröße 1 Mio. Einwohner gewählt, um eine Vergleichbarkeit aller Teilprozesse vom Individualtransport bis zur Analyse der Sortierung zu gewährleisten. Das Datenmodell ist so angelegt, dass ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen Einwohnerzahl und den Sammelkosten besteht.

### 4.2.1 Gelbe Tonne

#### 4.2.1.1 Ist-Stand

Die Gelbe Tonne ist neben dem Gelben Sack das am weitesten verbreitete LVP-Sammelsystem in Deutschland. Es wird tendenziell häufiger in städtischen Vertragsgebieten eingesetzt.

Die Gelbe Tonne ist in der Regel das Hauptsammelsystem. Es wird in einigen Vertragsgebieten durch die LVP-Sammlung auf Wertstoffhöfen ergänzt. In einigen Vertragsgebieten wird für ausgewählte Wohngebiete der Gelbe Sack alternativ angeboten.

Die Sammlung über die Gelbe Tonne erfolgt ausschließlich als Mehrkomponentengemisch.

In den letzten Jahren wurde die Gelbe Tonne in mehreren Vertragsgebieten um die Miterfassung der stoffgleichen Nichtverpackungen (Wertstofftonne) und seltener Elektrokleingeräte (Gelbe Tonne plus) erweitert.

Als Sammelbehälter kommen in der Regel MGB in der Größe von 120 bis 1.100 l zum Einsatz. Der Sammelturnus schwankt zwischen wöchentlich und 4-wöchentlich, wobei der Sammelturnus bei den 4-Radbehältern in der Regel kürzer ist. Das bereitgestellte Behältervolumen am Standplatz orientiert sich häufig am bereitgestellten Behältervolumen für Restabfall.

#### 4.2.1.2 Aufkommen

Das einwohnerspezifische Aufkommen der LVP kann sich zwischen den Vertragsgebieten sehr stark unterscheiden. Die für die Sammelsysteme heranzuziehenden Vertragsgebiete (n=22) verzeichnen ein mittleres einwohnerspezifisches Aufkommen von 38 kg/(EW\*a) bei einer Spanne von 18–60 kg/(EW\*a).

Das einwohnerspezifische LVP-Aufkommen in den ländlichen Vertragsgebieten ist mit durchschnittlich 45,8 kg/(EW\*a) tendenziell höher als in den städtischen mit durchschnittlich 27,0 kg/(EW\*a).

Für den Vergleich der Sammelsysteme wurden die durchschnittlichen Aufkommen ausgewählt:

Tabelle 3: Einwohnerspezifisches Aufkommen für die Sammelsysteme Gelbe Tonne städtisch/ländlich

	Gelbe Tonne städtisch (ohne StNVP)	Gelbe Tonne ländlich (ohne StNVP)
Aufkommen [kg/(EW*a)]	27,0	45,8

#### 4.2.1.3 Prozesskette

In den Sammelsystemen „Gelbe Tonne städtisch/ländlich“ werden die LVP ausschließlich gemischt im Holsystem gesammelt.

Die Sammelkette besteht aus folgenden Vorgängen:

1. Systemloser Anfall im Haushalt (außerhalb Bilanzgrenze),
2. Benutzertransport aus dem Haushalt zur Gelben Tonne (außerhalb Bilanzgrenze),
3. Sammlung mit Sammelfahrzeug (Hecklader) im Umleersystem,
4. ggf. Umladung und Transport zur Sortieranlage mit Walking Floor-Fahrzeugen.

Die Erfassung im Haushalt erfolgt systemlos, es werden keine Säcke oder Mehrweggefäße seitens des Systembetreibers bereitgestellt.

Der Benutzertransport aus dem Haushalt zum Standplatz der Gelben Tonne auf dem Grundstück ist wie der Anfall außerhalb der Bilanzgrenze und wird nicht betrachtet.

#### 4.2.1.4 Behältergestaltung und Sammeltturnus

Als Sammelbehälter kommen die MGB 120, 240 und 1.100 zum Einsatz. Die Daten zur Behältergestaltung werden berechnet aus dem Mittelwert des auf 1 Mio. Einwohner normierten Behälterbestandes der betrachteten Vertragsgebiete.

Der Sammeltturnus wird ebenfalls aus dem Mittelwert der betrachteten Vertragsgebiete berechnet.

Tabelle 4: Behältergestaltung und Sammeltturnus für ein Modellgebiet mit 1 Mio. Einwohnern

	Einheit	Gelbe Tonne städtisch (ohne StNVP)	Gelbe Tonne ländlich (ohne StNVP)
Anzahl MGB 120	[Stück]	59.820	72.470
Anzahl MGB 240	[Stück]	53.570	263.400
Anzahl MGB 1.100	[Stück]	12.980	6.580
Sammeltturnus MGB 120 + 240	[Wochen]	2,0	2,7
Sammeltturnus MGB 1.100	[Wochen]	1,7	1,7

### 4.2.2 Wertstofftonne

#### 4.2.2.1 Ist-Stand

Bei der Wertstofftonne wird die Sammlung der LVP um die Miterfassung der StNVP erweitert. In einigen Vertragsgebieten wird die Wertstofftonne auch zur Miterfassung von Elektrokleingeräten (Gelbe Tonne plus) genutzt.

Die Wertstofftonne wird gegenwärtig nur in wenigen Vertragsgebieten angewendet. Dazu kommen Pilotgebiete, die sich nur über einen Teil eines Vertragsgebietes erstrecken. Die Wertstofftonne wird sowohl in städtischen wie auch ländlichen Vertragsgebieten eingesetzt.

Die Sammlung über die Wertstofftonne erfolgt ausschließlich als Mehrkomponentengemisch.

Als Sammelbehälter kommen in der Regel MGB in der Größe von 120 bis 1.100 l zum Einsatz. Der Sammeltturnus schwankt zwischen wöchentlich und 4-wöchentlich, wobei der Sammeltturnus bei den 4-Radbehältern in der Regel kürzer ist. Das bereitgestellte Behältervolumen am Standplatz orientiert sich häufig am bereitgestellten Behältervolumen für Restabfall.

#### 4.2.2.2 Aufkommen

Das einwohnerspezifische Aufkommen der LVP kann sich zwischen den Vertragsgebieten stark unterscheiden. Die für die Sammelsysteme heranzuziehenden Vertragsgebiete (n=17) verzeichnen ein mittleres einwohnerspezifisches Aufkommen von 33 kg/(EW\*a) bei einer Spanne von 20–44 kg/(EW\*a).

Das einwohnerspezifische Aufkommen in den ländlichen Vertragsgebieten ist mit durchschnittlich 38,7 kg/(EW\*a) tendenziell höher als in den städtischen mit durchschnittlich 30,4 kg/(EW\*a).

Für den Vergleich der Sammelsysteme wurden die in Tabelle 5 dargestellten durchschnittlichen Aufkommen ausgewählt.

Tabelle 5: Einwohnerspezifisches Aufkommen für die Sammelsysteme Wertstofftonne städtisch/ländlich

	Wertstofftonne städtisch (mit StNVP)	Wertstofftonne ländlich (mit StNVP)
Aufkommen [kg/(EW*a)]	30,4	38,7

#### 4.2.2.3 Prozesskette

In den Sammelsystemen „Wertstofftonne städtisch/ländlich“ werden die LVP und StNVP ausschließlich gemischt im Holsystem gesammelt.

Die Sammelkette besteht aus folgenden Vorgängen:

1. Systemloser Anfall im Haushalt (außerhalb Bilanzgrenze),
2. Benutzertransport aus dem Haushalt zur Wertstofftonne (außerhalb Bilanzgrenze),
3. Sammlung mit Sammelfahrzeug (Hecklader) im Umleersystem,
4. ggf. Umladung und Transport zur Sortieranlage mit Walking Floor-Fahrzeugen.

Die Erfassung im Haushalt erfolgt systemlos, es werden keine Säcke oder Mehrweggefäße seitens des Systembetreibers bereitgestellt.

Der Benutzertransport aus dem Haushalt zum Standplatz der Wertstofftonne auf dem Grundstück liegt wie der Anfall außerhalb der Bilanzgrenze und wird nicht betrachtet.

#### 4.2.2.4 Behältergestaltung und Sammeltturnus

Als Sammelbehälter kommen die MGB 120, 240 und 1.100 zum Einsatz. Die Daten zur Behältergestaltung werden berechnet aus dem Mittelwert des auf 1 Mio. Einwohner normierten Behälterbestandes der betrachteten Vertragsgebiete.

Der Sammeltturnus wird ebenfalls aus dem Mittelwert der betrachteten Vertragsgebiete berechnet.

Tabelle 6: Behältergestaltung und Sammeltturnus

	Einheit	Wertstofftonne städtisch	Wertstofftonne ländlich
Anzahl MGB 120	[Stück]	20.080	11.920
Anzahl MGB 240	[Stück]	101.890	259.180
Anzahl MGB 1.100	[Stück]	18.060	8.030
Sammeltturnus MGB 120 + 240	[Wochen]	2,8	2,9
Sammeltturnus MGB 1.100	[Wochen]	2,3	1,9

### 4.2.3 Gelber Sack

#### 4.2.3.1 Ist-Stand

Der Gelbe Sack ist neben der Gelben Tonne das am weitesten verbreitete LVP-Sammelsystem in Deutschland. Es wird deutlich häufiger in ländlichen Vertragsgebieten eingesetzt.

Der Gelbe Sack ist in der Regel das Hauptsammelsystem. Es wird in einigen Vertragsgebieten durch die LVP-Sammlung auf Wertstoffhöfen, teils ebenfalls gemischt im Sack, teils stoffspezifisch, ergänzt. In einigen Vertragsgebieten wird für ausgewählte Wohngebiete der Gelbe Sack alternativ zur Gelben Tonne angeboten.

Die Sammlung über den Gelben Sack erfolgt ausschließlich gemischt.

Die einzusetzenden Säcke besitzen weit überwiegend ein Fassungsvermögen von 90 l. Der Sammelturnus schwankt zwischen 2-wöchentlich und 4-wöchentlich, wobei der 2-wöchentliche Sammelturnus dominiert.

Aufgrund der wenigen Referenzen wird das Sammelsystem „Gelber Sack städtisch“ im Rahmen des Forschungsvorhabens nicht betrachtet.

#### 4.2.3.2 **Aufkommen**

Das einwohnerspezifische Aufkommen kann sich zwischen den Vertragsgebieten sehr stark unterscheiden. Die für die Sammelsysteme heranzuziehenden ländlichen Vertragsgebiete (n=25) verzeichnen ein mittleres einwohnerspezifisches Aufkommen von 34,0 kg/(EW\*a) bei einer Spanne von 25-43 kg/(EW\*a).

Tabelle 7: Einwohnerspezifisches Aufkommen für das Sammelsystem Gelber Sack ländlich

	Gelber Sack ländlich (ohne StNVP)
Aufkommen [kg/(EW*a)]	34,0

#### 4.2.3.3 **Prozesskette**

Im Sammelsystem „Gelber Sack „ werden die LVP ausschließlich gemischt im Holsystem gesammelt.

Die Sammelkette besteht aus folgenden Vorgängen:

1. Systemloser Anfall im Haushalt (außerhalb Bilanzgrenze),
2. Benutzertransport aus dem Haushalt zum Gelben Sack; Bereitstellung des Gelben Sacks zur Sammlung (außerhalb Bilanzgrenze),
3. Sammlung mit Sammelfahrzeug (Hecklader) im Umleersystem,
4. ggf. Umladung und Transport zur Sortieranlage mit Walking Floor-Fahrzeugen.

Die Erfassung im Haushalt erfolgt systemlos, die Bereitstellung zur Sammlung im Gelben Sack. Die leeren Säcke werden durch den Systembetreiber bereitgestellt. Die Distribution der Säcke ist nicht im Bilanzraum enthalten.

Der Benutzertransport der Säcke aus dem Haushalt zum Bereitstellungsplatz für die Sammlung ist, wie die Erfassung der Abfälle im Haushalt, außerhalb der Bilanzgrenze und wird nicht betrachtet.

#### 4.2.3.4 **Behältergestaltung und Sammelturnus**

Die Anzahl der benötigten Säcke wird auf Basis mittleren Sammelmasse pro Sack von 1,5 kg<sup>3</sup> berechnet. Pro Standplatz werden im Mittel vier Säcke bereitgestellt.

Die Anzahl der befüllten Säcke wird berechnet aus dem mittleren Aufkommen auf 1 Mio. Einwohner normiert und der mittleren Sammelmasse pro Sack.

Der Sammelturnus wird aus dem Mittelwert der betrachteten Vertragsgebiete gebildet.

Tabelle 8: Befüllte Säcke und Sammelturnus

	Einheit	Gelber Sack ländlich
Anzahl befüllte Säcke	[Stück/a]	22,7 Mio.
Sammelturnus	[Wochen]	2,7

<sup>3</sup> eigene Messungen INTECUS

#### 4.2.4 Wertstoffsack

##### 4.2.4.1 Ist-Stand

Die Anwendung des Wertstoffsacks ist für insgesamt drei ländliche Gebiete dokumentiert, davon ist eines ein Pilotgebiet. Gegenwärtig wird der Wertstoffsack noch in einem Vertragsgebiet genutzt. Dort ist er das Hauptsammelsystem. Für die weiteren Betrachtungen werden die Daten aller drei Gebiete soweit sinnvoll genutzt. Die Sammlung über den Wertstoffsack erfolgt ausschließlich gemischt.

Die einzusetzenden Säcke besitzen ein Fassungsvermögen von 90 l. Der Sammeltturnus schwankt zwischen 2-wöchentlich und 4-wöchentlich.

##### 4.2.4.2 Aufkommen

Das mittlere einwohnerspezifische Aufkommen an LVP inkl. StNVP liegt bei 43,5 kg/(EW\*a).

Tabelle 9: Einwohnerspezifisches Aufkommen für das Sammelsystem Wertstoffsack

	Wertstoffsack ländlich (mit StNVP)
Aufkommen [kg/(EW*a)]	43,5

##### 4.2.4.3 Prozesskette

Im Sammelsystem „Wertstoffsack“ werden die LVP gemeinsam mit den StNVP ausschließlich gemischt im Holsystem gesammelt.

Die Sammelkette besteht aus folgenden Vorgängen:

1. Systemloser Anfall im Haushalt (außerhalb Bilanzgrenze),
2. Benutzertransport aus dem Haushalt zum Wertstoffsack; Bereitstellung des Wertstoffsacks zur Sammlung (außerhalb Bilanzgrenze),
3. Sammlung mit Sammelfahrzeug (Hecklader) im Umleersystem,
4. ggf. Umladung und Transport zur Sortieranlage mit Walking Floor-Fahrzeugen.

Die Erfassung im Haushalt erfolgt systemlos, die Bereitstellung zur Sammlung im Wertstoffsack. Die leeren Säcke werden durch den Systembetreiber bereitgestellt. Die Distribution der Säcke ist nicht im Bilanzraum enthalten.

Der Benutzertransport der Säcke aus dem Haushalt zum Bereitstellungsplatz für die Sammlung ist, wie die Erfassung der Abfälle im Haushalt, außerhalb der Bilanzgrenze und wird nicht betrachtet.

##### 4.2.4.4 Behältergestaltung und Sammeltturnus

Die Anzahl der benötigten Säcke wird auf Basis mittleren Sammelmasse pro Sack von 1,5 kg<sup>4</sup> berechnet. Pro Standplatz werden im Mittel vier Säcke bereitgestellt.

Die Anzahl der befüllten Säcke wird berechnet aus dem mittleren Aufkommen auf 1 Mio. Einwohner normiert und der mittleren Sammelmasse pro Sack.

Der Sammeltturnus wird aus dem Mittelwert der betrachteten Vertragsgebiete berechnet.

Tabelle 10: Befüllte Säcke und Sammeltturnus

	Einheit	Wertstoffsack ländlich
Anzahl befüllte Säcke	[Stück/a]	29,0 Mio.
Sammeltturnus	Wochen	3,0

<sup>4</sup> eigene Messungen INTECUS

## 4.2.5 Depotcontainer

### 4.2.5.1 Ist-Stand

Die Sammlung von LVP mit Depotcontainern als Hauptsammelsystem wird nur noch in wenigen Vertragsgebieten (<10 %) durchgeführt, die vorrangig in Süddeutschland liegen. Immer wird als alternatives Sammelsystem der Wertstoffhof angeboten. Der Anteil der über Depotcontainer gesammelten LVP beträgt im Mittel 85 % der in den Vertragsgebieten insgesamt gesammelten Masse.

Das Sammelsystem wird sowohl in städtischen als auch in ländlichen Gebieten eingesetzt.

Die Sammlung über Depotcontainer erfolgt fast ausschließlich gemischt. Nur in Ausnahmefällen werden Metallverpackungen getrennt erfasst.

Die einwohnerspezifische Standplatzdichte schwankt stark zwischen 350 und 3.000 angeschlossenen Einwohnern je Standplatz. Für die im Projekt betrachteten Vertragsgebiete wurde ein Mittelwert von 687 Einwohnern je Standplatz ermittelt.

Als Sammelbehälter kommen überwiegend Depotcontainer mit einem Fassungsvermögen von 3 m<sup>3</sup> zum Einsatz. Anwendung finden auch MGB 1.100 und Umleerbehälter mit einem Volumen von 5 m<sup>3</sup> oder 7 m<sup>3</sup>.

### 4.2.5.2 Aufkommen

Das einwohnerspezifische Aufkommen in den Vertragsgebieten (n=5) beträgt im Mittel 24,7 kg/(EW\*a) bei einer Schwankungsbreite von 5,1 kg/(EW\*a) bis 35,1 kg/(EW\*a). Das Aufkommen in den ländlichen Vertragsgebieten ist höher als in den städtischen.

Tabelle 11: Einwohnerspezifisches Aufkommen für das Sammelsystem Depotcontainer

	Depotcontainer (ohne StNVP)
Aufkommen [kg/(EW*a)]	24,7

### 4.2.5.3 Prozesskette

Im Sammelsystem „Depotcontainer“ werden die LVP ausschließlich gemischt im Bringsystem gesammelt. Die Sammelkette besteht aus folgenden Vorgängen:

1. Systemlose Erfassung im Haushalt (außerhalb Bilanzgrenze)
2. Individualtransport aus dem Haushalt zum Depotcontainer-Standplatz systemlos und turnusfrei
3. Sammlung mit Sammelfahrzeug (Abroll-Containerfahrzeug mit Kranaufbau) im Umleersystem turnusfrei (bei Bedarf)
4. ggf. Umladung und Transport zur Sortieranlage mit Walking Floor-Fahrzeugen

Für die Erfassung im Haushalt werden keine Säcke oder Mehrweggefäße seitens des Systembetreibers bereitgestellt.

Für den Individualtransport aus dem Haushalt zum Depotcontainer-Standplatz wird angenommen, dass der Transport der Glasverpackungen gemeinsam mit LVP erfolgt. Dies bedeutet für die Berechnung der System-Aufwendungen, dass der Benutzertransport für LVP anteilig mit 50 % in die Kalkulation eingeht [BIFA, 2011].

### 4.2.5.4 Behältergestaltung und Sammeltturnus

Auf den Standplätzen sind Behälter für LVP und Glasverpackungen gestellt. Die Größe der LVP-Depotcontainer beträgt 3 m<sup>3</sup>, pro Standplatz sind zwei Depotcontainer gestellt. Die einwohnerspezifische Standplatzdichte beträgt 687 Einwohner je Standplatz. Es wird ein mittlerer Füllgrad von 80 % bei einer mittleren Schüttdichte von 35 kg/m<sup>3</sup> angenommen.

Tabelle 12: Behältergestaltung und Sammelturnus

	Einheit	Depotcontainer
Anzahl Depotcontainer 3 m <sup>3</sup>	[Stück]	2.910
Sammeltturnus	[Wochen]	bei Bedarf

#### 4.2.6 Wertstoffhof als Hauptsammelsystem

##### 4.2.6.1 Ist-Stand

Die Sammlung von LVP auf Wertstoffhöfen als Hauptsammelsystem erfolgt vorrangig in Süddeutschland. Bundesweit werden weniger als 3 % der Leichtverpackungen auf Wertstoffhöfen gesammelt. Das Sammelsystem wird ausschließlich in ländlichen Gebieten eingesetzt. In den Vertragsgebieten mit Wertstoffhöfen als Hauptsammelsystem sind keine Holsysteme (gelber Sack oder gelbe Tonne) installiert. Zusätzlich zu den Wertstoffhöfen werden i.d.R. Depotcontainer für die Dosensammlung eingesetzt. In Ausnahmefällen werden Wertstoff-Inseln (in Hochhaus-Gebieten) eingesetzt (dies sind mehrere separate MGB 240 mit den „Wertstoffhof-Fraktionen“ Folien, Flaschen, Becher usw.). Dieser Sammeltyp ist Grundlage des Wertstoffhof-Sammelsystems.

Neben dem Wertstoffhof mit stoffspezifischer Separation als Hauptsammelsystem existieren die gemischte Sammlung Gelber Säcke auf dem Wertstoffhof als Haupt- und Nebensammelsystem sowie die stoffspezifische Wertstoffhof-Sammlung als Nebensammelsystem mit Erfassungsanteilen zwischen 3 % und 25 %. Die Sammlung von LVP auf Wertstoffhöfen als Nebensammelsystem ist weit verbreitet, führt aber im Allgemeinen zu sehr geringen Erfassungsanteilen. Im Sammelsystem Wertstoffhof wird daher nur die Nutzung mit stoffspezifischer Separation als Hauptsammelsystem betrachtet.

Je nach Vertragsgebiet sind durchschnittlich 4.500 Einwohner an einen einzelnen Wertstoffhof angeschlossen bei einer Schwankungsbreite zwischen 3.100 und 12.000 Einwohnern.

Die Sammlung der Verpackungsmaterialien auf den Wertstoffhöfen erfolgt sortenrein getrennt nach Materialart und Verpackungsform (Kunststofffolien, Kunststoffflaschen, Kunststoffbecher, Weißblech usw.). PPK und PPK-Verbunde werden dem Altpapier zugewiesen und fallen nicht als LVP-Fraktion an. Glasverpackungen werden separat gesammelt.

Bei der Sammlung der Leichtverpackungen auf den Wertstoffhöfen kommen unterschiedliche Konzepte zum Einsatz. Ein Vertragsgebiet arbeitet ausschließlich mit Umleer- und Depotcontainer (4,5m<sup>3</sup>-7,0 m<sup>3</sup>), ein anderes Vertragsgebiet favorisiert Wechselcontainer (Abrollcontainer, Presscontainer, Absetzcontainer) und wieder ein anderes Vertragsgebiet arbeitet ausschließlich mit Foliensäcken. Am häufigsten wird eine Mischung aller am Markt üblichen Sammelbehälter für die unterschiedlichen Wertstoff-Fraktionen und die unterschiedliche Einwohnerzahl im Einzugsbereich des Wertstoffhofes verwendet (Abrollcontainer, Absetzcontainer, Depotcontainer, MGB 1.100, MGB 240, Foliensäcke (1-2,5 m<sup>3</sup>)).

##### 4.2.6.2 Aufkommen

Das einwohnerspezifische Aufkommen an Leichtverpackungen in den Vertragsgebieten beträgt durchschnittlich 10,9 kg/(EW\*a) bei einer Schwankungsbreite von 7,3 kg/(EW\*a) bis 14,7 kg/(EW\*a). Das Aufkommen verteilt sich auf einzelne vermarktungsfähige Sammelfraktionen wie in Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Einwohnerspezifisches Aufkommen für das Sammelsystem Wertstoffhof

	Wertstoffhof gesamt	Folien	Flaschen	Becher	EPS	MKS	Weißblech	Alu	Verbunde
Aufkommen [kg/(EW*a)]	10,9	1,0	1,0	0,5	0,2	4,5	2,1	0,2	1,2

Auf den Wertstoffhöfen werden die Einwohner zur sortenreinen Sammlung motiviert/geschult. Die Sammelfraktionen sind sehr sortenrein, eine nachträgliche Sortierung ist vor der weiteren Aufbereitung nicht notwendig und im Datenmodell nicht vorgesehen.

#### 4.2.6.3 Prozesskette

Im Sammelsystem „Wertstoffhof“ werden die Leichtverpackungen ausschließlich sortenrein und getrennt voneinander im Bringsystem gesammelt.

Die Sammelkette besteht aus folgenden Vorgängen:

1. Systemlose Erfassung im Haushalt (nicht im Bilanzraum enthalten),
2. Individualtransport aus dem Haushalt zum Wertstoffhof systemlos und turnusfrei,
3. Separate Erfassung der Leichtverpackungen auf den Wertstoffhöfen in folgenden Wertstoff-Fraktionen:
  - ▶ Folie (0310),
  - ▶ Kunststoffbehälter (0320/0321),
  - ▶ Becher (0330),
  - ▶ EPS (0340),
  - ▶ Mischkunststoff (0350/0352),
  - ▶ Weißblech (0410),
  - ▶ Aluminium (0420),
  - ▶ Flüssigkeitskartonagen (0510),
4. Sammlung der Wertstoff-Fraktionen von den einzelnen Wertstoffhöfen im Landkreis zur Umschlaganlage per Hecklader,
5. Transport zur Aufbereitungs- und Endverwertungsanlage (Sortierung ist nicht vorgesehen).

Die Erfassung im Haushalt erfolgt systemlos, es werden keine Säcke oder Mehrweggefäße seitens des Systembetreibers bereitgestellt.

#### 4.2.6.4 Behältergestaltung und Sammeltturnus

Auf den Wertstoffhöfen sind Sammelbehälter für Folie, Kunststoffflaschen, Kunststoffbecher, expandiertes-Polystyrol, Mischkunststoff, Weißblech, Aluminium und Flüssigkeitskartonagen gestellt.

Für das Datenmodell wird vereinfachend angenommen, dass alle Fraktionen mit Umleerbehältern mit einem Volumen von 5 m<sup>3</sup> gesammelt werden. In der Praxis ist der Umleerbehälter für die Fraktionen Folie, Kunststoffflaschen, Kunststoffbecher, Mischkunststoff, Weißblech der bevorzugte Sammelbehälter, es werden aber auch Depotcontainer, Abroll-/Absetzcontainer mit einem Volumen von 3–36 m<sup>3</sup> eingesetzt. Die Fraktion expandiertes-Polystyrol wird häufig in Foliensäcken mit einem Füllvolumen von 1–2,5 m<sup>3</sup> gesammelt, die Fraktionen Aluminium und Flüssigkeitskartonagen über MGB 1.100.

Tabelle 14: Behältergestaltung und Sammeltturnus - Wertstoffhof

Fraktion	Behältertyp/-größe	Behältergestaltung	Sammeltturnus
		[Stück]	[Wochen]
Folie	Umleerbehälter 5 m <sup>3</sup>	33	0,5
Kunststoffflaschen	Umleerbehälter 5 m <sup>3</sup>	29	0,4
Kunststoffbecher	Umleerbehälter 5 m <sup>3</sup>	29	0,2
EPS	Umleerbehälter 5 m <sup>3</sup>	22	0,3
Mischkunststoff	Umleerbehälter 5 m <sup>3</sup>	66	1,3
Weißblech	Umleerbehälter 5 m <sup>3</sup>	22	0,5
Aluminium	Umleerbehälter 5 m <sup>3</sup>	22	0,1
Flüssigkeitskartonagen	Umleerbehälter 5 m <sup>3</sup>	33	0,7

Für das Datenmodell wurde die mittlere Behälteranzahl pro Wertstoff aus den Angaben der Abstimmungsvereinbarungen entnommen und mit der mittleren Anzahl der Wertstoffhöfe multipliziert. Dies sind bei 1 Mio. Einwohnern im Vertragsgebiet und einem mittleren Anschluss von 4.500 Einwohnern 220 Wertstoffhöfe. In der Praxis richtet sich die Art und Anzahl der Sammelbehälter auch nach den Anliefermengen des jeweiligen Wertstoffhofes. Ziel der Behältergestaltung ist, dass die Behälter einer Sammeltour einen hohen Füllgrad haben. Für den Sammeltturnus wird angenommen, dass die Behälter mit Erreichen eines Füllgrades von 80 % geleert werden.

### 4.3 Datenerhebung der Sammelsystemspezifischen LVP-Zusammensetzung

Die LVP-Zusammensetzung bildet neben dem Aufkommen die Datenbasis für das Teilmodell der Sortierung/Verwertung. Sie wird modellgebietsspezifisch erhoben. Für die Modellgebiete mit Holsystem (Sack/MGB) städtisch mit/ohne Erfassung StNVP liegen insgesamt 29 Datensätze vor, die die Datengrundlage für die Berechnung der charakteristischen mittleren Zusammensetzung der jeweiligen Sammelsysteme bilden (Tabelle 15).

Die Daten wurden mittels Sortieranalyse im Zeitraum von 2008 bis 2015 erhoben, wobei der weit überwiegende Teil aus den Jahren 2011-2013 stammt. Die meisten Datensätze wurden repräsentativ für die Vertragsgebiete bestimmt.

Die Datensätze wurden selbst erhoben, aus öffentlichen Quellen entnommen oder von örE bzw. dualen Systemen zur Verfügung gestellt.

Tabelle 15: Datengrundlage LVP-Zusammensetzung nach Differenzierungsebenen

	WST/s	Sack/l	WST/l	MGB/s	MGB/l	WSack/l	DC	WSTH
Anzahl Analysen	6	9	7	2	3	2	Modell	fraktionierte Erfassung

Für die gemischte Sammlung der LVP über Depotcontainer liegen keine Daten vor. Hier wird die Zusammensetzung auf Basis der Zusammensetzung in den Modellgebieten mit Holsystem festgelegt. Dabei bleiben die Verhältnisse zwischen den Einzelfraktionen der Verpackungen und StNVP gleich, der Anteil der sonstigen Fraktionen wird auf Basis von Daten aus Modellversuchen von Papiersammelsystemen geschätzt.<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Wissenschaftliche Untersuchung und Begleitung von Modellversuchen zur getrennten Erfassung graphischer Altpapiere, Studie der INTECUS GmbH im Auftrag der AGRAPA, 2000

Für die Getrenntsammlung mehrerer Fraktionen für das System Wertstoffhof liegen die Gesamterfassungsmengen bei den dualen Systemen vor.

Für die Berechnungen im Teilmodell Sortierung/Verwertung ist ein hoher Differenzierungsgrad für die Zusammensetzung der LVP Grundvoraussetzung. Diese Grundvoraussetzung erfüllen nur wenige der vorliegenden Sortieranalysen. Zudem ist die Aufschlüsselung in Sortierfraktionen für die verschiedenen Sortieranalysen nicht immer gleich.

Dem wird durch die Entwicklung eines dreistufigen Datenmodells für die Ermittlung der modellgebietspezifischen Zusammensetzung Rechnung getragen. Das Modell beinhaltet drei Differenzierungsebenen (siehe Tabelle 30). Die Aufsummierung der Fraktionen der stärker aufgeschlüsselten Differenzierungsebene zur jeweils weniger aufgeschlüsselten ist definiert.

Die Berechnung der mittleren Zusammensetzung für die einzelnen Sammelsysteme erfolgt nach folgendem Modell: Alle für das Sammelsystem vorliegenden Sortieranalysen werden auf die Zusammensetzung nach der 1. Differenzierungsebene umgerechnet, soweit sie nicht in der entsprechenden Form vorliegen. Im nächsten Schritt werden die Fraktionen, die in der 1. Differenzierungsebene Summen mehrerer Fraktionen der 2. Differenzierungsebene bilden, berechnet. Dies erfolgt durch die Ermittlung der Zusammensetzung dieser Summen auf Basis der Sortieranalysen, die auch für die 2. Differenzierungsebene vorliegen. Dieser Schritt wird dann für die Transformation der Daten der 2. Differenzierungsebene zur 3. Differenzierungsebene wiederholt.

Im letzten Schritt erfolgt eine Zusammenfassung der Fraktionen für jedes Sammelsystem gemäß des für das Sortiermodell benötigten Anlageninputs. Die Zusammensetzungen der Sammelsysteme sind in Anlage 1 zusammengestellt.

#### 4.4 Diskussion der Datenerhebung zum Aufkommen

Das mittlere Aufkommen der Sammelsysteme ist die Basisgröße für die Kalkulation der Mengen, Kosten und Umweltauswirkungen. Entsprechend wurde der Ermittlung dieser Größe besonderes Augenmerk geschenkt. Dafür wurden mehrere Methoden herangezogen, die nachfolgend diskutiert werden.

Die erste Methode war die Bildung des Mittelwertes auf Basis der Aufkommen der Vertragsgebiete im Jahr 2015. Diese Methode wurde trotz der enthaltenen Unplausibilitäten letztlich als die Vorzugsmethode gewählt. Die statistischen Grunddaten der Auswertung enthält Tabelle 16.

Kritisch bei der Nutzung der Methode ist, dass zum einen die Bandbreite der Werte sehr groß ist, sie beträgt je nach Sammelsystem zwischen 17 % und 121 %. Zum Zweiten ist für die Mehrzahl der Sammelsysteme eine Verbreiterung der Datenbasis, die voraussichtlich ein statistisch sichereres Ergebnis bringen würde, nicht möglich, da keine weiteren zuordenbaren Vertragsgebiete bekannt waren.

Unplausibel war insbesondere der Vergleich des mittleren Aufkommens der Gelben Tonne ländlich mit der Wertstofftonne ländlich, da der Wert für die Wertstofftonne ländlich 7,5 kg/(EW\*a) unter dem der Gelben Tonne ländlich lag. Zu erwarten wäre, dass die Erfassungsmenge der Wertstofftonne ländlich aufgrund der zusätzlich erfassten StNVP größer ist als die der Gelben Tonne ländlich. Diese offensichtliche Abweichung von den Erwartungswerten ist bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen. Die Daten in Anlage 1 zeigen aber auch, dass die höhere erfasste Menge der Gelben Tonnen im Vergleich zu den Wertstofftonnen sich zu einem relevanten Teil über höhere Anteile von Stoffen erklären lässt, die nicht in die Gelbe Tonne oder die Wertstofftonne gehören. Dies kann damit zusammenhängen, dass den Bürgern im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit zur Einführung von Wertstofftonnen zusätzliche Informationen über die Erfassung bereitgestellt werden, wodurch die Bürger über den normalen Umfang hinaus für die Thematik sensibilisiert werden.

Tabelle 16: Mittleres, maximales und minimales Aufkommen der betrachteten Vertragsgebiete je Sammelsystem

Sammelsysteme	Anzahl	Mittleres Aufkommen [kg/(EW*a)]	Maximales Aufkommen [kg/(EW*a)]	Minimales Aufkommen [kg/(EW*a)]	Bandbreite <sup>6</sup>
Wertstofftonne städtisch	8	30,4	43,7	20,2	77%
Wertstofftonne ländlich	7	38,7	42,0	35,6	17%
Gelbe Tonne städtisch	9	27,0	37,0	17,9	71%
Gelbe Tonne ländlich	15	45,8	60,2	38,5	47%
Gelber Sack ländlich	25	34,0	43,3	25,3	53%
Wertstoffsack ländlich	2	43,5	52,1	34,9	40%
Depotcontainer	5	24,7	35,1	5,1	121%
Wertstoffhof	10	10,9	14,7	7,3	68%

Als eine weitere Methode wurde für die Sammelsysteme mit gemeinsamer Erfassung der StNVP geprüft, ob die Differenz in der Aufkommensentwicklung vor/nach Einführung der Systeme eine plausible Aufkommensermittlung zulässt. Datengrundlage dafür waren die Aufkommen der Vertragsgebiete mit bzw. ohne Systemumstellung für 2010 und 2015.

Im ersten Schritt wurde dazu eine mittlere jährliche Steigerungsmenge für die Systeme MGB und Sack ohne Systemwechsel ermittelt, um diese Effekte aus der Erhöhung mit Systemwechsel herausrechnen zu können. Dazu wurden die Werte von 2010 mit denen von 2015 verglichen und auf ein Jahr hochgerechnet. Diese hochgerechneten Werte liegen bei 0,5 kg/(EW\*a). Dies bedeutet, dass in den Gebieten, die für diesen Vergleich herangezogen wurden, die LVP Menge jährlich um durchschnittlich 0,5 kg/(EW\*a) gestiegen ist.

Im zweiten Schritt wurden die mittleren jährlichen Aufkommenserhöhungen mit Systemwechsel berechnet und anschließend die Werte um die Aufkommenserhöhung ohne Systemwechsel bereinigt (Tabelle 17). Mehrmalige Systemwechsel wurden nicht berücksichtigt. Danach wurde je nach Systemwechsel eine systemwechselbedingte Erhöhung von 0,9 kg/EW bis zu 5,0 kg/EW berechnet<sup>7</sup>.

<sup>6</sup> Angabe als Summe der prozentualen Abweichungen des Minimums und Maximums vom Mittelwert

<sup>7</sup> Berechnung der systemwechselbedingten Erhöhung aus der Differenz der jährlichen Aufkommenserhöhung ohne/mit Systemwechsel multipliziert mit dem Faktor 5 (Jahre); der Faktor ergibt sich aus der Tatsache, dass die jährliche Aufkommenserhöhung für 5 Jahre berechnet wurde, faktisch aber nur einmal stattfand.

Tabelle 17: Aufkommensberechnung auf Basis der Aufkommensentwicklung 2010-2015

Systemwechsel	jährliche Aufkommenserhöhung ohne Systemwechsel	jährliche Aufkommenserhöhung mit Systemwechsel	Systemwechselbedingte Erhöhung	Anzahl Werte Systemwechsel	Bandbreite <sup>8</sup>
	kg/(EW*a)	kg/(EW*a)	kg/EW		
Sack → MGB	0,5	0,7	0,9	3	224%
Sack → WST	0,5	1,5	5,0	7	174%
MGB → WST	0,5	0,9	2,2	4	24%

Problematisch ist die geringe Anzahl an Einzelwerten für die Sammelsysteme bei Systemwechsel und die hohe Streuung der Einzelwerte für die Systemwechsel vom Gelben Sack zu Wertstofftonne bzw. Gelber Tonne.

Aus diesen Gründen und der eingeschränkten Aussage für nur wenige Sammelsysteme wurde entschieden, die zuerst dargestellte Methode der Mittelwertbildung zur Berechnung des Aufkommens trotz der erkannten Unplausibilitäten heranzuziehen.

Mit Ausnahme der Erfassungsmenge für das Sammelsystem „Wertstofftonne ländlich“ erscheinen die dadurch ermittelten Werte plausibel. Die vorstehend genannte Unsicherheit in der Datenbasis ist bei den Auswertungen zu berücksichtigen.

<sup>8</sup> Angabe als prozentuale Abweichung vom Mittelwert

## 5 Modellierung der Teilprozesse Individualtransport, Sammlung und Transport

### 5.1 Individualtransport

Individualtransport, also der Transport der LVP zu den Sammelbehältern im Bringsystem, findet nur für die Sammelsysteme Depotcontainer und Wertstoffhof statt.

Für die Charakterisierung wichtiger zur Quantifizierung des Prozesses „Individualtransport“ nötiger Parameter liegen nur wenige Daten vor. Die hier verwendeten Daten gehen zum überwiegenden Teil auf die Studie von BIFA [2011] zurück.

Eine direkte Übertragung der Ergebnisse der Studie ist aufgrund der lokalen Besonderheiten des Untersuchungsgebietes im Vergleich zum Modellgebiet (Wertstoffhof-/Depotcontainerdichte, Art und Anzahl der parallel erfassten Fraktionen) nicht möglich, die Daten für das Modellgebiet liefern aber eine realistische Größenordnung zu den Aufwendungen für den Individualtransport.

Als Aufwendungen gelten ausschließlich die Entfernungen, die mit dem PKW zurückgelegt werden. Die Anlieferung zu Fuß/per Rad wurde nicht betrachtet. Ebenfalls nicht betrachtet wurde die benötigte Zeit. Dies bedeutet, dass die Bringsysteme die angeschlossenen Einwohner vom zeitlichen und vom Arbeitsaufwand her in Wirklichkeit wesentlich mehr belasten als in den hier durchgeführten Vergleichen. Der Ansatz in dieser Studie kann daher als konservativ betrachtet werden. Für den Vergleich der Sammelsysteme muss ebenfalls berücksichtigt werden, dass zeitlich oder in der Mobilität eingeschränkte Personengruppen von der Nutzung der Bringsysteme abgeschnitten sein können.

Die Parameter

- ▶ Anliefermenge,
- ▶ Anteil der Anlieferfahrten,
- ▶ Anteil der Direktfahrten (Fahrten die ausschließlich der Anlieferung von Abfällen/Wertstoffen zum Depotcontainer/Wertstoffhof dienen),
- ▶ Anteil der Kombifahrten (Fahrten, die auch zu mindestens einem anderen Zweck als der Anlieferung von Abfällen/Wertstoffen an den Depotcontainer/Wertstoffhof dienen),
- ▶ mittlere Entfernung vom Grundstück sowie Anteil der Fahrten

wurden in BIFA [2011] per Befragung ermittelt und für das Datenmodell übernommen. Der Anlieferanteil, also die Anteil der Anlieferfahrten, die bei Anlieferung mehrerer Abfälle/Wertstoffe den LVP zuzuordnen sind, wurde für das Sammelsystem Depotcontainer mit 50 % festgelegt. Für den Anlieferanteil der LVP am Wertstoffhof wurde die Anzahl der persönlichen Anlieferungen, die im Untersuchungsgebiet von BIFA [2011] erfolgten (26,5 pro a), mit den durchschnittlichen persönlichen Anliefervorgängen an Wertstoffhöfe eines anderen Untersuchungsgebiets (1,6 pro a) nach Kerber [2016] ins Verhältnis gesetzt. Daraus ergibt sich der verwendete Anlieferanteil LVP am Wertstoffhof von 94%.

Tabelle 18: Parameter zur Quantifizierung des Individualtransports und Berechnung

	Einheit	Depotcontainer	Wertstoffhof
Aufkommen	[kg/(EW*a)]	24,7	10,9
Sammelmasse	[Mg/a]	24.700	10.900
Einwohner		1 Mio.	1 Mio.
Anliefermenge	[kg/Anliefervorgang]	2,0	2,0
Anlieferungen/a	[Anzahl/a]	12.350.000	5.450.000
Anlieferanteil LVP		50 %	94 %
Distanz (hin & rück)	[km]	2	6
Distanz Kombifahrt (hin & rück)		0,9	4
Anteil Fahrzeuganlieferung	[%]	58 %	97 %
Anteil Direktfahrt FZG	[%]	21 %	38 %
Anteil Kombifahrt FZG	[%]	37 %	59 %
Strecke Direktfahrt	[km/a]	2.650.310	11.623.520
Strecke Kombifahrt	[km/a]	2.030.710	12.120.250
Gesamtstrecke	[km/a]	4.681.020	23.743.770

## 5.2 Beschreibung des Teilprozesses Sammlung

### 5.2.1 Methodik

Für die Berechnung der Sammelleistung im Modellgebiet wird die Methodik der Zerlegung einer Sammeltour in charakteristische Zeitabschnitte entsprechend der Tätigkeit vereinfacht nach folgender Formel angewendet.

$$\text{Tourzeit} = \sum \text{Ladezeiten} + \sum \text{Zwischenfahrtzeiten} + \sum \text{Entleerzeiten}$$

Die charakteristischen Zeitabschnitte sind wie in Tabelle 19 dargestellt definiert.

Tabelle 19: Definition und Abhängigkeiten logistischer Kennzahlen

Begriff	Definition	Abhängigkeit
Tourzeit	Zeit vom Start auf dem Betriebshof bis zum Tourende auf dem Betriebshof abzüglich der Pausenzeit	Arbeitszeit, Planung
Zwischenfahrtzeit	Fahrtzeit zwischen den einzelnen Ladepunkten im Sammelgebiet < 5 min	Bebauung, Behältergröße
Ladezeit	Zeit, die das Sammelfahrzeug am Ladepunkt zum Zwecke des Ladens steht	Anzahl der Behälter pro Ladepunkt
Entleerfahrtzeit	Benötigte Zeit für die Entleerung des Sammelfahrzeugs an der Umschlag-/Verwertungsanlage, gemessen von der Abfahrt vom letzten gekippten MGB bis zur Ankunft am ersten zu kippenden MGB bzw. bis zur Ankunft auf dem Betriebshof	Füllgrad der einzelnen Sammelbehälter, zulässige Zuladung des Sammelfahrzeugs, Entfernung vom letzten Ladepunkt zur Übergabestelle/Sortieranlage bis zum nächsten Ladepunkt

Die einzelnen charakteristischen Zeitabschnitte entstammen realen Untersuchungen von INTECUS und wurden unter Dokumentation der Randbedingungen des jeweiligen Untersuchungsgebietes durch Tourenbegleitungen und/oder durch Tracking bzw. Registrierung von logistisch relevanten Ereignissen (Auslösung Kippung, Entleervorgang) aufgenommen. Die Mittelwerte der charakteristischen Zeitabschnitte bilden die logistischen Kennzahlen.

Die für das Datenmodell verwendeten logistischen Kennzahlen sind in nachfolgender Tabelle dargestellt. Sie sind dem Datenpool aus einer Reihe von Projekten zur Kennzahlenermittlung von INTECUS entnommen.

Tabelle 20: Zeitbedarf für die Sammlung für die Sammelsysteme

Kennzahl	Anzahl Behälter pro Ladepunkt [n]	WST/s [s]	Sack/l [s]	WST/l [s]	MGB/s [s]	MGB/l [s]	WSack/l [s]	DC/s-l [s]	WSTH [s]
<b>Ladezeit</b>									
MGB 120-240	1	19		19	19	19			
MGB 120-240	2	28		28	28	28			
MGB 120-240	3	34		34	34	34			
MGB 120-240	>3	39		39	39	39			
MGB 1.100	1	45		45	45	45			
MGB 1.100	2	70		70	70	70			
MGB 1.100	3	83		83	83	83			
MGB 1.100	>3	93		93	93	93			
DC 3.000 bzw. ULB 5.000	1							200	150
DC 3.000 bzw. ULB 5.000	2							300	250
DC 3.000 bzw. ULB 5.000	3							400	350
DC 3.000 bzw. ULB 5.000	>3							500	450
Säcke 90	1		10				10		
Säcke 90	2		12				12		
Säcke 90	3		14				14		
Säcke 90	>3		16				16		
<b>Zwischenfahrtzeit</b>									
MGB 120-240		15		15	15	15			
MGB 1.100		45		45	45	45			
DC 3.000 bzw. ULB 5.000								90	300
Säcke 90			15				15		
<b>Entleerfahrtzeit (Einzelereignis)</b>		3.000	3.600	3.600	3.000	3.600	3.600	3.000	3.000

Für das Datenmodell wird vereinfachend angenommen, dass die Raumdichte in allen Behältern je Sammelsystem gleich ist und der Bereitstellungsgrad 100 % beträgt. In der Praxis unterscheidet sich die Raum-dichte zwischen kleinen und großen Behältern, vor allem aufgrund des meist höheren Fehlwurfanteils in den MGB 1.100<sup>9</sup>.

Als Sammelfahrzeug kommt für die Sammelsysteme im Holsystem und das Wertstoffhof-Sammelsystem ein Hecklader zum Einsatz, Depotcontainer werden durch ein Kranfahrzeug mit Ab-rollcontainer geleert.

Mit diesen logistischen Kennzahlen kann unter Berücksichtigung der Randbedingungen und in Kenntnis des Behälterbestands und der Anzahl der Standplätze eine Berechnung der Sammelleistung für einzelne Gebiete durchgeführt werden. Für das Datenmodell ist der Behälterbestand für die einzelnen Sammelsysteme in Abschnitt 4.2 dargestellt.

### 5.2.2 Anzahl Sammeltouren

Unter Berücksichtigung der oben aufgelisteten Kennzahlen werden für die Sammlung die Anzahl der Sammeltouren pro Jahr für die einzelnen Sammelsysteme für jeweils 1 Mio. Einwohner berechnet:

Tabelle 21: Anzahl der Sammeltouren für die einzelnen Sammelsysteme

		WST/s	Sack/l	WST/l	MGB/s	MGB/l	WSack/l	DC/s-l	WSTH
<b>Anzahl Sammeltouren (je 8 h)</b>	[Touren/a]	4.150	7.380	4.540	9.330	6.200	7.200	3.560	1.090

## 5.3 Transport

Bei der Bewertung der Transportvorgänge wurde davon ausgegangen, dass mit Ausnahme des Sammelsystems Wertstoffhof, bei dem die Fraktionen bereits getrennt gesammelt werden, keine Unterschiede beim Prozessschritt Transport bestehen.

Die Kennzahlen für die Berechnung der Transportaufwendungen wurden mittels Expertenbefragung erhoben. Als Experten wurden Mitarbeiter von mehreren dualen Systemen interviewt, die mit den Transportvorgängen vertraut sind. Da die dualen Systeme an dieser Stelle unter hohem Konkurrenzdruck stehen, werden die Ergebnisse nur als Mittelwerte und anonymisiert dargestellt. Wo Mittelwerte nicht sinnvoll ermittelbar waren, wurde ein Wert basierend auf den vorliegenden Antworten gewählt. Die Befragung ergab folgende Ergebnisse:

Tabelle 22: Ergebnisse der Expertenbefragung

Kennzahl	Einheit	Wertstoffhof (gewählt)	Mittelwert/ gewählter Wert andere Sammel-systeme	Bemerkungen
Anteil LVP, der von Umladestationen zu Sortieranlagen transportiert wird	[%]	0 <sup>10</sup>	70	Die verbleibenden 30 % sind Direktanlieferungen zur Sortieranlage.
Anteil LVP, der von Umladestationen zu Behandlungsanlagen	[%]	100	0	

<sup>9</sup> Fehlwürfe insbesondere mit hohem Organikanteil haben eine höhere Dichte als LVP

<sup>10</sup> Fraktionen werden getrennt gesammelt, die Sortierung entfällt (sh. Kap 4.2.6)

Kennzahl	Einheit	Wertstoffhof (gewählt)	Mittelwert/ gewählter Wert andere Sammel-systeme	Bemerkungen
transportiert wird				
mittlere einfache Transportentfernung	[km]	150	150	
Transportmittel		Walking Floor	Walking Floor	für kürzere Strecken auch Abrollcontainerzug
Mittlere Zuladung	[Mg]	11	11	
Verpressung (für Transport) <sup>11</sup>		nein	nein	
Lademittel (Beladung)		nicht relevant	Radlader	falls nicht verfügbar, auch Bagger möglich
Beladungszeit	[h]	1	1	
Entladungszeit	[h]	1	1	
Anteil Rückfracht	[%]		75	Rückfahrten mit Rückfracht werden kostenseitig und ökobilanziell nicht berücksichtigt.

Hochgerechnet auf die einzelnen Sammelsysteme ergeben sich die in Tabelle 23 dargestellten Aufwendungen für den Transport zu den Sortieranlagen.

Tabelle 23: Aufwendungen Transport zu Sortieranlagen

	Einheit	WST/s	Sack/l	WST/l	MGB/s	MGB/l	WSack/l	DC/s-l	WSTH <sup>12</sup>
<b>Sammelmasse</b>	[Mg/a]	30.400	38.700	27.000	45.800	34.000	43.500	24.700	10.900
<b>Transportanteil</b>	[Mg/a]	21.280	27.090	18.900	32.060	23.800	30.450	17.290	10.900
<b>Transportvorgänge</b>	[Anzahl/a]	1.935	2.463	1.718	2.915	2.164	2.768	1.572	991
<b>Transportstrecke</b>	[km/a]	652.909	831.170	579.886	983.659	730.227	934.261	530.489	334.432

## 5.4 Kostenansätze

Alle Kostenansätze sind netto angegeben.

### 5.4.1 Behälter

Tabelle 24 stellt die jährlichen Kosten pro Sammelbehälter in Abhängigkeit von Bauform und Größe dar. In den Kosten enthalten ist die Abschreibung von den Investitionskosten, Reparatur und Erhaltung des Behälterbestands.

<sup>11</sup> Bei der Sammlung gemischter LVP mit Pressfahrzeugen findet eine Verpressung statt, für den Transport ist eine zulässige Dichte vertraglich vereinbart

<sup>12</sup> Für das Sammelsystem Wertstoffhof Transport zur Behandlungsanlage

Tabelle 24: Jährliche Kosten Sammelbehälter

	Einheit	MGB 120	MGB 240	MGB 1.100	Sack 90	DC 3.000	ULB 5.000
Behälterkosten pro Stück und Jahr	[EUR/a]	2,8	3,9	24,8	0,06 <sup>13</sup>	100,0	129,6

Für die Berechnung der Kosten des Gelben Sacks wurde angenommen, dass die ausgegebenen Säcke ausschließlich für die Befüllung mit Leichtverpackungen eingesetzt werden.

#### 5.4.2 Individualtransport

Kostenrelevant für den Individualtransport sind die mit dem PKW gefahrenen km. Dafür werden Kosten von 0,3 EUR/km angesetzt.

#### 5.4.3 Sammlung

Für alle Sammelsysteme mit Ausnahme der Depotcontainer wird für die Sammlung ein Hecklader-Fahrzeug mit der in Tabelle 25 beschriebenen Fahrzeugspezifikation zu den angegebenen jährlichen Kosten eingesetzt. Die Kosten sind aus INTECUS-Projekten entnommen.

Tabelle 25: Kosten Sammelfahrzeuge

Kennzahl	Einheit	Fahrzeugtyp	
Spezifikation		Hecklader (Pressplatte), 3 Achsen, Aufbau 20 m <sup>3</sup> , Zuladung 5 Mg, 1 Fahrer, 1 Lader	Abrollcontainerfahrzeug mit Kran, 3 Achsen, Aufbau 36 m <sup>3</sup> , 1 Fahrer
Gesamtpreis Fahrzeug inkl. Personal sowie Fahrzeug- und Personalreserve	[EUR/a]	200.000	130.000

#### 5.4.4 Transport

Für den Einsatz eines Walking Floor mit Sattelzugmaschine inkl. Fahrer und Reserve werden Kosten von 20 EUR/Fahrzeugladung festgelegt.

Die Kosten sind aus INTECUS-Projekten entnommen.

<sup>13</sup> Hier, abweichend von den Behältern, der Stückpreis

## 6 Ergebnisse für die Teilprozesse Individualtransport, Sammlung und Transport

### 6.1 Einwohnerbezogene Kosten

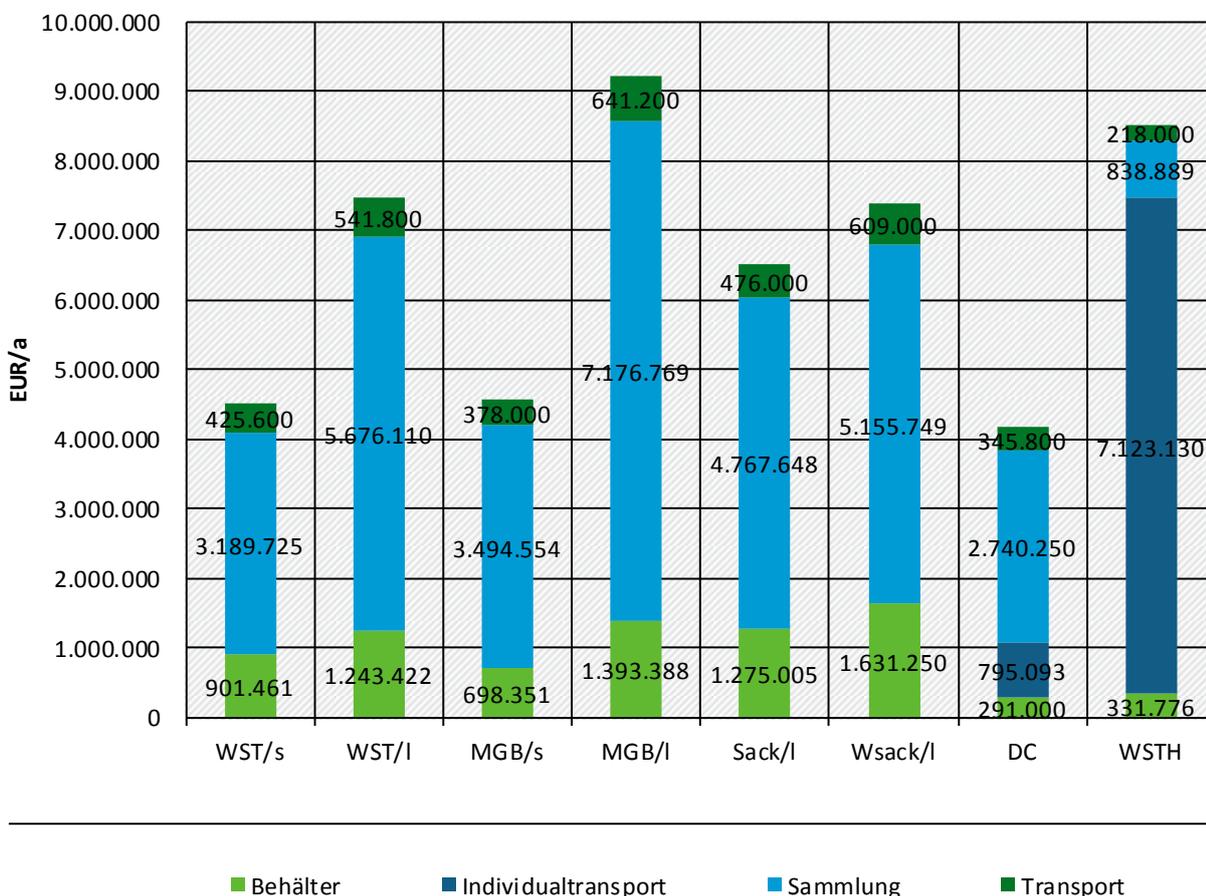
Auf Basis des dargestellten Datenmodells wurden für die acht Sammelsysteme die in Abbildung 14 dargestellten jährlichen Kosten bezogen auf 1 Mio. Einwohner ermittelt. Kostenbestandteil sind die Behältergestaltung bzw. die Anzahl der benötigten Säcke, der Individualtransport, die Sammlung und anteilig der Transport zur Sortieranlage.

Die Gesamtkosten liegen je nach Sammelsystem zwischen 4,2 Mio. EUR und 9,2 Mio. EUR pro 1 Mio. Einwohner.

Abbildung 14: Jährliche Logistikkosten bezogen auf 1 Mio. Einwohner

#### Jährliche Logistikkosten

bezogen auf 1 Mio. Einwohner



Quelle: Eigene Darstellung

Die Unterschiede in den Logistikkosten für die Holsysteme sind vor allem auf die unterschiedlichen einwohnerspezifischen LVP-Aufkommen zurückzuführen, die Verteilung auf die Kostenbestandteile ist ein etwa gleich.

Im Sammelsystem Wertstoffhof entfallen über 80 % der Logistikkosten auf den Individualtransport. Diese Kosten finden sich bei den Bringsystemen nicht in den kalkulatorischen Kosten der Systembetreiber oder der Abfallwirtschaftsbetriebe wieder und werden somit zusätzlich zu den Lizenzentgelten der dualen Systeme auf die Endverbraucher übertragen. Die anderen Kostenbestandteile liegen absolut unter denen der Holsysteme.

Der Anteil der bedeutendsten Kostenbestandteile Sammlung und Individualtransport für das Sammelsystem Depotcontainer liegt zwischen der der Holsysteme und dem Sammelsystem Wertstoffhof. Dies ist auch plausibel, da die mittlere Entfernung vom Grundstück zum Behälter-Standplatz einen großen Einfluss auf die Motivation, das System zu nutzen und auf die Wahl des Verkehrsmittels hat.

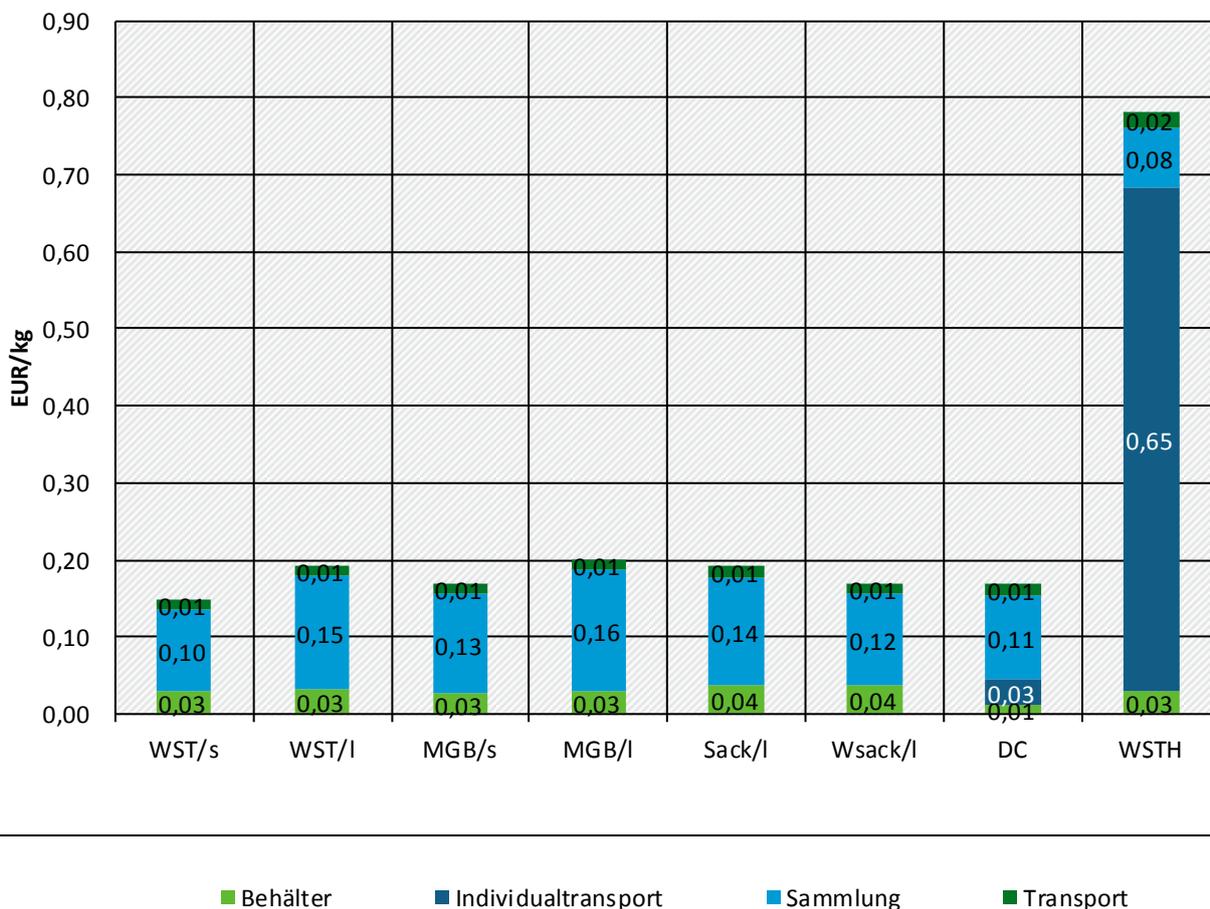
## 6.2 Massebezogene Kosten

In Abbildung 15 sind die Logistikkosten massespezifisch dargestellt:

Abbildung 15: Logistikkosten bezogen auf 1 kg anfallende LVP-Masse

### Logistikkosten

bezogen auf 1 kg anfallende LVP-Masse



Quelle: Eigene Darstellung

Die massespezifischen Gesamtkosten liegen je nach Sammelsystem zwischen 0,15 und 0,78 EUR/kg. Die höchsten massespezifischen Logistikkosten fallen für das Sammelsystem Wertstoffhof an. Dabei liegen die Kostenbestandteile Behälter, Sammlung und Transport im Bereich oder unterhalb der Kos-

ten für die Holsysteme. Mit Abstand größter Kostenbestandteil ist der Individualtransport der wie bereits geschrieben nicht in der Abfallwirtschaft sondern bei den Endverbrauchern anfällt.

Die massespezifischen Logistikkosten liegen für die Holsysteme in etwa auf demselben Niveau. Die geringsten Logistikkosten fallen für das Sammelsystem Wertstofftonne städtisch an. Das liegt vor allem an der relativ geringen Anzahl von bei der Sammlung anzufahrenden Standplätzen sowie am höchsten Anteil an für die Sammlung besonders effizienten MGB 1.100 im Behälterbestand. Umgekehrt sind die Sammelsysteme Wertstofftonne ländlich und Gelbe Tonne ländlich bei der Sammlung vergleichsweise teuer.

Beim Vergleich der ländlichen Sammelsysteme fallen die geringsten massespezifischen Logistikkosten für das Sammelsystem Wertstoffsack ländlich an. Die im Vergleich höheren massespezifischen Logistikkosten für das Sammelsystem Gelber Sack ländlich sind mit dem geringeren Aufkommen zu erklären: Die Anzahl der anzufahrenden Standplätze ist gleich, die bereitgestellte Masse pro Standplatz für das Sammelsystem Wertstoffsack ländlich höher. Die höheren massespezifischen Logistikkosten für das Sammelsystem Gelbe Tonne ländlich im Vergleich zur Wertstofftonne ländlich sind auf die Unterschiede im Behälterbestand zurückzuführen. Im Behälterbestand ist der Anteil der logistisch aufwändigeren MGB 120 im Sammelsystem Gelbe Tonne ländlich höher, der Anteil der MGB 1.100 geringer.

Die massespezifischen Logistikkosten für das Sammelsystem Depotcontainer liegen im Bereich der Kosten für die Holsysteme, wobei die Einsparungen durch die geringeren Behälterkosten in etwa den Mehr-aufwendungen durch den Individualtransport entsprechen.

### 6.3 Vergleich mit anderen Kostenberechnungen

Die Ergebnisse der Berechnung basieren auf einem komplexen, teils aufeinander aufbauenden Datenmodell. Deshalb wird im Folgenden ein Vergleich der hier ermittelten Werte mit Literaturangaben vorgenommen.

Folgende Studien wurden dafür herangezogen:

- ▶ Bundeskartellamt: Sektoruntersuchung duale Systeme – Zwischenbilanz der Wettbewerbsöffnung, Bonn [2012]
- ▶ Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW (Hrsg.): Ökologische und ökonomische Bewertung von Sammelsystemen für Haushaltsabfälle in Nordrhein-Westfalen, Eigenverlag, [2005]
- ▶ AT Kearney: „Auswirkung der geplanten Erhöhung der Recyclingquoten im Entwurf des VerpackG1 auf die LVP2-Systemkosten“, Zusammenfassung der Studie, [2016]

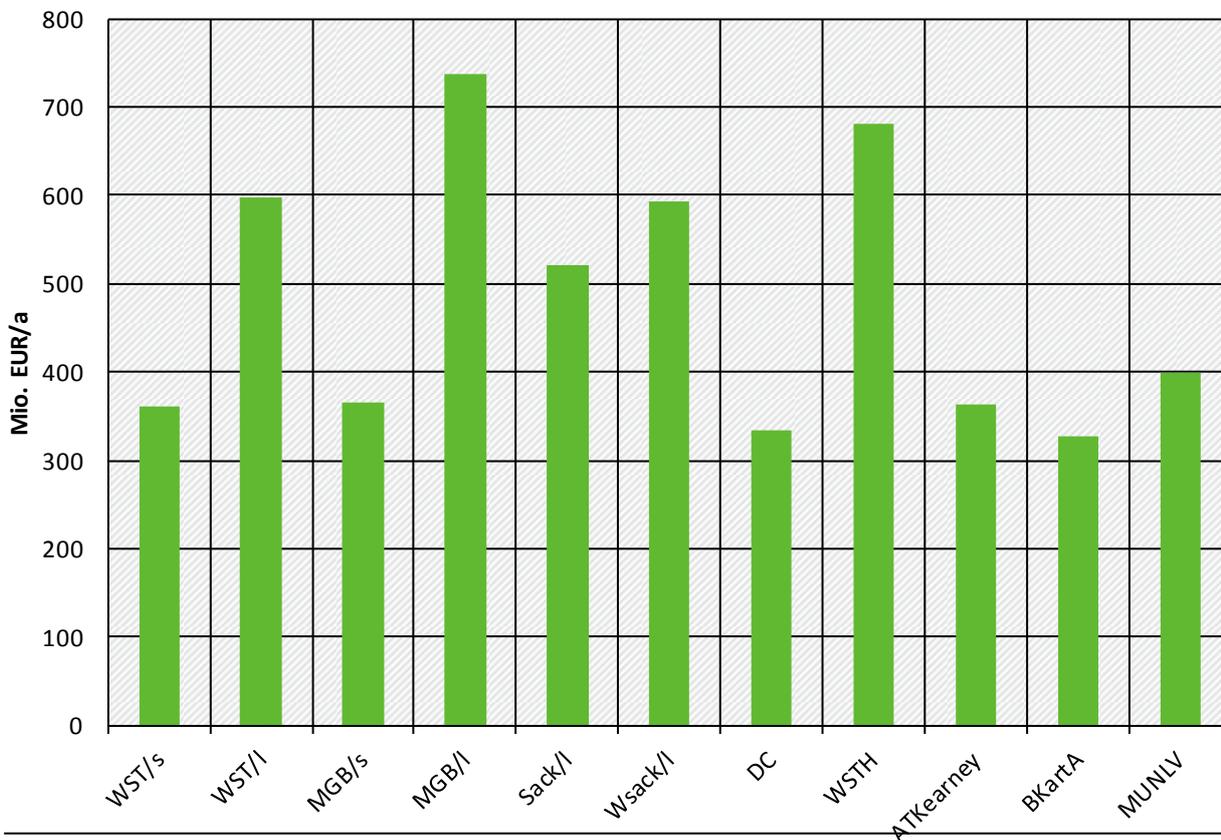
Alle Studien geben die Sammelkosten in Bezug auf die Summe aller Vertragsgebiete an. Entsprechend wurden die Sammelsysteme ebenfalls auf die Anzahl angeschlossener Einwohner von 80 Mio. hochgerechnet.

Die Systemgrenzen sind in den Studien unterschiedlich präzise beschrieben. Es kann davon ausgegangen werden, dass Sammel- und Behälterkosten in allen Studien enthalten sind, die Kosten für den Individualtransport hingegen nicht.

Das Ergebnis ist in Abbildung 16 dargestellt.

Abbildung 16: Vergleich der deutschlandweiten Logistikkosten der Sammelsysteme mit Literaturwerten

**Vergleich der deutschlandweiten Logistikkosten der Szenarien mit Literaturwerten**



Quelle: Eigene Darstellung, Bundeskartellamt [2012], MUNLV[2005], AT Kearney [2016]

Zunächst liegen die Literaturwerte auf einem ähnlichen Niveau wie die Logistikkosten der Sammelsysteme, die für den Vergleich auf den Anschluss von 80 Mio. Einwohnern hochgerechnet wurden. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Studie des MUNLV bereits im Jahr 2005 erschien, in dem das einwohnerspezifische LVP-Aufkommen noch deutlich unter dem der letzten Jahre lag. Die Berechnungsbasis war das einwohnerspezifische Aufkommen für Nordrhein-Westfalen von 2003, das 23 kg/(EW\*a) betrug. Es ist aufgrund der Entwicklung bei der Sammelmenge und bei den Preisen für die Logistik davon auszugehen, dass aktuell mit signifikant höheren Kosten zu rechnen wäre.

Drei von den acht berechneten Sammelsystemen liegen im Bereich der Literaturwerte und fünf teilweise um das Doppelte über den Literaturwerten. Auch hier ist wieder zu berücksichtigen, dass das einwohnerspezifische Aufkommen für die Sammelsysteme mit den hohen Logistikkosten, wie Gelbe Tonne ländlich und Wertstoffsack ländlich mit 45,8 kg/(EW\*a) bzw. 44 kg/(EW\*a) deutlich über dem aktuellen deutschen Mittelwert 31,4 kg/(EW\*a) [DESTATIS, 2015] liegt. Die Sammelsysteme Wertstoffhof und Depotcontainer beinhalten mit dem Individualtransport Kosten, die von den anderen Studien wahrscheinlich nicht betrachtet wurden. Insofern sind die Berechnungen der Sammelsysteme im Vergleich mit den Werten der Studien plausibel.

## 6.4 Optimierungspotenziale

### 6.4.1 Einfluss Miterfassung StNVP

Auf Basis der Daten in Abbildung 15 ist durch die Miterfassung der StNVP im Vergleich zu den Sammelsystemen ohne Miterfassung der StNVP eine geringfügige Verringerung der massespezifischen Kosten fest-zustellen. Tabelle 26 zeigt die Kostenverringerung der Systeme mit Miterfassung von StNVP im Vergleich zum jeweiligen System ohne die Erfassung von StNVP. Die Kostenreduzierung beträgt bis zu 12 % im Falle des städtischen Wertstofftonnensystems (WST/s) im Vergleich zur herkömmlichen „Gelben Tonne“ (MGB/s). Dies ist insofern plausibel, als dass durch das höhere einwohnerspezifische Aufkommen tendenziell größere Sammelbehälter zum Einsatz kommen. Zudem ist zu erwarten, dass sich durch eine höhere Dichte der StNVP die Raumdichte erhöht.

Tabelle 26: Kostenvergleich bei Miterfassung der StNVP

	Einheit	MGB/s	WST/s	MGB/l	WST/l	Sack/l	WSack/l
<b>Gesamtkosten</b>	[EUR/kg]	0,17	0,15	0,20	0,19	0,19	0,17
<b>Kostenverringerung bei Miterfassung StNVP</b>	[%]		-12 %		-4 %		-11 %

### 6.4.2 Einfluss der Erfassung weiterer Wertstoffe auf dem Wertstoffhof

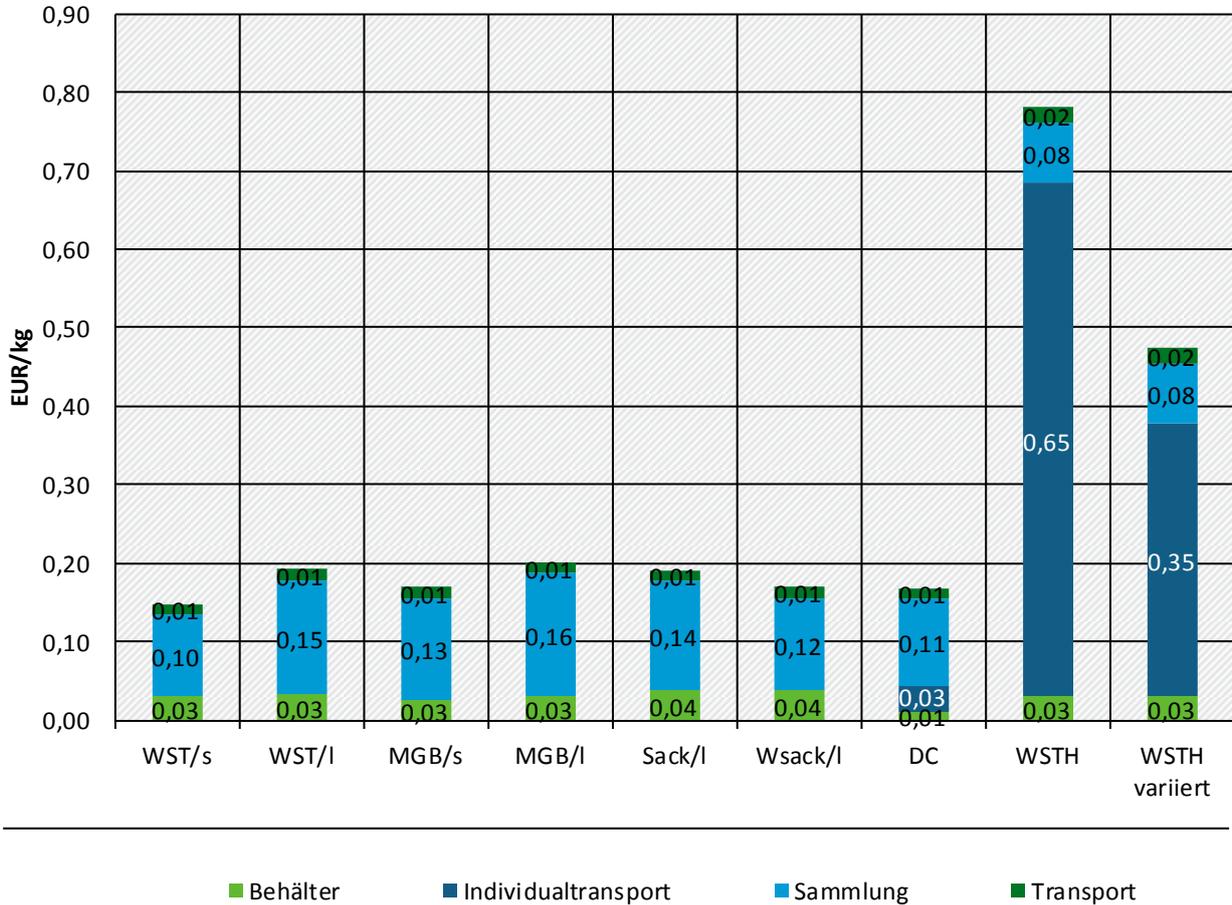
Für das vorliegende Datenmodell ist das Sammelsystem Wertstoffhof aufgrund der hohen Kosten für den Individualtransport massespezifisch deutlich teurer als die anderen Sammelsysteme. Grund dafür ist vor allem die Annahme, dass 94 % der Anlieferungen auf dem Wertstoffhof den Leichtverpackungen zuzuordnen sind. Würden Altpapier und Altglas ebenfalls ausschließlich über den Wertstoffhof erfasst, würde sich der Anteil der den Leichtverpackungen zuzuordnenden Anlieferungen deutlich verringern. Für diese Variation des Sammelsystems wurde ein Anteil der den Leichtverpackungen zuzuordnenden Anlieferungen von 50 % angenommen.

Unter der weiteren Voraussetzung, dass sich das einwohnerspezifische Aufkommen bei der Variation des Sammelsystems nicht ändern würde, wurde für die Gesamtkosten des variierten Sammelsystems 0,48 EUR/kg berechnet. Dies entspricht einer Kostenreduktion um 39 %. Auch das variierte Sammelsystem würde noch immer die mit Abstand höchsten Logistikkosten verursachen.

Abbildung 17: Logistikkosten bezogen auf 1 kg anfallende LVP-Masse, ergänzt um das variierte Sammelsystem Wertstoffhof

**Logistikkosten, ergänzt um das variierte Szenario Wertstoffhof**

bezogen auf 1 kg anfallende LVP-Masse



Quelle: Eigene Darstellung

In der Praxis ist dieses Sammelsystem zumindest für die Sammlung des Altpapiers schwierig umsetzbar, da damit zu rechnen ist, dass gewerbliche oder gemeinnützige Sammler ein konkurrierendes Altpapier-Sammelsystem im Holsystem etablieren würden, das den Großteil der Altpapiermengen aus Haushalten abschöpfen würde und die logistisch bedingten Kostenvorteile durch die aufkommensbedingten Nachteile überkompensiert würden.

**6.4.3 Einfluss der Streckung des Sammelturnus**

Die Sammelturnusse liegen in den betrachteten Vertragsgebieten für die MGB 1.100 bei 1-4 Wochen, für die MGB 120-240 und die Sacksammlung bei 2-4 Wochen.

Das Optimierungspotenzial bei Streckung des Sammelturnus liegt vor allem in einer erhöhten Anfallmenge pro Standplatz und Turnus. Die Bringsysteme bleiben aufgrund der variablen Gestaltung des Sammelturnus von dieser Variation unberührt.

Praktisch würde sich durch die Streckung des Sammelturnus die Gesamt-Zwischenfahrtzeit verringern. Zusätzlich wäre mit einer Änderung des Behälterbestandes hin zu größeren Sammelbehältern, vor allem von MGB 120 zu MGB 240, zu rechnen und im städtischen Bereich mit der Gestellung mehre-

rer MGB, um die durch die Streckung des Turnus zu speichernde erhöhte Menge aufzunehmen. Die Variationen der Sammelsysteme sind in Tabelle 27 dargestellt.

Es wird weiter angenommen, dass sich durch die Streckung des Sammelturnus das einwohnerspezifische Aufkommen nicht ändert.

Tabelle 27: Mittlere Sammelturnusse und Sammelturnusse variiert

	Einheit	WST/s	Sack/l	WST/l	MGB/s	MGB/l	WSack/l
Turnus Ist MGB 1.100	[Wochen]	2,3		1,9	1,7	1,6	
Turnus Ist MGB 120-240 bzw. Sack	[Wochen]	2,8	2,7	2,9	2,0	2,7	3,0
Turnus variiert MGB 1.100	[Wochen]	2 <sup>14</sup>		2	2	2	
Turnus variiert MGB 120-240 bzw. Sack	[Wochen]	4	4	4	4	4	4

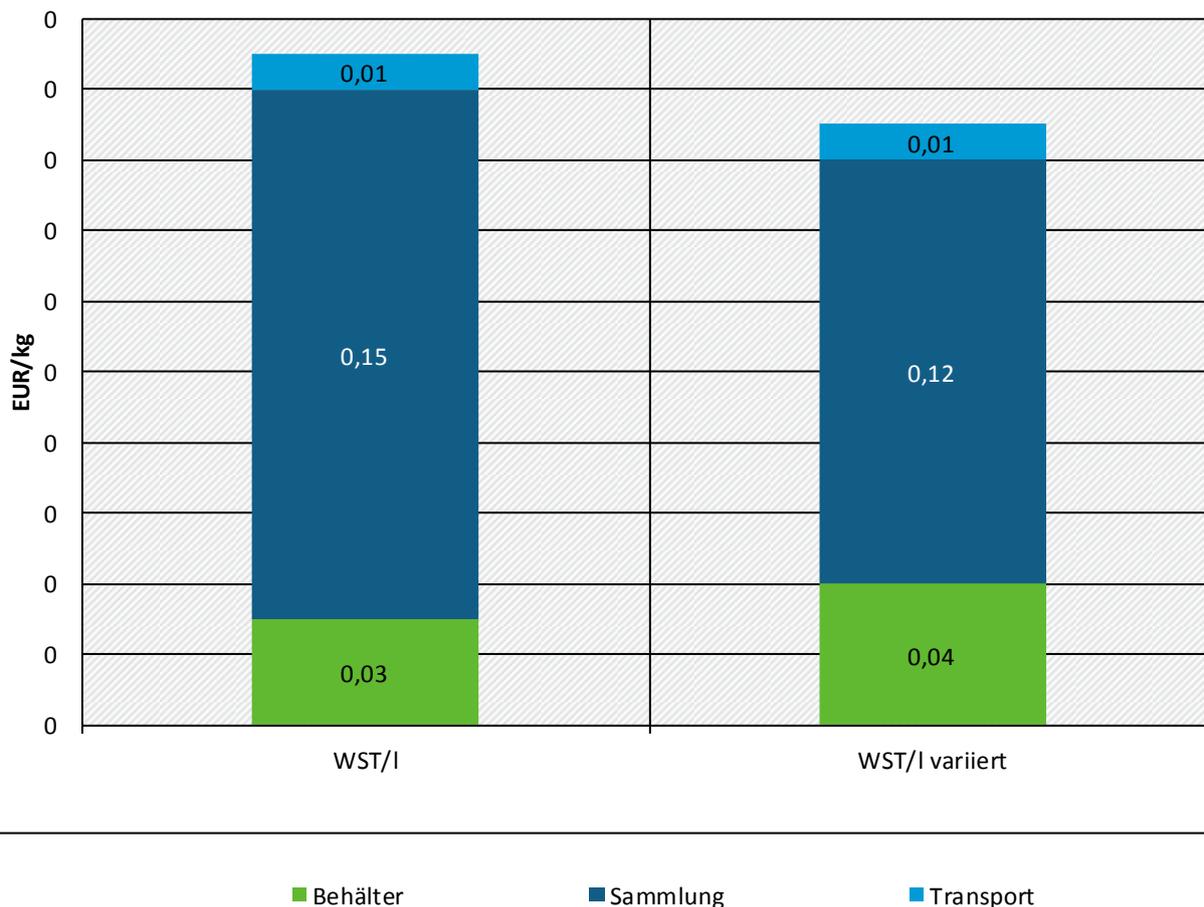
Das Ergebnis der Variation wird nachfolgend beispielhaft für das Sammelsystem Wertstofftonne ländlich dargestellt.

<sup>14</sup> Der Wert stellt eine Kürzung des Sammelturnus dar und wurde aufgrund der besseren Vergleichbarkeit der optimierten Sammelsysteme gewählt.

Abbildung 18: Logistikkosten, bezogen auf 1 kg anfallende LVP-Masse, für das Sammelsystem Wertstofftonne ländlich, ergänzt um das variierte Sammelsystem mit verlängertem Sammelturnus

**Logistikkosten für das Szenario Wertstofftonne ländlich, ergänzt um das variierte Szenario**

bezogen auf 1 kg anfallende LVP-Masse



Quelle: Eigene Darstellung

Das Ergebnis der Variation wird nachfolgend beispielhaft für das Sammelsystem Wertstofftonne ländlich dargestellt.

Abbildung 18 zeigt, dass für das Sammelsystem Wertstofftonne ländlich nur geringes Optimierungspotenzial zu erwarten ist. Den geringfügig sinkenden Sammelkosten, die vor allem auf die Abschaffung der MGB 120 zurückzuführen sind, stehen Mehrkosten für den Behälterbestand entgegen.

Für die städtischen Sammelsysteme wird das Optimierungspotenzial voraussichtlich etwas höher ausfallen, bleibt aber auch hier auf einem niedrigen Niveau. Der etwas stärkere Rückgang der Logistikkosten liegt daran, dass im Modell zwischen dem Ist-Turnus und der Variation größere Unterschiede bestehen und mit dem verstärkten Einsatz der logistisch effizienteren MGB 1.100 zu rechnen ist.

In der Praxis wird die Streckung des Sammelturnus vor allem in den städtischen Vertragsgebieten schwierig umsetzbar sein, da die Aufstellung mehrerer Sammelbehälter bzw. der Austausch mehrerer MGB 240 zu einem MGB 1.100 aus Gründen einer limitierten Standplatzfläche nicht immer möglich ist.

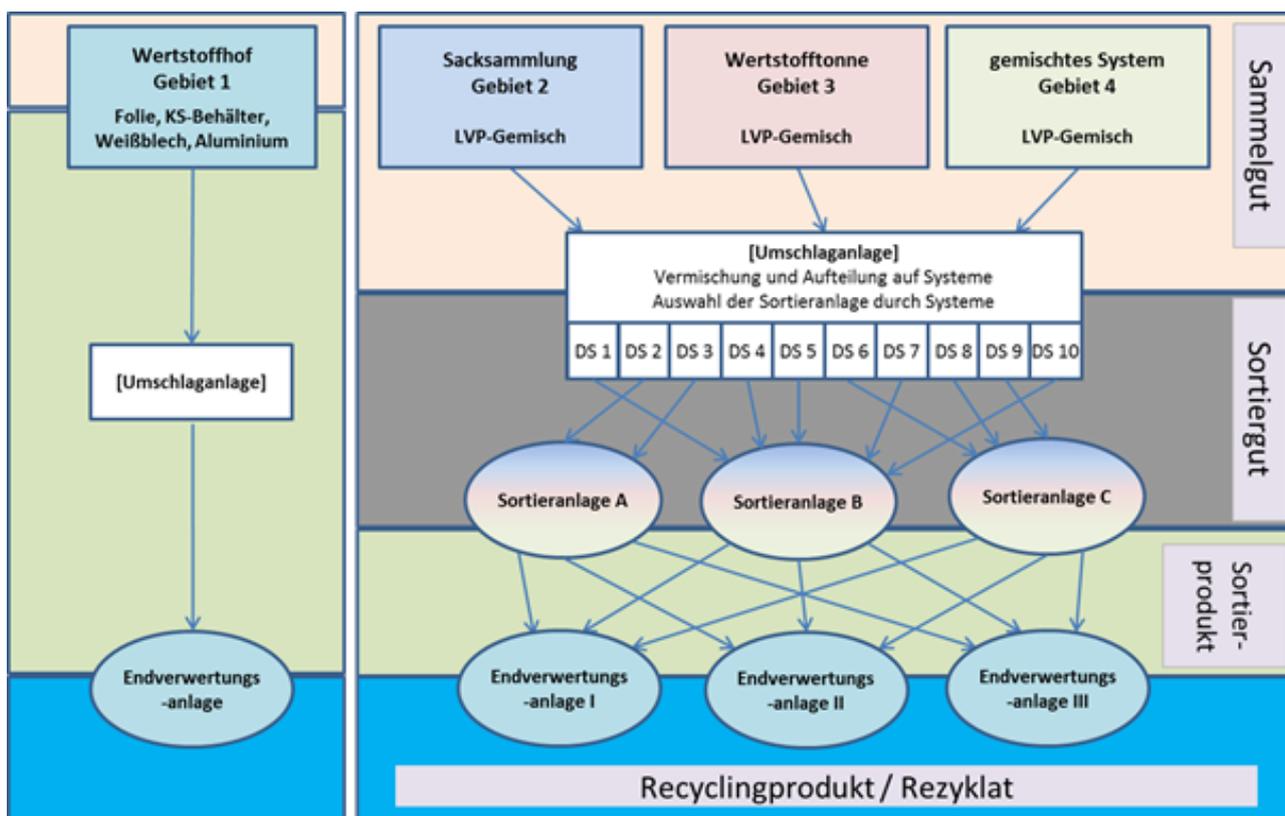
## 7 Sortierung und Bereitstellung zur Verwertung

### 7.1 Vernetzung der Prozesse von der Erfassung zur Verwertung

Die dualen Systeme verfügen über die Entscheidungshoheit zur Sortierung und Verwertung ihres LVP-Anteils und erfüllen ihre Pflichten zur Sammlung, Sortierung und Verwertung des Materials, indem sie die Leistungen vertraglich mit verschiedenen Sammelpartnern, Sortieranlagenbetreibern und Aufbereitern regeln.

Das Material wird nach der Sammlung zunächst in Umschlaganlagen auf die einzelnen Systembetreiber aufgeteilt. In den Umschlaganlagen werden die Leichtverpackungen aus dem Gelben Sack, der Gelben Tonne und den Depotcontainern ggf. erstmals vermischt. Nach der Aufteilung entscheidet jeder Systembetreiber in welcher LVP-Sortieranlage das LVP-Material sortiert wird. Das Eingangsmaterial der Sortieranlage stammt somit aus unterschiedlichen Vertragsgebieten und setzt sich dadurch aus der Sammlung unterschiedlicher Erfassungssysteme und Vertragsgebiete zusammen. Lediglich Verpackungsabfälle aus der Wertstoffhofsammlung werden aufgrund der spezifischen Materialzusammensetzung sowie des direkten Verwertungsweges separat umgeschlagen. Die nachfolgende Abbildung 19 veranschaulicht den Zusammenhang.

Abbildung 19: Schema der Prozessvernetzung von der Erfassung zur Verwertung



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 19 zeigt die möglichen Vermischungsstellen von LVP aus den Herkunftsbereichen der Erfassung, über den Umschlag, die anteilige Sortierung je nach Anteil der dualen Systeme und die Weiterleitung der Sortierprodukte zu den Verwertungsanlagen.

Im Jahr 2016 existierten in Deutschland in etwa 376 verschiedene gelistete Sortieranlagen laut Stammdaten nach efact [2016], von denen aktuell nach eigenen Schätzungen ca. 100 bis maximal 130 Anlagen tatsächlich LVP aus dualen Systemen sortieren. Die Verarbeitungskapazitäten von LVP-Sortieranlagen liegen derzeit zwischen 20.000 Mg/a bis zu >200.000 Mg/a.

## 7.2 Beschreibung der Einflussgrößen auf den Sortierprozesses

Der Betrieb einer Sortieranlage und die Durchführung der LVP-Sortierung werden im Wesentlichen durch folgende Parameter beeinflusst:

- ▶ technische Möglichkeiten
- ▶ wirtschaftliche Indikatoren
- ▶ rechtliche Rahmenbedingungen

### 7.2.1 Technische Möglichkeiten der Sortierung

Die technischen Möglichkeiten hängen insbesondere ab

- ▶ von der Zusammensetzung des Materialinputs aus Sammlung/Umschlag,
- ▶ von der vorhandenen Verfahrenstechnik und Prozessabfolge in Bezug auf den Stand der Verfahrenstechnik und
- ▶ vom Durchsatz.

Die Materialzusammensetzung ist in der Regel eine Mischung aus unterschiedlichen Sammelsystemen (von Wertstoffhöfen einmal abgesehen), d.h. Inhalte von gelben Tonnen, gelben Säcken, Wertstofftonnen, Wertstoffsäcken etc. aus den anteilig sortierten Erfassungsgebieten kommen je nach Zufuhr zur Sortierung mehr oder weniger vermischt in den Sortierprozess. Insoweit ist die in diesem Gutachten vorgenommene Potenzialanalyse einzelner Erfassungssysteme in Bezug auf die Sortierung (Annahme eines homogenen Inputs aus einem jeweils betrachteten Sammelsystem) hypothetisch. An späterer Stelle wird eine zusätzliche Modellberechnung vorgenommen, die von einem Sortiergemisch folgender Zusammensetzung ausgeht, um die reale Situation besser widerzuspiegeln:

- ▶ 25 % Gelber Sack ländlich,
- ▶ 25 % Gelbe Tonne ländlich,
- ▶ 30 % Gelbe Tonne städtisch,
- ▶ 20 % Wertstofftonne städtisch.

Für das Sortierergebnis ist ebenso die Qualität des Inputmaterials entscheidend, also der Verschmutzungsgrad, der Störstoffanteil oder die Homogenität. Diesen Einflussgrößen kann nur bedingt durch Anpassung des Sortierprozesses (Rückführung, manuelle Sortierung) begegnet werden. Andererseits erscheint für die Gutachter der Einfluss einer Verdichtung im Sammelfahrzeug und/oder eine Sammlung „Tüte in Sack“ vernachlässigbar bzw. durch die Aufgabeprozesse (Sackaufreißer) oder erste Sortierschritte (Siebtrommel, manuelles Rückführen) behebbar.

Bei der Sortiertechnik (Verfahrensstufen und Prozessabfolge) ergeben sich derzeit bei gegebenem Input die größten Unterschiede bei den betriebenen Sortieranlagen. So wurden auf Basis eigener Einschätzung aus den Jahren 2013/2014 folgende Varianten betrieben:

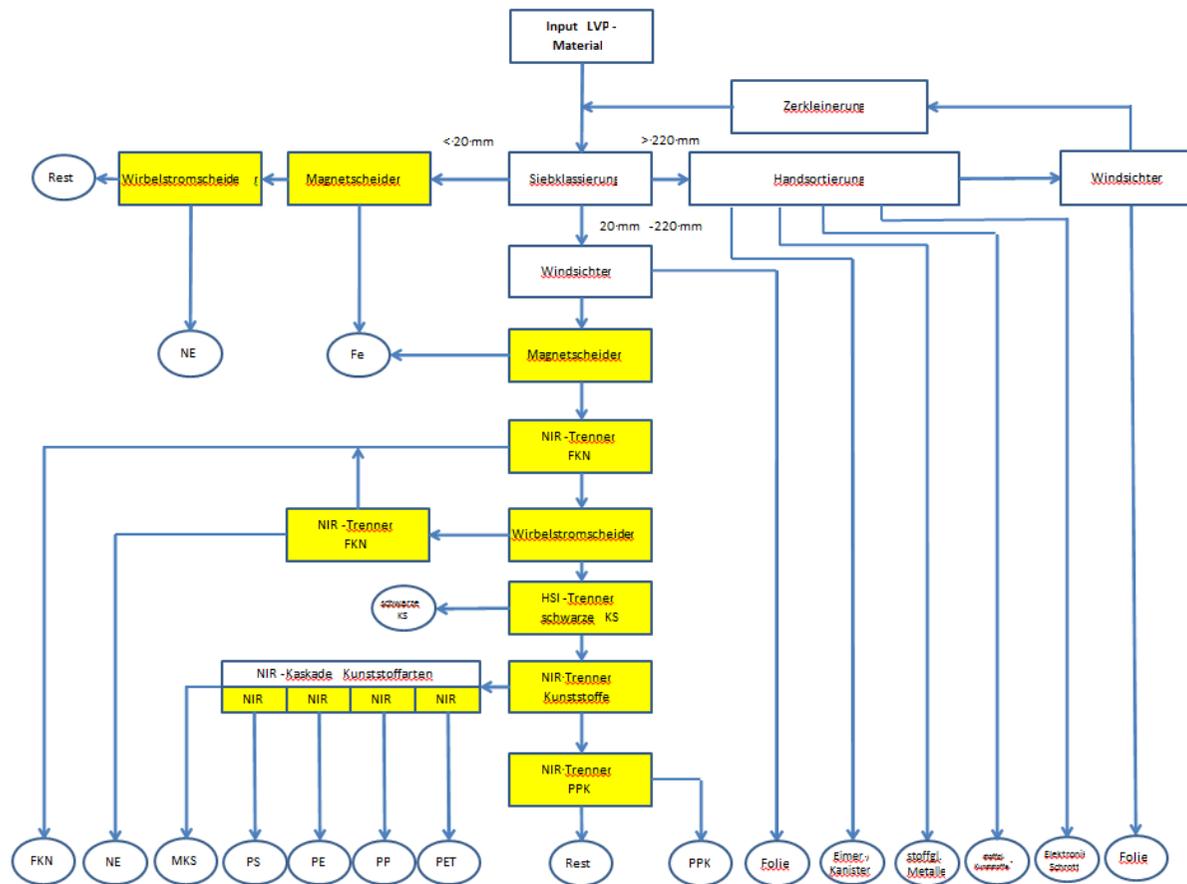
- ▶ moderne Sortieranlagen mit einer umfangreichen Kunststoffartentrennung (i.d.R. >12 NIR Trenner, Stand der Technik) ca. 50 % des Materialstromes
- ▶ (ältere) Sortieranlagen, die mit NIR Trennern nachgerüstet wurden (<12 NIR Trenner) ca. 25 % des Materialstromes
- ▶ Sortieranlagen mit Schwerpunkt „gemischte Polyolefine (MPO)“ oder „Formstabile Kunststoffe“ ca. 12 % des Materialstromes
- ▶ Altanlagen ohne Kunststoffartentrennung ca. 8 % des Materialstromes
- ▶ Sonderfälle: Anlagen, die Leichtverpackungen aus Sondersammelsystemen (PPK/LVP) verarbeiten oder ein eigenes Aufbereitungskonzept (wie z. B. „LVP-Wäsche“) verfolgen ca. 5 % des Materialstromes

Auf Basis der Daten aller Mengenstromnachweise dualer Systeme 2014 nach Bothe [2014] lassen sich von 2,405 Mio. Mg erfasster LVP lediglich 0,04 Mio. Mg von Wertstoffhöfen kalkulieren, die direkt der Verwertung zugeführt wurden. Die verbleibenden ca. 2,37 Mio. Mg teilen sich auf die vorgenannten Materialströme der existierenden Sortieranlagen auf. Es sei dabei darauf hingewiesen, dass dies nicht bedeutet, dass die Anlagen auch entsprechend ihrer technischen Möglichkeiten betrieben werden; vielmehr werden zum Teil vorhandene Ausstattungen nicht ausgeschöpft, weil nicht-technische Gründe (Marktnachfragen) dies implizieren.

Hinzu kommt, dass auch modern, nach dem Stand der Technik ausgestattete Sortieranlagen häufig am oberen Rand ihrer Verarbeitungskapazität betrieben („überfahren“) werden. Ein erhöhter Durchsatz wirkt sich regelmäßig negativ auf die Trennschärfe und Sortiertiefe aus.

Nichtsdestotrotz gehen die in diesem Gutachten im Rahmen der Szenarien betrachteten Verfahren vom Stand der Sortiertechnik mit umfangreicher Kunststoffartentrennung aus, der sich durch nachfolgendes Schaubild charakterisieren lässt:

Abbildung 20: Schematische Darstellung Stand der Sortiertechnik



Quelle: Eigene Darstellung

Ausführlichere Beschreibungen lieferte das Teilvorhaben 1 im Rahmen des UBA-Planspiels (TV1). Nachfolgend eine Liste der wesentlichen Attribute einer LVP-Sortierung nach Stand der Technik, zitiert nach Dehoust, Christiani [2012]:

- ▶ mehrstufige Gebindeöffnung zur quasi vollständigen mechanischen Freilegung der einzelnen Komponenten ohne Aufschluss der Materialien,
- ▶ differenzierte Siebklassierung ohne systematische Verpackungsverluste als vorbereitende Maßnahme für größen- und materialabhängige Sortierstufen,
- ▶ Windsichtung der Siebfraktionen zur Auftrennung in folienartige und sonstige Komponenten,
- ▶ Rückführung des Windsichterschwergutes über Zerkleinerer in die Sortierstrecken mit automatischen Trennaggregaten zur Ausbringensmaximierung,
- ▶ Gewinnung der metallischen Produkte (Weißblech- und Aluminium) mittels Überbandmagnetscheidung bzw. Wirbelstromscheidung mit spezifisch angepassten Leistungsmerkmalen,
- ▶ Nachreinigung der nicht-metallischen Inhalte über automatische Klaubesysteme mit Hilfe spektrometrischer Detektion,
- ▶ Mehrfachtrennungen einer Zielfraktion sowie Kontrollsortiersysteme für Sortierreste zur Ausbringensmaximierung,
- ▶ Kontrollmöglichkeiten für alle Outputströme zur Behebung zufälliger und systematischer maschinentechnischer Defizite und zur Identifizierung von Störungen im Prozessablauf,
- ▶ Sortierung formstabiler Kunststoffe nach Kunststoffart zur Minimierung der Mischkunststofffraktion in Abstimmung an die Anforderungen hochwertiger Rezyklate; aktuell entstehen dabei vier Fraktionen der Standardverpackungspolymere PE, PP, PS und PET.

### 7.2.2 Wirtschaftliche Indikatoren

Wirtschaftliche Indikatoren der Sortierungen ergeben sich vor allem aus

- ▶ den Sortierverträgen mit den dualen Systemen,
- ▶ der Auslastung und dem Durchsatz der Anlage,
- ▶ dem Alter bzw. dem Grad der Abschreibung der Anlage,
- ▶ dem Personalkostenanteil (manuelle Sortierschritte!),
- ▶ der Vermarktbarkeit (Nachfrage) der Rezyklate (Erlös/Zuzahlung).

Die Sortierverträge unterscheiden sich ganz wesentlich danach, ob die Sortierprodukte dem auftraggebenden dualen System zur Vermarktung bereitgestellt werden oder ob die Vermarktung durch die Sortieranlage selbst erfolgt. Vereinfachend kann festgestellt werden, dass im Falle der Bereitstellung sich die Nachfrage weniger direkt auf die Sortierung auswirkt, zumal die Sortiermengen von dualen Systemen über mehrere Anlagen gebündelt werden können. Im Falle der Direktvermarktung ist die einzelne Sortieranlage indes auf ihren Marktzugang und ihren Output beschränkt.

Die Auslastung und der Durchsatz der Sortierung stehen in der Regel im direkten Konflikt mit der Sortierqualität (siehe technische Möglichkeiten) und führen nach eigenen Erkenntnissen immer häufiger zum „Überfahren“ der Anlage unter Verzicht auf eine mögliche und vorhandene Sortiertiefe.

Ein weiterer erheblicher Kostendruck entsteht für die Sortieranlagenbetreiber durch die Abschreibung der Anlage. Die zunehmend aufwändige Sortiertechnik insbesondere der Kunststoffartendetektion erfordern hohe Investitionen und entsprechend lange Amortisationszeiten. Dies ist insbesondere bei kurzen Sortiervertragslaufzeiten und international volatilen Nachfragemärkten im Wettbewerb mit abgeschriebenen Altanlagen ein Problem; letztere beschränken sich dann häufig auf marktgängige Sortierprodukte/Rezyklate wie formstabile Kunststoffe oder MPO.

Der Automatisierung stehen hohe Personalkosten für alternative manuelle Sortierschritte (Vor- oder Nachsortierung) entgegen. Beiträge des Europäischen Wirtschaftsdienstes EUWID belegen regelmäßig

die Tendenz, gemischte PET-Fraktionen oder PE/PP-Gemische in Billiglohnländern (Osteuropa, Asien) sortieren und dort weiterverwerten zu lassen.

Schließlich wirkt sich wirtschaftlich die unmittelbare Nachfrage nach einzelnen Sortierprodukten aus. Dies gilt in besonderem Maße für die werkstoffliche Verwertung von Kunststoffen zu Regranulat. Im Wettbewerb mit Neuware unterliegen insbesondere solche Kunststoffe wie PS mit geringen Masseanteilen im LVP-Strom nicht zuletzt durch einen sinkenden Ölpreis. Den Autoren ist zumindest eine (der wenigen) Anlagen bekannt, die sortenreines PS sortiert und diese Sortierung aus den genannten Gründen mangelnder Wettbewerbsfähigkeit eingestellt hat.

### 7.2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Zu den rechtlichen Rahmenbedingungen, die sich unmittelbar oder mittelbar auf die Sortierergebnisse und die Verwertung auswirken, seien an dieser Stelle genannt:

- ▶ die vorgegebenen Verwertungsquoten der Verpackungsverordnung bzw. des künftigen Verpackungsgesetzes,
- ▶ die Abfallhierarchie hinsichtlich stofflicher und energetischer Verwertung,
- ▶ ökologische Vorgaben zum Verpackungsdesign.

Mit der Anhebung der Verwertungsquoten z. B. für die (werk-)stoffliche Verwertung von Kunststoffen im neuen Verpackungsgesetz hat der Gesetzgeber eine unmittelbar wirksame Regelung in Bezug auf die Sortierergebnisse verabschiedet. Aufgrund des 2014 mit etwa 2,4 Mio. Mg deutlichen Überhanges an LVP-Sammelmenge gegenüber einer Lizenzmenge von 1,17 Mio. Mg und des Quotenbezuges auf eben diese Lizenzmenge war die Quotenerfüllung im Allgemeinen leicht zu bewältigen.

Dies führte zum Teil zu Quoten deutlich über 100 %. Anstelle aufwändiger Sortierung konnten Quotenüberhänge im stofflichen Bereich auf energetische Verwertungswege gebracht werden. Mischkunststofffraktionen und EBS bzw. Sortierreste gelangen so unter Verzicht auf verfügbare Sortiertechnik überwiegend in die energetische Verwertung.

Die geringen Preise für energetische Verfahren führen zudem häufig zu einem Unterlaufen der Abfallhierarchie, insbesondere dann, wenn es kaum mehr MVA gibt, die nicht die Kriterien der energetischen Verwertung erfüllen. Das vorrangige Ziel einer hochwertigen, insbesondere (werk)stofflichen Verwertung bleibt damit de facto häufig den Quotenvorgaben des Verpackungsrechts überlassen.

Ökologische Vorgaben zum Verpackungsdesign und zur Verpackungsvermeidung manifestieren sich bislang in den rechtlichen Vorschriften – von der Vorgabe von Schadstoffgrenzwerten abgesehen – nur rudimentär über allgemeine Leitsätze. Das neue Verpackungsgesetz verpflichtet die dualen Systeme in § 21 im Rahmen der Bemessung der Beteiligungsentgelte, Anreize für die ökologische Gestaltung von Verpackungen zu schaffen (Stichworte: Rezyklateinsatz, Recyclingfähigkeit).

**Alle vorgenannten technischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Kriterien bestimmen die Sortierleistungen und die Qualität der Sortierprodukte. Im Ergebnis ergibt sich ein Gesamtbild das sich bundesweit an den Mengenstromnachweisen der dualen Systeme ablesen lässt. Im folgenden Abschnitt gibt deshalb die Auswertung dieser Mengenstromnachweise ein reales Bild der derzeitigen Erfassungs- und Sortierergebnisse wieder.**

## 7.3 Auswertungen der Mengenstromnachweise dualer Systeme

Jährlich bis zum 01.05. sind die dualen Systeme rechtlich verpflichtet, einen durch unabhängige Sachverständige geprüften Mengenstromnachweis vorzulegen. Dieser umfasst die vom jeweiligen System-Wirtschaftsprüfer bestätigten (in Verkehr gebrachten) „Lizenzmengen“ an Verkaufsverpackungen aus Glas, PPK und „Leichtverpackungen“ (LVP) und die dementsprechend auf das jeweilige duale System entfallenden Anteile der Erfassungsmengen, die einer Verwertung zugeführt wurden. Im Falle der

LVP<sup>15</sup> ist hierzu i. d. R. eine Sortierung vorgeschaltet. Der Sachverständige prüft im Rahmen seiner Tätigkeit die Richtigkeit und Konsistenz der Daten aus der Erfassung, der Sortierung und der Zuführung zur Verwertung. Dabei werden nur solche Verwertungsmengen anerkannt, die im Falle von LVP-Materialien aus Kunststoff und aus Verbundmaterialien gemäß LAGA-M 37 einer dafür zertifizierten Verwertungsanlage zugeführt wurden. Für Glas und PPK ist aufgrund von LVP getrennter Erfassungssysteme ein separater Mengenstrom zu führen. Dies gilt ebenso für außerhalb der öffentlich-rechtlichen Sammelsysteme erfasste Mengen über sogenannte Branchenlösungen oder bis zur 7. Novelle der VerpackV noch zulässige „Eigenrücknahmen“ der Hersteller bzw. Vertreiber.

Fasst man alle Mengenstromnachweise der dualen Systeme (Verkaufsverpackungen nach § 6 Abs. 1 VerpackV) zusammen, so erhält man auf der Erfassungs-, Sortier- und Verwertungsseite ein Gesamtbild der in Deutschland im jeweiligen Kalenderjahr verwerteten Materialfraktionen aus Verkaufsverpackungen privater Endverbraucher (außer Branchenlösungen und Eigenrücknahmen).

In den Jahren 2011 bis 2015 wurden durch Bothe [10/2016] beim Senator für Umwelt, Bau und Verkehr der Freien Hansestadt Bremen (Referat für Kreislauf- und Abfallwirtschaft) derartige Auswertungen durchgeführt. Für das Kalenderjahr 2013 lag der Schwerpunkt bei der Gesamtausbringung aller Fraktionen, in der Auswertung der Mengenstromnachweise des Jahres 2014 wurde der Schwerpunkt auf die Differenzierung der Kunststoffverpackungen gelegt, vgl. Bothe [09/2016]. Für das Kalenderjahr 2014, das als Bezugsjahr für die meisten Daten in diesem Gutachten verwendet wurde, ergibt sich folgendes Ergebnis:

Tabelle 28: Zuführungsmengen aus LVP dualer Systeme zur Verwertung 2014 auf MSN-Basis nach Bothe [2016]

	Masse [Mg]	Anteil [%]
Kunststoffe	1.131.123	47,0
Weißblech	261.778	10,9
Aluminium	60.746	2,5
Flüssigkeitskartonagen	128.153	5,3
PPK aus LVP, einschl. PPK-VB	44.631	1,9
sonst. Wertstoffe (StNVP)	7.061	0,3
EBS-Vorprodukt incl. MPO-Beiprodukt	175.133	7,3
Sortierreste	596.468	24,8
Summe	2.405.093	100,0

Eine detaillierte Darstellung der vorgenannten Auswertung ist Anlage 3.1 zu entnehmen.

Während die Zuführungsmengen für Weißblech, Aluminium, sonstige Wertstoffe (StNVP) und FKN vollumfänglich den als werkstofflich verwerteten Mengen entsprechen, ergibt sich für die Kunststoffe ein differenziertes Bild gemäß folgender Aufschlüsselung der Mengen für das Kalenderjahr 2014 anhand der Mengenstromnachweise nach Bothe [2016]

<sup>15</sup> Der LVP-Begriff fasst die ursprünglich im Sammelsystem Gelber Sack/Gelbe Tonne zu erfassenden Materialfraktionen an Verkaufsverpackungen aus Kunststoffen, Weißblech (Fe-Metall), Aluminium sowie deren Verbunde einschl. sonstige Verbunde aus PPK zusammen, wobei die Flüssigkeitskartonagen aus Papier-Kunststoff-Alu- Verbund als FKN separat ausgewiesen werden.

Tabelle 29: Differenzierung der Kunststoffverpackungen aus der Zuführung zur Verwertung im MSN 2014 nach Bothe [2016]

Fraktion	Masse zugeführt Verwertung [Mg]	Anteil an Kunst- stofffraktion [%]	Masse werk- stofflich ver- wertet [Mg]	Anteil werk- stofflich verwertet [%]
Folie	152.664	13,5	150.334	98,5
Kunststoffarten/Kunststoffrein- fraktionen (0320 bis 0340, mit Aus- nahme MPO (0323))	193.001	17,1	185.016	95,9
MPO (0323)	37.881	3,3	37.166	98,1
Mischkunststoffe 0350-x, 0352	733.249	64,8	39.044	5,3
Formstabile Kunststoffe 0351-x	14.328	1,3	13.155	91,8
<b>Kunststoffverpackungen insgesamt</b>	<b>1.131.123</b>	<b>100,0</b>	<b>424.715</b>	<b>37,5<sup>16</sup></b>

Die in der vorgenannten Tabelle ermittelten Werte für die werkstofflich verwerteten Kunststoffe wurden unter folgenden Randbedingungen aus den MSN abgeleitet:

- ▶ Es wurden nur Verwertungsmengen aufgenommen, die von den prüfenden Sachverständigen als werkstofflich verwertet anerkannt worden sind.
- ▶ Bei einer zusätzlichen Berechnung hat Bothe [2016] die Werte auf Trockenmassen unter Berücksichtigung eines Feuchteanteils von 5 % und eines Mindestanteils an Kunststoffen gemäß den Systemspezifikationen von 85–92 % umgerechnet und erhält dann anstelle einer der Verwertung zugeführten Kunststoffmenge von 1.131.123 Mg eine bereinigte Reinkunststoffmenge von 936.368 Mg.
- ▶ Umstritten<sup>17</sup> ist die vorgenommene Reduzierung der werkstofflichen Verwertung im Gesetzesinne auf sogenannte Rezyklatausbeuten, die Bothe zwischen etwa 44 % für „Mischkunststoffe, neu (0352)“ und 71 % für MPO (0323) ansetzt. Hier kommt Bothe [2016] auf deutlich reduzierte Mengen an recycelten Kunststoffen, die für Neuprodukte als Potenzial zur Verfügung stehen, von lediglich 277.062 Mg gegenüber einer Zuführungsmenge zur Verwertung von 424.715 Mg (siehe Tabelle 29). Von den Systembetreibern und Verwertern wird hierzu vor allem vorgetragen, dass die geforderten Quoten der Verpackungsverordnung sich schließlich auf die „der Verwertung zugeführten Mengen“ beziehen, soweit diese „spezifikationsgerecht“ sind (s. Spezifikationsvorgaben der Systembetreiber) und die „Letztempfängeranlage“ für die Materialfraktion zertifiziert ist. Diese Vorgehensweise hat vor allem erhebungstechnische Gründe<sup>18</sup>. Für die Berechnung des Umweltnutzens der durch die werkstoffliche Verwertung erzielt wird, ist hingegen die Ausbeute an Rezyklaten am Ende des Recyclingprozesses ausschlaggebend. Unter den ökologischen Aspekten dieses Gutachtens ist nicht die Zuführungsquote zur Verwertung, sondern die Produktionsquote an Rezyklat zugrunde gelegt, vgl. Anlage 3.2.
- ▶ Sowohl die anhand der MSN-Daten als auch von Verwerter-Zertifikaten ermittelten Ausbringungsraten der Sortierung bzw. Zuführungsquoten zur (werk-)stofflichen Verwertung (Anla-

<sup>16</sup> Achtung: Diese werkstoffliche Verwertungsquote bezogen auf die erfassten und einer werkstofflichen Verwertung zugeführten Kunststoffe ist nicht zu verwechseln mit der Quotenvorgabe der Verpackungsverordnung, die sich auf die in Verkehr gebrachte Menge an (Kunststoff-)Verkaufsverpackungen bezieht. Bei einer Lizenzmenge nach Bothe [2015] von 698.699 Mg für 2014 entspricht dies nach Verpackungsverordnung einer werkstofflichen Quote über alle Systeme von 60,8 %.

<sup>17</sup> Vgl. Workshop des USV e.V. am 06.04.2016 zur Vereinheitlichung der Zertifikate gem. LAGA M37.

<sup>18</sup> Eine ausführliche Diskussion zu Schnittstellen der Quotenberechnung ist in UBA-Texte 101/2015 „Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2013“ in Kapitel 7.6 zu finden.

ge 3.1) und die letztendlichen Produktionsraten zur Herstellung von Rezyklaten (Anlage 3.2) werden in den nachfolgenden Szenarien zur Berechnung herangezogen.

Insgesamt ist aus den Auswertungen der MSN für 2014 wie schon in den Vorjahren erkennbar, dass im Wesentlichen die erzeugten Mischkunststofffraktionen 0350-x und 0352 zu fast zwei Dritteln den überwiegenden Anteil an sortierten Kunststoffen bilden (743.249 Mg). Hieraus werden lediglich 5,3 % einer werkstofflichen Verwertung zugeführt<sup>19</sup>. Wenngleich noch 8,9 % rohstofflich verwertet werden, so gelangen doch 85,8 % in die energetische Verwertung.

Nimmt man zu diesen Mengen an MKS (MPO-Fraktion wird als „Reinkunststofffraktion“ gewertet) noch die Ersatzbrennstoffe einschließlich der Beiprodukte der MPO-Fraktion hinzu, die vorwiegend aus nicht separierten Kunststoffanteilen bestehen, so ergibt sich nach dem MSN 2014 ein Potenzial von

$$0,858 \times 743.249 \text{ Mg} + 55.291 \text{ Mg} + 119.842 \text{ Mg} = \mathbf{812.841 \text{ Mg}}$$

an theoretisch maximal zusätzlich vorhandenen Kunststoffen für (werk-)stoffliche Verwertung. Die technischen Grenzen der Sortierung werden hier mit dem Pareto-Prinzip von 80:20 überschlägig abgeschätzt. Damit kommt man auf ein zusätzliches Potenzial von etwa 650.000 Mg für eine andere als die energetische Verwertung, entsprechend etwa 8,1 kg/(EW\*a).

Anhand dieser Zahl lassen sich die Anteile der werkstofflich verwerteten Kunststofffraktionen aus den einzelnen Sammelsystemen mit den Anteilen, die in die energetische Verwertung gelangen, vergleichen.

Eine Frage lautet also: Ergeben sich durch die unterschiedlichen Sammelsysteme unter derzeitigen (IST) oder realisierbaren Sortiersystemen (ZUKUNFT) relevante zusätzliche Potenziale in Richtung auf eine werkstoffliche Verwertung?

Die Daten aus dem MSN 2014 liefern für das nachfolgend betrachtete IST-Szenario die Basis realer Ausbringungsmengen und tatsächlich verwerteter, insbesondere auch werkstofflich verwerteter Anteile und hieraus entstehender Rezyklate. Sie bilden somit die realen o. g. Implikationen auf den Sortier- und Verwertungsprozess ab, während das betrachtete ZUKUNFT-Szenario die technischen Möglichkeiten bei dem heutigen Stand der Sortiertechnik anhand variabler Inputzusammensetzungen (Sammelsysteme) fokussiert.

## 7.4 Ausgewählte Sammelsysteme und Modellparameter

Im Rahmen dieses Gutachtens wurden acht Sammel- bzw. Behältersysteme anhand vorliegender Sortieranlagen untersucht. Die ermittelten Fraktionen werden als solche als „homogener“ Herkunftsbe- reich als LVP-Wareneingänge in eine fiktive Sortieranlage definiert; real handelt es sich bei den Zu- gängen zur Sortierung um Mischungen aus verschiedenen Vertragsgebieten und Sammelsystemen.

Für sieben Sammelsysteme (Material von Wertstoffhöfen geht direkt in die Aufbereitung/Verwertung) wird die analytisch bestimmte Zusammensetzung des LVP-Materials auf zwei verschiedene fiktive Sortieranlagen aufgegeben.

### Szenario 1: IST-Modell

Es handelt sich um eine durchschnittliche Sortieranlagenausstattung entsprechend der in Ab- schnitt 7.2.1 dargestellten Bandbreite aus Anlagen mit unzureichender Ausstattung, z. B. ohne Kunststoffartentrennung, mit durchschnittlicher Ausstattung und mit Ausstattung nach dem

<sup>19</sup> Die Fraktion FKN wird in die Betrachtung der Kunststoffverwertung nicht einbezogen, wenngleich neuere Verfahren existieren, die eine werkstoffliche Verwertung für die bei der FKN-Aufbereitung in Papierfabriken anfallenden Rejekte aus Kunststoff (PE) und Aluminium eröffnen. Derzeit gelten die FKN vollständig als werkstofflich verwertet, wenn der Papieranteil recycelt wird und die Rejekte gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz verwertet werden.

Stand der Technik, einschließlich solcher, die „überfahren“ werden. Das IST-Szenario spiegelt demnach die derzeitige Sortiertechnik in Deutschland wider und bezieht sich insoweit auf die realen Randbedingungen wie sie in Abschnitt 7.3 anhand der MSN-Analyse 2014 dargestellt wurden (Sortierfraktionen, Verwertungsanteile etc.).

**Szenario 2: ZUKUNFT-Modell**

Bei diesem Modell wird die deutschlandweite Sortierung nach dem Stand der Technik (StdT) betrachtet. Die LVP Sammelmengen gelangen also vollständig in Sortieranlagen, die mit optimaler NIR-Trennung ohne Überlast arbeiten.

Die Unterschiede beider Szenarien finden wie folgt Eingang in die Modellberechnung für jedes betrachtete Erfassungssystem:

Schritt 1: Materialaufkommen aus der Erfassung als Wareneingang der Sortieranlage

Schritt 2: Aufteilung des Wareneingangs der Sortieranlage auf die Fraktionen im Ausgang der Sortieranlage (Ballenwarenuordnung)

- a. Szenario IST
- b. Szenario ZUKUNFT

Schritt 3: Berechnung der aus den einzelnen Sammelsystemen sortierten Mengen (Ausbringung Sortieranlage, Wareneingang)

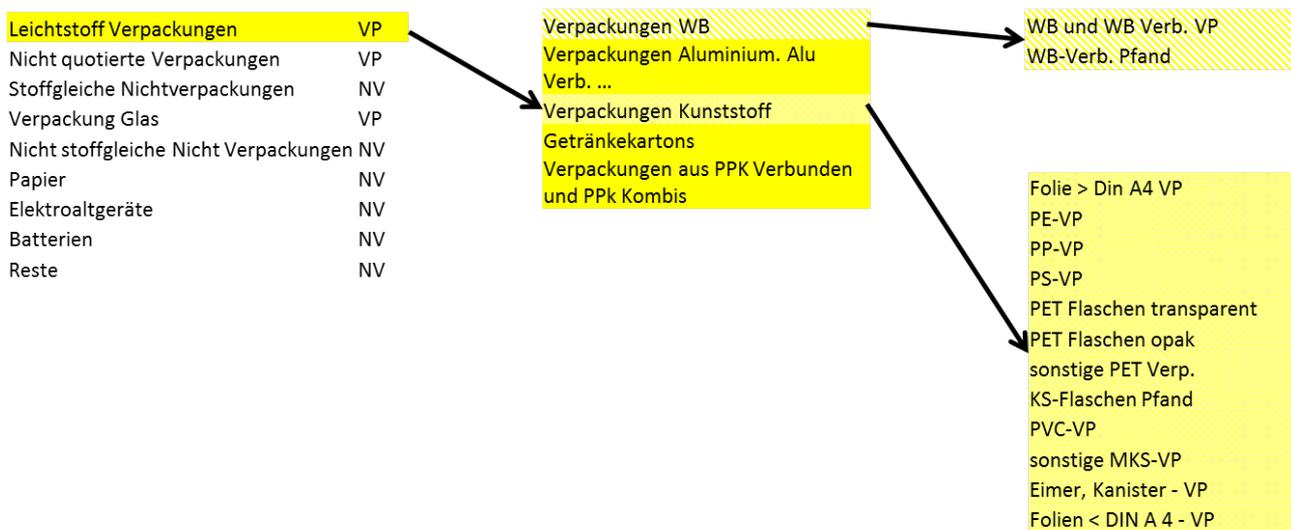
Schritt 4: Berechnung des jeweils erzeugten Rezyklats aufgrund der Zuführungsrate zur werkstofflichen Verwertung und der Produktionsrate an Rezyklaten für

- a. Szenario IST
- b. Szenario ZUKUNFT

**7.4.1 Schritt 1: Differenzierung der Erfassungsmengen**

Wie bereits dargestellt wurde, werden die Sammelsysteme bzw. Behälteranalysen über drei Sortierebenen aufgeschlüsselt. Das Schaubild in Abbildung 21 verdeutlicht die schrittweise Differenzierung der Daten.

Abbildung 21: Sortierebenen des Dateninputs



Quelle: Eigene Darstellung

In Tabelle 30 sind die Fraktionen der drei Differenzierungsebenen zur Ermittlung der LVP-Zusammensetzung ausführlich dargestellt:

Tabelle 30: Fraktionen zur Ermittlung der LVP-Zusammensetzung nach Differenzierungsebenen

1. Differenzierungsebene	2. Differenzierungsebene	3. Differenzierungsebene
Leichtstoff Verpackungen	Verpackungen WB	WB und WB Verb. VP
Nicht quotierte Verpackungen	Verpackungen Aluminium. Alu Verb.	WB-Verb. Pfand
Stoffgleiche Nichtverpackungen	Verpackungen Kunststoff	FE Schrott
Verpackung Glas	Flüssigkeitskartons	Alu, Alu Verb. Verp.
Nicht stoffgleiche Nicht Verpackungen	Verpackungen aus PPK Verbunden und PPK Kombis	aluh.-Verb. PPK frei
Papier	Verpackungen aus Holz	aluh.-Verb. PPK haltig
Elektroaltgeräte	Verpackungen aus Gummi	Alu Pfand
Batterien	Verpackungen aus Kork	Alu NV
Reste	Verpackungen aus Keramik	NE-Schrott
	Verpackungen Glas	Folien <DIN A 4 - VP
	stoffgleiche NVP aus NE-Metallen	Folie <Din A4 NV
	stoffgleiche NVP aus Fe-Metallen	Folie >Din A4 VP
	stoffgleiche NVP aus Kunststoff	Folie >Din A4 NV
	NVP Holz	PE-VP
	NVP Gummi	PE-NV
	NVP Kork	PP-VP
	NVP Glas	PP-NV
	NVP Keramik	PS-VP
	NVP Textilien	PS-NV
	NVP Leder	PET Flaschen transparent
	Papier	PET Flaschen opak
	Elektroaltgeräte	sonstige PET Verp.
	Batterien	PET- NV
	Reste	KS-Flaschen Pfand
		PVC-VP
		PVC-NV
		sonstige MKS-VP
		MKS NV
		Eimer, Kanister - VP
		Eimer, NV
		FKN
		PPK Verbunde

1. Differenzierungsebene	2. Differenzierungsebene	3. Differenzierungsebene
		Papier VP
		Papier-NV
		Papier, Zellstoff -NV
		CD's
		CD's verpackt
		Holz VP
		Holz-NV
		Gummi VP
		Gummi-NV
		Kork VP
		Kork NV
		Glas VP
		Glas NV
		Keramik VP
		Keramik NV
		trennbare Kombi VP
		Elektro- (nik-)altgeräte
		Rest Windeln
		Rest Leder
		Textilien
		Batterien
		Küchen-/ Gartenabfälle
		Rest (inkl. Feinkorn)

Die zunächst nach 60 Kategorien unterteilten Abfallanalysen der einzelnen Erfassungssysteme („Ebene 3“, „fein“) wurden auf 16 Fraktionen (von 24 möglichen) des Wareneingangs der Sortieranlage aggregiert („Ebene 2“, mittel). Dies ist erforderlich, weil eine so hohe Differenzierung sich nicht über den Prozess bis zur Verwertung darstellen lässt.

Das Sammelaufkommen der 16 Fraktionen als Wareneingang der Sortierung ist in Anlage 1 wiedergegeben. Angegeben sind jeweils die Massenanteile der Materialfraktionen im Input bezogen auf 1 Mio. Einwohner bzw. als prozentualer Anteil (%).

Tabelle 31: Auszug aus der Darstellung des Wareneingangs „Wertstofftonne städtisch“, Fraktionen prozentual, Erfassungsdetaillierung Ebene 2

<b>Ebene 2</b>	<b>Wertstofftonne städtisch [%]</b>
Aluminiumhaltig / NE-Metall	3,0
Eimer, Kanister	1,3
Folien <DIN A 4	7,5
Folien >DIN A 4	5,1
PET Flächen transparent	1,4
PET sonstig	1,6
Polyethylen (PE)	3,5
Polypropylen (PP)	7,9
Polystrol (PS)	2,1
sonstige Kunststoffe	13,8
FKN	5,7
PPK Verbunde	0,5
trennbare Kombi VP	1,0
Weißblech / Fe-Metall	9,5
PPK, kein LVP	11,8
ungeeignetes LVP Material	24,3
<b>Summe</b>	<b>100,0</b>
Anteil Kunststoffe	44,2

Ergänzend wird in Anlage 1 die Aufteilung auf drei von neun Inputanalysefraktionen angegeben („Ebene 1“, „grob“).

Tabelle 32: Auszug aus der Darstellung des Wareneingangs „Wertstofftonne städtisch“, Fraktionen prozentual, Erfassungsdetaillierung Ebene 1

<b>Ebene 1</b>	<b>Wertstofftonne städtisch</b>
Systemzugehörige LVP-Verpackung	46,3 %
geeignetes Zusatzmaterial im LVP	17,6 %
Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	36,1 %
<b>Summe</b>	<b>100,0 %</b>

Zusätzlich wurde auch der im Wareneingang der Sortierung enthaltene PPK-Anteil aufgeschlüsselt.

Tabelle 33: Aufschlüsselung des (nicht LVP-zugehörigen) PPK-Anteils im Wareneingang am Beispiel der Wertstofftonne städtisch

PPK (ohne PPK Verbunde) Feinsortierung Ebene 3	Wertstofftonne städtisch
Papier VP [Mg]	1.626
Papier-NV [Mg]	1.319
Papier, Zellstoff -NV [Mg]	646
Summe [Mg]	3.592
Anteil an der Gesamterfassung [%]	11,8

Die angegebenen Tabellen-Werte aus Anlage 1 beziehen sich auf die Massenanteile der Sammelmenge der Wertstofftonne städtisch, bzw. auf die Massen bezogen auf 1 Mio. Einwohner.

### 7.4.2 Schritt 2: Verteilung des Wareneingangs auf die Sortierfraktionen (Warenausgang)

Bei diesem Schritt erfolgt bereits die eigentliche Differenzierung der beiden Szenarien IST und ZUKUNFT. Hierzu werden die Fraktionen des Wareneingangs auf Basis der Fraktionen der Ebene 3 (fein) den Ausgangsfraktionen der Sortieranlage (Ballenware, DS-Fraktionsbezeichnungen) zugewiesen. Diese Zuweisung basiert auf Kenntnissen der Sortiertechnik und einer Verteilung anhand von eigenen Erfahrungswerten in Verbindung mit den DS-Spezifikationen.

Die detaillierte Zuordnung findet sich in

- ▶ Anlage 7: Ausbringungsraten für das IST-Szenario
- ▶ Anlage 8: Ausbringungsraten für das ZUKUNFT-Szenario

Dabei ist zu beachten, dass es sich bei den Tabellenwerten um reine Rechengrößen handelt, die ausgehend von der Zuordnung des jeweiligen Hauptmaterialanteils auf die übrigen Ausgangsfraktionen aufgeteilt werden (Darstellung von Nachkommastellen). Die beiden Anlagen dienen nur der Nachvollziehbarkeit des Rechenweges zu den erhaltenen Massenanteilen in den jeweiligen Sortierfraktionen.

Tabelle 34: Beispiel 1 (Angaben gerundet):

	DS-Fraktion	310	350	361/365/830
Folien <DIN A4	IST		85 %	15 %
	ZUKUNFT		90 %	10 %
Folien >DIN A4	IST	85 %	13 %	2 %
	ZUKUNFT	90 %		10 %

Tabelle 35: Beispiel 2 (Angaben gerundet)

	DS-Fraktion	331	340	350	360	361/365/830
Polystyrol VP	IST	20,3 %	0,2 %	67,6 %		11,9 %
	ZUKUNFT	90,0 %				10,0 %
Polystyrol NVP	IST	14,2 %	0,2 %	70,9 %	2,2 %	12,5 %
	ZUKUNFT	63,0 %			27,0 %	10,0 %

Die vorgenommene Datenbankverknüpfung erlaubt prinzipiell eine Veränderung einzelner Parameter und Überprüfung der Auswirkungen.

Den beiden Szenarien liegen folgende Annahmen einer Aufteilung der Inputfraktionen (Sammlung) auf den Sortieranlagenausgang zugrunde.

IST-Szenario

1. Maximal 80-85 % der Inputfraktion wurden ihrer Zielfraktion zugewiesen, d. h. maximale Ausbringungsrates im aktuellen „Sortieranlagenmix“, vgl. Abschnitt 7.2.1:
  - a. volle NIR-Ausstattung
  - b. MPO/formstabile Kunststoffe –spezialisierte Anlagen,
  - c. ältere Anlagen mit geringer Trennleistung;
2. Begrenzung der Sortierprodukte auf die maximal im MSN 2014 erreichten Sortierprodukte durch Rückrechnung auf die Sammelmengen (Sortierinput);
3. Waren in den Inputfraktionen von Aluminium, Weißblech, Polyolefinen (PP,PE) usw. mehr Verpackungen enthalten als 2014 Sortierprodukte erzeugt wurden, wurden die Verpackungsmaterialien in der folgenden Abstufung den zur Verfügung stehenden Materialfraktionen zugewiesen (abhängig davon, ob dies lt. Produktspezifikation zulässig ist):
  - a. Mischkunststoffe
  - b. EBS-Vorprodukt
  - c. Sortierreste
4. Für „Sonstige Wertstoffe“ wurde angenommen: 50 % Fe, 30 % NE, 10 % stoffgleiche Kunststoffe und 10 % Elektronikschrott.

ZUKUNFT-Szenario

Im Einzelnen ergeben sich die nachfolgend beschriebenen Zuordnungen des Sortieranlageninputs zu den Ausgangsfraktionen (Sortierprodukte) nach dem Stand der Technik.

Die Weißblechverpackungen lassen sich mit Hilfe von Magnetabscheidern (Überbandmagneten) zu ca. 95 % aus dem Hauptmaterialstrom separieren. Weißblechverpackungen fallen hierbei überwiegend im Mittelkorn an (je nach Ausführung der Siebtrommel >20 mm bis 220 mm) und werden automatisch aussortiert. Stoffgleiche Nichtverpackungen aus Eisen fallen aufgrund ihrer Form und Größe in etwa zur Hälfte im Siebdurchgang (händische Klaubung, Zielfraktion stoffgleiche Metalle) und im Mittelkorn (Zielfraktion Weißblech) an.

Gerätebatterien werden in Sortieranlagen nicht zielgerichtet aussortiert. Über den Anteil an eisen- und nichteisenhaltigen Batterien liegen keine Informationen vor. Eigene Untersuchungen haben ergeben, dass Gerätebatterien, die im Haushalt anfallen, nahezu vollständig magnetisch sind. Aus diesem Grund wurde davon ausgegangen, dass Batterien in der Fraktion Weißblech anfallen, da sie sich sortiertechnisch nicht von der Weißblechfraktion unterscheiden (ihr Inputanteil beträgt etwa 0,05 %).

Tabelle 36: Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion Fe-Metalle/Weißblech

Inputmaterial	Zielfraktion
WB und WB Verb. VP	0410/0412 Weißblech
Fe-Schrott	50 % Weißblech (0410/0412)
50 % stoffgleiche Metalle (0430)	

Die Aluminiumverpackungen lassen sich erfahrungsgemäß zu ca. 90 % mit Wirbelstromabscheidern aus dem Fein- und Mittelkorn separieren. Die StNVP aus Aluminium unterscheiden sich zum Teil in ihrer Größe und Form von den Aluminiumverpackungen und werden im Siebdurchgang händisch entnommen und der Fraktion stoffgleiches Aluminium zugewiesen.

Tabelle 37: Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion NE-Metalle

Inputmaterial	Zielfraktion
Alu, Alu Verb. Verp. Alu Pfand	Aluminium (0420)
aluh.-Verb. PPK frei aluh.-Verb. PPK haltig	Aluminium (0420)
Alu NV	50 % Aluminium (0420)
NE-Schrott	50 % Aluminium (0420) 50 % stoffgleiches Aluminium (0435)

Folien werden in Sortieranlagen nach der Siebung in unterschiedliche Korngrößen üblicherweise als erste Fraktion abgetrennt. Dies geschieht durch eine Absaugung über dem Förderband (Grobfraktion) mit Hilfe von Windsichtern. Durch die Abtrennung zu Beginn der Prozesskette sind ebenfalls andere flugfähige Materialien (Styroporkugeln, Holzstückchen, Papier) in der Folienfraktion enthalten, die bei der Siebung nicht abgetrennt wurden.

Tabelle 38: Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion Folien >DIN A4

Inputmaterial	Zielfraktion
Folie >DIN A4 VP Folie >DIN A4 NV	Folien >DIN A4 (0310/ 0312)

Kleine Folien gelangen über das Mittelkorn der Siebfraktion am Beginn der Sortierung (Siebdurchlauf) durch die nachgeschaltete Windsichtung überwiegend in die MKS-Fraktion.

Eimer, Kanister und ähnliche Materialien werden der Zielfraktion Hohlkörper >5 l zugeordnet.

Tabelle 39: Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion Hohlkörper >5 l

Inputmaterial	Zielfraktion
Eimer, Kanister-VP Eimer, NV	Hohlkörper >5 l (0322)

Die Verpackungen aus PE, PP, PS und ihre korrespondierenden StNVP haben vielfach eine vergleichbare Größe und ein vergleichbares Sortierverhalten, so dass sie in der gleichen Sortierspezifikation anfallen. Die Identifizierung und Ausbringung der PE-, PP, PET und PS-Verpackungen erfolgt mit Hilfe der Nahinfrarotspektroskopie (NIR-Trenner).

Tabelle 40: Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion PE/PP

Inputmaterial	Zielfraktion
PP-VP	PP (0324)
PP-NV	PP (70 %) (0324) stoffgleiche Kunststoffe (30 %) (0360)
PE-VP	PE (329)
PE-NV	PE (70 %) (329) stoffgleiche Kunststoffe (30 %) (0360)

StNVP aus PET sind im Input nicht enthalten bzw. nicht in den Analysen ausgewiesen.

PET wird in der Sortieranlage mittels NIR-Trenner separiert und kann unterschiedlichen PET Sortierprodukten zugewiesen werden, die sich im PET-Flaschenanteil unterscheiden (90 % Flaschenanteil, 70 % Flaschenanteil, 50 % Flaschenanteil).

Die PET Flaschen werden werkstofflich verwertet. Für die PET Blister und Schalen stehen noch keine (ausreichend) geeigneten werkstofflichen Verwertungsverfahren zur Verfügung. Sie werden in der Regel beim Aufbereiter/Verwerter aussortiert und energetisch verwertet. In der Szenarienberechnung werden zwei PET Fraktionen generiert:

- ▶ 0328-1 PET mit einem Flaschenanteil an transparenten PET Flaschen in Höhe von >90 %
- ▶ 0328-x alle anderen PET Verpackungen

Über „KS-Flaschen Pfand“ liegen keine Informationen zur Materialart vor. Sie wurden als „PET Flaschen transparent“ eingestuft.

Tabelle 41: Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion PET

Inputmaterial	Zielfraktion
PET Flaschen transparent	Misch-PET (0328-1)
KS-Flaschen Pfand	Misch-PET (0328-1)
PET Flaschen opak	Misch-PET (0328-X)
sonstige PET Verpackungen	

In den ausgewerteten Sortieranalysen war kein expandiertes Polystyrol (EPS) ausgewiesen. Ob und in welchem Umfang in den Inputfraktionen „PS-VP“ und „PS-NV“ expandiertes Polystyrol enthalten ist, ist nicht bekannt. Aufgrund der beschriebenen Stoffgruppenkataloge wird davon ausgegangen, dass in der Stoffgruppe PS-VP kein expandiertes Polystyrol (EPS) enthalten ist, sondern es sich ausschließlich um „ungeschäumtes“ Polystyrol (Becher, Schalen, Blister) handelt, so dass EPS der Stoffgruppe „sonstige MKS-VP“ zugewiesen wurde. Expandiertes Polystyrol wird in Sortieranlagen mit Kunststoffarten-Trennung nicht aussortiert und fällt in Mischkunststoffen, EBS-Vorprodukt oder den Sortierresten an.

Tabelle 42: Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion PS

Inputmaterial	Zielfraktion
PS-VP	Polystyrol (0331)
PS-NV	Polystyrol (70 %) (0331) stoffgleiche Kunststoffe (30 %) (0360)

Flüssigkeitskartonagen (FKN) werden mit Hilfe von NIR-Trennern der Fraktion 0510 FKN zugewiesen.

Tabelle 43: Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion FKN

Inputmaterial	Zielfraktion
FKN	FKN (0510)

Sonstige Kunststoffverpackungen, die bei den Sortieranalysen keiner speziellen Sortierfraktion zugeordnet werden konnten, wurden bei der Sortierung den Fraktionen „sonstige MKS-VP“ und „MKS NV“ zugewiesen.

Da über die Zusammensetzung der Fraktion „sonstige MKS-VP“ und „sonstige MKS NV“ keine weiteren Informationen vorliegen, wurden diese Stoffgruppen je zu einem Drittel den Mischkunststoffen, EBS Vorprodukt und den Sortierresten zugewiesen, insbesondere, weil bei den Sortieranalysen die spezifischen Zielfraktionen zuvor separiert wurden.

Tabelle 44: Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion Mischkunststoffe

Inputmaterial	Zielfraktion
sonstige MKS-VP	1/3 Mischkunststoffe (0350/0352)
sonstige MKS NV	1/3 stoffgleiche Kunststoffe (0360)
	1/3 EBS-Vorprodukt (0365)

PPK und PPK-Verbunde werden in den Sortieranlagen mit Hilfe von NIR-Trennern aussortiert. Ihre Ausbringungsrate ist nicht nur technisch bedingt, sondern hängt vielfach von den festgelegten Ausbringungsraten der Systembetreiber ab. Im LVP Input sind ca. 3,1 bis 16,2 % PPK und PPK-Verbundverpackungen enthalten. Dies spiegelt sich in den Sortierprodukten der Sortieranlagen nicht wider. Im Sortieranlagenausgang beträgt der Anteil der Sortierfraktion PPK aus LVP nur etwa 1-2 %. Über die Zusammensetzung der Inputfraktion „Papier, Zellstoff –NV“ liegen keine Informationen vor. Es wurde davon ausgegangen, dass es sich um Papiertücher, Taschentücher usw. handelt. Sie wurden der Zielfraktion PPK aus LVP, einschl. PPK-Verbunde (550) zugewiesen.

Tabelle 45: Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion PPK

Inputmaterial	Zielfraktion
Papier VP	PPK aus LVP (0550)
Papier-NV	
PPK Verbunde	
Papier, Zellstoff –NV	

Bei „trennbaren Kombinationsverpackungen“ handelt es sich beispielsweise um Zigarettenschachteln, Joghurtbecher mit Papp-Banderole oder um Schokoladenpapierverpackungen mit Alufolie. Miteinander verbunden können sie in der Sortieranlage keiner eindeutigen Zielfraktion zugewiesen werden. Es wurde angenommen, dass diese Verpackungen zu je 25 % in den Fraktionen PPK aus LVP einschl. PPK-VB (0550), EBS Vorprodukt (0365), Aluminium (0420) und Sortierresten (0830) anfallen (Ihr Anteil am Input beträgt ca. 1,4 %).

Für PVC existiert kein Zielprodukt und es ist in allen Zielfraktionen als Störstoff eingestuft. Aus diesem Grund wurden „PVC-VP“ und „PVC-NV“ den Sortierresten (0830) zugewiesen.

„Rest/ Störstoffe/ Verderbnisabfälle/ Feinkorn“, „Glas VP“, „Textilien“, „Rest Windeln“, „Küchen-/ Gartenabfälle“, „Gummi-NV“, „Holz-NV“, „Keramik NV“, „Rest Leder“, „Glas NV“, „Kork NV“ und „Keramik VP“ werden in den Sortieranlagen nicht zielgerichtet ausgebracht, und sind nur aufgrund vergleichbarer Sortiereigenschaften als Störstoff in den Sortierspezifikationen enthalten. So können beispielsweise Kork oder Holzsnipsel aufgrund ähnlicher „Flugeigenschaften“ in der Folienfraktion oder Windeln aufgrund ähnlicher Reflexionseigenschaften in der Fraktion Flüssigkeitskartonagen anfallen.

Tabelle 46: Zuordnung des Anlageninputs – Zielfraktion Sortierreste

Inputmaterial	Zielfraktion
Rest/ Störstoffe/ Verderbnisabfälle/ Feinkorn, Glas VP Textilien Rest Windeln Küchen-/ Gartenabfälle Gummi-NV Holz-NV Keramik NV Rest Leder Glas NV Kork NV Keramik VP Holz VP	Sortierreste (0830)

Für Elektronikaltgeräte und Batterien können im IST-Szenario keine bewussten Zielfraktionen benannt werden. Ihr kumulierter Anteil am LVP-Aufkommen beträgt <1 %. Ein Teil der Elektronikaltgeräte kann händisch aus dem Siebdurchlauf entnommen werden. Kleinteiligere Elektronikaltgeräte können als Fehlaustragung in anderen Zielfraktionen (Weißblech, Aluminium, Mischkunststoffe, EBS-Vorprodukt) oder den Sortierresten anfallen. Für CDs gilt entsprechendes anteilig für 0361, 0362 und 0830.

Elektronikaltgeräte (Haushaltskleingeräte, IT- und Telekommunikationsgeräte, Geräte der Unterhaltungselektronik, elektrische Werkzeuge, elektrische Spielzeuge, Glühbirnen und andere Leuchtmittel) wurden im IST-Szenario zu etwa 3 % der Fraktion 0440 (Elektronikaltgeräte) und zu 97 % den Sortierresten (0830) zugewiesen, im ZUKUNFT-Szenario hingegen zu 40 % der Fraktion 0440 und zu 60 % der Fraktion 0830. Eventuelle Fehlausträge in andere Sortierfraktionen wurden wie oben dargestellt berücksichtigt.

CDs wurden im ZUKUNFT-Szenario je zur Hälfte dem EBS-Vorprodukt (0365) und den Sortierresten (0830) zugewiesen.

Die folgenden Sortierfraktionen wurden in den ausgewerteten Sortieranalysen der Sammlung nicht festgestellt bzw. nicht ausgewiesen:

- ▶ „WB-Verb. Pfand“;
- ▶ „PET- NV“;
- ▶ „CDs verpackt“;
- ▶ „Gummi VP“;
- ▶ „Kork VP“;
- ▶ „PVC-VP“.

Stoffgleiche Nichtverpackungen, die sich aufgrund Ihrer Größe zum Teil von den vergleichbaren Verpackungsfraktionen differenzieren, wurden je zur Hälfte der Verpackungsfraktion (gleiche Sortiereigenschaft) und zu 50 % der entsprechenden Zielfraktion der stoffgleichen Nichtverpackungen zugewiesen.

Die vorgenommene Aufteilung enthält eine Reihe von Einflussgrößen, auf die im Zusammenhang mit der Zuführung zur Verwertung anhand der einzelnen DS-Fraktionen noch näher eingegangen wird.

Reduziert man die Darstellung der Zuordnung auf 16 Erfassungsfractionen (Ebene 2) zu 25 Ausgangsfractionen so ergibt sich folgende Gegenüberstellung der nachfolgenden Tabelle. Eine 26. Ausgangsfraction für sortierte schwarze Kunststoffe ist denkbar (351-5) wurde aber mangels derzeitiger Relevanz und verfügbarer Daten außer Acht gelassen.

Tabelle 47: Reduzierte Darstellung der Zuordnung des Sortieranlageneingangs zu den bereitgestellten Ballenfractionen

Erfassungsfraction (Klassifizierungsebene 2)	Sortierfraction zur Verwertung (Output Sortieranlage)	DS-Schlüssel	
<u>Gemischt erfasste LVP, die in den Sortieranalysen in folgende Fractionen unterschieden wurden (siehe Abbildung 21):</u>	Folien	0310	
	Flaschen	0320	
	PO Flaschen	0321	
	Hohlkörper >5 l	0322	
	MPO	0323	
	Polypropylen	0324	
	Polyethylen	0329	
	Aluminiumhaltig / NE-Metall	PET Flaschen 328-1 90 % Flaschen	0328-1
	Eimer, Kanister	Misch-PET 328-2 75 % Flaschen	0328-x
	Folien <DIN A 4	Becher (Wertstoffhof)	0330
Folien >DIN A 4	Polystyrol	0331	
PET Flächen transparent	Expandiertes Polystyrol (Styropor®)	0340	
PET sonstig	Formstabile Kunststoffe	0351	
Polyethylen (PE)	stoffgleiche Nichtverpackungen (KS)	0360	
Polypropylen (PP)	Mischkunststoffe	0350	
Polystyrol (PS)	Weißblech	412	
sonstige Kunststoffe	Aluminium	420	
FKN	Stoffgleiche Fe-Metalle	430	
PPK Verbunde	Stoffgleiche NE-Metalle	435	
trennbare Kombi VP	Elektronikaltgeräte	440	
Weißblech / Fe-Metall	Flüssigkeitskartonagen	510	
PPK, kein LVP	PPK aus LVP, einschl. PPK-VB	550	
ungeeignetes LVP Material	KEG = EBS	0361	
Die detaillierten Zuordnungen zu den Sortierfractionen zur Verwertung sind ausgehend von der Klassifizierungsebene 3 in den Anlagen 7 und 8 dargestellt.	EBS-Vorprodukt	0365	
	Sortierreste	830	

### 7.4.3 Schritt 3: Berechnung der aus den einzelnen Sammelsystemen sortierten Mengen (Ausbringung Sortieranlage, Warenausgang)

Aus der Zuordnung nach Schritt 2 lässt sich für jedes Sammelsystem unmittelbar die Menge an Output-Fractionen (Ausbringung) berechnen. Das Ergebnis ist detailliert in Anlage 4 (IST-Szenario) und Anlage 5 (ZUKUNFT-Szenario) dargestellt. Es handelt sich um die Mengen, die gesamt der Verwertung (werkstofflich, rohstofflich und energetisch) zur Verfügung stehen.

Folgende Tabelle zeigt die Output-Mengen am Beispiel des Erfassungssystems Wertstofftonne städtisch im Vergleich der Szenarien IST und ZUKUNFT bezogen auf 1 Mio. Einwohner.

Tabelle 48: Szenarien-Vergleich Output Sortieranlage am Beispiel „Wertstofftonne städtisch“

DS Fraktion	Bezeichnung	IST-Szenario [Mg]	ZUKUNFT-Szenario [Mg]	Bezeichnung	DS-Fraktion
0310	Folien	1.330	1.408	Folien	0310
0320	Flaschen	20		Flaschen / PO Flaschen	0320
0321	PO Flaschen	177		(Wertstoffhof)	0321
0322	Hohlkörper >5L	136	366	Hohlkörper >5L	0322
0323	MPO	467			
0324	Polypropylen	1.004	2.088	Polypropylen	0324
0329	Polyethylen	281	921	Polyethylen	0329
0328-1	PET Flaschen 328-1 90 % Flaschen	145	371	PET Flaschen 328-1 90 % Flaschen	0328-1
0328-x	Misch-PET 328-2 75 % Flaschen	403	441	Misch-PET 328-2 75 % Flaschen	0328-x
0330	Becher (Wertstoffhof)	2		Becher (Wertstoffhof)	0330
0331	Polystyrol	124	549	Polystyrol	0331
0340	Expandiertes Polystyrol (Styropor®)	1		Expandiertes Polystyrol (Wertstoffhof)	0340
0351	Formstabile Kunststoffe	176			
0360	stoffgleiche Nichtver- packungen (KS)	11	128	stoffgleiche Nichtver- packungen (KS)	0360
0350	Mischkunststoffe	6.756	4.862	Mischkunststoffe	0350
412	Weißblech	2.202	2.324	Weißblech	412
420	Aluminium	697	739	Aluminium	420
430	Stoffgleiche Fe-Metalle	124	456	Stoffgleiche Fe-Metalle	430
435	Stoffgleiche NE-Metalle	37	104	Stoffgleiche NE-Metalle	435
440	Elektronikaltgeräte	21	245	Elektronikaltgeräte	440
510	Flüssigkeitskartonagen	1.332	1.550	Flüssigkeitskartonagen	510
550	PPK aus LVP	600	3.391	PPK aus LVP	550
0361	KEG = EBS	1.287			
0365	EBS-Vorprodukt	2.788	1.091	EBS-Vorprodukt	0365
830	Sortierreste	10.279	9.364	Sortierreste	0830
<b>Summe</b>		<b>30.400</b>	<b>30.400</b>		

Die Fraktionen MPO, EPS<sup>20</sup>, formstabile Kunststoffe und MPO-Beiprodukt (KEG) wurden im Szenario ZUKUNFT für Sammelsysteme mit Sortierprozessen nicht mehr als relevant angesehen. Diese Fraktionen spielen nur bei der getrennten Erfassung auf Wertstoffhöfen eine Rolle.

Zum Verständnis der Verschiebungen einzelner Fraktionen bzw. Mengenanteile vom IST- zum ZUKUNFTS-Szenario ist anzumerken, dass die Mengenanteile einzelner Fraktionen (z. B. 550) im IST-Szenario durch die Verwendung realer Daten aus dem MSN „gedeckt“ sind. Im ZUKUNFTS-Szenario ist hingegen die Ausschöpfung der technischen Möglichkeiten nach dem Stand der Sortiertechnik zur gezielten Ausbringung Basis der Betrachtung. Vergleiche hierzu beispielsweise im Sammelsystem „Wertstofftonne städtisch“ die Verschiebung von rechnerisch 2.984 Mg aus den Verbrennungsfractionen 0365 und 830 auf die Fraktion 550, die gegenüber dem IST-Szenario um etwa 2.800 Mg zulegt.

#### **7.4.4 Schritt 4: Berechnung des jeweils erzeugten Rezyklats aufgrund der Zuführungsrate zur werkstofflichen Verwertung und der Produktionsrate**

Zur Berechnung auf Basis der in Schritt 3 für die einzelnen Erfassungssysteme ermittelten Austrahlungsmengen der Sortieranlagen im Szenario IST und ZUKUNFT werden die Anteile der einzelnen Fraktionen benötigt, die der werkstofflichen Verwertung zugeführt werden.

Um ferner den schließlich erzeugten Anteil an Rezyklaten (Sekundärmaterialien) zu ermitteln wird noch die Produktionsrate der Verwertungsverfahren benötigt (Abzug der Verluste, Störstoffe etc.).

Anhand der realen Daten aus dem MSN 2014 konnten die Zuführungsquoten zur werkstofflichen Verwertung mit Hilfe der von Bothe [2016] und den Autoren vorgenommenen Auswertungen ermittelt werden. Das Ergebnis ist Anlage 3.1 zu entnehmen und in folgender Tabelle zusammengefasst:

---

<sup>20</sup> EPS kann in Sortieranlagen nicht aussortiert werden.

Tabelle 49: Zuführungsquoten zur (werk)stofflichen Verwertung

Sortierfraktion	Quote Zuführung (werk-)stofflich
Folien	98 %
Flaschen (WSTH)	92 %
PO Flaschen (WSTH)	100 %
Hohlkörper >5l	97 %
PP	99 %
PET(Flaschen)	93 %
PET(Blister)	82 %
PE	100 %
Becher (WSTH)	100 %
Polystyrol (PS)	99 %
EPS (Styropor®)	99 %
MPO	98 %
Misch-KS	5,3 %
Formstabile KS	92 %
Weißblech	100 %
Aluminium	100 %
sonstige Wertstoffe (SNVP)	100 %
FKN	100 %
PPK/PPK-VB aus LVP	82 %
KEG = EBS Vorprodukt	0 %
EBS Vorprodukt	0 %
Sortierreste	0 %

Die reduzierten Zuführungsquoten bei PET und formstabilen Kunststoffen resultieren hauptsächlich aus einem Anteil, der entweder energetisch verwertet wurde oder wo das Verwertungsverfahren nicht als werkstofflich anerkannt wurde. Bei der geringen Quote werkstofflicher Verwertungszuführung von Mischkunststoffen ist anzumerken, dass 2014 zusätzlich noch etwa 8,9 % rohstofflich verwertet wurden.

Die somit errechenbaren Mengen, die einer werkstofflichen Verwertung zugeführt wurden, entsprechen jenen Mengen, die als Basis für die Berechnung der Verwertungsquote nach Verpackungsverordnung dienen.

Durch das Recyclingverfahren unterliegen die zugeführten Mengen einer weiteren Reduktion aufgrund der eingesetzten Verfahrenstechnik, ausgedrückt über die jeweilige Produktionsrate bzw. Rezyklatausbeute.

Die Rezyklatausbeuten wurden aufgrund folgender Informationsquellen abgeschätzt:

- ▶ Angaben zu Ausbringungsquoten aus vorliegenden Anlagenzertifikaten für Anlagen zur Kunststoff-, Kunststoffverbund- und sonstigen Verbund-Verwertung (zertifizierungspflichtige Anlagen),
- ▶ Angaben zur Bandbreite verschiedener Verfahren („range“) aufgrund MSN-Auswertung,

- Einzelinformationen einzelner Anlagenbetreiber (z. B. Alu-Fraktion).

Aus den vorgenannten Informationen wurde ein jeweiliger Mittelwert der prozentualen Rezyklatausbeute (Rezyklatoutput aus dem Verwertungsprozess) wie folgt abgeschätzt:

Tabelle 50. Verwendete Rezyklatausbeuten der einzelnen werkstofflichen Verfahren

Fraktion	Rezyklatausbeute
Folie (0310-0/0310-1)	72,5 %
Flaschen/PO-Flaschen (0320)	65,0 %
PO KS_Flaschen (0321)	65,0 %
Hohlkörper (0322)	75,0 %
MPO (0323/0350-4)	65,0 %
PP (0324)	75,0 %
PET Flaschenanteil >90 %	75,0 %
PET 0328-2	52,5 %
PET 0328-x	52,5 %
PE (0329)	75,0 %
Becher (0330)	65,0 %
PS (0331)	75,0 %
EPS (0340)	87,5 %
Mischkunststoffe	65,0 %
FSK (ohne schwarze KS)	65,0 %
FSK schwarze KS	55,0 %
Stoffgleiche Kunststoffe	55,0 %
KEG = EBS	0,0 %
EBS	0,0 %
Weißblech	80,0 %
Aluminium	38,0 %
Stoffgleiches Fe-Metall	80,0 %
Stoffgleiche NE-Metalle	80,0 %
Elektronikaltgeräte	70,0 %
Flüssigkeitskartonagen	75,0 %
PPK aus LVP, einschl. PPK-VB	75,0 %
Sortierreste	0,0 %

In Anlage 3.2 sind weitere Angaben aufgeführt, wie die Anzahl der verwendeten Quelldaten.

Zu einzelnen Rezyklatausbeuten ist folgendes anzumerken:

- Die Ausbringungsraten für Kunststoffverpackungen basieren zumeist auf eigenen Auswertungen, und Informationen anderer Marktteilnehmer.
- Die Sortierfraktion Aluminium setzt sich aus Alu- und Alu-Verbundverpackungen, aluhaltigen Verbunden PPK-frei und aluhaltigen Verbunden PPK-haltig zusammen. Der Aluminiumgehalt

in der Sortierfraktion Aluminium (420) wird regelmäßig analysiert und beträgt zwischen 36 und 40 %, Rechenwert 38 %.

- ▶ Flüssigkeitskartonagen: Laut Fachverband Kartonverpackungen für flüssige Nahrungsmittel e.V. bestehen Flüssigkeitskartonagen zu 75 % aus Kartonage, zu 20 % aus PE-Folie und zu ca. 5 % aus Aluminium. Zwei wesentliche Verarbeiter der Flüssigkeitskartonagen gaben an, dass die Faserausbeute zwischen 60 und 65 % liegt. Die Folien-/Aluminiumrejekte werden entweder in Zementwerken stofflich/energetisch verwertet (Aluminium dient hierbei als Bauxitersatz) oder bei speziellen Aufbereitern nachsortiert und werkstofflich verwertet. Im Sinne der Verpackungsverordnung gelten die einem Recyclingverfahren zugeführten Flüssigkeitskartonagen als vollständig verwertet. In dem vorliegenden Gutachten wurden 50 % des Folien-/Aluminiumgemisches als stofflich verwertet eingestuft. Es wurde eine Rezyklatausbeute von 75 % herangezogen.
- ▶ Bei der Sortierfraktion PPK aus LVP (550) handelt es sich um ein Gemisch aus PPK sowie Verbunden auf PPK-Basis, das vielfach einen relativ hohen Feuchtigkeitsanteil von ca. 15-20 % aufweist. Ein Hauptabnehmer dieser Sortierfraktion ermittelt regelmäßig die Faserausbeute dieser Fraktion, die zusammen mit eigenen Untersuchungen in Kooperation mit der Papiertechnischen Stiftung, Heidenau zu einem Wert von 75 % Rezyklatausbeute zusammengefasst wurden.
- ▶ Die Sortierfraktion Weißblech (410/412) besteht aus Weißblech-Verpackungen, Weißblech-Verbundverpackungen und Fe-Schrott einschließlich Batterien. Die Aufbereitungs- und Verwertungsanlagen geben regelmäßig an, dass der Störstoffanteil an Folien, Anhaftungen usw. bei bis zu 20 % und der Metallgehalt bei ca. 80 % liegt. Für Weißblech wurde eine Rezyklatausbeute von 80 % zugrunde gelegt.

Sowohl die Zuführungsquote als auch die Rezyklatausbeute wurden gleichermaßen auf die Mengen beider Szenarien (Schritt 3) angewendet.

Im Endergebnis ergeben sich die folgenden Mengen an Rezyklaten:

- ▶ Anlage 4, unterer Tabellenteil: Szenario IST
- ▶ Anlage 5, unterer Tabellenteil: Szenario ZUKUNFT

Am Beispiel der „Wertstofftonne städtisch“ werden in den folgenden Tabellen die Rezyklatausbeuten der beiden Szenarien gegenübergestellt:

Tabelle 51: Rezyklatausbeuten im Szenario IST bei „Wertstofftonne städtisch“

DS Fraktion	Bezeichnung	Wertstofftonne städtisch [Mg]
0310	Folien	945
0320	Flaschen / PO Flaschen (Wertstoffhof)	12
0321	Flaschen / PO Flaschen (Wertstoffhof)	115
0322	Hohlkörper >5 l	99
0323	MPO	298
0324	Polypropylen	745
0329	Polyethylen	211
0328-1	PET Flaschen 328-1 90 % Flaschen	101
0328-x	Misch-PET 328-2 75 % Flaschen	174
0330	Becher (Wertstoffhof)	1
0331	Polystyrol	92
0340	Expandiertes Polystyrol (Wertstoffhof)	1
0351	Formstabile Kunststoffe	105
0360	stoffgleiche Nichtverpackungen	6
0350	Mischkunststoffe	233
412	Weißblech	1.762
420	Aluminium	265
430	Stoffgleiche Fe-Metalle	99
435	Stoffgleiche NE-Metalle	30
440	Elektronikaltgeräte	15
510	Flüssigkeitskartonagen	999
550	PPK aus LVP	369
0361	KEG	0
0365	EBS-Vorprodukt	0
830	Sortierreste	0
<b>Summe</b>		<b>6.676</b>

Tabelle 52: Rezyklatausbeuten im Szenario ZUKUNFT bei „Wertstofftonne städtisch“

DS Fraktion	Bezeichnung	Wertstofftonne städtisch [Mg]
0310	Folien	1.001
0320/0321	Flaschen / PO Flaschen (Wertstoffhof)	
0322	Hohlkörper >5 l	266
0324	Polypropylen	1.550
0329	Polyethylen	691
0328-1	PET Flaschen 328-1 90 % Flaschen	259
0328-x	Misch-PET 328-2 75 % Flaschen	190
330	Becher (Wertstoffhof)	
0331	Polystyrol	408
340	Expandiertes Polystyrol (Wertstoffhof)	
0360	stoffgleiche Nichtverpackungen	70
0350	Mischkunststoffe	168
412	Weißblech	1.859
420	Aluminium	281
430	Stoffgleiche Fe-Metalle	365
435	Stoffgleiche NE-Metalle	83
440	Elektronikaltgeräte	172
510	Flüssigkeitskartonagen	1.162
550	PPK aus LVP	2.086
0365	EBS-Vorprodukt	0
830	Sortierreste	0
<b>Summe</b>		<b>10.610</b>

## 7.5 Bereitstellung zur Verwertung

Die Bereitstellung der Sortierfraktionen zur Verwertung erfolgt anhand der bereits dargestellten Fraktionsbezeichnungen, die ursprünglich vom Dualen System Deutschland (DSD) eingeführt wurden und nunmehr Grundlage für die von allen Systemen verwendeten DS-Spezifikationen herangezogen werden. Nach wme.fact [2016] ergeben sich folgende einzuhaltenden Sortenreinheiten bzw. maximalen Störstoffanteile. Diese können bei einzelnen Sortierverträgen der Systeme abweichend geregelt sein:

Tabelle 53: Sortenreinheiten bzw. maximale Störstoffanteile der Sortierfraktionen zur Verwertung nach wme.fact [2016]

Fraktion	Bezeichnung	Reinheit [Masse-%]	Störstoffanteil [Masse-%]
0310	Kunststoff-Folien	92	8
0320	Gemischte Kunststoff-Flaschen	94	6
0321	PO-Kunststoff-Flaschen	94	6
0322	Kunststoff-Hohlkörper	94	6
0323	Gemischte Polyolefin-Artikel (MPO)	85	15
0324	Polypropylen	94	6
0328-x	Misch-PET	/	/
0328-1	Misch-PET 90/10	90/10 <sup>21</sup>	2
0329	Polyethylen	94	6
0330	Becher	94	6
0331	Polystyrol	94	6
0340	Expandiertes Polystyrol	97	3
0350	Mischkunststoffe	90	10
0351	Formstabile Kunststoffe (Qualität 1)	80	20
0351-5	Schwarze Kunststoffe	/	/
0360	Stoffgleiche Kunststoffe	/	/
0361	MPO Beiprodukt	40 <sup>22</sup>	/
0365	Ersatzbrennstoff-Vorprodukt	90	10
0412	Weißblech-SPEZ-2011	67 <sup>23</sup>	33
0420	Aluminium	90	10
0430	Stoffgleiches Metall aus LVP	/	/
0435	Stoffgleiches Aluminium aus LVP	/	/
0440	Elektronikschrott	/	/
0510	Flüssigkeitskartons	90	10
0550	PPK aus LVP	90	10
0830	Sortierreste aus LVP	/	/

Anmerkung: Bei fehlenden Zahlenangaben liegen keine Spezifikationsfestlegungen vor.

Die einzelnen Fraktionen, vgl. auch die Beschreibung der Zielfraktionen in Abschnitt 7.4.2, lassen sich wie folgt charakterisieren (Auswahl):

<sup>21</sup> mindestens 90 % PET-Flaschen, transparent, maximal 10 % sonstige, formstabile Verpackungen aus PET

<sup>22</sup> Mindestkunststoffgehalt

<sup>23</sup> Abweisungsgrenze, Abschlagsfreie Standardqualität mindestens 82 Masse-%, d. h. 18 % Störstoffe (= Berechnungswert in diesem Gutachten)

### **Kunststoffolie (0310)**

Die Folien-Fraktion 0310 besteht aus restentleerten Artikeln aus Kunststoffolie (>DIN A4, hoher LDPE-Anteil), wobei auch Nebenbestandteile wie Etiketten enthalten sein dürfen.

Insgesamt darf der Störstoffanteil (sonst. Metalle, sonst. Kunststoffe, sonst. Reststoffe) 8 % nicht überschreiten und einzelne Störstoffe mit einem Gewicht >100 g dürfen ebenfalls nicht enthalten sein.

Folien werden in Sortieranlagen nach der Siebung in unterschiedliche Korngrößenfraktionen üblicherweise als erste Fraktion abgetrennt. Dies geschieht durch eine Absaugung über dem Förderband mit Hilfe von Windsichtern. Durch die Abtrennung zu Beginn der Prozesskette sind ebenfalls andere flugfähige Materialien (Styroporkugeln, Holzstückchen, Papier) in der Folienfraktion enthalten.

Die Sortierspezifikation mit einem maximalen Störstoffanteil von 8 % wird in der Regel eingehalten.

Die Verwertung erfolgt in spezialisierten Anlagen. Nach Störstoffabtrennung, Zerkleinerung und Wäsche werden die Sortierproduktbestandteile PS und PET aufgrund ihrer hohen Dichte durch eine Schwimm-Sink-Trennung vom Stoffstrom separiert, zu Ersatzbrennstoff (EBS) aufbereitet und einer energetischen Verwertung zugeführt. Das aufschwimmende PE und PP wird eingeschmolzen, filtriert, zu Agglomerat/Regranulat verarbeitet und anschließend als Rezyklat wiederverwertet. Die Rezykeltausbeute des werkstofflich verwertbaren Folienanteils liegt in etwa bei 73 %. Die Verwertung erfolgt in Deutschland, dem europäischen Ausland und Asien.

### **Gemischte Kunststoffflaschen (0320)**

Die Flaschenfraktion besteht aus formstabilen, restentleerten Hohlkörpern (<5 l). Nebenbestandteile wie Verschlüsse oder Etiketten dürfen ebenfalls enthalten sein. Der Störstoffanteil darf 6 % nicht überschreiten und es dürfen keine einzelnen Störstoffe mit einem Gewicht >100 g enthalten sein. Zu den Störstoffen zählen sonst. Metalle und Kunststoffe sowie Reststoffe.

Kunststoffflaschen werden in Sortieranlagen meist händisch durch Sortierkräfte aussortiert. Alternativ können Paddelsiebe, welche rollfähiges Material abtrennen, eingesetzt werden. Durch die vorwiegend händische Sortierung wird die Spezifikation mit einem maximalen Störstoffanteil von 6 % in der Regel eingehalten.

Vor der Endverwertung wird die Fraktion teilweise in Aufbereitungsanlagen nachsortiert um zum Beispiel PET-Flaschen oder andere Kunststoffarten zu separieren. Die Verwertung der Kunststoffarten erfolgt vergleichbar zur Folienfraktion. Bezüglich des Verwertungsweges der PET Flaschen siehe Fraktion 0325.

### **PO-Flaschen (0321)**

Die PO-Flaschen-Fraktion entspricht der Fraktion 0320, mit der Ausnahme, dass PET-Flaschen nicht enthalten sein dürfen und im Anlagenprozess vorher abgetrennt werden müssen (NIR). Die Reinheit der Fraktion sowie der nachfolgende Verwertungsweg unterscheiden sich nicht von der Fraktion 0320.

### **Kunststoffhohlkörper >5l (0322)**

Die Hohlkörper-Fraktion besteht wie die Fraktion 0320 und 0321 aus formstabilen, restentleerten Hohlkörpern inklusive Nebenbestandteilen wie Verschlüsse und Etiketten und einem maximalen Störstoffanteil von 6 % mit dem Unterschied, dass nur Gebinde >5 l gesammelt werden. PET-Gebinde dürfen nicht enthalten sein, wobei große Hohlkörper wie Eimer und Kanister grundsätzlich aus PO-Material gefertigt werden.

Da die Hohlkörper in den Sortieranlagen ausschließlich händisch separiert werden, wird die Spezifikation im Regelfall eingehalten und eine hohe Sortenreinheit erreicht. Der weitere Verwertungsweg entspricht der Fraktion 0321.

### **Gemischte Polyolefin-Artikel – MPO (0323)**

Die Fraktion MPO enthält restentleerte Verpackungen aus den Kunststoffen PE und PP inklusive Nebenbestandteilen wie Verschlüssen und Etiketten. Folien dürfen ebenfalls enthalten sein. Der maximale Störstoffanteil beträgt 15 % und es dürfen keine einzelnen Störstoffe mit einem Gewicht >100 g enthalten sein.

MPO wird üblicherweise in älteren Sortieranlagen ohne Kunststoffartentrennung aussortiert bzw. werden die polyolefinhaltigen Kunststoffe separiert. Nach der Separation von PET trennt am Ende der Prozesskette ein NIR-Trenner sämtliche Kunststoffe ab. Anschließend werden durch einen weiteren NIR-Trenner die Polyolefine PE und PP abgetrennt. Die durchlaufenden Kunststoffe werden als MPO-Beiprodukt (KEG) gesammelt. Insbesondere Fremdkunststoffe wie PET-Blister und PVC verunreinigen die MPO-Fraktion. Die Spezifikation mit einem maximalen Störstoffanteil von 15 % wird in der Regel eingehalten.

Die Verwertung von MPO erfolgt nach der Aufbereitung zu Ersatzbrennstoff entweder energetisch oder stofflich in Verwertungsanlagen, die auch Kunststoffe wie PP oder PE verwerten. In diesen Fällen muss zunächst der relativ hohe Fremd- bzw. Störstoffanteil separiert werden. Vergleichbar zur Folienverwertung werden die Fremdanteile zu EBS aufbereitet und energetisch verwertet. Somit wird eine relativ geringe Rezyklatausbeute von ca. 60 % erreicht. Die Verwertung erfolgt vornehmlich im Inland. Es bestehen aktuelle Tendenzen, derartige Mischfraktionen in Billiglohnländern (Asien) händisch in PP, PE und PET zu sortieren und dort zu verwerten; andererseits ist auch eine zukünftig vermehrte (roh)stoffliche Verwertung denkbar.

### **Polypropylen - PP (0324)**

Die Fraktion PP (Polypropylen) besteht aus restentleerten, formstabilen Kunststoffartikeln aus PP mit einem Volumen <5 l inklusive Nebenbestandteilen wie Verschlüsse und Etiketten. Der Störstoffanteil (sonst. Metalle, sonst. Kunststoffe, Reststoffe) darf 6 % nicht überschreiten und es dürfen keine einzelnen Störstoffe mit einem Gewicht >100 g enthalten sein.

Die PP-Fraktion wird in modernen Sortieranlagen am Ende der Prozesskette mit Hilfe von NIR-Trennern separiert. Dabei erkennt ein Sensor anhand von reflektierten Nahinfrarotstrahlen das Material sowie dessen Position und bläst es durch Luftdruckdüsen vom Förderband. In Abhängigkeit von der Anordnung des NIR-Trenners (vor oder nach anderen Kunststoffabtrennungen) und der Einstellung der Anlage (Bandgeschwindigkeit) kann in dieser Fraktion teilweise auch ein relativ hoher Anteil an sonstigen Kunststoffen enthalten sein. Die erforderliche Spezifikation mit einem Störstoffanteil von <6 % wird in den meisten Fällen eingehalten.

In älteren Sortieranlagen wird die PP-Fraktion teilweise nicht separat, sondern gemeinsam mit anderen Kunststoffen als formstabile Kunststoffe (0351) oder als MPO (0323) sortiert.

Die Verwertung erfolgt werkstofflich, vergleichbar zur Folienfraktion in spezialisierten Anlagen, in denen das Material zerkleinert, von Störstoffen befreit, gewaschen und getrocknet wird. Fremdkunststoffe wie PET-Blister oder PET werden durch eine Schwimm-Sink-Trennung separiert und als EBS weiterverarbeitet. Entweder wird das zerkleinerte PP-Material in Form eines Mahlgutes oder nach Schmelze und Filtration in Form eines Regranulats (Rezyklat) bereitgestellt. Die Rezyklatausbeute des werkstofflichen Anteils liegt bei über 70 %. Die Verwertung erfolgt vorwiegend in Deutschland bzw. im innereuropäischen Ausland.

### **PET-Flaschen transparent (0325)**

Die Fraktion PET-Flaschen transparent besteht aus restentleerten, formstabilen Verpackungen aus PET mit einem Volumen <5 l und einem maximalen Störstoffanteil von 2 %. Zu den Störstoffen zählen sonstige Metallartikel, opake PET-Falschen und andere PET-Artikel (Blister etc.), sonstige Kunststoffartikel, EPS, PVC und sonstige Reststoffe und einzelne Störstoffe mit einem Gewicht >100 g.

Die Fraktion PET-Flaschen transparent muss im Rahmen des Sortierprozesses in mehreren Schritten gewonnen werden. Zunächst werden sämtliche Kunststoffe aus PET am Ende der Prozesskette durch NIR-Trenner separiert. Die Abtrennung der Flaschen aus diesem Stoffstrom geschieht dann meist händisch oder teilweise durch Paddelsiebe. Aufgrund des aufwändigen Sortierprozesses und den hohen Anforderungen an die Sortenreinheit mit einem maximalen Störstoffanteils von 2 % wird die Fraktion in Sortieranlagen selten produziert und meist nur die Fraktion Misch-PET (0328) gewonnen. Die PET-Flaschen werden dann in einer nachgeschalteten Aufbereitungsanlage separiert.

Die Verwertung erfolgt in speziellen Anlagen vergleichbar zu den Fraktionen Folien und PP. Das Endprodukt besteht nach Zerkleinerung, Störstoff- und Fremdstoffentfernung, Wäsche und Trocknung aus sog. PET-Flakes die als Rezyklat eingesetzt und zu PET-Fasern oder anderen PET-Artikeln (Hohlkörper) verarbeitet werden können. Die Verwertung erfolgt vorwiegend im europäischen Ausland oder in Asien.

### **Misch-PET (0328)**

Die Fraktion Misch-PET besteht aus restentleerten, formstabilen Verpackungen aus PET mit einem maximalen Störstoffanteil (sonst. Metalle, sonst. Kunststoffe, PVC, sonst. Reststoffe) von 2 %. Weiterhin wird zwischen den Qualitäten 90/10 (0328-1), 70/30 (0328-2) und 50/50 (0328-3) unterschieden, die jeweils den Anteil an transparenten PET-Flaschen beschreiben. Wie bereits bei der Fraktion 0325 beschrieben, ist eine Nachsortierung erforderlich, um die sonstigen PET-Bestandteile (Blister, PET-Schalen) zu separieren. Diese werden derzeit nur energetisch als EBS verwertet. Die Verwertung der Flaschen erfolgt wie unter Fraktion 0325 beschrieben, wobei als Rezyklatausbeute der reinen Flaschen-Fraktion von ca. 70 % ausgegangen werden kann.

### **Polyethylen - PE (0329)**

Die Fraktion PE besteht aus restentleerten, formstabilen Kunststoffartikeln aus PE mit einem Volumen <5 l inklusive Nebenbestandteilen wie Verschlüsse und Etiketten. Der Störstoffanteil (sonst. Metalle, sonst. Kunststoffe, Reststoffe) darf 6 % nicht überschreiten und es dürfen keine einzelnen Störstoffe mit einem Gewicht >100 g enthalten sein.

Die Sortierung und Verwertung erfolgen entsprechend der Fraktion PP (Polypropylen). PE und PP werden üblicherweise in den gleichen Anlagen verwertet.

### **Polystyrol - PS (0331)**

Die Fraktion PS besteht aus restentleerten, formstabilen Kunststoffartikeln aus PS mit einem Volumen <5 l inklusive Nebenbestandteilen wie Verschlüsse und Etiketten. Der Störstoffanteil (sonst. Metalle, sonst. Kunststoffe, Reststoffe) darf 6 % nicht überschreiten und es dürfen keine einzelnen Störstoffe mit einem Gewicht >100 g enthalten sein.

Die Sortierung und Verwertung erfolgen entsprechend den Fraktionen PP (Polypropylen) und PE (Polyethylen). Da Polystyrol relativ selten als Verpackungsmaterial eingesetzt wird, existieren nur wenige Anlagen, die sich auf dieses Material spezialisiert haben.

### **Mischkunststoffe (0350)**

Die Fraktion Mischkunststoffe enthält restentleerte Artikel aus den verpackungstypischen Kunststoffen PE, PP, PET und PS inklusive Nebenbestandteilen wie Verschlüssen und Etiketten. Der maximale Störstoffanteil (Papier, Pappe, Karton, sonst. Metalle, PET-Flaschen transparent, PVC, sonst. Reststoffe) darf höchstens 10 % betragen und es dürfen keine einzelnen Störstoffe mit einem Gewicht >100 g enthalten sein.

Mischkunststoffe werden in Sortieranlagen an unterschiedlichen Punkten gesammelt. Zum einen wird Material aus dem Mittelkorn zu Beginn der Prozesskette mit Hilfe eines Windsichters abgesaugt und das flugfähige Material als „Mischkunststoff leicht“ gesammelt. Des Weiteren werden die Kunststoffe,

die nicht durch die Kunststoffartentrennung PE, PP, PET oder PS erfasst werden, am Ende der Prozesskette als Mischkunststoffe gesammelt. Durch diese Negativ-Sortierung enthält die Mischkunststoff-Fraktion üblicherweise viele Fremdstoffe, die durch die vorherigen Trennschritte nicht erfasst worden sind. Die Spezifikation mit einem maximalen Störstoffanteil von 10 % wird in der Regel eingehalten.

Der Verwertungsweg und die Menge der aussortierten Mischkunststoffe hängen meist von der aktuellen Marktsituation (Marktpreise) sowie gesetzlichen Vorgaben (Verwertungsquoten, Anerkennung energetische Verwertung) ab. Aktuell werden in etwa 5 % der Mischkunststoffe werkstofflich, ca. 9 % rohstofflich und ca. 86 % energetisch verwertet (MSN 2014).

Bei der werkstofflichen Verwertung ist zwischen verschiedenen Intrusionsverfahren zu unterscheiden. Zum einen werden die zerkleinerten MKS zu dickwandigen Kunststoffprodukten in Form von Backenfüßen, Poldern oder Industriepaletten verpresst. Vorteil hierbei ist, dass auch hochschmelzende PET-Anteile eingearbeitet werden können. Um die MKS in speziellen Anlagen, wie bei den Einzelfraktionen beschrieben, zu Rezyklaten zu verarbeiten (Schmelzintrusion), müssten PET-Anteile aussortiert und die übrigen Fraktionen händisch oder mit Hilfe von NIR-Trennern separiert werden (PE, PE). Insbesondere der hohe Anteil an Multilayer-Verpackungen (Kunststoff-Kunststoff-Verbunde) innerhalb der Mischkunststofffraktion würde für eine niedrige Rezyklatausbeute sorgen, da sich verschiedene Kunststoffschichten maschinell nicht mehr trennen lassen und der Verbund zur energetischen Verwertung abgetrennt würde.

Die (roh)stoffliche Verwertung von MKS kann über die Zwischenbildung von rieselfähigen Agglomeraten als Substitut von Schweröl (Reduktionsmittel) bei der Roheisenerzeugung erfolgen. Die energetische Verwertung der MKS-Restanteile aus den vorgenannten Aufbereitungen erfolgt ebenso wie die insgesamt nicht stofflich aufbereiten MKS nach der Aufbereitung und PVC-Abtrennung zu EBS. Diese werden in speziellen EBS-Kraftwerken oder in Zementwerken, aber auch in MVA, die mittlerweile zur energetischen Verwertung anerkannt sind, als Substitut für fossile Brennstoffe verwendet. Hierbei ist aufgrund des hochkalorischen MKS i. a. eine Vermischung mit anderen Materialien zur Erzielung des gewünschten Heizwertes erforderlich, dadurch sinkt aber der Durchsatz an Hausmüll mit Heizwerten zwischen 8.000-11.000 kJ/kg.

### **Formstabile Kunststoffe (0351-x)**

Die Fraktion Formstabile Kunststoffe enthält restentleerte, formstabile Verpackungen aus den Kunststoffen PE, PP und PS inklusive Nebenbestandteilen wie Verschlüssen und Etiketten. Der maximale Störstoffanteil (Papier, Pappe, Karton, Kunststofffolien, EPS, PET, sonst. Reststoffe) darf je nach Spezifikation (0351-1 bis 0351-4) zwischen 20 % und 50 % betragen und es dürfen keine einzelnen Störstoffe mit einem Gewicht >100 g enthalten sein.

Formstabile Kunststoffe werden üblicherweise in älteren Sortieranlagen ohne Kunststoffartentrennung sortiert, in dem am Ende der Prozesskette, nach der Separation von PET, ein NIR-Trenner die sonstigen Kunststoffarten (PE, PP, PS) abtrennt. Insbesondere weiche Kunststoffe, wie Folien sowie Papier verunreinigen die Fraktion.

Die Verwertung erfolgt zum Großteil werkstofflich in speziellen Anlagen, wo die Kunststoffarten PE, PP und teilweise PS separiert und zu Mahlgut oder Granulat verarbeitet werden. Aufgrund des aus der Sortierung resultierenden hohen Fremd- bzw. Störstoffanteils liegt die Rezyklatausbeute in etwa nur bei 65 %. Die Fremdmaterialien wie Folie oder Papier werden meist zu EBS aufbereitet und einer energetischen Verwertung zugeführt. Die Verwertung erfolgt in Deutschland oder im innereuropäischen Ausland.

### **MPO-Beiprodukt - KEG (0361)**

Die Fraktion KEG („Kunststoffe zur Energiegewinnung“) enthält Kunststoffe, die bei der Herstellung von MPO nicht vorher abgeworfen werden. Dabei muss der Kunststoffanteil mindestens 40 % betragen. Ebenfalls dürfen keine einzelnen Störstoffe mit einem Gewicht von >100 g enthalten sein.

Die Sortierung ist unter Fraktion 0323 beschrieben. KEG wird zu 100 % energetisch verwertet. Die Verwertung erfolgt hierbei vergleichbar zur Fraktion 0350 nach der Aufbereitung zu EBS in speziellen EBS-Kraftwerken oder in Zementwerken.

### **Ersatzbrennstoff-Vorprodukt (0365)**

Diese Fraktion ist vergleichbar mit KEG (0361) und dient ausschließlich der energetischen Verwertung in EBS-Kraftwerken, Zementwerken oder MVA. Sie besteht überwiegend aus Kunststoffbestandteilen, Papier und Holzpartikeln und textilen Materialien. Der Störstoffanteil ist auf 10 % begrenzt. Zurzeit wird an einer Normung der EBS gearbeitet.

### **Weißblech (0410 / 0412)**

Die Weißblech-Fraktion besteht aus restentleerten Artikeln aus Weißblech inklusive Nebenbestandteilen wie Verschlüsse und Etiketten. Der maximale abschlagfreie Störstoffanteil beträgt 18 %. Störstoffe umfassen Nichtmetalle und unter anderem geschlossene Hohlkörper, Sprengkörper oder Elektrogeräte.

Weißblech wird in Sortieranlagen nach der Siebung und Windsichtung aus dem Mittelkorn mit Hilfe eines Überbandmagneten abgetrennt. In den der Sortieranlage vorgeschalteten Umschlaganlagen wird das gesammelte Weißblech meist durch Radlader mit Folien zusammen unkontrolliert/ungeplant verpresst. Der Folienanteil in der abgetrennten Weißblechfraktion ist daher sehr hoch. Aufgrund der geringen Masse des Folienanteils wird die Spezifikation mit einem maximalen Störstoffanteil von 18 % in der Regel erreicht, hiervon geschätzt 12 Prozentpunkte Folien.

Die Verwertung erfolgt in speziellen Schrottaufbereitungsanlagen. Dort wird das Weißblech meist mit anderem eisenhaltigen Metallen gemischt, um das spezifische Gewicht des Aufgabematerials zu erhöhen. Nach der Zerkleinerung durch Hammermühlen und Shredder wird die Leichtfraktion, welche hauptsächlich aus Folien besteht durch einen Windsichter abgesaugt. Diese wird meist energetisch verwertet. Das Weißblech wird durch einen Überbandmagneten entfernt und anschließend der verbleibende Materialstrom mit Hilfe eines Wirbelstromscheiders von NE-Metallen befreit. Die Endverwertung des Weißblechs erfolgt überwiegend in Deutschland oder im innereuropäischen Ausland. Je nach Marktpreis wird das Material teilweise auch an Stahlwerke in Fernost geliefert.

### **Aluminium (0420)**

Die Aluminiumfraktion enthält restentleerte Artikel aus Aluminium und Aluminiumfolie inklusive Nebenbestandteilen wie Verschlüsse und Etiketten. Der Störstoffanteil (aluminiumfreie Artikel, Flüssigkeitskartons, sonst. Metalle, sonst. Reststoffe) darf 10 % nicht überschreiten.

Aluminium wird in Sortieranlagen üblicherweise nach Weißblech und FKN durch einen Wirbelstromscheider separiert. Dieser erzeugt einen Wirbelstrom, der die NE-Metalle auflädt. Ein Polrad am Ende des Förderbandes stößt dann die geladenen aluminiumhaltigen Bestandteile über einen Scheitel ab. Teilweise wird das aluminiumhaltige FKN nach Aluminium aussortiert und nur durch die Einstellung des Scheitels vom Abwurf gehindert. Somit gelangen teilweise hohe Anteile des FKN in die Aluminiumfraktion. Weiterhin gelangen viele Verbund-Materialien die nur zu geringen Teilen aus Aluminium bestehen (Chipstüte, Tablettenblister) in den Abwurfschacht. Diese Verbundstoffe gelten nicht als Störstoffe, können aber auch nicht als Aluminium verwertet werden. Der reine Anteil an Aluminium in der Sortierfraktion einer modernen LVP-Sortieranlage beträgt ca. 36-40 %.

Die eigentliche Verwertung erfolgt dann in so genannten Pyrolyseanlagen, die durch den chemischen Prozess die organischen Anhaftungen zur Energiegewinnung nutzen und verschiedene Aluminiumlegierungen herstellen können. Diese eignen sich im Folgenden zur Neuherstellung von Produkten. Die Verwertung erfolgt hauptsächlich in Deutschland.

Teilweise ist im Rahmen der Endverwertung des Alu-Anteils eine mechanische Aufbereitungsanlage der Sortieranlage nachgeschaltet. Diese separiert durch Zerkleinerung und weitere Wirbelstromscheidung das reine Aluminium von den Verbundstoffen, welche in der Regel energetisch verwertet werden.

### **Flüssigkeitskartonagen FKN (0510)**

Von der Sortierfraktion FKN (NIR\_Trennung) wird ein maximaler Störstoffanteil von 10 % erwartet, der im Wesentlichen aus anderen langfaserigen PPK-Anteilen besteht. In Papierfabriken erfordert die Verarbeitung nach der Grobstörstoffabtrennung im Pulper eine separate Aufbereitung zur Erzielung eines Faserbreis unter Abtrennung der Verbundanteile PE- und Aluminiumfolie (Rejekte). Der Papierfaseranteil wird mit Faserbrei aus anderen Altpapieren vermischt um z. B. Kartonagen definierter Grammaturn herzustellen. Die FKN-Fraktion gilt unter diesen Bedingungen als vollständig werkstofflich verwertet. Die Rejekte werden energetisch, vereinzelt auch nach Auftrennung des PE-Alu-Gemisches werkstofflich aufbereitet.

### **PPK aus LVP (0550)**

Die Fraktion besteht aus Papier, Pappe, Kartonagen und sonstigen PPK-Verbundverpackungen und darf 10 % Störstoffe enthalten. Aufgrund der schlechten Qualität unterhalb der schlechtesten Qualitäten der Altpapiersortenliste weist diese Fraktion nur eine geringe Faserausbeute von ca. 50 % auf. Dadurch ist eine werkstoffliche Verwertung i. a. nicht möglich.

## **7.6 Zusätzliche Auswertungen und Variation der Sammelsysteme**

### **7.6.1 UBA-Planspiele zur Fortentwicklung der Verpackungsverordnung**

In den Jahren 2011 und 2012 wurden im Auftrag des Umweltbundesamtes zwei Planspiele zur Fortentwicklung der Verpackungsverordnung in Richtung auf eine erweiterte Wertstofffassung durchgeführt:

1. Teilvorhaben 1 (TV 1): „Bestimmung der Idealzusammensetzung der Wertstofftonne“, nachfolgend zitiert als Bünemann, Christiani [2011]
2. Teilvorhaben 2 (TV 2): „Finanzierungsmodelle der Wertstofftonne“, Dehoust, Christiani [2012]

Die publizierten Daten wurden der in diesem Gutachten verwendeten Zusammensetzung der jeweils betrachteten Sammelsysteme gegenüber gestellt, und zwar

- a) als Status Quo der LVP-Sammlung und
- b) als prognostizierte Mengenanteile nach Miterfassung von stoffgleichen Nichtverpackungen (StNVP).

Die Mengenanteile der einzelnen Sammelfraktionen wurden sowohl in kg/(EW\*a) als auch prozentual ausgewiesen. Vergleichbar sind

- ▶ die „Status Quo-Mengen“ mit den Sammelsystemergebnissen Gelber Sack ländlich, Gelbe Tonne städtisch/ländlich, Depotcontainer ohne StNVP und Wertstoffhof ohne StNVP sowie
- ▶ die prognostizierten Mengen nach Miterfassung StNVP mit den Sammelsystemen Wertstofftonne städtisch/ländlich und Wertstoffsack ländlich.

Die Ergebnisse sind in Anlage 2 detailliert dargestellt, wobei die vorgenannten Vergleiche farblich gekennzeichnet wurden.

Wie bereits dargestellt wurde, erfolgte in der Gegenüberstellung der betrachteten Sammelsysteme über alle Auswertungsstufen die Betrachtung eines zusätzlichen theoretischen Sammelsystems mit der „Musterzusammensetzung“ aus

- ▶ 25 % Gelber Sack ländlich
- ▶ 25 % Gelbe Tonne ländlich
- ▶ 30 % Gelbe Tonne städtisch
- ▶ 20 % Wertstofftonne städtisch

Dieses Sammelmuster sollte die Realität des tatsächlichen gemischten Wareneingangs einer Sortieranlage aus verschiedenen Vertragsgebieten besser abbilden.

Auffällig ist bei einem Vergleich der Daten aus „TV 1“ und „TV 2“ mit den Sammelsystemanalysen, dass

1. die im TV 1 ermittelten Weißblechanteile im „Status Quo“ deutlich höher angegeben werden als die Ergebnisse aus den analysierten Sammelsystemen Sack und Tonne, dies gilt auch gegenüber der „Musterzusammensetzung“, obwohl diese bereits 20 % Anteil der Wertstofftonne städtisch enthält,
2. die im TV 1 ermittelten Anteile PPK und Reste deutlich geringer ausfallen als in den Gelben Tonnen und der „Musterzusammensetzung“ und nur mit den Ergebnissen des Gelben Sacks harmonisieren,
3. die Prognosemengen aus den Teilvorhaben bei Miterfassung von StNVP ebenfalls deutlich höhere Weißblechanteile ausweisen als dies aus den bestehen Wertstofffassungssystemen erwartet werden könnte,
4. die Prognosemengen „PPK und Reste“ am ehesten mit der Wertstofftonne ländlich übereinstimmen, aber zwischen denen der Wertstofftonne städtisch und dem Wertstoffsack ländlich liegen.

Die Gründe für diese Abweichungen können an dieser Stelle nur vermutet werden, sollten sich aber auf den Anteil werkstofflich verwertbarer Anteile merklich auswirken.

Vermutete Gründe für die Abweichungen zu Daten aus anderen Quellen:

- ▶ Die ausgewerteten Sortieranalysen sind bezogen auf das gesamte Bundesgebiet punktuelle Messungen und auch wenn für jedes Sammelsystem eine möglichst große Zahl verwertbarer Sortieranalysen einbezogen wurde, bestehen Abweichungen vom Mittelwert aufgrund der sehr unterschiedlichen Ausprägung der Untersuchungsgebiete auch innerhalb eines Sammelsystems.
- ▶ Bei Abfallgemischen handelt es sich um sehr heterogenes, teilweise sehr grobstückiges Material, was die statistische Sicherheit der Sortieranalysen einschränkt.

### 7.6.2 Potenzial nicht erfasster Wertstoffe

Wie bereits an den Ausbringungsmengen, Zuführungsquoten zur (werk)stofflichen Verwertung sowie letztlich den Produktionsraten einzelner Sortierfraktion bei werkstofflicher Verwertung erkennbar, stecken erhebliche Potenziale separierbarer Wertstoffe in Fraktionen wie 0350 Mischkunststoffe.

Ein weiteres Wertstoffpotenzial zur werkstofflichen Verwertung ergibt sich aus der Menge „nicht erfasster Wertstoffe“. Da hierzu nicht ausreichend Restmüllsortieranalysen vorhanden sind, soll hier unter nicht erfasste Wertstoffe diejenige Differenzmenge verstanden werden, die sich aus dem Sammelsystem mit den höchsten Erfassungsmengen („Gelbe Tonne ländlich“ mit 45,8 kg/(EW\*a)) gegenüber dem jeweils anderen Sammelsystem ergibt. In folgender Tabelle 54 sind die Sammelsysteme nach aufsteigenden Potenzial geordnet (s. auch Anlage 4 und Anlage 5), zum Vergleich sind die „Reste bzw. ungeeigneten Zusatzmaterialien im LVP“ aus Anlage 1 angegeben:

Tabelle 54: Potenziale „nicht erfasster Wertstoffe“ gegenüber dem Sammelsystem mit der höchsten festgestellten Sammelmenge

Kennziffer	Sammelsystem	Sammelmenge [kg/(EW*a)]	Nicht erfasste Wertstoffe [kg/(EW*a)]	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP [kg/(EW*a)]
5	Gelbe Tonne ländlich	45,8	0	17,3
6	Wertstoffsack ländlich	43,5	2,3	8,5
3	Wertstofftonne ländlich <sup>24</sup>	38,7	7,1	11,4
0	„Musterzusammensetzung“	34,1	11,7	
2	Gelber Sack ländlich	34,0	11,8	8,8
1	Wertstofftonne städtisch	30,4	15,4	11,0
4	Gelbe Tonne städtisch	27,0	18,8	11,2
7	Depotcontainer o. StNVP	24,7	21,1	3,9
9	Wertstoffhof	10,9	34,9	0

Das Sammelsystem „Wertstoffsack ländlich“ erweist sich als System mit hoher Sammelmenge bei geringem Anteil nicht erfasster Wertstoffe und gleichzeitig geringem Anteil an ungeeigneten Zusatzmaterialien im LVP bzw. Resten. Dies wäre ebenso für die „Wertstofftonne ländlich“ zu erwarten. Allerdings führte die Auswertung der Datengrundlagen für dieses Sammelsystem zu unplausiblen Ergebnissen. Erläuterungen dazu finden sich im Abschnitt 4.4.

Der Anteil an „nicht erfassten Wertstoffen“ wird mit Mengen gleichgesetzt, die vorhanden sind, aber in anderen Erfassungssystemen wie dem häuslichen Restmüll landen. Die hieraus resultierende Kostenbelastung<sup>25</sup> wurde unter Annahme einer Hausmüllverbrennung in einer MVA mit 105 EUR/Mg (incl. 15 EUR/Mg Transport) in die im nachfolgenden Abschnitt vorgenommene Kostenaufstellung aufgenommen, vgl. Anlage 4 und Anlage 5 sowie auch in die Darstellungen in Anlage 6.1 und Anlage 6.2 einbezogen.

### 7.6.3 Wertstoffanteile in den zulässigen Störstoffanteilen der Sortierfraktionen

Im Rahmen der marktüblichen Spezifikationen der Sortierprodukte gelangen auch Fehlabbwürfe/Störstoffe in den Verwertungsstrom der spezifischen Sortierfraktionen. Diese stellen ein gewisses Restpotenzial an werkstofflich verwertbaren Teilmengen dar, werden aber regelmäßig als Reste der Verwertungsverfahren energetisch verwertet.

Bei der Betrachtung der Verwertungspotenziale bzw. der Kostensituation ist zu beachten, dass die Fehlausträge bei der Sortierung ein nicht unwesentliches Reservoir an Wertstoffen beinhalten. In Form von „Störstoffen“ gelangen Fremdmaterialien aus anderen Sortierfraktionen bedingt durch die Anlagentechnik und Betriebsweise der Sortierung in die Sortierprodukte in Größenordnung „zulässiger Störstoffanteile“ entsprechend den Produktspezifikationen (z. B. für Ballenware).

So beträgt bei einer Zuführung von 100 % Weißblech zur Sortierung die Ausbringungsrate bzw. Zuführungsquote zur Verwertung nur 85 %. Die Differenz von 15 % besteht mit real etwa 12 % aus potenziell werkstofflich verwertbaren Folien, die in den bisherigen Betrachtungen für die werkstoffliche

<sup>24</sup> Bzgl. der Bewertung der Ergebnisse für das Sammelsystem „Wertstofftonne ländlich“ wird auf die Ausführungen im Abschnitt 4.4 verwiesen.

<sup>25</sup> Folgt man der Gleichsetzung, so entstehen die Kosten im Endeffekt für den Bürger über die Hausmüllgebühren; in diesem Gutachten werden sie aber als Systemzusatzkosten den Kosten für Sortierung, Transport und Verwertung hinzugerechnet

Verwertung unberücksichtigt bleiben bzw. letztlich in der energetischen Verwertung von Seiten der werkstofflichen Verwertungsanlage landen. Gemessen an den Spezifikationen der Sortierprodukte lassen sich folgende werkstofflich verwertbaren Anteile in den Sortierprodukten identifizieren:

Tabelle 55: Mögliche wertstoffhaltige Störstoffanteile in Sortierfraktionen

Fraktion	Störstoffanteile in Massen-%					
	Sonst. K-Artikel	PPK	EPS, formst. PE	Sonstige Reststoffe	Metallartikel	Max. Gesamtstörstoffe
310	<4			<4	<0,5	8
320	<3			<3	<1	6
321	<3			<3	<0,5	6
322	<3			<3	<0,5	6
323	<7,5	<5		<3		15
324		<1	<1,5	<3	<0,5	6
325	<2		<0,5	<2	<0,5	2
326	<3	<5		<3	<2	10
328	<2			<3	<0,5	2
329	<3,5			<3	<0,5	6
330	K-Folie <5				<0,5	6
331	<3		<1	<2	<0,5	6
350	<4	<5		<3	<2	10
351-1	PET-Fl. <4	<6	<2	<3		20
351-2	K-Folie <10	<8	<3	<3		20
412	PET <8					Nichtmetalle 33 <sup>26</sup>
420	K-Folie <20	FKN <2		<5	Fe <3	10
510	PET <10	<2,5		<3	<0,5	10
550		FKN <4		(<3,5)	<0,5	10

Anmerkung: Die einzelnen angegebenen Obergrenzen sind nicht kumulativ, sondern durch die Obergrenze des Gesamtstörstoffanteils begrenzt. Die sonstigen Reststoffe bestehen zum Teil auch aus PPK, FKN, alubedampften K-Folien, sonstigen Kunststoffen, soweit diese nicht einzeln benannt sind.

Unter Berücksichtigung der Fehlabbwürfe ergäbe sich bei einer theoretisch 100 % sortenreinen Bereitstellung und Aufteilung der bislang zulässigen Fehlabbwürfe bzw. Störstoffe auf die jeweiligen Wertstofffraktionen

- ▶ eine Absenkung des Restabfallaufkommens und der dadurch verursachten Kosten,
- ▶ bei gleichzeitiger Erhöhung des Wertstoffanteils zur werkstofflichen Verwertung.

Eine Berücksichtigung dieser Anteile erweist sich als äußerst komplex und erfolgt im Rahmen dieses Gutachtens bereits durch die Anhebung der Ausbringungsraten der Sortierung im ZUKUNFT-Szenario bei Anwendung des Standes der Technik. Weitergehende Potenzialerschließungen erscheinen danach nicht möglich.

<sup>26</sup> Aufgrund der Bandbreite verschiedener Fraktionen mit festgelegten Abweisungsquoten wird mit ca.18 % Störstoffanteil an Nicht-Metallen gerechnet

## 7.7 Kostenberechnung für Sortierung und Verwertung

### 7.7.1 Angesetzte Marktpreise

Zur Ermittlung der Sortierkosten wurden verschiedene Marktteilnehmer wie Systembetreiber, Sortieranlagen, Händler und Verwerter befragt, deren Einzelinformationen vertraulich im Rahmen der Generierung von durchschnittlichen „Branchenwerten“ für dieses Gutachtens gegeben wurden. Zur Darstellung der Kosten/Preise vergleiche auch eigene Vorerhebungen wie Rhein [2012].

Entsprechend der bereits vorgenommenen Gruppierung der etwa 100 „aktiven“ Sortieranlagen für LVP in Deutschland, vgl. Abschnitt 7.2.1, nach Art und Umfang der Sortierung (Ausstattung, Betriebsweise) ergibt sich für 2014 eine Bandbreite der LVP-Sortierkosten

**von 60 EUR/Mg bis 100 EUR/Mg LVP.**

Im IST-Szenario wurde mit einem mittleren Sortierpreis (Kosten für die beauftragenden Systeme) von **80 EUR/Mg** gerechnet.

Im Szenario ZUKUNFT wurden die aktuellen Sortierkosten der Sortieranlagen mit umfangreicher Kunststoffartentrennung (ca. 85 EUR/Mg bis 100 EUR/Mg) mit einem Aufschlag von etwa 10 % versehen, da im Szenario davon ausgegangen wird, dass die Sortierung unter optimalen Bedingungen erfolgt. Dies erfordert u.a. geringere Anlagendurchsätze bei hohen Abschreibungen aufgrund hochwertiger Technik. Im Szenario ZUKUNFT wurde deshalb mit einem Sortierpreis von 100 EUR/Mg gerechnet.

Laut Bundeskartellamt [2012] hielten sich die Kosten und die Erlöse für die Verwertung des Sortieranlagenoutputs in etwa die Waage (Anm.: zu Zeiten relativ hoher Verwertungserlöse). Somit entsprach der dort angegebene Wert von 229 Mio. EUR für LVP-Sortierung und Verwertung 2012 ungefähr den Kosten der reinen Sortierleistung. Dies ergibt einen Sortierpreis von 97 EUR/Mg LVP-Sammelmenge.

Während die Sortierkosten über alle Anlagen relativ konstant bleiben, unterliegen die Kosten bzw. Erlöse für die Verwertung der Sortierfraktionen erheblichen Marktschwankungen.

Die Erlöse bzw. Kosten/Zuzahlungen für die einzelnen erzeugten Fraktionen (Sortierprodukte) der Sortieranlagen wurden 2016 bei Vermarktern/Händlern und Sortieranlagenbetreibern abgefragt und hieraus ein „durchschnittlicher Branchenwert“ (Marktpreis) gebildet, der sich an einer „mittleren“ Marktsituation orientiert. Die Kosten/Erlöse für die Sortierprodukte sind u.a. von den allgemeinen Rohstoffpreisen abhängig. So ließen sich beispielsweise zu Zeiten hoher Rohstoffpreise für Weißblech und Aluminium Erlöse von 150 EUR/Mg realisieren. Zu Zeiten geringer Rohstoffpreise sind auch Zuzahlungen für Weißblech und Aluminium möglich. Das heißt, dass ein Sortieranlagenbetreiber/ Vermarkter für die Abnahme bei einem Verwerter z. B. 10 EUR/Mg hinzuzahlen muss (zzgl. Transportkosten). Die anderen Output-Fraktionen unterliegen vergleichbaren Preisschwankungen in Abhängigkeit von den Rohstoffpreisen. Eine gewisse Ausnahme bilden Flüssigkeitskartonagen (FKN), da diese im Auftrag aller dualen Systeme über den Garantiegeber „ReCarton“ vermarktet werden und dadurch nur geringe Kosten/Erlösschwankungen für die Sortieranlagen auftreten; die genauen Kosten/Erlöse sind nicht bekannt.

Im Rahmen der durchgeführten Erhebung 2016 erwiesen sich vor allem die massenrelevanten Fraktionen 0350/0352 Mischkunststoffe (60 EUR/Mg Zuzahlung energetische Verwertung, 90 EUR/Mg Zuzahlung werkstoffliche Verwertung) sowie 0365 EBS-Vorprodukt (Zuzahlung 75 EUR/Mg) und Sortierreste (Zuzahlung 90 EUR/Mg) stark kostenbelastet. Alle übrigen Sortierprodukte können mit einem Erlös zwischen 0 EUR/Mg (0550 PPK aus LVP, einschl. PPK-VB) und 320 EUR/Mg (0329 PE) angesetzt werden.

Die bei den Marktteilnehmern abgefragte Erlös-/Kostensituation für die Sortierprodukte spiegeln dabei den Stand von Mitte 2016 wider, zu einer Zeit, in der sich nach eigener Einschätzung die Rohstoffpreise im unteren Drittel bzw. im mittleren Bereich befanden.

Anhand der ermittelten Verwertungskosten bzw. -erlöse wurden folgende Berechnungsgrößen für die Kosten-/Erlösermittlung der Sortierfraktionen aus den Sammelsystemen eingesetzt:

Tabelle 56: Verwertungskosten bzw. -erlöse für einzelne DS-Fraktionen:

Sortierfraktion	Erlös (-) Zuzahlung (+) Verwertung [EUR/Mg]	Logistikkosten (SoA-Verwerter) [EUR/Mg]
0310	-20	+15
0320	-80	+35
0321	-250	+30
0322	-200	+20
0323*	-50	+25
0324	-240	+25
0328-1	-50	+20
0328-x	-10	+20
0329	-320	+25
0330	-140	+25
0331	-100	+25
0340	-230	+50
0350	+60	+17,5
0351*	-100	+25
0360*	-60	+25
0361*	+75	+15
0365	+75	+15
412	-40	+15
420	-50	+15
430	-40	+25
435*	-50	+25
440*	-20	+25
510	-28	+25
550	+0	+20
830	+90	+15

Für die meisten Sortierfraktionen konnten aus den Befragungen „Branchenwerte“ gebildet werden, für die besten Fraktionen musste jedoch auf Schätzungen anhand vergleichbarer Fraktionen zurückgegriffen werden:

Hierbei handelt es sich um Fraktionen, die nur einen sehr geringen Output-Anteil in den Sortieranlagen aufweisen. Aus diesem Grund wurden zumeist die Zahlen von vergleichbaren Output-Fraktionen auf diese Output-Fraktionen übertragen.

Für stoffgleiche Fe-Metalle (0430) liegen keine ausreichenden Kenntnisse zur Qualität und den möglichen Erlösen vor. Es wird davon ausgegangen, dass es sich bei stoffgleichen Fe-Metallen um Schrau-

ben, Nägel, Werkzeuge, Töpfe, Pfannen, Küchenartikel aus Eisen und Kunststoff (Messer, Küchenreibe, Kartoffelstampfer, Pürrierstab, Thermoskanne) etc. handelt. Diese Fraktion enthält dickwandigere Metalle als die Fraktion Weißblech (höherer Erlös) und höhere Störstoffanteile (Kunststoffe, geringere Erlöse). Einzelne Sortieranlagenbetreiber gaben an, dass sie für diese Fraktion keine Erlöse erzielen. Andererseits ließen sich bei Aufbereitern für Shredder-Vormaterial oder Mischschrott 50 EUR/Mg Erlös erzielen; es wurde deshalb ein Erlös von 40 EUR/Mg angesetzt.

Bei stoffgleichen NE-Metallen (0435) handelt es sich um Pfannen, Töpfe aus Aluminium, Edelstahlpfannen, Kupferkabel, Messingbeschläge usw. Hierfür wurde ein Erlös von 50 EUR/Mg angenommen.

Bei der Fraktion PPK aus LVP, einschl. PPK-VB (0550) ergab sich kein einheitliches Ergebnis. Manche Papierfabriken orientieren sich bei dieser Fraktion am Preis für Mischpapier (Erlöse für Sortieranlagen/Vermarkter) andere Papierfabriken orientieren sich am Entsorgungspreis in Müllverbrennungsanlagen (Zuzahlung für Sortieranlagen/Vermarkter). Aus diesem Grund wurden die Kosten/Erlöse mit 0 EUR/Mg angesetzt.

Für Mischkunststoffe (0350) wurde der Preis für die energetische Verwertung verwendet, da diese aufgrund der MSN-Auswertungen mit über 85 % den relevanten Verwertungsweg gegenüber der werkstofflichen Verwertung darstellt.

### **7.7.2 Übersicht der Gesamtkosten für Sortierung und Verwertung der gesammelten Massen aus den einzelnen Sammelsystemen**

Die Kostenanteile für Sortierung und Verwertung/Entsorgung wurden in Anlage 4 und Anlage 5 für die beiden Szenarien IST und ZUKUNFT ausgewiesen. Dabei erfolgte für jedes Sammelsystem eine Aufgliederung nach:

- ▶ Sortierkosten,
- ▶ Verwertungserlöse bzw. -kosten,
- ▶ Transportkosten zum Verwerter und
- ▶ Entsorgungskosten für „nicht erfasste Wertstoffe“.

Dies ergibt einen Gesamtkostenblock, der sich jeweils anhand der in den Modellrechnungen ermittelten Rezyklatausbeuten für die werkstofflich verwerteten Sortierprodukte auf Kosten pro kg Rezyklatausbeute umrechnen lässt.

Bei Verwendung der berechneten Kosten bzw. aus Anlage 4 und Anlage 5 ergibt sich unter Umrechnung auf Angaben in EUR/EW\*a folgendes Bild:

Tabelle 57: Kostenanteile der verschiedenen Sammelsysteme für Sortierung und Verwertung nach dem IST-Szenario

Sammelsystem	Sortierkosten (EUR/EW*a)	Verwertungskosten (+) u. – Erlöse (-) (EUR/EW*a)	Transportkosten (EUR/EW*a)	Entsorgung nicht erf. Wertstoffe (EUR/EW*a)	Rezyklat- ausbeute (kg/(EW*a))	Spezif. Kosten Rezyklat (EUR/kg)
Gelbe Tonne ländlich	3,66	1,57	0,78	0	5,7	0,63
Wertstoffsack ländlich	3,48	0,77	0,77	0,24	11,8	0,44
Wertstofftonne ländlich	3,10	1,03	0,67	0,75	8,9	0,62
„Musterzusammensetzung“	2,73	1,05	0,58	1,23	7,6	0,71
Gelber Sack ländlich	2,72	0,74	0,59	1,24	8,7	0,61
Wertstofftonne städtisch	2,43	0,97	0,52	1,62	6,7	0,83
Gelbe Tonne städtisch	2,16	0,93	0,46	1,97	5,7	0,97
Depotcontainer o. StNVP	1,98	0,29	0,44	2,22	7,3	0,68
Wertstoffhof	0	-0,11	0,22	3,66	4,8	0,79

Tabelle 58: Kostenanteile der verschiedenen Sammelsysteme für Sortierung und Verwertung nach dem ZUKUNFT-Szenario

Sammelsystem	Sortierkosten (EUR/EW*a)	Verwertungskosten (+) u. -erlöse (-) (EUR/EW*a)	Transportkosten (EUR/EW*a)	Entsorgung nicht erf. Wertstoffe (EUR/EW*a)	Rezyklat- ausbeute (kg/(EW*a))	Spezif. Kosten Rezyklat (EUR/kg)
Gelbe Tonne ländlich	4,58	+0,28	0,82	0	14,6	0,39
Wertstoffsack ländlich	4,35	-0,59	0,80	0,24	16,2	0,30
Wertstofftonne ländlich	3,87	-0,18	0,70	0,75	13,3	0,39
„Musterzusammensetzung“	3,41	+0,02	0,62	1,23	11,7	0,47
Gelber Sack ländlich	3,40	-0,30	0,62	1,24	12,4	0,40
Wertstofftonne städtisch	3,04	+0,03	0,55	1,62	10,6	0,49

Sammelsystem	Sortierkosten (EUR/EW* a)	Verwertungskosten (+) u. -erlöse (-) (EUR/EW*a)	Transportkosten (EUR/EW* a)	Entsorgung nicht erf. Wertstoffe (EUR/EW* a)	Rezyklatausbeute (kg/(EW* a))	Spezif. Kosten Rezyklat (EUR/kg)
Gelbe Tonne städtisch	2,70	+0,10	0,49	1,97	9,3	0,57
Depotcontainer o. StNVP	2,47	-0,52	0,46	2,22	9,8	0,47
Wertstoffhof	0	-0,11	0,22	3,66	4,8	0,79

In den vorstehenden Tabellen wurde die gleiche Reihenfolge der Sammelsysteme gewählt wie in Abschnitt 7.6.2 bei der Tabellendarstellung der „nicht erfassten Wertstoffe“.

Beim IST-Szenario zeigt das Sammelsystem mit den höchsten Sammelmengen (Gelbe Tonne ländlich) erwartungsgemäß die höchsten Sortier- und Transportkosten, dicht gefolgt vom Wertstoffsack ländlich. Dieser rückt aber aufgrund der hohen Kunststoffanteile auf Platz 4 der geringsten Verwertungskosten auf und ergibt den ersten Platz bei den Rezyklatausbeuten mit 11,8 kg/(EW\*a). Dies führt zu den niedrigsten spezifischen Kosten der Prozesskette von der Sortierung bis zur Verwertung von 0,44 EUR/kg.

Noch deutlicher wird dieser Unterschied beim ZUKUNFT-Szenario: Hier ergibt sich bei gleicher Rangfolge der Sammelsysteme hinsichtlich Sortier- und Transportkosten ein deutlicher Vorsprung bei den Verwertungserlösen gegenüber den übrigen Sammelsystemen für den Wertstoffsack ländlich. Die Rezyklatausbeute liegt nunmehr sogar mit 16,2 kg/(EW\*a), entsprechend 16.157 Mg für 1 Mio. Einwohner, vgl. Anlagen 4 und 5, an der Spitze.

Beim ZUKUNFT-Szenario erhöht sich bei Einbeziehung aller Sammelsysteme (ohne Wertstoffhof als Bring-System) die Wertstoffausbeute und die Rezyklatausbeute der werkstofflichen Verwertung deutlich von 7,8 +/- 1,9 auf 12,2 +/- 2,2 kg/(EW\*a).

Im Vergleich ZUKUNFT gegenüber IST reduzieren sich die Verwertungskosten und führen aufgrund der Wertstoffenergieerlöse sogar in vier von sieben Sammelsystemen zu Erlösen (ohne Wertstoffhof und Mutterzusammensetzung).

## 7.8 Auswertung der Sortierergebnisse aus den Szenarien „IST“ und „ZUKUNFT“

### 7.8.1 Auswirkungen der Zusammensetzungen der Sammelsysteme auf den Sortieranlageneingang

Im ersten Teil des Gutachtens wurden bereits die Unterschiede der betrachteten Sammelsysteme ausgewertet. Bei der Darstellung der fraktionsbezogenen Unterschiede wurde in Anlage 1 für die betrachteten Sammelsysteme (Sortieranlageneingang) für jede Fraktion ein arithmetischer Mittelwert (mit Ausnahme der Wertstoffhofsammlung als Bringsystem) über die Sammelsysteme gebildet. Mit Hilfe der „mittleren Abweichung“<sup>27</sup> wird ein Intervall „Mittelwert +/- mittlere Abweichung“ gebildet. Einzelwerte außerhalb dieses Intervalls (ober- oder unterhalb) sollten relevante Änderungen (einschließlich „Ausreißer“) gegenüber den anderen Sammelsystemen bezüglich der betreffenden Fraktion signalisieren. In Anlage 1 sind Abweichungen zu höheren Mengen/prozentualen Anteilen mit blauer Schrift, solche zu niedrigeren Werten mit roter Schrift gekennzeichnet.

Mit erhöhten Anteilen der Kunststofffraktionen gegenüber dem Durchschnittsintervall fallen die Sammlungen „Wertstoffsack ländlich“ und „Depotcontainer ohne StNVP“ auf, wobei diese zugleich

<sup>27</sup> Die mittlere Abweichung erweist sich für die gewünschte Darstellung als sinnvoller als die Standardabweichung.

geringere Mengen an PPK (kein LVP) und „ungeeignetem Zusatzmaterial im LVP“ aufweisen; diese liegen mit 19,5 % bzw. 15,7 % Anteil am Sammelgut deutlich unterhalb der maximal mit 41,5 % festgestellten Anteile in der „Gelben Tonne städtisch“. Diese weist komplementär den geringsten Kunststoffanteil mit 39,6 % auf. Die etwa gleichhohen Kunststoffanteile im „Wertstoffsack ländlich“ und im „Depotcontainer“ von 55,7 bzw. 57,0 % dürfen aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass der Depotcontainer<sup>28</sup> neben dem Wertstoffhof (10,9 kg/(EW\*a)) mit 24,7 kg/(EW\*a) das niedrigste Sammelergebnis aufweist. Demgegenüber zeigt der „Wertstoffsack ländlich“ nahezu ähnlich hohe Sammelmengen mit 43,5 kg/(EW\*a) wie der maximale Wert von 45,8 kg/(EW\*a) bei der „Gelben Tonne ländlich“.

Damit ist der „Wertstoffsack ländlich“ dasjenige Sammelsystem, dass der Sortieranlage die annähernd größten Mengen mit den höchsten Kunststoffanteilen bei geringsten PPK (kein LVP)-Mengen und geringsten Mengen an ungeeignetem Zusatzmaterial im LVP zuleiten kann, während die „Gelbe Tonne städtisch“ den schlechtesten Sortierinput erwarten lässt.

Der „Wertstoffsack ländlich“ schneidet mit nur 7,2 kg/(EW\*a) an PPK- und Reststoffen dabei sogar noch besser ab als von Bünemann, Christiani [2011] mit 8 kg/(EW\*a) prognostiziert, vgl. Anlage 2.

### 7.8.2 Vergleich der Szenarien anhand der Mischkunststoffe und Sortierreste/EBS

Die im IST-Szenario bereitgestellten Sortierprodukte der Fraktion 0350 (Mischkunststoffe) liegen zwischen etwa 5,3 (Gelbe Tonne städtisch) und 12,0 kg/(EW\*a) (Wertstoffsack ländlich), s. Anlage 4.

Im ZUKUNFT-Szenario sinkt für die gleichen Sammelsysteme die Sortierfraktion 0350 auf 3,7 und 8,5 kg/(EW\*a), s. Anlage 5, weil sich diese Sortierfraktion unterschiedlich zusammensetzt.

Tabelle 59: Verteilung des Sammelguts auf die Sortierfraktion 0350 Mischkunststoffe

Materialfraktion Sammlung Ebene 3	Materialanteil von 100 % Sammlung, der auf die Zielfraktion Mischkunststoffe 0350 entfällt (gerundet)	
	IST-Szenario	ZUKUNFT-Szenario
Eimer, Kanister VP	56,6 %	
Eimer NV	56,6 %	
Folien <DIN A4 VP	85,0 %	90 %
Folien <DIN A4 NV	85,0 %	90 %
Folien >DIN A4 VP	12,8 %	
Folien >DIN A4 NV	12,8 %	
PE-VP	36,6 %	
PE-NV	38,1 %	
PP-VP	30,0 %	
PP-NV	33,5 %	
PS-VP	67,6 %	
PS-NV	70,9 %	
Sonstige MKS-VP	68,0 %	68,0 %
MKS-NV	68,0 %	68,0 %

<sup>28</sup> Achtung: über dieses Sammelsystem lagen nur verhältnismäßig wenig Daten vor, es handelt sich zudem um ein Bringsystem

Anhand der Tabelle 59 lässt sich zeigen, dass im ZUKUNFT-Szenario von einer erheblich verbesserten Materialtrennung ausgegangen wird, so dass die Materialien aus Eimer (überwiegend aus PO), (LDPE)-Folien und PE, PP und PS künftig ihren „eigenen“ Sortierfraktionen 0310, 0329, 0324 und 0331 bzw. bei PS-NV auch 0360 zugewiesen werden können. Mischkunststoffe sollten nach dem Stand der Technik nur noch aus Folien <DIN A4 und Mischkunststoffen bestehen, die bereits bei der Sammelgutanalyse als solche nicht differenzierbar sind, hierbei handelt es sich vor allem um Kunststoffverbundmaterialien. Derartige, aus mehreren Kunststoffarten bestehende Verbunde sind einer Trennung im Sortierprozess nicht zugänglich. Ihr Anteil kann nur durch Restriktionen beim Verpackungsdesign reduziert werden.

Auch nachgeschaltete Aufbereitungsverfahren scheitern an derartigen „Mischkunststoffen“ (Verbunde, nicht: Kunststoffgemischen!) aufgrund der Vielzahl der Kombinationsmöglichkeiten und Arten des Verbundes.

Zu beachten ist, dass Materialkombinationen laut Definition nach VerpackV/VerpackG nur dann als Verbund gelten, wenn sie nicht von Hand trennbar sind und keine Materialart einen Masseanteil von 95% überschreitet. Materialverbunde folgen in der Regel dem Verwertungsweg des Hauptmaterials.

Ein weiterer Vergleich zwischen IST- und ZUKUNFT-Szenario bietet sich anhand der „energetischen Verwertungsfraktionen“ „MPO-Beiprodukt (KEG), 0361“, „EBS-Vorprodukt 0365“ und „Sortierreste, 0830“ an. Fasst man die Ausbringungsmengen der Sortierung für diese drei Sortierprodukte für jedes Sammelsystem zusammen, so ergibt sich folgende Tabellenübersicht:

Tabelle 60: Summe der Sortierprodukte 0361, 0365 und 0830 im Vergleich IST/ZUKUNFT in kg/(EW\*a)

Sammelsystem	IST-Szenario	ZUKUNFT-Szenario	Differenz ZUKUNFT-IST	Steigerung Rezyklatmenge	Delta
Spalte	1	2	2-1	3	3+2-1
Gelbe Tonne ländlich	22,6	18,0	-4,6 (-20,4 %)	5,1 (53,7 %)	0,5 (2,2 %)
Wertstoffsack ländlich	15,3	12,7	-2,6 (-17,0 %)	4,4 (37,2 %)	1,8 (11,8 %)
Wertstofftonne ländlich	16,1	12,6	-3,5 (-21,7 %)	4,4 (49,6 %)	0,9 (5,6 %)
Gelber Sack ländlich	13,2	10,5	-2,7 (-20,5 %)	3,7 (42,3 %)	1,0 (7,6 %)
Wertstofftonne städtisch	14,4	10,5	-4,3 (-29,9 %)	3,9 (58,4 %)	-0,4 (-2,8 %)
Gelbe Tonne städtisch	13,7	9,9	-3,8 (-27,7 %)	3,6 (63,0 %)	-0,2 (-1,5 %)
Depotcontainer o. StNVP	7,8	6,4	-1,4 (-17,9 %)	2,5 (34,4 %)	1,1 (14,1 %)

Die vorstehende Tabelle lässt sich wie folgt deuten:

In allen Sammelsystemen lassen sich die Anteile, die zu Sortierprodukten der „energetischen Fraktionen“ führen, angeben. Beim ZUKUNFT gegenüber dem IST-Modell lässt sich der Sortierproduktanteil dieser „energetischen Fraktionen“ aufgrund der Sammelgutzusammensetzung zwischen 17,9 (Depotcontainer) bzw. 17,0 (Wertstoffsack ländlich) und 29,9 Prozent (Wertstofftonne städtisch) senken. Die „Gelbe Tonne städtisch“ führt im ZUKUNFTS-Modell zu dem höchsten Anstieg der Rezyklatmenge (63

Prozent). Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass dieses Sammelsystem einen hohen Anteil von Fehlwürfen/Verschmutzungen hat. Am geringsten ist die Steigerung der Rezyklatmenge beim Depotcontainer (34,4 Prozent).

Theoretisch müssten die reduzierten Mengen an „Verbrennungsprodukten“ sich in einer entsprechenden Steigerung des werkstofflichen Rezyklatanteils wiederfinden. Unter Angabe der generierten Rezyklate (vgl. Anlagen 4 und 5) gelingt dies rechnerisch am ehesten beim Sammelsystem „Wertstoffsack ländlich“, bei welchem sogar noch weitere 1,8 kg/(EW\*a) werkstofflich verwertet werden können. Bei den „Tonnensammlungen städtisch“ gelingt es hingegen offenbar nicht, die reduzierten Mengen an „Verbrennungsfractionen“ vollständig für die werkstoffliche Verwertung zu generieren. Dies liegt daran, dass diese Betrachtung die möglichen Verschiebungen zu/von anderen Fraktionen vernachlässigt, die wie Mischkunststoffe nur gering zur werkstofflichen Verwertung beitragen.

Der folgende Vergleich bezieht sich ausschließlich auf den Anteil der Sortierreste (Fraktion 0830):

Dehoust u. Christiani [2012] hatten festgestellt, dass sich bei „konsequenter Ausschöpfung der technischen Möglichkeiten“ der Anteil an Sortierresten von 32 auf 23 % absenken lässt.

Die folgende Tabelle 61 gibt die Daten aus dieser Untersuchung zum Vergleich:

Tabelle 61: Absenkung des Sortierrestanteils von ZUKUNFT gegenüber IST

Sammelsystem	Anteil Sortierrest IST-Szenario (%)	Anteil Sortierrest ZUKUNFT-Szenario (%)
Wertstofftonne städtisch	33,8	30,8
Gelber Sack ländlich	26,3	27,1
Wertstofftonne ländlich	29,1	28,4
Gelbe Tonne städtisch	36,4	33,5
Gelbe Tonne ländlich	36,5	35,5
Wertstoffsack ländlich	23,1	25,0
Depotcontainer o. StNVP	19,3	21,7

Die Beschränkung der Betrachtungsweise auf die Sortierreste belegt einen Anstieg bei „Gelber Sack ländlich“, „Wertstoffsack ländlich“ und „Depotcontainer“. Dies ist bei Vergleich der Sammelsysteme unlogisch und begründet zugleich, warum nur eine geschlossene Betrachtung der Fraktionen 0830 + 0361 + 0365 aufgrund der Verschiebungen untereinander, vgl. Tabelle 62, sinnvoll ist.

Damit lassen sich die Werte von Dehoust u. Christiani [2012] nicht bestätigen. Vermutlich besteht der Unterschied darin, dass im vorliegenden Gutachten für die meisten Wertstofffraktionen noch ein Sortierrest von 10 % auch bei Anwendung des Standes der Technik angenommen wurde. Der Sortiererfolg hängt aber wie bereits dargestellt entscheidend von der Fahrweise der Anlage und nicht nur von der eingesetzten Technik ab.

## 8 Gesamtbewertung

### 8.1 Zusammenfassung der Erkenntnisse der Wertschöpfungskette Sammlung-Verwertung

#### 8.1.1 Kostenbetrachtung

Folgende Kosten fallen im Rahmen der Erfassung und Verwertung von LVP an:

- ▶ Behälterkosten,
- ▶ Kosten des Individualtransports,
- ▶ Sammelkosten,
- ▶ Transportkosten zur Sortieranlage,
- ▶ Sortierkosten,
- ▶ Transportkosten zur Verwertungsanlage,
- ▶ Verwertungskosten bzw. -erlöse,
- ▶ Sammel- (40 EUR/Mg) und Entsorgungskosten (90 EUR/Mg) für nicht erfasste und mit dem Restabfall entsorgte LVP und StNVP.

In Tabelle 62 sind sämtliche in den vorangegangenen Abschnitten ermittelten Kosten im Überblick dargestellt und für die einzelnen Sammelsysteme summiert<sup>29</sup>. Nachfolgend werden sowohl einwohnerspezifische Kosten, als auch Kosten bezogen auf die Sammelmenge oder die Rezyklatausbeute berechnet. Anzumerken ist dabei, dass es sich hierbei um eine Annäherung an die volkswirtschaftlichen Kosten handelt. Beispielsweise der Individualtransport, oder die Mitbetrachtung der Entsorgungskosten von Wertstoffen über die Restmülltonne lassen einen direkten Vergleich mit Berechnungen mit anderen Systemgrenzen nicht zu. Bei der Verrechnung der Kosten in Bezug auf die Rezyklatausbeute muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass die Wertstoffeffassung darüber hinaus auch zu weiteren Nutzen führt. Die hochwertige energetische Verwertung von nicht stofflich verwertbaren Anteilen führt beispielsweise zu wesentlich höheren Umweltentlastungen als die direkte Verbrennung in Müllverbrennungsanlagen (siehe Abschnitt 8.1.2).

In Abbildung 22 sind die Gesamtkosten der einzelnen Sammelsysteme dargestellt. Der Anteil der Sammelkosten an den Gesamtkosten schwankt zwischen 48 % (Sammelsystem „Wertstofftonne städtisch“) und 72 % (Sammelsystem „Wertstoffhof ohne StNVP“).

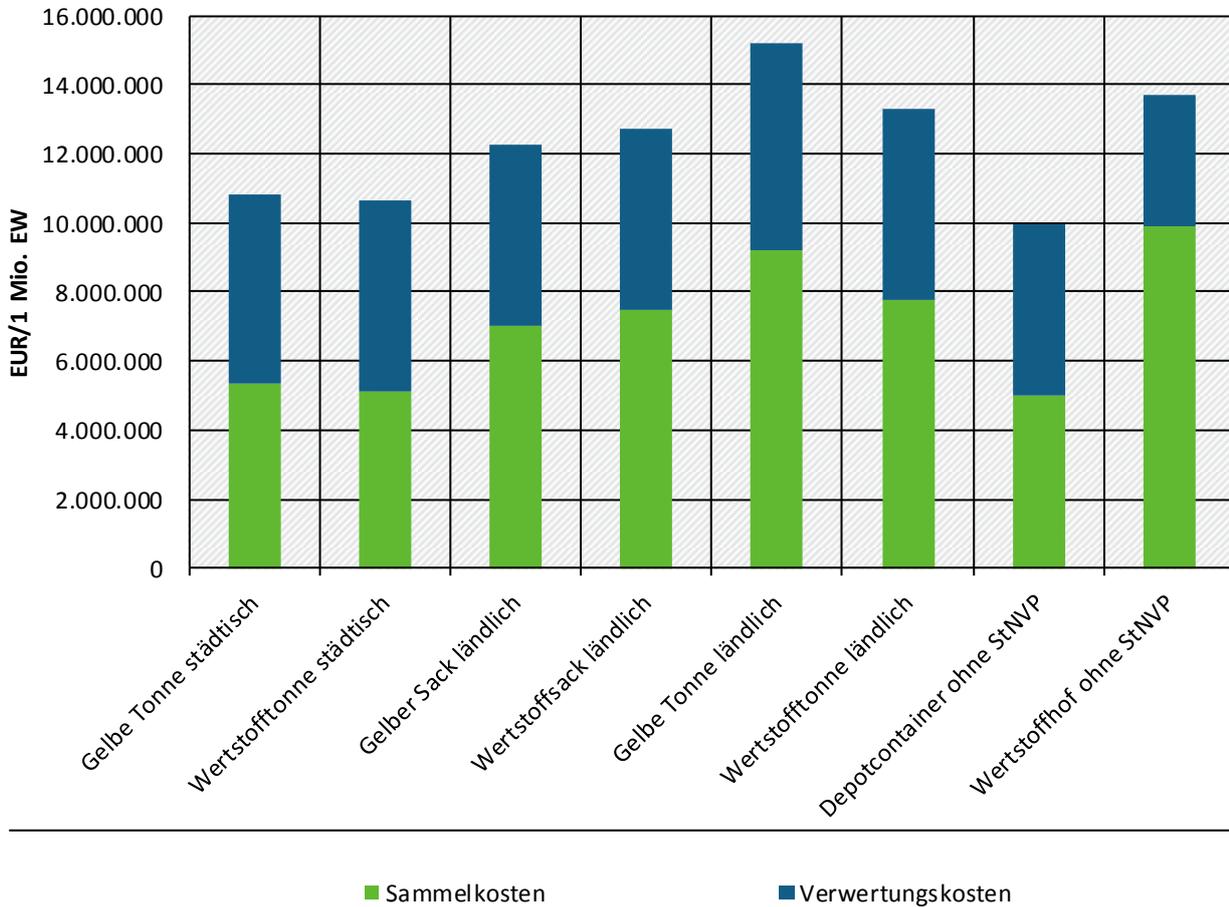
---

<sup>29</sup> Hinsichtlich der Bewertung der Ergebnisse für die Wertstofftonne ländlich wird auf die Ausführungen im Abschnitt 4.4 verwiesen.

Abbildung 22: Gesamtkosten der einzelnen Sammelsysteme bezogen auf 1 Mio. Einwohner im IST-Szenario

**Gesamtkosten der einzelnen Sammelsysteme im IST-Szenario**

bezogen auf 1 Mio. Einwohner



Quelle: Eigene Darstellung

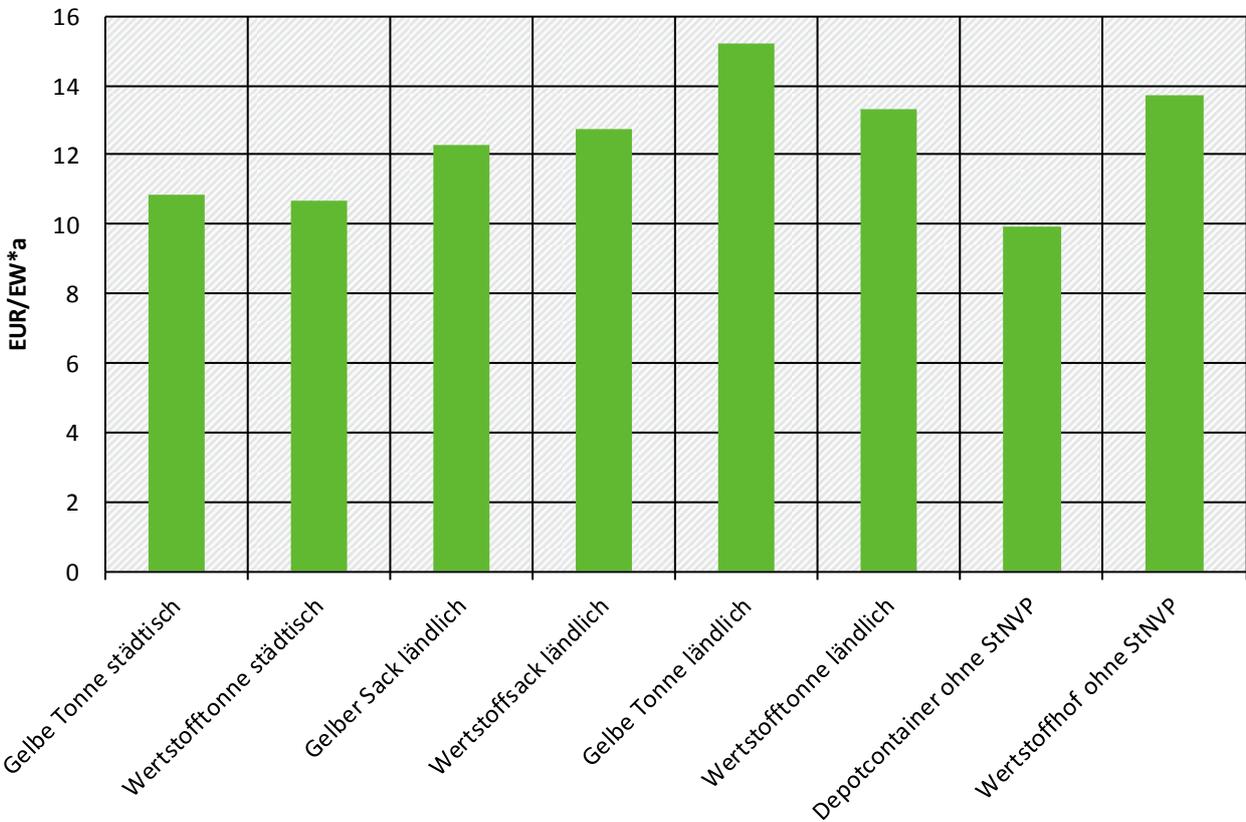
Die Gesamtkosten bezogen auf 1 Mio. Einwohner liegt zwischen ca. 10 und 15 Mio. EUR. Der Anteil der Sammelkosten an den Gesamtkosten schwankt zwischen 48 % (Sammelsystem „Wertstofftonne städtisch“) und 72 % (Sammelsystem „Wertstoffhof ohne StNVP“).

Betrachtet man die einwohnerspezifischen Systemkosten wird deutlich, dass die Kosten mit der Sammelmenge steigen (siehe Abbildung 23). Die hohen Erfassungsmengen führen zu entsprechend höheren Kosten bei Sammlung und Verwertung. Eine Ausnahme bildet der Wertstoffhof, der aufgrund der hohen Aufwendungen des Individualtransports ein vergleichsweise teures System ist. Ein Großteil der Kosten belastet dabei zusätzlich die angeschlossenen Bürger und nicht die in der Entsorgung der Verpackungsabfälle tätigen Unternehmen. Insgesamt sind die Systemkosten für die LVP- bzw. Wertstofffassung gering. Sie liegen im Schnitt bei jährlich etwa 12 bis 13 Euro pro Einwohner (inkl. Individualtransport). Der niedrigste Wert liegt bei 10 und der höchste bei 15 Euro pro Einwohner und Jahr.

Abbildung 23: Vergleich der einwohnerspezifischen Systemkosten je Sammelsystem im IST-Szenario

**Vergleich der Systemkosten je Sammelsystem im IST-Szenario**

einwohnerspezifisch



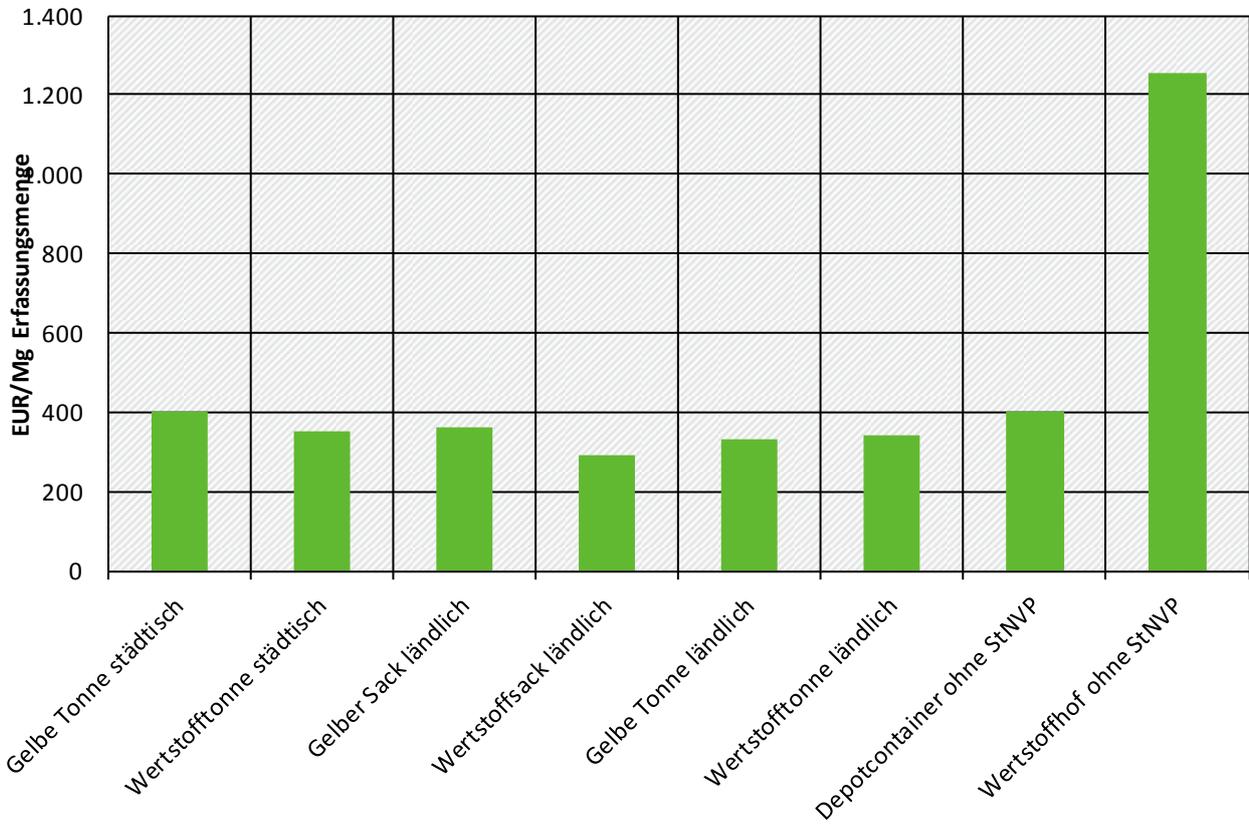
Quelle: Eigene Darstellung

Unter Einbeziehung des Parameters Erfassungsmenge kehrt sich das Bild um (siehe Abbildung 24). Die Systeme mit hohen Erfassungsmengen sind kostengünstiger als die Systeme mit geringeren Erfassungsmengen, was sich deutlich am System „Wertstoffhof“ zeigt, dessen hohe Kosten sich auf die geringste Erfassungsmenge beziehen.

Abbildung 24: Vergleich der spezifischen Systemkosten je Sammelsystem bezogen auf die Erfassungsmenge im IST-Szenario

**Vergleich der spezifischen Systemkosten je Sammelsystem im IST-Szenario**

bezogen auf die Erfassungsmenge



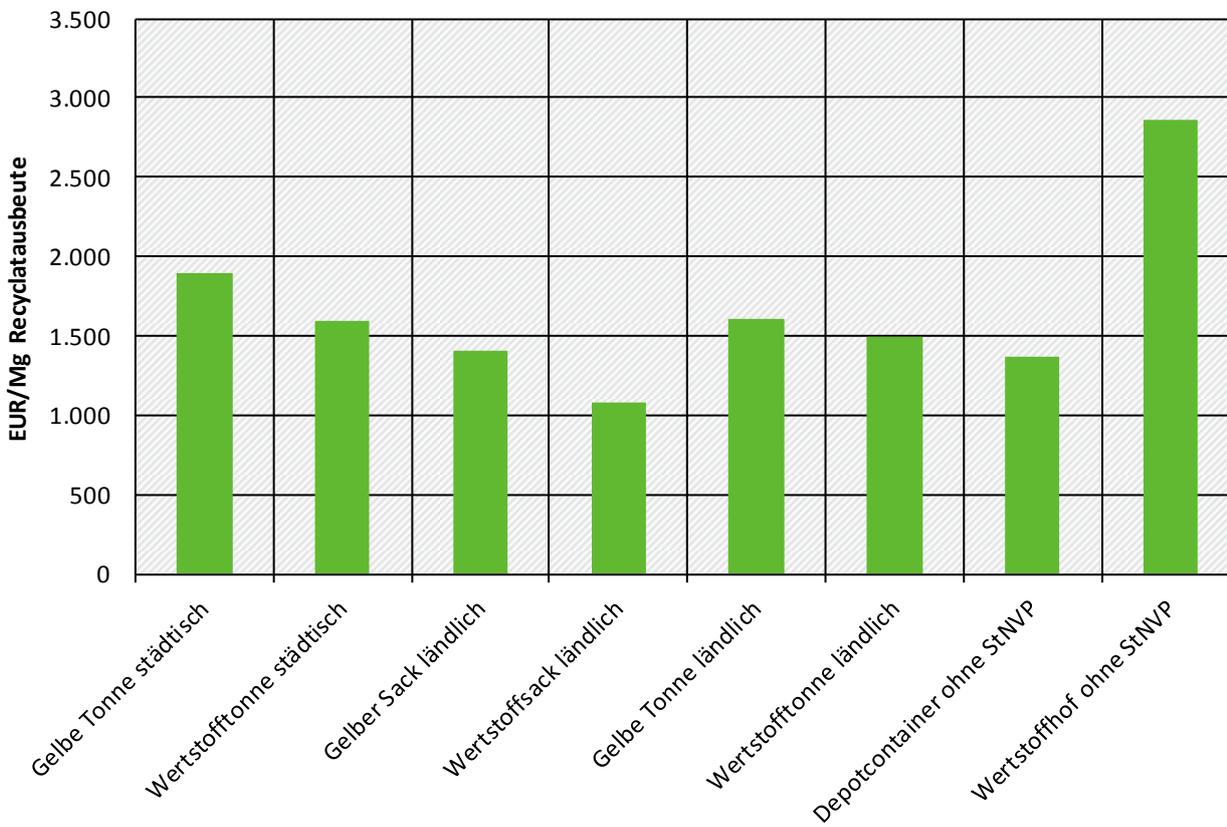
Quelle: Eigene Darstellung

In Abbildung 25 wird deutlich, dass auch die Qualität der erfassten Wertstoffe einen Einfluss auf die Systemkosten hat. Die Systeme mit guter Erfassungsqualität und gleichzeitig hohen Erfassungsmengen (insbesondere gelber Sack und Wertstoffsack ländlich) sind deutlich kosteneffizienter als die anderen Systeme. Es zeigt sich auch, dass die sortenreine Erfassung auf dem Wertstoffhof den Kostenabstand zu den anderen Systemen verringert. Dennoch bleibt der Wertstoffhof das spezifisch teuerste System.

Abbildung 25: Vergleich der spezifischen Systemkosten je Sammelsystem bezogen auf die Rezyklatausbeute im IST-Szenario

### Vergleich der Systemkosten je Sammelsystem im IST-Szenario

bezogen auf die Rezyklatausbeute



Quelle: Eigene Darstellung

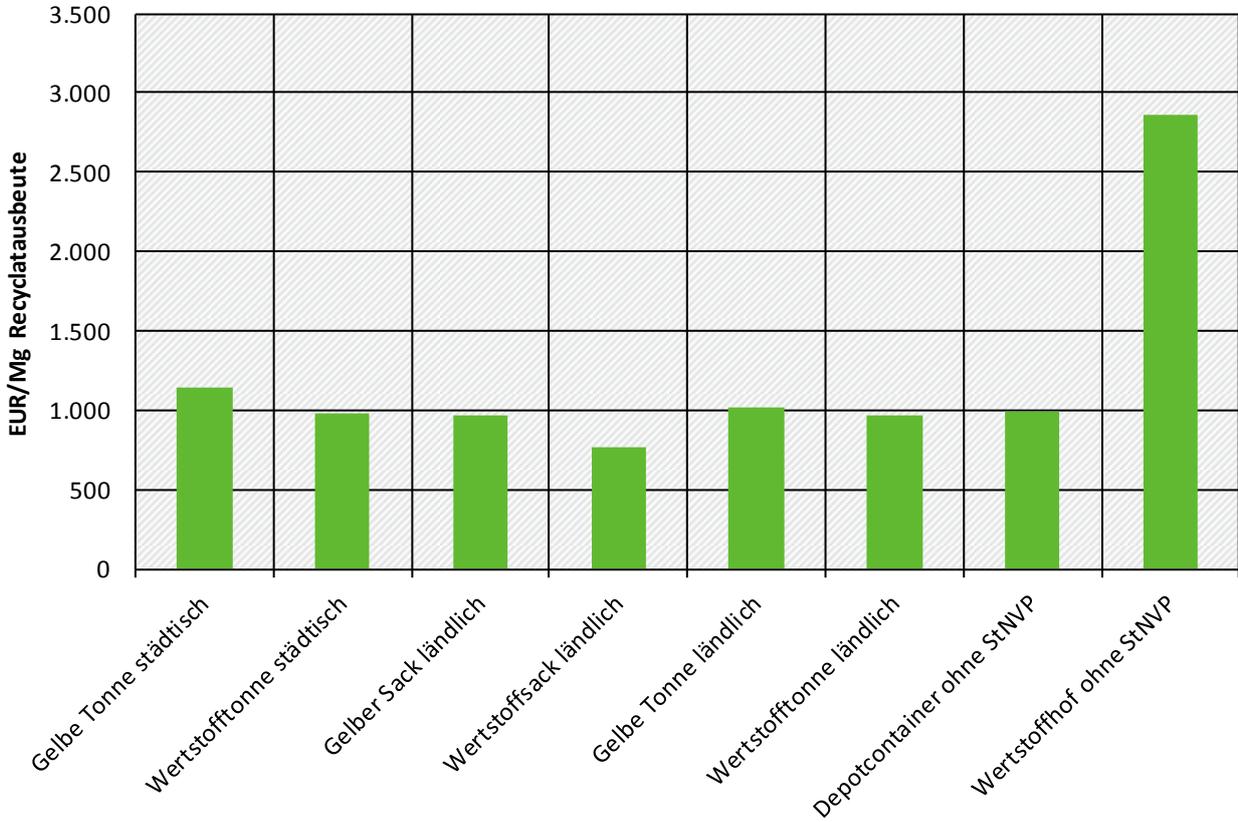
Der Wertstoffhof ist mit ca. 2.800 EUR/Mg Rezyklatausbeute das teuerste Sammelsystem. Der Einfluss der Qualität der erfassten Wertstoffe auf die Systemkosten wird durch den geringen Abstand auf die anderen Sammelsysteme, die zwischen 1.100 und 1.900 EUR/Mg Rezyklatausbeute liegen, deutlich. Die Systeme mit guter Erfassungsqualität und gleichzeitig hohen Erfassungsmengen (insbesondere gelber Sack und Wertstoffsack ländlich) sind deutlich kosteneffizienter als die anderen Systeme.

Im ZUKUNFT-Szenario zeigt sich, dass sich bei optimierter Ausbeute der Sortierung die Kosten bezogen auf die Rezyklatausbeute deutlich senken lassen (siehe Abbildung 26). Die spezifische Kosteneinsparung liegt zwischen 28 % (Sammelsystem „Depotcontainer ohne StNVP“) und 40 % (Sammelsystem „Gelbe Tonne städtisch“). Lediglich für den Wertstoffhof ergeben sich keine Kostenvorteile, da hier bereits im IST-Szenario die höchstmögliche Rezyklatausbeute erreicht wird.

Abbildung 26 Vergleich der spezifischen Systemkosten je Sammelsystem bezogen auf die Rezyklatausbeute im ZUKUNFT-Szenario

### Vergleich der Systemkosten je Sammelsystem im Zukunft-Szenario

bezogen auf die Rezyklatausbeute



Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 62: Zusammenstellung der Kosten je Sammelsystem (soweit in der Spalte „Kostenposition“ nicht anders vermerkt in EUR/1 Mio. Einwohner\*a)

Kostenposition	Gelbe Tonne städtisch	Wertstofftonne städtisch	Gelber Sack ländlich	Wertstoff-sack ländlich	Gelbe Tonne ländlich	Wertstofftonne ländlich	Depotcontainer ohne StNVP	Wertstoffhof ohne StNVP
Behälterkosten	698.351	901.461	1.275.005	1.631.250	1.393.388	1.243.422	291.000	331.776
Individualtransport	0	0	0	0	0	0	795.093	7.123.130
Sammelkosten	3.494.554	3.189.725	4.767.648	5.155.749	7.176.779	5.676.110	2.740.250	838.889
Transportkosten Sortieranlage	378.000	425.600	476.000	609.000	641.200	541.800	345.800	218.000
Sortierkosten	2.160.000	2.432.000	2.720.000	3.480.000	3.664.000	3.096.000	1.976.000	0
Transportkosten Verwertungsanlage	458.624	518.202	592.689	769.011	781.346	665.172	439.609	222.250
Verwertungskosten/-erlöse	930.852	972.020	739.545	766.732	1.571.839	1.033.879	287.954	-107.500
Sammelkosten Restabfall (40 EUR/Mg)	752.000	616.000	472.000	92.000	0	284.000	844.000	1.396.000
Entsorgungskosten Restabfall (90 EUR/Mg MVA + 15 EUR/Mg Transport)	1.974.000	1.617.000	1.239.000	241.500	0	745.500	2.215.500	3.664.500
Gesamtkosten	10.846.381	10.672.008	12.281.887	12.745.242	15.228.552	13.285.883	9.935.206	13.687.045
Spezifische Gesamtkosten [EUR/Einwohner*a]	10,85	10,67	12,28	12,75	15,23	13,29	9,94	13,69
Erfassungsmenge [Mg]	27.000	30.400	34.000	43.500	45.800	38.700	24.700	10.900
Spezifische Gesamtkosten [EUR/Mg Erfassungsmenge]	401,72	351,05	361,23	292,99	332,50	343,30	402,24	1255,69
Rezyklatausbeute [Mg]	5.710	6.676	8.745	11.833	9.492	8.871	7.260	4.783
Spezifische Gesamtkosten [EUR/Mg Erfassungsmenge]	1.899,44	1.598,55	1.404,37	1.077,06	1.604,31	1.497,73	1.368,50	2.861,60

## 8.1.2 Ökologische Bewertung

### 8.1.2.1 Methodik

Die Methodik der ökologischen Bewertung basiert auf der von Dehoust u. Christiani [2012] entwickelten Herangehensweise. Verglichen werden dabei die Wirkungskategorien Klimaänderungen (als Global Warming Potential (GWP)) sowie Primärenergiebedarf (als Kumulierter Energieaufwand (KEA)). Aufgrund des vergleichsweise geringen Materialaufwandes, welcher zur Herstellung von Kunststoffen erforderlich ist, erbringen Vergleiche des Rohstoffaufwandes (auf Basis des Kumulierten Rohstoffaufwandes (KRA)), wie sie von Wagner et al. [2012] durchgeführt wurden, keine wesentlich differenzierten Ergebnisse.

Die Sammelsysteme werden jeweils für 1 Mio. Einwohner kalkuliert. Betrachtet werden sowohl LVP als auch StNVP, womit die gesamten durch die Verwertung des erfassten Mengenstroms erzielten Effekte bewertet werden.<sup>30</sup>

Folgende Prozessschritte werden für die einzelnen Sammelsysteme bilanziert:

- ▶ Sammlung,
- ▶ Individualverkehr bei Bringsystemen (Depotcontainer, Wertstoffhof),
- ▶ Transport zur Sortieranlage,
- ▶ Sortierung,
- ▶ Transport der Fraktionen zu Aufbereitungs-, Verwertungs- und Behandlungsanlagen,
- ▶ Aufbereitung der verschiedenen Fraktionen,
- ▶ werkstoffliche Verwertung,
- ▶ rohstoffliche Verwertung im Hochofenprozess (Stahlwerk),
- ▶ energetische Verwertung in Form einer Co-Verbrennung in Zementwerken,
- ▶ energetische Verwertung der Sortierreste sowie der nicht erfassten LVP und StNVP gemeinsam mit dem Restabfall in MVA.

Für Sammlung und Transport wurden Werte aus GEMIS 4.94 genutzt. Es werden sowohl Kraftstoffverbrauch als auch der Verbrauch von Ressourcen für die Herstellung der Fahrzeuge bilanziert. Allerdings werden die Werte durch den Kraftstoffverbrauch dominiert. Um die Wirkungsfaktoren für ein Sammelfahrzeug abbilden zu können, wurde ein herkömmlicher LKW (>12 Mg) um die Wirkungsfaktoren eines Dieserverbrauchs von 45 l/100 km erweitert, so dass dieser mit einem Gesamtdieserverbrauch von 70 l/100 km in die Bilanzierung einfließt, was ein typischer Wert für die Abfallsammlung ist. Der Transport zur Sortieranlage wurde mit 11 Mg je Transporteinheit kalkuliert, der Transport zur Aufbereitung mit 22 Mg je Transporteinheit. Die Fahrleistungen für Sammlung und Transport wurden im Abschnitt 5 ermittelt.

Die Sortierung wurde nach Dehoust [2016] mit einem Stromverbrauch von 50 kWh/Mg Inputmaterial berechnet. Mit den Werten aus Tabelle 63 und Tabelle 64 ergeben sich als Belastung je Mg Inputmaterial zur Sortierung

- ▶ ein GWP von 29,606 kg CO<sub>2</sub>-Äq. und
- ▶ ein KEA von 366,8 kJ.

Die bewerteten Stoffströme basieren auf den Berechnungen in Abschnitt 7

Die Aufbereitung erfolgt fraktionsspezifisch durch unterschiedliche verfahrenstechnische Schritte. Die Bilanzierung der Aufbereitung sowie die Bewertung der Substitution von Primärmaterialien durch die

<sup>30</sup> Hinsichtlich der Bewertung der Ergebnisse für die Wertstofftonne ländlich wird auf die Ausführungen im Abschnitt 4.4 verwiesen.

erzeugten Rezyklate wurde für den Beitrag zum GWP und zum KEA mit Werten aus Dehoust et al. [2016] gerechnet und wurde als Nettogutschrift bzw. –belastung übernommen.

Für die Verwertung von nicht erfassten LVP und StNVP wurde die energetische Verwertung in MVA angenommen. Den Referenzwert für die maximal mögliche Erfassungsmenge im Rahmen des vorliegenden Systemvergleichs liefert das Sammelsystem „Gelbe Tonne ländlich“ mit 45.800 Mg/1 Mio. Einwohnern. Die Differenz der Erfassungsmengen der anderen Sammelsysteme zu diesem Referenzwert gilt als nicht erfasst und wird als Restabfall entsorgt. Da es sich dabei nicht um klassischen Hausmüll mit großen Anteilen an regenerativem Kohlenstoff handelt, sondern um LVP und StNVP mit nahezu ausschließlich fossilem Kohlenstoff, führt dieser Entsorgungsweg zu einer Klimabelastung und verschlechtert das Nettoergebnis des jeweiligen Systems bzgl. der klimawirksamen Emissionen. Beim KEA führt die Verwertung in MVA aufgrund der Energieerzeugung trotz der vergleichsweise geringen Effizienz zu einer Gutschrift.

Für die Bilanzierung gelten die gleichen Grundsätze wie bei Dehoust u. Christiani [2012]:

- ▶ Der Abfall geht ohne Vorlasten oder Gutschriften aus Herstellung bzw. Gebrauch in das System ein. Betrachtet wird der Umgang mit dem Abfall, ohne dessen Entstehung zu hinterfragen.
- ▶ Gutschriften aus der Bereitstellung von Energie, Sekundärrohstoffen bzw. -produkten werden zu 100 % dem Abfallwirtschaftssystem gutgeschrieben und nicht teilweise auf die aufnehmenden Produktionssysteme allokiert.

Soweit nicht anders vermerkt, beziehen sich alle aktualisierten Faktoren der vorliegenden Studie auf das Basisjahr 2014.

Die nachfolgende Tabelle 63 listet alle Wirkungsfaktoren auf, welche für die Bilanzierung des Global Warming Potenzials zum Ansatz gebracht wurden. Das Basisjahr ist 2014.

Tabelle 63: Verwendete GWP-Faktoren (Netto-Emissionsfaktoren)

Faktor	CO <sub>2</sub> -Äquivalent	Quelle
<b>Sammlung und Transport:</b>		
Sammelfahrzeug	0,11233 kg CO <sub>2</sub> -Äq./t.km	GEMIS 4.95, Lkw-Diesel->12t-Solo-DE-2010 + 45 ltr. Diesel, Erhöhung Jahreskilometer auf 55.000 km/a
Transportfahrzeug	0,05117 kg CO <sub>2</sub> -Äq./t.km	GEMIS 4.95, Lkw-Diesel-40t-Zug-DE-2010
PKW für Individualtransport	0,22615 kg CO <sub>2</sub> -Äq./P.km	GEMIS 4.95, Pkw-Otto-mittel-DE-2010-Basis (68 %), GEMIS 4.94, Pkw-Diesel-mittel-DE-2010-Basis (32 %)
<b>Sortierung:</b>		
Strominlandsverbrauch	0,5921 kg CO <sub>2</sub> -Äq./kWh	GEMIS 4.95, Netz-el-DE-Trafo MS/NS-2014
<b>Netto-Emissionsfaktor, bezogen auf die Menge Wertstoffgemisch, die der Verwertung zugeführt wird:</b>		
Folien	-878 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Flaschen / PO Flaschen (Wertstoffhof)	-1.074 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Hohlkörper >5 l	-1.074 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
MPO	-1.074 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]

Faktor	CO <sub>2</sub> -Äquivalent	Quelle
Polypropylen	-1.074 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Polyethylen	-1.074 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
PET	-1.781 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Becher (Wertstoffhof)	-2.320 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Mittelwert aus PET und PS
Polystyrol	-2.859 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Expandiertes Polystyrol (Wertstoffhof)	-9.321 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Formstabile Kunststoffe	-1.074 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
stoffgleiche Nichtverpackungen	-1.074 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Mischkunststoffe - werkstofflich (PO)	-472 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Mischkunststoffe - werkstofflich (Holz/Beton/HDPE)	-728 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Mischkunststoffe - Reduktionsmittel (Hochofen)	-549 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Mischkunststoffe - EBS (Zementwerk)	-883 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Weißblech	-1.210 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Aluminium	-3.137 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Stoffgleiche Fe-Metalle	-1.210 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	wie Weißblech
Stoffgleiche NE-Metalle	-3.137 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	wie Aluminium
Flüssigkeitskartonagen (Getränkeverbunde)	-865 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
PPK aus LVP (Verbund-PPK)	-166 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
KEG	-1.066 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
EBS-Vorprodukt	-1.066 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Sortierreste	-393 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016]
Restabfallbehandlung Wertstoffgemisch	511,5 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg	Dehoust et al. [2016], Mittelwert aus GWP für nicht erfasste StNVP (543 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg) und GWP für nicht erfasste LVP (480 kg CO <sub>2</sub> -Äq./Mg)

Die KEA-Faktoren wurden ebenfalls wie in Tabelle 64 aufgeführt aktualisiert. Auch hier ist 2014 das Basisjahr.

Tabelle 64: Verwendete KEA-Faktoren

Faktor	KEA	Quelle
<b>Sammlung und Transport:</b>		
Sammelfahrzeug	0,0175 GJ/t.km	Dehoust et al. [2016]
Transportfahrzeug	0,00139 GJ/t.km	Dehoust et al. [2016]
PKW für Individualtransport	0,00306 GJ/P.km	GEMIS 4.95, Pkw-Otto-mittel-DE-2010-Basis (68 %), GEMIS 4.94, Pkw-Diesel-mittel-DE-2010-Basis (32 %)
<b>Sortierung:</b>		
Strominlandsverbrauch	0,0073364 GJ/kWh	GEMIS 4.95, Netz-el-DE-Trafo MS/NS-2014
<b>Netto-KEA-faktor, bezogen auf die Menge Wertstoffgemisch, die der Verwertung zugeführt wird:</b>		
Folien	-39,247 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Flaschen / PO Flaschen (Wertstoffhof)	-41,051 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Hohlkörper >5 l	-41,051 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
MPO	-41,051 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Polypropylen	-41,051 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Polyethylen	-41,051 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
PET Flaschen 328-1 90 % Flaschen	-44,633 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Misch-PET 328-2 75 % Flaschen	-44,633 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Becher (Wertstoffhof)	-57,251 GJ/Mg	Mittelwert PET/PS
Polystyrol	-69,869 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Expandiertes Polystyrol (Wertstoffhof)	-73,363 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Formstabile Kunststoffe	-41,051 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
stoffgleiche Nichtverpackungen	-41,051 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Mischkunststoffe - werkstofflich (PO)	-15,094 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Mischkunststoffe - werkstofflich (Holz/Beton/HDPE)	-23,664 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Mischkunststoffe - Reduktionsmittel (Hochofen)	-38,574 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Mischkunststoffe - EBS (Zementwerk)	-12,045 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Weißblech	-8,936 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Aluminium	-37,536 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Stoffgleiche Fe-Metalle	-8,936 GJ/Mg	wie Weißblech
Stoffgleiche NE-Metalle	-37,536 GJ/Mg	wie Aluminium

Faktor	KEA	Quelle
Flüssigkeitskartonagen	-10,874 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
PPK aus LVP (Verbund-PPK)	-0,376 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
KEG	-14,896 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
EBS-Vorprodukt	-14,896 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Sortierreste	-6,817 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016]
Restabfallbehandlung Wertstoffgemisch	-12,452 GJ/Mg	Dehoust et al. [2016], Mittelwert aus KEA für nicht erfasste StNVP (13,619 GJ/Mg) und KEA für nicht erfasste LVP (11,285 GJ/Mg)

### 8.1.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Bilanzierung zeigen Abbildung 27 bis Abbildung 30 sowie Tabelle 65 und Tabelle 66.

Wie in Dehoust et al. (2016) ausgeführt, verringern sich allerdings die Gutschriften der energetischen Verwertung zum GWP zukünftig im Vergleich zur stofflichen Verwertung aufgrund der verstärkten Nutzung regenerativer Energieträger, so dass die Bedeutung des Beitrages der werkstofflichen Verwertung zum Klimaschutz zukünftig wachsen wird. Dieser Aspekt ist hier in dem Zukunftsszenario nicht berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen einige deutliche Tendenzen in den IST-Szenarien:

- ▶ Der Individualtransport der Sammelsysteme „Depotcontainer“ und „Wertstoffhof“ hat den dominierenden belastenden Einfluss auf die ökologischen Auswirkungen sowohl beim GWP als auch beim KEA dieser Sammelsysteme. Beim Sammelsystem „Wertstoffhof“ ergibt sich durch diesen Einfluss sowie durch den hohen Anteil an nicht erfassten und in MVA zu entsorgenden LVP und StNVP eine deutlich klimaschädigende Bilanz (siehe Abbildung 27 und Abbildung 29) sowie keine Einsparung beim KEA (siehe Abbildung 28 und Abbildung 30).
- ▶ Die sonstige Sammlung, die Transportprozesse der Abfälle und Sekundärrohstoffe sowie die Sortierung führen dagegen nur zu geringen Umweltbelastungen und haben kaum einen Einfluss auf die ökologische Effizienz der verschiedenen Sammelsysteme.
- ▶ Im Hinblick auf die Klimaerwärmung beeinflusst die Sammelmenge das Ergebnis wesentlich. Nicht erfasste LVP und StNVP werden in MVA entsorgt, was zu einer erhöhten Belastung mit klimawirksamen Gasen führt. Hingegen führen mehr getrennt erfasste LVP und StNVP zu höheren Nettogutschriften für das GWP (siehe Abbildung 27 und Abbildung 29).
- ▶ Im Vergleich des IST-Szenarios und des ZUKUNFT-Szenarios zeigt sich, dass die Optimierung der Sortierung keinen wesentlichen Einfluss auf den Beitrag der einzelnen Sammelsysteme zum GWP hat, da sich die Verschiebung von Materialien aus der energetischen Verwertung in die stoffliche Verwertung nahezu ausgleichen. Dies deckt sich mit den Untersuchungen von Dehoust et al. [2016], wo der Vergleich des Status-Quo-Szenarios (SQ) mit dem Szenario einer optimierten Sortiertechnik (Sz1) ebenfalls nur zu einem marginalen Anstieg der GWP-Nettogutschrift führt. Dies ist nach den dort gerechneten Sensitivitätsanalysen auf die hohe Gutschrift der energetischen Verwertung in Zementwerken zurückzuführen. Für die Zukunft zeigt Dehoust et al. [2016] auch, dass mit einem wachsenden Anteil erneuerbarer Energien der Aspekt einer optimierten Sortierung an Bedeutung gewinnen wird, da die Nettogutschriften für die energetische Verwertung sinken werden. Der Vergleich der Sammelsysteme untereinander (ohne Berücksichtigung von Sammlung, Transport und Aufbereitung, die in beiden Szenarien gleich sind) ergibt kein einheitliches Bild. Prozentual gesehen weist das Sammelsystem Depot-

container den höchsten Anstieg (+5 %) der Netto-Gutschriften auf, gefolgt vom Sammelsystem Wertstoffsack ländlich (+3 %), während die Gelbe Tonne städtisch (-9 %) den deutlichsten Rückgang zu verzeichnen hat. Die Ursachen dafür sind in den unterschiedlichen Sammelqualitäten der verschiedenen Systeme zu suchen. Durch die optimierte Sortierung werden bspw. im Sammelsystem Gelbe Tonne städtisch erheblich mehr PPK aus LVP erzeugt als im IST-Szenario. Diese Fraktion weist geringere Netto-Gutschriften zum GWP (-166 kg CO<sub>2</sub>-Äq./Mg) auf als die EBS-Fraktion (1.066 kg CO<sub>2</sub>-Äq./Mg), in welcher die PPK im IST-Szenario noch zugeordnet waren. Im System Depotcontainer ist das Potenzial für die PPK-Fraktion geringer, dafür werden durch die optimierte Sortierung des Depotcontainermaterials mehr Kunststofffraktionen mit höheren GWP-Gutschriften (> 1.000 kg CO<sub>2</sub>-Äq./Mg) erzeugt, woraus die Steigerung der Gesamt-Nettogutschriften zum GWP resultiert.

- ▶ Der Anteil der werkstofflichen Verwertung an den Gutschriften zum GWP beträgt zwischen 43 % (Gelbe Tonne ländlich; Szenario ZUKUNFT 61 %) und 74 % (Wertstoffhof; Szenario ZUKUNFT 74 %). Beim Sammelsystem Wertstoffhof wird aufgrund der geringen LVP-Erfassungsrate ein großer Teil der LVP über MVA entsorgt, so dass die vergleichsweise niedrige Gutschrift verbunden mit der guten Sammelqualität zu einem hohen Anteil der werkstofflichen Verwertung an den Gutschriften führt. Beim Sammelsystem „Gelbe Tonne ländlich“ ist dies umgekehrt. Es werden keine LVP über MVA entsorgt, dafür werden ein hoher Anteil Sortierreste und EBS thermisch verwertet, was einen geringeren Anteil der werkstofflichen Verwertung an den Gutschriften bedingt. Der Anteil der werkstofflichen Verwertung an den Gutschriften zum GWP ist somit kein geeigneter Indikator für die Effizienz der Erfassungssysteme. Dennoch zeigt sich, dass die optimierte Sortierung im Szenario ZUKUNFT den Beitrag der werkstofflichen Verwertung zu den Gutschriften aller Sammelsysteme außer dem Wertstoffhof<sup>31</sup> deutlich erhöht. Die Erhöhung beträgt zwischen 14 % (Wertstofftonne ländlich) und 20 % (Gelbe Tonne städtisch).
- ▶ Der Wertstoffsack ländlich weist die höchsten absoluten Gutschriften zum GWP auf, der Wertstoffhof die niedrigsten. Ausschlaggebend sind die Erfassungsmenge im getrennten Sammelsystem und die Erfassungsqualität sowie bei den Systemen Wertstoffhof und Depotcontainer die Belastungen durch den Individualtransport. Nicht erfasste Mengen führen zu Belastungen durch die MVA. Zwar werden durch das System Gelbe Tonne ländlich die höchsten Mengen erfasst, allerdings ist die Sammelqualität im System Wertstoffsack ländlich besser, so dass der höhere Anteil des Beitrages der werkstofflichen Verwertung zum GWP (Wertstoffsack ländlich: 51 %, Gelbe Tonne ländlich: 43 %) die Belastung durch die MVA mehr als ausgleicht.
- ▶ Ein deutlicheres Bild des Einflusses der werkstofflichen Verwertung zeigt sich beim KEA, auch wenn hier die MVA einen Betrag zur Nettogutschrift des KEA leistet. Der KEA wird insbesondere von der werkstofflichen Verwertung der Kunststoffe bestimmt, so dass auch hier der Wertstoffsack ländlich und zudem die Systeme Wertstofftonne ländlich und Gelber Sack ländlich im Vergleich zur Gelben Tonne ländlich trotz der geringeren Erfassungsmengen die höhere Nettogutschrift aufweisen (siehe Abbildung 28 und Abbildung 30).
- ▶ Der Anteil der werkstofflichen Verwertung an den Gutschriften zum KEA beträgt zwischen 49 % (Gelbe Tonne ländlich und Gelbe Tonne städtisch; Szenario ZUKUNFT jeweils 65 %) und 71 % (Wertstoffhof; Szenario ZUKUNFT 71 %). Hier gelten die gleichen Aussagen wie bei der Bewertung des Anteils der werkstofflichen Verwertung an den Gutschriften zum GWP. Ausschlaggebend ist dabei insbesondere die Sammelqualität. Der Indikator macht deutlich, dass beim System Wertstoffhof eine hohe Qualität erfasst wird, die einen hohen Anteil werkstofflicher Verwertung ermöglicht.

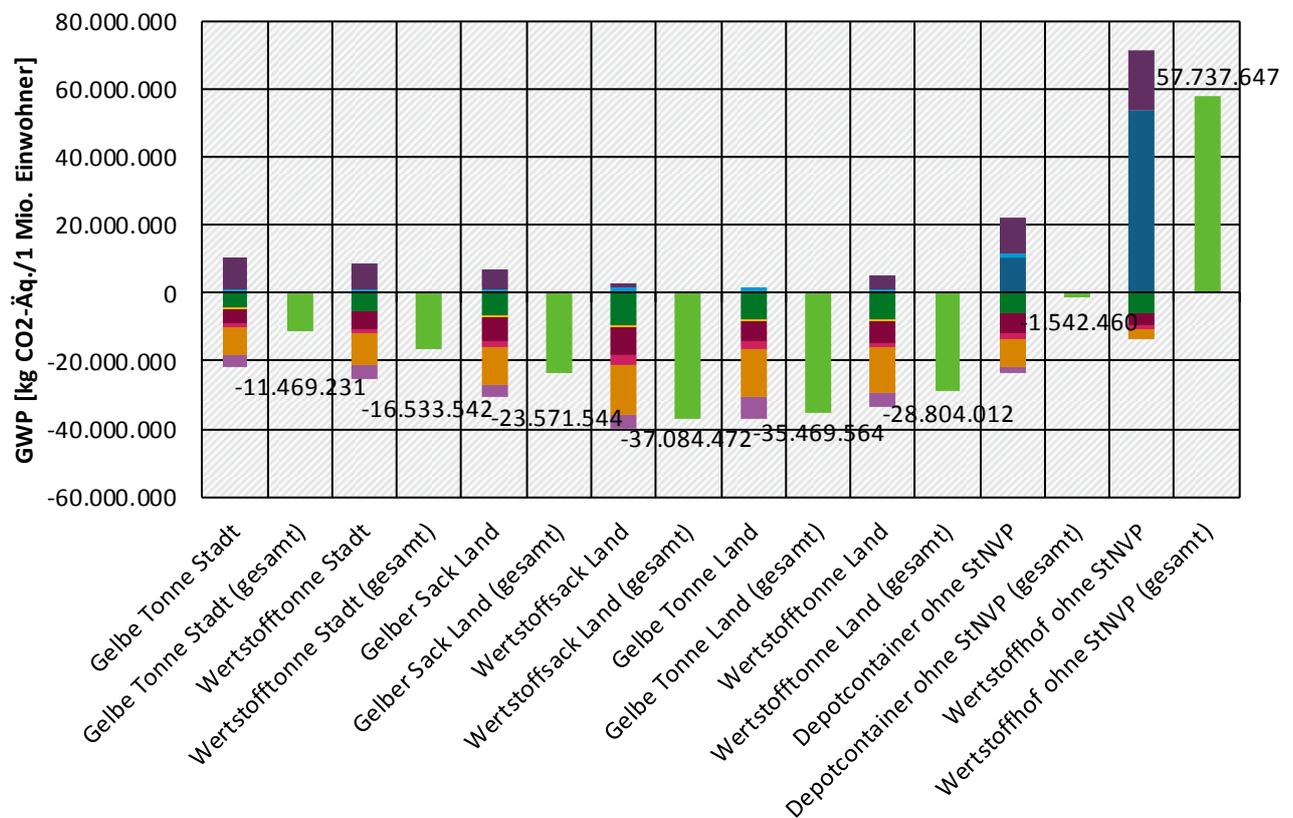
<sup>31</sup> Beim Sammelsystem „Wertstoffhof“ fehlt dieser Einfluss, da keine Sortierung stattfindet. Dort bleibt der Anteil konstant.

- Deutlich zeigt sich der Einfluss der optimierten Sortierung im Szenario ZUKUNFT. Die höheren Ausbeuten an Recyclingmaterial wirken sich durch die damit verbundenen höheren Gutschriften positiv auf den KEA aus (siehe Abbildung 30). Alle Sammelsysteme mit Ausnahme des Wertstoffhofes weisen Steigerungen der Netto-Gutschriften zum KEA zwischen 4 % (Gelbe Tonne städtisch) und 14 % (Wertstoffsack ländlich) auf. Dehoust et al. [2016] weisen im Vergleich des Status Quo-Szenarios (SQ) und dem Szenario der optimierten Sortierung ca. 8 % Steigerung aus.

Abbildung 27: Ergebnis der Bilanzierung des Global Warming Potenzials im IST-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner

### Ergebnis der Bilanzierung des Global Warming Potenzials im IST-Szenario

bezogen auf 1 Mio. Einwohner

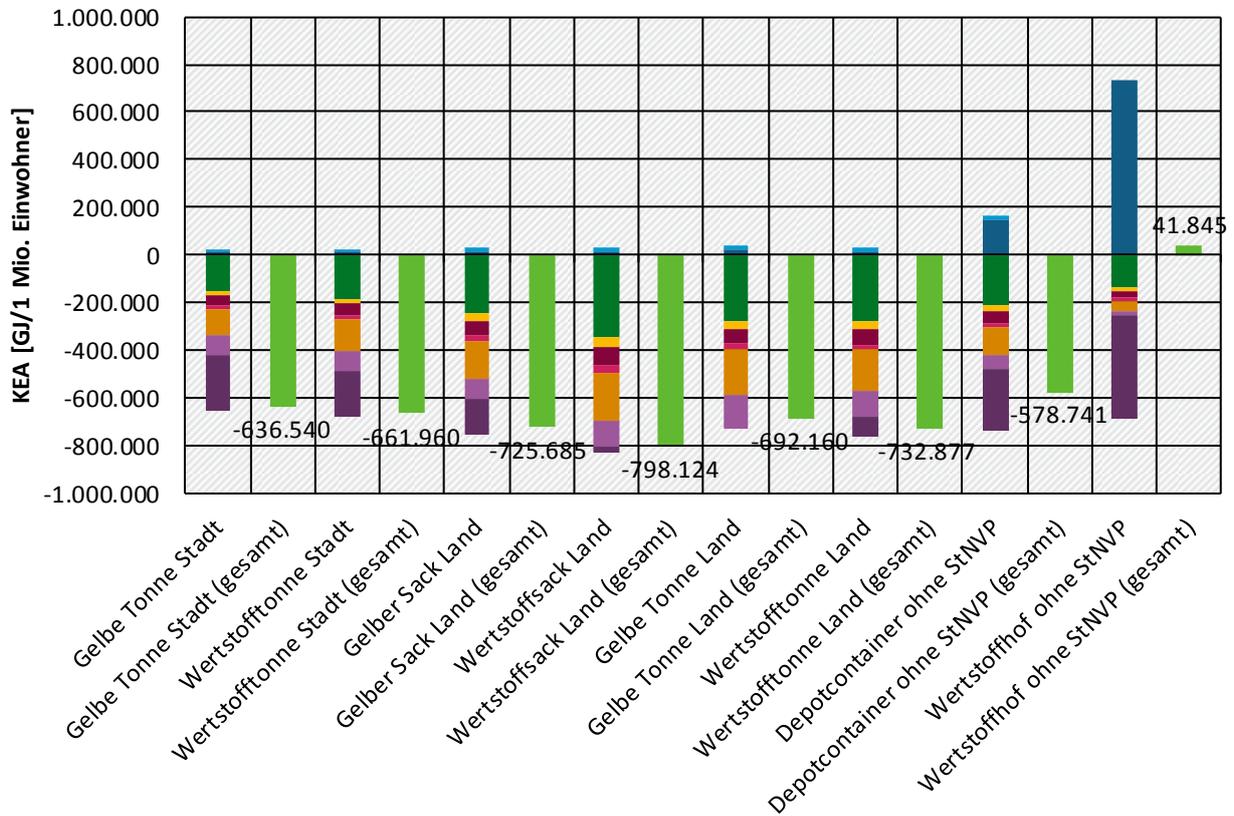


Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 28: Ergebnis der Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes im IST-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner

### Ergebnis der Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes im IST-Szenario

bezogen auf 1 Mio. Einwohner



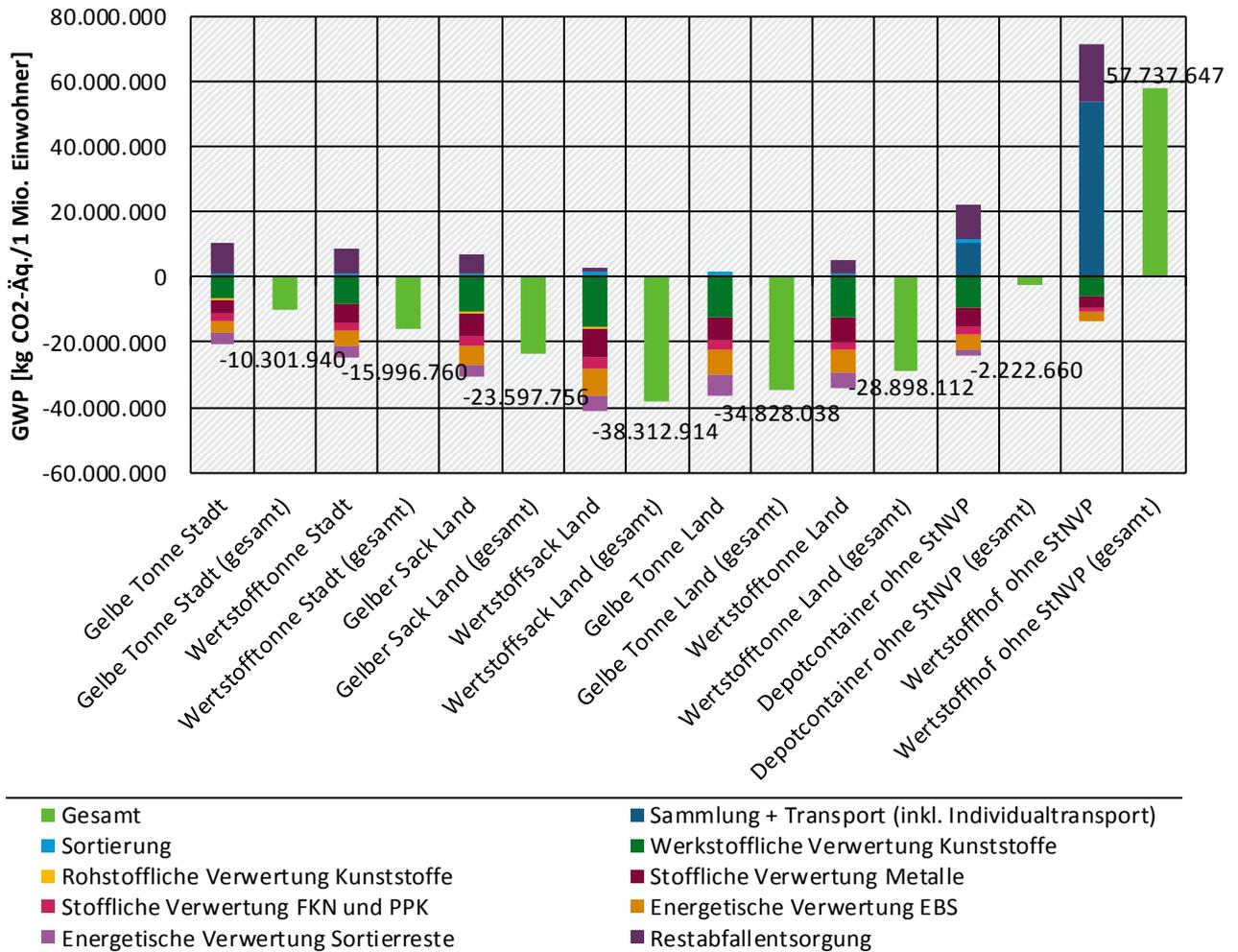
- |  |  |
|--|--|
| ■ Gesamt                               | ■ Sammlung + Transport (inkl. Individualtransport) |
| ■ Sortierung                           | ■ Werkstoffliche Verwertung Kunststoffe            |
| ■ Rohstoffliche Verwertung Kunststoffe | ■ Stoffliche Verwertung Metalle                    |
| ■ Stoffliche Verwertung FKN und PPK    | ■ Energetische Verwertung EBS                      |
| ■ Energetische Verwertung Sortierreste | ■ Restabfallentsorgung                             |

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 29: Ergebnis der Bilanzierung des Global Warming Potenzials im ZUKUNFT-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner

### Ergebnis der Bilanzierung des Global Warming Potenzials im Zukunft-Szenario

bezogen auf 1 Mio. Einwohner

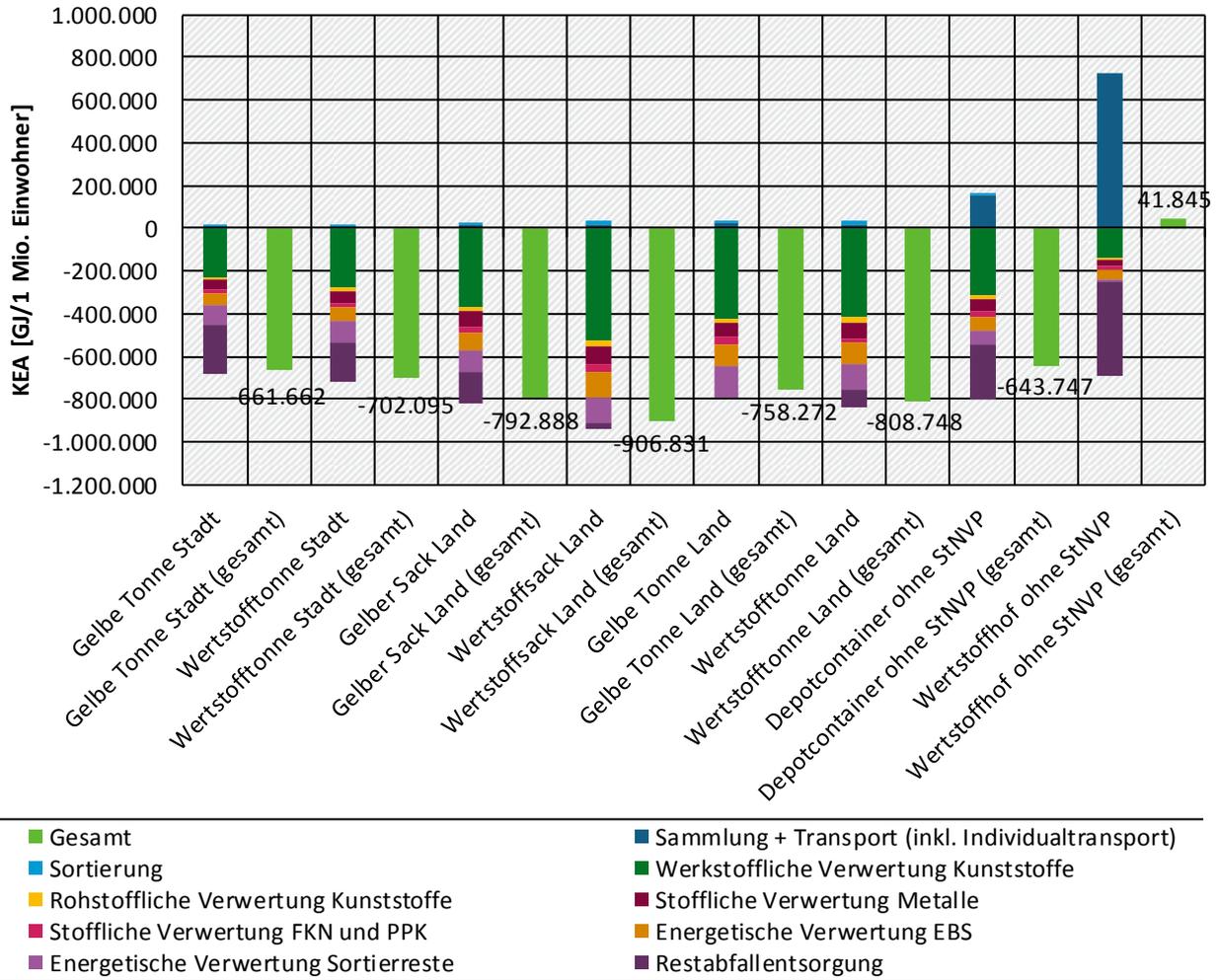


Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 30: Ergebnis der Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes im ZUKUNFT-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner

**Ergebnis der Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes im ZUKUNFT-Szenario**

bezogen auf 1 Mio. Einwohner



Quelle: Eigene Darstellung

Tabelle 65: Detailergebnis der Bilanzierung des Global Warming Potentials im IST-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner [kg CO<sub>2</sub>-Äq.]

	Gelbe Tonne Stadt	Wertstofftonne Stadt	Gelber Sack Land	Wertstoffsack Land	Gelbe Tonne Land	Wertstofftonne Land	Depotcontainer ohne StNVP	Wertstoffhof ohne StNVP
Individualtransport	0	0	0	0	0	0	10.586.221	53.697.002
Sammlung	61.237	55.895	83.546	90.347	125.762	99.465	48.019	14.700
Transport Sortieranlage	29.673	33.409	37.366	47.806	50.334	42.531	27.145	17.113
Transport Verwertungsanlage	14.836	16.705	18.683	23.903	25.167	21.265	13.573	8.556
Sortierung	799.362	900.023	1.006.605	1.287.862	1.355.956	1.145.753	731.269	0
Folien	-939.482	-1.167.953	-1.522.993	-2.092.482	-1.739.959	-1.773.113	-1.207.237	-878.000
Flaschen / PO Flaschen	-17.968	-21.176	-28.443	-40.868	-32.432	-32.065	-25.266	0
Flaschen / PO Flaschen	-161.709	-190.581	-255.987	-367.808	-291.889	-288.582	-227.396	-1.074.000
Hohlkörper > 5 l	-116.790	-145.654	-203.203	-209.311	-201.378	-222.584	-91.005	0
MPO	-425.608	-501.599	-673.745	-968.051	-768.234	-759.532	-598.494	0
Polypropylen	-911.207	-1.078.319	-1.435.661	-2.114.719	-1.661.691	-1.631.862	-1.325.410	0
Polyethylen	-269.582	-302.259	-424.609	-593.843	-466.106	-457.389	-372.760	0
PET Flaschen 328-1 90% Flaschen	-236.730	-258.125	-370.411	-518.687	-401.541	-390.277	-331.655	0
Misch-PET 328-2 75% Flaschen	-618.044	-718.171	-967.051	-1.443.125	-1.117.192	-1.085.854	-922.751	0
Becher (Wertstoffhof)	-4.366	-5.146	-6.912	-9.932	-7.882	-7.792	-6.140	-1.392.000
Polystyrol	-292.426	-354.317	-464.429	-675.582	-540.175	-536.747	-413.276	0
Expandiertes Polystyrol (Styropor®)	-9.556	-11.787	-15.253	-22.089	-17.853	-17.867	-13.304	-2.330.250
Formstabile Kunststoffe	-160.586	-189.258	-254.210	-365.254	-289.862	-286.578	-225.817	0
stoffgleiche Nichtverpackungen (KS)	-6.699	-11.414	-11.949	-15.341	-15.460	-17.473	-5.908	0

	Gelbe Tonne Stadt	Wertstofftonne Stadt	Gelber Sack Land	Wertstoff-sack Land	Gelbe Tonne Land	Wertstofftonne Land	Depotcontainer ohne StNVP	Wertstoffhof ohne StNVP
Mischkunststoffe - werkstofflich (PO)	-28.553	-36.616	-46.313	-64.804	-54.308	-55.610	-36.930	-23.915
Mischkunststoffe - werkstofflich (Holz/Beton/HDPE)	-88.079	-112.950	-142.864	-199.905	-167.526	-171.544	-113.919	-73.771
Mischkunststoffe - Reduktionsmittel (Hochofen)	-257.397	-330.081	-417.498	-584.195	-489.571	-501.312	-332.912	-214.988
Mischkunststoffe - EBS (Zementwerk)	-4.077.351	-5.228.729	-6.613.477	-9.254.065	-7.755.157	-7.941.145	-5.273.567	-3.405.201
Weißblech	-2.117.483	-2.664.341	-3.339.436	-4.464.764	-3.287.242	-3.462.487	-2.886.237	-2.420.000
Aluminium	-1.881.456	-2.186.037	-3.413.666	-3.193.249	-2.546.272	-2.978.791	-2.576.371	-941.100
Stoffgleiche Fe-Metalle	-31.477	-149.561	-22.951	-111.831	-56.818	-94.812	-30.347	0
Stoffgleiche NE-Metalle	-69.010	-117.527	-44.551	-166.437	-174.408	-155.217	-45.885	0
Flüssigkeitskartonagen	-1.151.344	-1.152.083	-1.936.349	-2.706.907	-1.964.670	-1.194.861	-1.582.735	-1.081.250
PPK aus LVP, einschl. PPK-VB	-116.447	-99.642	-64.445	-36.794	-124.296	-81.676	-22.673	-16.600
KEG = EBS	-1.305.966	-1.371.837	-1.440.404	-1.750.248	-1.984.187	-1.634.514	-1.010.829	0
EBS-Vorprodukt	-2.829.199	-2.971.901	-3.120.441	-3.791.677	-4.298.473	-3.540.955	-2.189.824	0
Sortierreste	-3.866.025	-4.039.613	-3.516.192	-3.948.871	-6.572.201	-4.424.039	-1.872.687	0
Restabfallentsorgung	9.616.200	7.877.100	6.035.700	1.176.450	0	3.631.650	10.792.650	17.851.350
<b>Gesamt</b>	<b>-11.469.231</b>	<b>-16.533.542</b>	<b>-23.571.544</b>	<b>-37.084.472</b>	<b>-35.469.564</b>	<b>-28.804.012</b>	<b>-1.542.460</b>	<b>57.737.647</b>

Tabelle 66: Detailergebnis der Bilanzierung des kumulierten Energieaufwandes im IST-Szenario bezogen auf 1 Mio. Einwohner [GJ]

	Gelbe Tonne Stadt	Wertstofftonne Stadt	Gelber Sack Land	Wertstoff-sack Land	Gelbe Tonne Land	Wertstofftonne Land	Depotcontainer ohne StNVP	Wertstoffhof ohne StNVP
Individualtransport	0	0	0	0	0	0	143.257	726.651
Sammlung	9.540	8.708	13.016	14.075	19.593	15.496	7.481	2.290
Transport Sortieranlage	806	908	1.015	1.299	1.367	1.155	737	465
Transport Verwertungsanlage	403	454	508	649	684	578	369	232
Sortierung	9.904	11.151	12.472	15.957	16.800	14.196	9.060	0
Folien	-41.995	-52.208	-68.078	-93.535	-77.777	-79.259	-53.964	-39.247
Flaschen / PO Flaschen (320)	-687	-809	-1.087	-1.562	-1.240	-1.226	-966	0
Flaschen / PO Flaschen (321)	-6.181	-7.284	-9.784	-14.059	-11.157	-11.030	-8.692	-41.051
Hohlkörper > 5 l	-4.464	-5.567	-7.767	-8.000	-7.697	-8.508	-3.478	0
MPO	-16.268	-19.172	-25.752	-37.001	-29.364	-29.031	-22.876	0
Polypropylen	-34.829	-41.216	-54.875	-80.830	-63.514	-62.374	-50.661	0
Polyethylen	-10.304	-11.553	-16.230	-22.698	-17.816	-17.483	-14.248	0
PET Flaschen 328-1 90% Flaschen	-5.933	-6.469	-9.283	-12.999	-10.063	-9.781	-8.311	0
Misch-PET 328-2 75% Flaschen	-15.489	-17.998	-24.235	-36.166	-27.998	-27.212	-23.125	0
Becher (Wertstoffhof)	-108	-127	-171	-245	-194	-192	-152	-34.351
Polystyrol	-7.146	-8.659	-11.350	-16.510	-13.201	-13.117	-10.100	0
Expandiertes Polystyrol (Styropor®)	-75	-93	-120	-174	-141	-141	-105	-18.341
Formstabile Kunststoffe	-6.138	-7.234	-9.717	-13.961	-11.079	-10.954	-8.631	0
stoffgleiche Nichtverpackungen (KS)	-256	-436	-457	-586	-591	-668	-226	0
Mischkunststoffe - werkstofflich (PO)	-913	-1.171	-1.481	-2.072	-1.737	-1.778	-1.181	-765

	Gelbe Ton- ne Stadt	Wertstoff- tonne Stadt	Gelber Sack Land	Wertstoff- sack Land	Gelbe Ton- ne Land	Wertstoff- tonne Land	Depotcontainer ohne StNVP	Wertstoffhof ohne StNVP
Mischkunststoffe - werkstofflich (Holz/Beton/HDPE)	-2.863	-3.672	-4.644	-6.498	-5.446	-5.576	-3.703	-2.398
Mischkunststoffe - Reduktionsmittel (Hochofen)	-18.085	-23.192	-29.334	-41.047	-34.398	-35.223	-23.391	-15.106
Mischkunststoffe - EBS (Zementwerk)	-55.619	-71.325	-90.214	-126.235	-105.788	-108.325	-71.937	-46.450
Weißblech	-15.638	-19.676	-24.662	-32.973	-24.277	-25.571	-21.315	-17.872
Aluminium	-22.513	-26.157	-40.846	-38.209	-30.468	-35.643	-30.828	-11.261
Stoffgleiche Fe-Metalle	-232	-1.105	-169	-826	-420	-700	-224	0
Stoffgleiche NE-Metalle	-826	-1.406	-533	-1.992	-2.087	-1.857	-549	0
Flüssigkeitskartonagen	-14.474	-14.483	-24.342	-34.029	-24.698	-15.021	-19.897	-13.593
PPK aus LVP, einschl. PPK-VB	-264	-226	-146	-83	-282	-185	-51	-38
KEG = EBS	-18.249	-19.170	-20.128	-24.458	-27.726	-22.840	-14.125	0
EBS-Vorprodukt	-39.534	-41.529	-43.604	-52.984	-60.066	-49.480	-30.600	0
Sortierreste	-84.013	-89.482	-86.752	-101.733	-141.381	-102.717	-53.574	-12.748
Restabfallentsorgung	-234.098	-191.761	-146.934	-28.640	0	-88.409	-262.737	-434.575
<b>Gesamt</b>	<b>-636.540</b>	<b>-661.960</b>	<b>-725.685</b>	<b>-798.124</b>	<b>-692.160</b>	<b>-732.877</b>	<b>-578.741</b>	<b>41.845</b>

## 9 Konsequenzen und Empfehlungen

### 9.1 Gesamtbewertung der Teilprozesse Individualtransport, Sammlung und Transport im Vergleich

#### 9.1.1 Sammelmenge und Sammelqualität<sup>32</sup>

Die Wahl des Sammelsystems entscheidet maßgeblich über die einwohnerspezifisch gesammelte Menge. Auf Basis der zur Verfügung stehenden Daten ist festzustellen, dass die höchsten Sammelmen gen mit den Systemen Gelbe Tonne und Wertstofftonne zu erzielen sind. Auch wenn der Vergleich der Sammelsysteme Wertstofftonne ländlich und Gelbe Tonne ländlich diesen Schluss nicht direkt zulässt, liegt die Erhöhung der Sammelmenge wie beim Vergleich der entsprechenden Sammelsysteme in den städtischen Vertragsgebieten durch die Erfassung zusätzlicher Materialien auf der Hand. Problematisch ist, dass die Sammelsysteme Gelbe Tonne ländlich und städtisch über den höchsten Anteil an der Fraktion „Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP“ verfügen.

Das Sammelsystem Wertstoffsack ländlich verfügt über eine vergleichbar hohe Sammelmenge wie die Wertstofftonne und innerhalb der Holsysteme über den geringsten Anteil an der Fraktion „Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP“, ist aber aufgrund der geringen Datenbasis von zwei Datensätzen hier nicht abschließend bewertbar.

Der Gelbe Sack liegt bei der Sammelmenge im Vergleich mit den anderen ländlichen Sammelsystemen leicht unterhalb der anderen Holsysteme und hat einen geringen Anteil an der Fraktion „Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP“.

Die Sammelmengen der Bringsysteme liegen deutlich unterhalb der anderen Systeme, haben aber den geringsten Reste-Anteil.

Die Störstoffe beeinträchtigen in üblichen Anteilen die Sammelqualität in der Regel nicht in der Form als dass die Ziel-Fraktionen verschmutzen oder verkleben und damit die Sortierung erschweren bzw. die Qualität des Sortieroutputs verringern. Unter dieser Maßgabe wirkt sich die Sammelmenge höher auf die Umweltentlastung aus als die Sammelqualität. Entsprechend sind mit dem Ziel der Maximierung der Umweltentlastung Holsysteme unter Miterfassung der StNVP zu bevorzugen.

Das Sammelsystem „Depotcontainer“ liegt mit einer mittleren einwohnerspezifischen Sammelmenge von 24,7 kg/(EW\*a) deutlich unterhalb der mittleren aktuellen deutschlandweiten Werte. Der Maximalwert für ein Vertragsgebiet ist allerdings im Bereich des Mittelwertes für den Gelben Sack und damit im Bereich aktuellen deutschlandweiten mittleren Aufkommens dokumentiert. Da das Sammelsystem kostenseitig im Bereich der Holsysteme liegt und die Sammelqualität deutlich besser als für die Sammelsysteme mit Holsystem ist, kann für geeignete Gebiete, insbesondere für die, in denen eine hohe Sammelmenge aktuell vorliegt oder zu erwarten ist, der Betrieb dieses Sammelsystems akzeptabel sein.

Das Sammelsystem Wertstoffhof liefert auf der einen Seite gute Sammelqualitäten in Form von direkt vermarktbar Fraktionen. Auf der anderen Seite liegt die Sammelmenge mit im Mittel 10,9 kg/(EW\*a) und maximal 14,7 kg/(EW\*a) deutlich unterhalb der aktuellen deutschlandweiten mittleren Sammelmen gen. Im Sinne der Maximierung der Umweltentlastung ist ein reines Wertstoffhofsyste m somit nicht zu empfehlen.

#### 9.1.2 Logistikkosten

Unter Berücksichtigung der Teilprozesse Individualtransport, Sammlung und Transport fallen die mit Abstand höchsten massespezifischen Kosten für das Sammelsystem Wertstoffhof an.

<sup>32</sup> Bewertung anhand des Anteils der Fraktion „Reste“ in der Zusammensetzung

Die anderen Sammelsysteme unterscheiden sich hinsichtlich der Kosten nur graduell, so dass hinsichtlich der massespezifischen Logistikkosten keines der untersuchten Systeme eindeutig favorabel ist.

Die Miterfassung von StNVP führt je nach Ausgangs-Sammelsystem zu einem geringen Optimierungspotenzial zwischen 4 und 12 %. Ob sich diese Einsparungen realisieren lassen, ist aber von den speziellen Bedingungen vor Ort abhängig. Dies ist damit zu erklären, dass für eine Systemänderung zusätzlich einmalige Kosten für die Änderung des Behälterbestandes und die nötige Öffentlichkeitsarbeit zu kalkulieren wären, welche den genannten Kostenvorteil mindern würden.

Das Optimierungspotenzial durch Streckung des Sammelturnus ist mit 7 % in den ländlichen Gebieten und einem höher zu erwartenden Potenzial in den städtischen Gebieten ebenfalls gering, zumal gerade in den städtischen Gebieten die Aufstellung der nötigen zusätzlichen Behälter schwierig werden dürfte. Das geringe Kosten-Einsparpotenzial und geringe Akzeptanz bei den Grundstückseigentümern, die die zusätzliche Standplatzfläche bereitstellen müssten, lassen die Hebung dieses Potenzials als nicht sinnvoll erscheinen.

## 9.2 Gesamtbewertung der Sortierung im Vergleich

Bei der Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse soll auf die in Abschnitt 7.2 beschriebenen Parameter Bezug genommen werden:

- ▶ technische Möglichkeiten,
- ▶ wirtschaftliche Indikatoren,
- ▶ rechtliche Rahmenbedingungen.

Dabei muss berücksichtigt werden, dass einzelne Ergebnisse aufgrund der Sammelgutzusammensetzung der verschiedenen Erfassungs- bzw. Sammelsysteme unter dem Vorbehalt stehen, dass

1. erhebliche Unterschiede beim Umfang der Datenbasis bestehen (zwei untersuchte Vertragsgebiete beim „Wertstoffsack ländlich“ bis 25 Vertragsgebiete beim „Gelben Sack ländlich“),
2. nicht zwingend in den herangezogenen Sortieranalysen die gleiche Sortiertiefe/-kriterien angewendet wurden,
3. einer Sortieranlage i.d.R. nicht das homogene Sammelgut aus einem Sammelsystem, sondern die Mischung verschiedener Vertragsgebiete und damit Sammelsysteme zugeführt wird; die Betrachtung einer hypothetischen „Musterzusammensetzung“ sollte diesen Umstand verdeutlichen.

Bei einer Gegenüberstellung der Sammelsysteme mit den Möglichkeiten für eine Verbesserung der Wertstoffausbeute sollte zudem zwischen folgenden Ursachen für die Schwierigkeiten einer Optimierung unterschieden werden. Zum einen beeinflussen die Bürger mit ihrem Sammel- und Trennverhalten der LVP-Abfälle maßgeblich die Sortierqualität, Stichwort: Fehlwürfe, mangelnde Restentleerung, Verschmutzung, unzureichende Vereinzelnung verschiedener Materialien. Zum anderen erschwert die immer komplexere Verpackungszusammensetzung und Materialauswahl die sortenreine Trennung in Sortieranlagen, Stichwort: Verbundmaterialien und Materialkombinationen (Blister etc., PE/PP und PET-Kombi). Diese Ursachen können nur durch Veränderungen beim Verpackungsdesign (Recyclingfähigkeit) und durch Aufklärung der Bürger bei einem von diesen akzeptiertem Sammelsystem angegangen werden.

Im Folgenden geht es um die Frage, welche Beiträge die Sortierung bei gegebenem Input zur Erhöhung der Wertstoffausbeute beitragen kann.

### 9.2.1 Technische Möglichkeiten der Sortierung und Verwertung

Die Anwendung des Standes der Sortiertechnik lässt ein erhebliches Potenzial zusätzlicher werkstofflicher Verwertung erkennen, wobei von der derzeitigen Zusammensetzung des Sammelgutes in den betrachteten Sammelsystemen (Stand etwa 2014) ausgegangen wird (siehe Tabelle 67).

Tabelle 67: Erhöhung der Zuführung zur stofflichen Verwertung durch Anwendung des Standes der Technik

Sammelsystem	Erhöhung der Zuführung zur werkstofflichen Verwertung in kg/(EW*a) von IST->ZUKUNFT	Prozentuale Erhöhung (%) bezogen auf IST
Wertstofftonne städtisch	5,2	55 %
Gelber Sack ländlich	4,7	38 %
Wertstofftonne ländlich	5,8	56 %
Gelbe Tonne städtisch	4,7	37 %
Gelbe Tonne ländlich	6,6	33 %
Wertstoffsack ländlich	5,6	25 %
Depotcontainer o. StNVP	3,2	24 %
Wertstoffhof o. StNVP	0	0 %
„Musterzusammensetzung“	5,4	33 %

Die werkstoffliche Verwertung führt durchschnittlich über alle Materialfraktionen zu einer Rezyklatausbeute von 70-72 % bezogen auf die der werkstofflichen Verwertung zugeführte Menge.

Die oben genannten Rezyklatausbeuten an werkstofflicher Verwertung beziehen sich auf die Zuführungsmengen zur werkstofflichen Verwertung bei Sammelmengen zwischen 24,7 (Depotcontainer) und 45,8 kg/(EW\*a) (Gelbe Tonne ländlich), ohne Wertstoffhöfe. Damit ergeben sich folgende Rezyklatausbeuten, die in Anlage 4 und Anlage 5 für alle Sammelsysteme dargestellt sind (Umrechnung der Mg-Angaben letzte Zeile in kg/EW\*a):

- ▶ IST-Szenario: 8,0 kg/(EW\*a) bis 16,6 kg/(EW\*a)
- ▶ ZUKUNFT-Szenario: 12,8 kg/(EW\*a) bis 22,2 kg/(EW\*a)

Je nach Sammelsystem (ohne Wertstoffhof) lassen sich zwischen 2,5 und 5,1 kg/(EW\*a) (24-56 %) an Rezyklatausbeuten der werkstofflichen Verwertung zusätzlich gegenüber dem IST-Stand bei durchgängiger Anwendung des „Stand der Technik“ generieren, vgl. Differenz aus den Rezyklatausbeuten in Anlage 4 und Anlage 5. Werden zusätzlich noch die Erfassungsmengen der Wertstoffe erhöht, so steigt das Potential für die werkstoffliche Verwertung noch weiter.

Die Potenziale resultieren bei Anwendung des Standes der Technik vor allem aus

- ▶ der Reduzierung der bisher energetisch verwerteten Fraktionen 0361, 0365 und 0830 durch erhöhte Wertstoffsartierung (z. B. Senkung der Feinkorngrenze und/oder Verbesserung der Nachsortierung über die Metallabscheidung hinaus, Begrenzung des EBS/Sortierreste-Anteils auf unter 30 % des Inputs, was im Zukunft-Szenario annähernd nur bei der Sacksammlung ländlich (30,9 % bzw. 29,2 %) bei den Holsystemen erreicht wird)
- ▶ der Erzeugung von Kunststofffraktionen für die werkstoffliche Verwertung v.a. aus den Mischkunststoffen 0350

Die derzeitigen Ausbringungsraten mit hohen Anteilen an Mischkunststoffen und Sortierfraktionen, die nahezu ausschließlich energetisch verwertet werden (können) sind nicht nur durch die technischen Möglichkeiten, sondern maßgeblich auch durch wirtschaftliche Aspekte bedingt.

Rein verfahrenstechnisch bieten zwar Trenntechnologien für schwarze Kunststoffe noch ein Verbesserungspotenzial, die überwiegenden Optimierungen dürften aber den optimierten Verfahrensabläufen

(Rücklaufsartierung, Fraktionierung) zuzurechnen sein und nur bei auf die Anlage abgestimmten Durchsätzen erfolgreich sein.

Die Festlegung einer Durchsatzbegrenzung von Sortieranlagen anhand von Qualitätszielen sollte deshalb vorrangig erfolgen. Der Nachweis der Erreichung der Qualitätsziele sollte im Rahmen von immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren vorgelegt und ggf. unter Hinzuziehung von Sachverständigen auf Plausibilität geprüft werden.

Allerdings ist der Stand der Technik derzeit allenfalls in geschätzt 50 % der Sortieranlagen verfügbar. Hier besteht ein erhebliches Nachholpotenzial. Zudem entspricht die Betriebsweise der Anlagen häufig nicht den Anforderungen (zu hohe Durchsätze, nicht optimierte Einstellungen der NIR-Trenner, Verzicht auf Rückführung von schlecht aufgeschlossenen Teilströmen etc.).

Dem realen IST-Stand der Sortierung und Verwertung wurde im Gutachten durch Bezug auf die Auswertungen aller Mengenströme der dualen Systeme durch Bothe [2016] unter Einbeziehung eigener Prüferfahrungen Rechnung getragen (vgl. Kap. 7).

Anhand der Mengestromauswertungen lässt sich belegen, dass die Ausbringungsraten (gemessen an den Sortierproduktspezifikationen der Marktteilnehmer) und damit die Zuführungsraten der einzelnen Sortierprodukte zur werkstofflichen Verwertung durchweg sehr hoch liegen (>80 %). Eine Ausnahme bilden die Sortierprodukte „Mischkunststoffe (0350) mit lediglich 5,3 % und die Sortierprodukte zur energetischen Verwertung (EBS-Vorprodukte und Sortierreste) mit 0 %, die den Durchschnitt der Zuführung zur werkstofflichen Verwertung sinken lassen.

Für den eigentlichen Prozess der werkstofflichen Verwertung unterliegen die zugeführten Sortierprodukte einerseits aufgrund der spezifikationsgerechten Störstoffanteile und andererseits aufgrund Unterschieden in den Aufbereitungs-/Verwertungsverfahren einer Rezyklatausbeute zwischen 65 bis 75 % bezogen auf die Zuführungsmengen. Eine Ausnahme bilden vor allem 0420 Aluminium mit 38 % aufgrund der nur geringen Aluminiumanteile in den enthaltenen Verbundmaterialien und die PET-Fraktionen 0328-x mit etwas mehr als 50 % aufgrund des anzunehmenden Flaschenanteils.

Technisch betrachtet lassen sich sicher einige Verwertungsverfahren optimieren, vor allem durch die Kombinationen mit Nachsortierungen und Erschließung werkstofflicher Verwertungswege für derart erzeugte Fehlabbaubestandteile. Ein Beispiel ist der hohe Folienanteil in Weißblech-Fraktionen, der derzeit mit in die Metallaufbereitung gelangt.

Am ehesten ließen sich die o.g. Qualitätsziele der Sortierung über die Absenkung der zulässigen Störstoffanteile in den DS-Spezifikationen erreichen. So könnten die Störstoffanteile technisch problemlos z. B. in PE- und PP-Ballen auf max. 2 anstatt 6 % begrenzt werden und damit eine direkte Verwertung ohne abfallwirtschaftliche Vorbehandlung und Abtrennung ermöglichen. Die heutigen Extruder können geringe Störstoffanteile durch automatische Siebeinsätze verarbeiten, aber nicht 6%.

### 9.2.2 Wirtschaftliche Indikatoren

Wirtschaftliche Gründe sind eine wesentliche Ursache für den Betrieb von Sortieranlagen nach dem Stand der Technik weit unterhalb ihrer Möglichkeiten. Zukunftsinvestitionen werden regelmäßig nur getroffen, wenn eine hinreichende Langfristigkeit durch stabile gesetzliche Vorgaben und dadurch eine gewisse Preis- und damit Kostenstabilität zu erwarten ist. Beides scheint in der Vergangenheit nicht der Fall gewesen zu sein. Ein Ausbau von Kapazitäten darf dabei nicht mit einem Ausbau technologischer Möglichkeiten verwechselt werden, so dass zwar Kapazitäten angestiegen, aber gleichzeitig Anlagen auf eine geringe Sortierqualität zurückgefallen sind. Zu beobachten ist unter dem Kostendruck auch das Ausweichen auf Billiglohnländer. So finden händische „Nachsortierungen“ von z. B. PE/PP/PET-Mischungen aktuell zunehmend in asiatischen Ländern statt oder auch in der außereuropäischen Türkei, dabei werden zum Teil auch schlechtere Qualitäten angenommen und verarbeitet. Rückstände aus der Aufarbeitung werden in diesen Ländern in der Regel deponiert. Dadurch entste-

hen einerseits ökonomische Vorteile, die aber oftmals zu Lasten der Umwelt gehen. Außerdem gehen hier Mengen für die deutsche Recyclingindustrie verloren. Die Deponierung der Rückstände aus der Aufbereitung ist aus Umweltschutzsicht auch kritischer als die energetische Verwertung zu sehen.

Insbesondere die starken Schwankungen der Nachfrage und Preise für Rezyklate bewirken, dass die technischen Möglichkeiten nicht ausgeschöpft werden. Allein im Zeitraum von 2011 (Bezugsjahr der Sektoruntersuchung des Bundeskartellamtes) und dem Jahr 2014 (Bezugsjahr Mengenstromauswertungen) mit Preisansätzen aus einer Umfrage aus 2016 ergibt sich ein völlig geändertes Bild. Danach gleichen sich die Verwertungserlöse mit den Verwertungskosten bei relativ konstanten Sortierkosten nicht mehr aus, wie vom Bundeskartellamt festgestellt, sondern schlagen mit zusätzlichen Kosten von 12 bis 35 EUR/Mg zu Buche (berechnet nach Anlage 4). Die Systemkosten bewegen sich damit zwischen 0,47 EUR und 0,97 EUR/kg Rezyklatausbeute bei werkstofflicher Verwertung, jeweils unter Einbeziehung der Kosten für die Entsorgung „nicht erfasster Wertstoffe“ mit Referenzierung auf die maximal festgestellte Sammelmenge (45,8 kg/EUR\*a). Bei Anwendung des Standes der Technik lassen sich die spezifischen Kosten auf 0,30 bis 0,57 EUR/kg Rezyklatausbeute deutlich senken.

Nach Auffassung der Gutachter können die erhöhten Verwertungsquoten im Verpackungsgesetz ab 2019 sowie die Berücksichtigung der Recyclingfähigkeit und der Verwendung von Rezyklaten bei der Bemessung der Beteiligungsentgelte für duale Systeme weitere wirtschaftliche Impulse setzen.

Ein ernsthaftes Problem stellen die (derzeitigen) Preise für energetische Verwertung dar. Solange Mischkunststoffe bei der energetischen Verwertung mit 60 EUR/Mg Zuzahlung belastet sind (bei nach wie vor Verbrennungsüberkapazitäten), die werkstoffliche Verwertung aber mit 90 EUR/Mg, kann wohl kaum eine Zunahme der werkstofflichen Verwertungszuführung oberhalb der derzeitigen 5,3 % erwartet werden.

### 9.2.3 Rechtliche Rahmenbedingungen

Solange die Erfüllung der gesetzlichen Verwertungsquoten aus dem Reservoir des Überhanges aus der Sammelmenge gegenüber den Lizenzmengen sichergestellt werden kann, wird sich eine Auswirkung auf die Anlagentechnik der Sortierung und der Verzicht auf alte Anlagen kaum als notwendig erweisen.

Inwieweit die im VerpackG nur vage formulierten Instrumente, über die Lizenzkosten Anreize für recyclingfähiges Verpackungsmaterial zu schaffen, greifen, ist schwer vorauszusagen. Zum einen, weil mit der Recyclingfähigkeit noch nicht gesagt ist, dass unter den gegebenen Bedingungen der Sortiertechnik dies auch zu einer nennenswerten Erhöhung der Ausbringung beiträgt. Hier ist auch häufig eine Erhöhung des Siebschnittes mit Anstieg der Feinkorngröße von 20 auf 40 oder sogar auf 60 mm zu beobachten, was in der Regel zu erhöhten Wertstoffanteilen in den Restfraktionen nach den Metallscheidern führt. Diese Wertstoffanteile sind zwar „recyclingfähig“, werden aber dem Recycling nicht zugeführt. Die künftige Definition der Recyclingfähigkeit sollte daher die realen Entwicklungen bei Sortieren und Recycling einbeziehen. Zum anderen dürfte dieses Instrument des „Ökodesigns“ allenfalls mittel- bis langfristig wirken.

Selbst Anlagenbetreiber sind oftmals erstaunt über die geringen Auflagen und Kontrollen der Durchsatzleistungen von Sortieranlagen. In persönlichen Gesprächen wurde immer wieder erklärt, dass die Anlagendurchsätze sich nahezu ausschließlich an den Leistungsdaten der Aggregate orientieren (technische Durchsatzleistung), nicht aber an den Merkmalen der Sortierprodukte. Auch sind Überschreitungen der genehmigten Kapazitäten um bis zu 50 % keine Seltenheit. Der unmittelbare Zusammenhang erhöhter Durchsätze auf die Produktqualität der Sortierprodukte wurde bereits dargelegt, so dass rechtlich eine bessere Genehmigungs- und Überwachungspraxis der Leistungsdaten sinnvoll erscheint.

## 9.3 Gesamtbewertung der Systeme im Vergleich

### 9.3.1 Schlussfolgerungen auf Basis der ökologischen Auswirkungen

Wie im Abschnitt 8.1.2 dargestellt sind für die ökologische Effizienz des Gesamtsystems die Sammelmenge, die Sammelqualität sowie die Aufwendungen für den Individualtransport ausschlaggebend. Für die nachfolgenden quantitativen Ergebnisse gilt 1 Mio. Einwohner als Bezugsgröße. Ein Bezug auf die Sammelmenge ändert nichts an der Bewertung, verstärkt lediglich die schlechten Ergebnisse für Systeme mit vergleichsweise geringen Sammelergebnissen („Depotcontainer“, „Wertstoffhof“).

#### 9.3.1.1 Klimaerwärmungspotenzial

Die höchsten Beiträge zur Senkung des Klimaerwärmungspotenzials weisen die Holsysteme im ländlichen Raum mit Werten zwischen -23.572 („Gelber Sack ländlich“) und -37.084 Mg CO<sub>2</sub>-Äq./1 Mio. Einwohner („Wertstoffsack ländlich“) auf<sup>33</sup>. Ausschlaggebend sind hohe Erfassungsmengen an LVP und StNVP verbunden mit guten Sammelqualitäten sowie der fehlende Individualtransport. Die städtischen Holsysteme mit ihren geringeren Sammelmengen weisen dagegen geringere Nettogutschriften von -11.469 („Gelbe Tonne städtisch“) und -16.534 Mg CO<sub>2</sub>-Äq./1 Mio. Einwohner („Wertstofftonne städtisch“) auf. Die Systeme „Depotcontainer“ (-1.542 Mg CO<sub>2</sub>-Äq./1 Mio. Einwohner) und „Wertstoffhof“ (57.738 Mg CO<sub>2</sub>-Äq./1 Mio. Einwohner) werden am schlechtesten bewertet, der Wertstoffhof sogar mit einer deutlichen Klimabelastung. Ursache sind die geringen Erfassungsmengen und die hohen Aufwendungen für den Individualtransport. Auch eine Erhöhung der Erfassungsmengen würde bei diesen Systemen nicht zu einer Verbesserung des Ergebnisses beitragen, da gleichzeitig die Aufwendungen für den Individualtransport steigen würden.

Daraus lassen sich folgende Schlussfolgerungen ableiten:

1. Ausschlaggebend für die Effizienz von Holsystemen aus Sicht des Klimaerwärmungspotenzials ist die Sammelmenge. Eine Steigerung der Sammelmenge hat grundsätzlich eine positive Wirkung, selbst, wenn sich dabei der Anteil an energetisch zu verwertenden EBS erhöht. Der positive Effekt einer energetischen Verwertung wird sich dabei zukünftig aufgrund des wachsenden Anteils regenerativer Energieträger reduzieren. Insofern kommt der Sammelqualität in Hinblick auf die Ausbeute werkstofflich verwertbarer Fraktionen eine wachsende Bedeutung zu. Die gemeinsame Erfassung von LVP und StNVP mittels Wertstofftonne oder Wertstoffsack verringert das Klimaerwärmungspotenzial grundsätzlich und sollte gefördert werden. Ein erhebliches Potenzial besteht insbesondere in der Verbesserung der Sammlung in städtischen Gebieten.
2. Bringsysteme sind aus Sicht des Klimaerwärmungspotenzials aufgrund des Individualtransports mit dem PKW auch unter Berücksichtigung von Koppelfahrten, bspw. zum Einkaufen, ineffizient. Dies gilt umso mehr, je weitere Entfernungen zum Erfassungssystem zurückgelegt werden müssen. Eine bessere Sammelqualität oder eine Steigerung der Erfassungsmengen heben diesen Nachteil nicht auf.

#### 9.3.1.2 Primärenergieaufwand

Kennzeichnend für den Primärenergieaufwand, ausgedrückt als kumulierter Energieaufwand (KEA) ist, dass im Gegensatz zum GWP auch die Verwertung der nicht erfassten LVP und StNVP in MVA aufgrund der Energiegewinnung eine Gutschrift erzeugt. Aus diesem Grund hat die Erfassungsmenge auf diesen Indikator einen geringeren Einfluss und die Unterschiede zwischen den Holsystemen in ländlichen und städtischen Gebieten sind nicht so deutlich wie beim GWP. Dennoch weisen auch hier Holsysteme in den ländlichen Gebieten die höchste Effizienz auf. Der KEA bewegt sich in ländlichen Gebieten zwischen -798 („Wertstoffsack ländlich“) und -692 TJ/1 Mio. Einwohner („Gelbe Tonne ländlich“).

<sup>33</sup> Die höchsten Gutschriften müssten für die „Wertstofftonne ländlich“ zu erwarten sein. Die Auswertung der verfügbaren Daten ergab jedoch für dieses Modell geringere Erfassungsmengen. Die Ursachen wurden im Abschnitt 4.4 diskutiert.

Die Holsysteme im städtischen Bereich weisen einen KEA von -662 („Wertstofftonne städtisch“) und -637 TJ/1 Mio. Einwohner („Gelbe Tonne städtisch“) auf. Schlechter schneidet das System „Depotcontainer“ (-579 TJ/1 Mio. Einwohner) ab. Einen Primärenergieaufwand weist mit einem KEA von 42 TJ/1 Mio. Einwohner das System „Wertstoffhof“ auf.

Aus den Ergebnissen der Bilanzierung des Primärenergieaufwandes lassen sich deutlichere Schlussfolgerungen als im vorstehenden Abschnitt zum Klimaerwärmungspotenzial ableiten. Durch die energetische Verwertung nicht erfasster LVP und StNVP in der MVA ergibt sich eine Nettogutschrift. Die spezifischen Gutschriften der werkstofflichen Verwertung sind aber deutlich höher als die der energetischen Verwertungsverfahren. Im Vergleich des IST- und des ZUKUNFT-Szenarios ergibt sich, dass eine optimierte Sortierung deutlich zur Erhöhung der Nettogutschrift zum KEA beiträgt und demzufolge aus ökologischer Sicht gefördert werden sollte.

### 9.3.2 Schlussfolgerungen auf Basis der Gesamtkosten

Werden die Gesamtkosten der Systeme auf 1 Mio. Einwohner bezogen, weisen die Systeme „Gelbe Tonne ländlich“ mit 15,2 Mio. EUR (aufgrund der hohen Sammelmenge) und „Wertstoffhof“ mit 13,7 Mio. EUR (aufgrund der Kosten des Individualtransports) die höchsten Kosten auf. Am Kostengünstigsten ist das System „Depotcontainer“ mit 9,9 Mio. EUR (aufgrund der geringen Sammelkosten).

Da sich aus diesen Ergebnissen keine Empfehlungen ableiten lassen, wurden im Abschnitt 8.1.1 die Kosten auch auf die Erfassungsmenge bezogen. Dabei wird deutlich, dass die Erfassung durch das System „Wertstoffhof“ mit 1.256 EUR/Mg das mit Abstand teuerste System ist. Alle anderen Systeme kosten zwischen 293 und 402 EUR/Mg.

Deutlicher lassen sich die Systeme differenzieren, wenn man die Sammelqualität einbezieht und die Kosten auf die Rezyklatausbeute bezieht. Mit 2.862 EUR bleibt der „Wertstoffhof“ das teuerste System. Am kostengünstigsten sind die Systeme, welche hohe Sammelmengen bei gleichzeitig guter Erfassungsqualität generieren. Dies sind vor allem die Sacksammlungen in den ländlichen Gebieten. Mit 1.077 EUR/Mg („Wertstoffsack ländlich“) bzw. 1.404 EUR/Mg („Gelber Sack ländlich“) weisen diese Systeme die geringsten Kosten auf und sind somit sogar kostengünstiger als die „Gelbe Tonne ländlich“ (1.604 EUR/Mg), welche die höchste Erfassungsmenge erzeugt.

Aus diesen Feststellungen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

1. Individualtransporte sind kostenintensiv und beeinflussen die Kosteneffizienz der Systeme in erheblichem Maße negativ. Dies gilt insbesondere bei geringen Sammelmengen (System „Wertstoffhof“), während eine hohe Kosteneffizienz in den nachgelagerten Bereichen der Erfassung, diesen Kostennachteil aufwiegen kann (System „Depotcontainer“).
2. Kosteneffizient sind Systeme mit hohen Erfassungsmengen.
3. Eine gute Erfassungsqualität steigert die Ausbeute zur werkstofflichen Verwertung und führt somit zu einer hohen Kosteneffizienz auf der Rezyklatseite.

## 9.4 Abschließende Empfehlungen

Grundsätzlich ist die Erfassung von LVP gemeinsam mit StNVP aus Sicht der ökologischen und ökonomischen Effizienz empfehlenswert, da mit der gemeinsamen Erfassung die erfassten Mengen gesteigert werden und damit auch die Effizienz steigt.

Auch wenn die Erfassung mit dem System „Depotcontainer“ bei Nichtberücksichtigung der Kosten des Individualtransports sehr kosteneffizient erscheint, kann eine Neueinrichtung derartiger Systeme nicht empfohlen werden, da die Sammelmenge der Holsysteme mit diesem System nicht erreicht werden kann. In Gebieten, in denen diese Systeme etabliert sind, kann eine Optimierung hinsichtlich der Steigerung der Sammelmengen (bspw. durch bürgerfreundlichere Ausgestaltung und intensivierete Öffentlichkeitsarbeit) sinnvoll sein.

Holsysteme sind bei der Erfassung grundsätzlich zu bevorzugen, da sie sowohl ökologisch als auch ökonomisch (hier zumindest im Vergleich zum System „Wertstoffhof“) deutliche Vorteile aufweisen.

Sacksammlungen besitzen gegenüber Behältersammlungen Vorteile bei der Erfassungsqualität. In ländlichen Gebieten kann deren Einsatz insofern sinnvoll sein und sollte unter Berücksichtigung der vorhandenen Nachteile (insbesondere Ortsbild, Verwehungen, Zerstörung von Säcken durch Tiere) abgewogen werden. Durch entsprechende Ausgestaltung der Erfassung (bspw. zentrale Sammelpunkte) sowie durch intensivierete Öffentlichkeitsarbeit (bspw. Sensibilisierung der Bevölkerung für den optimalen Zeitpunkt der Bereitstellung) können diese Nachteile minimiert werden.

Bei der Behältersammlung ist insbesondere in städtischen Gebieten durch verstärkte Öffentlichkeitsarbeit (ggf. auch durch Sanktionierung fehlgefüllter Behälter) auf eine Verbesserung der Erfassungsqualität hinzuwirken.

Die ökonomischen Optimierungspotenziale in der Logistik (bspw. durch Streckung des Sammelturnus) sind im Vergleich zur derzeitigen Praxis eher gering. Auch die Akzeptanz solcher Maßnahmen ist als gering anzusehen. Ob sich die Nachteile mit den geringen Vorteilen rechtfertigen lassen sollte abgewogen werden.

Die analysierten Zusammenhänge der Sortierung und Verwertung mit Blick auf eine erhöhte Wertstoffausbeute bei gegebenem Sammlungsinput wurden vor dem Hintergrund geeigneter erscheinender technischer, wirtschaftlicher und rechtlicher Maßnahmen diskutiert und hieraus Empfehlungen abgeleitet.

Die Materialzusammensetzung (Verbundanteile) ist teilweise für ein werkstoffliches Recycling schwierig. Dies kann aber nur auf der Ebene des Verpackungsdesigns gelöst werden. Bei Sortierung und Verwertung gibt es folgendes Optimierungspotential.

Empfehlungen für die Sortierung und Verwertung:

1. Konsequenter Ausbau der Sortieranlagen in Deutschland nach dem Stand der Technik. Damit lässt sich bei gegebener Sammelgutzusammensetzung die Zuführung zur werkstofflichen Verwertung zwischen 25 und 56 % gegenüber dem IST-Stand (MSN 2014) erhöhen. Dies entspricht (ohne Wertstoffhof) 3,2 bis 10,3 kg/(EW\*a) zusätzlich werkstofflich verwertbarer Sammlungsanteile bzw. einer durchschnittlichen Steigerung des Outputs an Rezyklat um 70 bis 72 %.
2. Reduzierung der bisher energetisch verwerteten Fraktionen 0361, 0365 und 0830 durch verbesserte Wertstoffsartierung zur werkstofflichen Verwertung (z. B. Senkung der Feinkornsgrenze und/oder Verbesserung der Nachsortierung über die Metallabscheidung hinaus, Begrenzung des EBS/Sortierreste-Anteils auf unter 30 % des Inputs).
3. Möglichst vollständige Kunststoffartentrennung zumindest an HDPE/LDPE, PP, PS und Reduzierung der Mischkunststoffe.
4. Reduzierung der Folienanteile in der Weißblechfraktion. Die bis zu 12 % Folien in der Weißblechfraktion gehen unmittelbar für eine werkstoffliche Verwertung verloren.
5. Einführung bzw. Erweiterung bestehender Altanlagen auf den Stand der Technik insbesondere durch folgende technische Maßnahmen zur Verbesserung der Qualität und damit der Verwertung bzw. Vermarktbarkeit:
  - a. Trennung schwarzer Kunststoffe,
  - b. verbesserte Verfahrensabläufe z. B. durch Nachsortierung von Rückläufen schlecht aufgeschlossener Teilströme,
  - c. Optimierung der Einstellung der NIR-Trennung,
  - d. Angemessene Anlagendurchsätze. Die Festlegung einer Durchsatzbegrenzung von Sortieranlagen anhand von Qualitätszielen sollte vorrangig verfolgt werden.

Die Verbesserung der Ausgangsqualität der Sortierprodukte kann von den dualen Systemen durch Absenkung der zulässigen Störstoffanteile in den DS-Spezifikationen erzwungen werden. So sollte die Erhöhung der Sortenreinheit von Kunststoffarten wie PE, PP oder PS auf 98 % anstatt 94 % angehoben werden. Dies ermöglicht eine direktere werkstoffliche Verwertung ohne erneute Vorabtrennung von Fremdstoffen. Darüber hinaus sollte die abschlagsfrei Annahme von Weißblech mit teilweise 12 % Folienanteil abgeschafft werden.

Die Realisierung der vorgenannten Maßnahmen hängt von einer Reihe von wirtschaftlichen und rechtlichen Randbedingungen ab:

1. Die Menge erzeugter Mischkunststoffe, die derzeit mit etwa 85 % energetisch verwertet werden lässt sich bei Anwendung des Standes der Technik und bei derzeitiger Zusammensetzung lediglich um 30 % zugunsten sortenreiner Kunststoffarten senken. Weitere Reduzierungen des MK-Anteils bedürfen Änderungen des Sammelgutes bzw. der Verpackungsmaterialien, die die Zusammensetzung des Sammelgutes bestimmen. Am Beispiel der Aluminiumverwertung (nur 38 % Rezyklat aufgrund des hohen Verbundanteils) lässt sich zeigen, wie stark ein hoher Verbundanteil die Rezyklatausbeute senkt.
2. Wirtschaftliche Gründe sind eine wesentliche Ursache für den Betrieb von Sortieranlagen nach dem Stand der Technik weit unterhalb ihrer Möglichkeiten. Zukunftsinvestitionen werden regelmäßig nur getroffen, wenn eine hinreichende Langfristigkeit durch stabile gesetzliche Vorgaben und dadurch eine gewisse Preis- und damit Kostenstabilität zu erwarten ist. Direkter wirkt sich die Nachfragesituation nach Rezyklaten durch ökonomische Anreize zur Förderung des Einsatzes. Entsprechende Anreizsysteme stehen vor dem Problem, dass nicht sicher bestimmt werden kann ob, zu welchen Anteilen und aus welchen Quellen Rezyklate bei der Produktion eingesetzt wurden.
3. Dem Kostendruck von Zuzahlungen bei der Verwertung wird häufig mit Erhöhung des Anlagenumsatzes entgegen gesteuert. Ein ernsthaftes Problem stellen die (derzeitigen) Preise für energetische Verwertung in Deutschland dar. Da Mischkunststoffe bei der energetischen Verwertung mit 60 EUR/Mg Zuzahlung belastet sind, die werkstoffliche Verwertung aber mit 90 EUR/Mg, geht diese Fraktion vornehmlich in die energetische Verwertung.
4. Die rechtlichen Vorgaben (Verwertungsquoten) werden mit dem neuen Verpackungsgesetz deutlich angehoben. Es dürfte künftig schwerer fallen, die Quoten allein aufgrund der Lücke zwischen Lizenzmenge (= in Verkehr gebrachte Menge) und Sammelmenge zu erfüllen.
5. Die Spezifikationen der Sortierprodukte sollten qualitativ erhöht werden, um größere Mengen höherwertige Sortierprodukte unter dem Nachfragedruck aufgrund gesetzlicher Verwertungsquoten bereitzustellen.

## 10 Quellenverzeichnis

AT Kearney [2016]: Auswirkung der geplanten Erhöhung der Recyclingquoten im Entwurf des VerpackG auf die LVP-Systemkosten, Zusammenfassung der Studie

BIFA [2011]: Wertstoffhöfe, Gelber Sack und Wertstofftonne – Eine Ökoeffizienz- und Akzeptanzanalyse für Bayern am Beispiel Zweckverband für Abfallwirtschaft Kempten, veröffentlicht unter bifa-Text Nr. 55

Bünemann, A.; Christiani, J.; Rachut, G. u.a. [2011]: Planspiel zur Fortentwicklung der Verpackungsverordnung, Teilvorhaben 1. Bestimmung der Idealzusammensetzung der Wertstofftonne. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. UBA-Texte 8/2011. Dessau-Roßlau

Bothe, D. [2016]: SUBV Bremen, diverse bereitgestellte Daten als Excel-Dateien, in dieser Form überwiegend unveröffentlicht:

Auswertung MSN 2013 und Kunststoffe 2014. Excel-Datei. Bremen, 09/2016

Auswertung MSN 2011 bis 2015. Excel-Datei. Bremen, 10/2016

Daten Umweltkanzlei 2. Excel-Datei. Bremen, 11/2016

Kunststoffe UK neu. Excel-Datei. Bremen, 11/2016

Duale Wertstofffassung - Daten, Mengen, Effizienz. Ingolstadt, 09/2016

Bundeskartellamt [2012]: Sektoruntersuchung duale Systeme: Zwischenbilanz der Wettbewerbsöffnung. Bonn

Christiani, J. [2016]: Bestätigung zu den Fortschreibungsergebnissen der Verbundanalyse für 2015. Aachen

Dehoust, G. u. J. Christiani [2012]: Sammel- und Verwertungsquoten für Verpackungen und stoffgleiche Nichtverpackungen als Lenkungsinstrument zur Ressourcenschonung. UBA-Texte

40/2012. [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz\\_3711\\_33\\_316\\_verwertungsquote\\_wertstoffe\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3711_33_316_verwertungsquote_wertstoffe_bf.pdf), zuletzt abgerufen am 30.05.2017

Dehoust, G.; Möck, A.; Merz, C. u. P. Gebhardt [2016]: Umweltpotenziale der getrennten Erfassung und des Recyclings von Wertstoffen im Dualen System - Bilanz der Umweltwirkungen [https://www.gruener-punkt.de/fileadmin/layout/redaktion/Nachhaltigkeit/Studie-Oeko-Institut/16-09-21\\_OEko-Institut\\_Abschlussbericht\\_LCA-DSD.PDF](https://www.gruener-punkt.de/fileadmin/layout/redaktion/Nachhaltigkeit/Studie-Oeko-Institut/16-09-21_OEko-Institut_Abschlussbericht_LCA-DSD.PDF), zuletzt abgerufen am 30.05.2017

DSD [2016]: Der Grüne Punkt - Duales System Deutschland GmbH: Spezifikationen. aufgerufen am 05.07.2016. Köln-Porz-Eil. Download unter: <https://www.gruener-punkt.de/de/impressum.html>

EUWID [2017]: EUWID, Ratsarbeitsgruppe will niedrigere Zielvorgaben in Verpackungsrichtlinie, 14.3.2017

GEMIS 4.95 [2017]: Globales Emissions-Modell integrierter Systeme. <http://iinas.org/gemis-de.html>, zuletzt abgerufen am 30.05.2017

Kerber [2016]: Der Wertstoffhof: Was erwarten unsere Kunden? Präsentation auf der UNIKAT-Fachtagung „Wertstoffhof -Chancen, Entwicklungen“, Kassel

LAGA M 37 [2015]: Mitteilung der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (Laga) 37 „Umsetzung der Verpackungsverordnung“ - „Anforderungen an Hersteller und Vertreiber, Betreiber von Systemen und Branchenlösungen sowie an beauftragte Dritte, Sachverständige, Wirtschaftsprüfer, Steuerberater und vereidigte Buchprüfer“ (23.09.2015). Herausgegeben von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)

LAGA M 37 [2017]: Mitteilung der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (Laga) 37 „Umsetzung der Verpackungsverordnung“ - „Anforderungen an Hersteller und Vertreiber, Betreiber von Systemen und Branchenlösungen sowie an beauftragte Dritte, Sachverständige, Wirtschaftsprüfer, Steuerberater und vereidigte Buchprüfer“ (08.02.2017). Herausgegeben von der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)

Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz NRW (Hrsg.), [2005]: Ökologische und ökonomische Bewertung von Sammelsystemen für Haushaltsabfälle in Nordrhein-Westfalen, Eigenverlag

Rhein, H.-B. [2012]: Wertschöpfung aus der Wertstofftonne?. Zeitschrift Kommunalwirtschaft 04/2012. S. 258-264

USV-workshop [2016]: Workshop des USV e.V. zur inhaltlichen Gestaltung der Zertifikate von Letztempfängeranlagen, Bonn 04/2016

VerpackV [2014]: Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen (Verpackungsverordnung) vom 21.08.1998 (BGBl. I S. 2379), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 17. Juli 2014 (BGBl. I S. 1061) geändert worden ist

Wagner, J.; Heidrich, K.; Baumann, J.; Kügler, Th. u. J. Reichenbach [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. <http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4275.pdf>, zuletzt abgerufen am 30.05.2017

wme.fact [2016]: wme.fact-stammdaten, Produktspezifikationen und Stammdaten Duales System Deutschland, 2016

## 11 Anlagen

LVP-Erfassungsmenge für die unterschiedlichen Erfassungssysteme

(= "Eingang Sortieranlage")

Gewählte Parameter in diesem Tabellenblatt								
LVP-Erfassungsmenge [kg/E*a]	30,4	34	38,7	27	45,8	43,5	24,7	10,9
Einwohner (Normierungsgröße)	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000

Ebene 2	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]
Aluminiumhaltig / NE-Metall	919	1.301	1.254	754	1.081	1.327	989	297
Eimer, Kanister	406	567	621	326	562	584	254	0
Folien < DIN A 4	2.282	3.122	3.457	1.958	3.471	4.327	2.634	0
Folien > DIN A 4	1.565	2.041	2.376	1.259	2.331	2.804	1.618	991
PET Flaschen transparent	413	592	624	379	642	829	530	103
PET sonstig	490	639	741	408	763	985	630	275
Polyethylen (PE)	1.053	1.471	1.594	931	1.618	2.050	1.277	256
Polypropylen (PP)	2.392	3.163	3.622	2.002	3.673	4.647	2.889	577
Polystrol (PS)	651	841	986	527	985	1.218	733	622
sonstige Kunststoffe	4.184	4.795	6.372	2.889	6.024	6.802	3.524	4.459
FKN	1.722	2.894	1.786	1.721	2.936	4.046	2.365	1.239
PPK Verbunde	141	224	134	230	393	300	195	99
trennbare Kombi VP	318	460	303	383	890	679	441	0
Weißblech / Fe-Metall	2.897	3.133	3.477	2.018	3.170	4.437	2.748	1.982
PPK, kein LVP	3.592	2.165	2.921	4.131	4.214	1.022	618	0
ungeeignetes LVP Material	7.375	6.594	8.432	7.084	13.047	7.445	3.256	0
<b>Summe</b>	<b>30.400</b>	<b>34.000</b>	<b>38.700</b>	<b>27.000</b>	<b>45.800</b>	<b>43.500</b>	<b>24.700</b>	<b>10.900</b>
Anteil Kunststoffe	13.436	17.230	20.393	10.679	20.069	24.245	14.088	7.283

Mittelwert (1-7)	Standardabw. (1-7)	mittlere Abw.	Min	Max
[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]
1.089	216	175	754	1.327
474	144	125	254	621
3.036	810	638	1.958	4.327
1.999	545	444	1.259	2.804
573	152	113	379	829
665	190	141	408	985
1.428	379	292	931	2.050
3.198	883	670	2.002	4.647
849	235	184	527	1.218
4.941	1.500	1.250	2.889	6.802
2.496	864	683	1.721	4.046
231	91	66	134	393
496	214	165	303	890
3.126	738	490	2.018	4.437
2.666	1.450	1.198	618	4.214
7.605	2.903	1.791	3.256	13.047
34.871	8.111	6.682	24.700	45.800
17.163	4.733	3.796	10.679	24.245

Ebene 2	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Aluminiumhaltig / NE-Metall	3,0%	3,8%	3,2%	2,8%	2,4%	3,1%	4,0%	2,7%
Eimer, Kanister	1,3%	1,7%	1,6%	1,2%	1,2%	1,3%	1,0%	0,0%
Folien < DIN A 4	7,5%	9,2%	8,9%	7,3%	7,6%	9,9%	10,7%	0,0%
Folien > DIN A 4	5,1%	6,0%	6,1%	4,7%	5,1%	6,4%	6,5%	9,1%
PET Flaschen transparent	1,4%	1,7%	1,6%	1,4%	1,4%	1,9%	2,1%	0,9%
PET sonstig	1,6%	1,9%	1,9%	1,5%	1,7%	2,3%	2,5%	2,5%
Polyethylen (PE)	3,5%	4,3%	4,1%	3,4%	3,5%	4,7%	5,2%	2,3%
Polypropylen (PP)	7,9%	9,3%	9,4%	7,4%	8,0%	10,7%	11,7%	5,3%
Polystrol (PS)	2,1%	2,5%	2,5%	2,0%	2,2%	2,8%	3,0%	5,7%
sonstige Kunststoffe	13,8%	14,1%	16,5%	10,7%	13,2%	15,6%	14,3%	40,9%
FKN	5,7%	8,5%	4,6%	6,4%	6,4%	9,3%	9,6%	11,4%
PPK Verbunde	0,5%	0,7%	0,3%	0,9%	0,9%	0,7%	0,8%	0,9%
trennbare Kombi VP	1,0%	1,4%	0,8%	1,4%	1,9%	1,6%	1,8%	0,0%
Weißblech / Fe-Metall	9,5%	9,2%	9,0%	7,5%	6,9%	10,2%	11,1%	18,2%
PPK, kein LVP	11,8%	6,4%	7,5%	15,3%	9,2%	2,4%	2,5%	0,0%
ungeeignetes LVP Material	24,3%	19,4%	21,8%	26,2%	28,5%	17,1%	13,2%	0,0%
<b>Summe</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>
Anteil Kunststoffe	44,2%	50,7%	52,7%	39,6%	43,8%	55,7%	57,0%	66,8%

Mittelwert (1-7)	Standardabw. (1-7)	mittlere Abw.	Min	Max
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
3,2%	0,6%	0,4%	2,4%	4,0%
1,3%	0,2%	0,2%	1,0%	1,7%
8,7%	1,3%	1,1%	7,3%	10,7%
5,7%	0,7%	0,6%	4,7%	6,5%
1,7%	0,3%	0,2%	1,4%	2,1%
1,9%	0,4%	0,3%	1,5%	2,5%
4,1%	0,7%	0,5%	3,4%	5,2%
9,2%	1,6%	1,2%	7,4%	11,7%
2,4%	0,4%	0,3%	2,0%	3,0%
14,0%	1,8%	1,3%	10,7%	16,5%
7,2%	1,9%	1,6%	4,6%	9,6%
0,7%	0,2%	0,2%	0,3%	0,9%
1,4%	0,4%	0,3%	0,8%	1,9%
9,1%	1,5%	1,1%	6,9%	11,1%
7,9%	4,7%	3,6%	2,4%	15,3%
21,5%	5,4%	4,2%	13,2%	28,5%
49,1%	6,7%	5,6%	39,6%	57,0%

Ebene 1	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]
Systemzugehörige LVP-Verpackung	14.085	20.732	20.071	13.051	22.203	28.394	18.375	10.900
geeignetes Zusatzmaterial im LVP	5.347	4.508	7.275	2.734	6.337	6.639	2.451	0
Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	10.967	8.759	11.354	11.215	17.260	8.467	3.874	0
<b>Summe</b>	<b>30.400</b>	<b>34.000</b>	<b>38.700</b>	<b>27.000</b>	<b>45.800</b>	<b>43.500</b>	<b>24.700</b>	<b>10.900</b>

Ebene 1	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Systemzugehörige LVP-Verpackung	46,3%	61,0%	51,9%	48,3%	48,5%	65,3%	74,4%	100,0%
geeignetes Zusatzmaterial im LVP	17,6%	13,3%	18,8%	10,1%	13,8%	15,3%	9,9%	0,0%
Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	36,1%	25,8%	29,3%	41,5%	37,7%	19,5%	15,7%	0,0%
<b>Summe</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>	<b>100,0%</b>

Anteil PPK (ohne PPK Verbunde)								
Feinsortierung Intecus Ebene 3	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
Papier VP [Mg]	1.626	971	1.323	1.795	1.907	463	280	0
Papier-NV [Mg]	1.319	797	1.073	1.560	1.548	376	227	0
Papier, Zellstoff -NV [Mg]	646	397	526	776	758	184	111	0
<b>Summe [Mg]</b>	<b>3.592</b>	<b>2.165</b>	<b>2.921</b>	<b>4.131</b>	<b>4.214</b>	<b>1.022</b>	<b>618</b>	<b>0</b>
Anteil an der Gesamterfassung [%]	11,8%	6,4%	7,5%	15,3%	9,2%	2,4%	2,5%	0,0%



Auswertung der Mengenstromnachweise aller dualen Systeme MSN 2014 - Bothe [2015] und Umweltkanzlei

Datenbasis für Szenarien  
Zuführung der LVP-Sortierfraktionen zur Verwertung

Bestimmung der Anteile, die als Ausgangsfraktionen der Sortieranlage in Anlagen zur werkstofflichen Verwertung gelangen (=Quote Zuführung (werk-)stofflich)

grün markierte Zahlen sind real nach Bothe [2015]  
Grau markierte Zahlen sind geschätzt und nicht relevant (werden nicht verwendet)



Zuführungsmengen gesamt Verwertung				der (werk-) stofflichen Verwertung zugeführte Masse an Sortierprodukten [Mg]		Quote Zuführung (werk-)stofflich	Bemerkungen	
FRAKTION	der Verwertung zugeführte Masse an Sortierprodukten [Mg]							
0310-0	75.810	152.664	152.664	193.001	Folien	150.334	98%	
0310-1/2	76.854				Flaschen (WSTH)	4.411	92%	
0320-0	4.776	4.776	PO Flaschen (WSTH)		14.387	100%		
0321-0	14.387	14.387	Hohlkörper > 5l		10.327	97%		
0322-0	10.700	10.700	PP		80.846	99%		
0324-0	81.338	81.338	PET(Flaschen)		11.417	93%	Rest energetisch bzw. nicht als werkstofflich anerkannte Menge	
0325-0	4.375	12.276	PET(Blisters)		27.216	82%	Rest energetisch bzw. nicht als werkstofflich anerkannte Menge	
0328-1	7.901		PE		23.454	100%		
0328-0	23.213	33.011	Becher (WSTH)		2.141	100%		
0328-2	9.798	9.798	Polystyrol (PS)		9.843	99%		
0329-0/1	23.490	23.490	EPS (Styroopor®)		973	99%		
0330-0	2.141	2.141	MPO		37.166	37.166	98%	
0331-0	9.904	9.904	Misch-KS		39.044	39.044	5,3%	rohstofflich zusätzlich ca. 8,9 %
0340-0	829	978	Formstabile KS		13.155	13.155	92%	Rest energetisch bzw. nicht als werkstofflich verwertete Menge anerkannt
0340-1/2	149		Weißblech	261.778	261.778	100%		
0323-0	37.881	37.881	Aluminium	60.746	60.746	100%		
0350-0	475.555	733.249	733.249	sonstige Wertstoffe (SNVP)	7.061	7.061	100%	
0350-4	29.866			FKN	128.153	128.153	100%	
0350-5	99			PPK/PPK-VB aus LVP	36.597	36.597	82%	
0350-6	960			KEG = EBS Vorprodukt	0	0	0%	
0352-0	226.769			Sortierreste	0	0	0%	
0351-0	6.623	14.328	14.328	0830-1	130	596.468	596.468	
0351-1	3.092			0830-2	781			
0351-3	1.187			831	164.138			
0351-4	135			880	17.775			
0351-5	3.291			<b>2.405.093</b>	<b>2.405.093</b>			<b>2.405.093</b>
410	75.645	261.778	261.778					
412	186.133	60.746	60.746					
420	60.746	60.746	60.746					
Sonstige Wertstoffe (430, 435, 440, 360 etc)	7.061	7.061	7.061					
510	128.153	128.153	128.153					
550	44.631	44.631	44.631					
0361-0	55.291	55.291	55.291					
0365-0	119.842	119.842	119.842					
830	413.644							

## Recyclinganteil / Rezyklatausbeute der Verwertungsanlagen

Datenbasis für Szenarien

Ausweisung der Rezyklatausbeute der belieferten Verwertungsanlagen in bezug auf die angelieferten Sortierprodukte der Sortieranlagen



Sortierfraktionen	Fraktion	durchschnittliche Ausbringsquote	n	Range	Recyclinganteil / Rezyklatausbeute	Bemerkung
0310	Folie (0310-0/0310-1)	73%	39	47 % - 95 %	72,5%	
0320	0320	75%	8	63 % - 85 %	65,0%	Kombination aus Nachsortierung und PE/PP bzw. PET Aufbereiter
0321	PO KS_Flaschen (0321)	76%	24	63 % - 90 %	65,0%	Kombination aus Nachsortierung und PE/PP bzw. PET Aufbereiter
0322	Hohlkörper (0322)	76%	30	63 % - 90 %	75,0%	
0323	MPO (0323/0350-4)	65%	9	39 % - 80 %	65,0%	
0324	PP (0324)	76%	39	63 % - 98 %	75,0%	
0328-1	PET Flaschenanteil > 90 %	76%	12	65 % - 91 %	75,0%	
0328-2	PET 0328-2	52,50%		75 % des Flaschenanteils	52,5%	Annahme Flaschenanteil 75%
0328-x	PET 0328-x	52,50%		75 % des Flaschenanteils	52,5%	Annahme Flaschenanteil 75%
0329	PE (0329)	76%	40	47 % - 95 %	75,0%	
0330	Becher (0330)	70%	5	63 % - 85 %	65,0%	Kombination aus Nachsortierung und PE/PP bzw. PS (PET) Aufbereiter
0331	PS (0331)	77%	12	63 % - 95 %	75,0%	
0340	EPS (0340)	88%	7	80 % - 98 %	87,5%	
0350	Mischkunststoffe	66%	13	39 % - 85 %	65,0%	
0351	FSK (ohne schwarze KS)	65%	8	39 % - 83 %	65,0%	
0351-5	FSK schwarze KS	56%	3	43 % - 69 %	55,0%	
0360	Stoffgleiche Kunststoffe				55,0%	Annahme: wie 0351-5
0361	KEG = EBS				0,0%	
0365	EBS				0,0%	
412	Weißblech				80,0%	
420	Aluminium				<b>38,0%</b>	
430	Stoffgleiches Fe-Metall				80,0%	Annahme wie Weißblech
435	Stoffgleiche NE-Metalle				80,0%	Annahme wie Weißblech
440	Elektronikalgeräte				70,0%	inkl. KS
510	Getränk Kartonagen				75,0%	inkl. Alu und KS teilweise
550	PPK und PPK-VB aus LVP				75,0%	
830	Sortierreste				0,0%	

Sortierprodukte für die unterschiedlichen Erfassungssysteme (IST - Szenarium)

(= Ausgang Sortieranlage)

	Gewählte Parameter in diesem Tabellenblatt									
	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP		0 LVP Musterzusammensetzung UK
Erfassungsmenge [kg/E*a]	30,4	34	38,7	27	45,8	43,5	24,7	10,9		34,128
Einwohner (Normierung)	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000		1.000.000

DS Fraktion	Bezeichnung	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
		[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]
1	0310	Folien	1.330	1.735	2.019	1.070	1.982	2.383	1.375
2	0320	Flaschen / PO Flaschen	20	26	30	17	30	38	24
3	0321	Flaschen / PO Flaschen	177	238	269	151	272	342	212
4	0322	Hohlkörper > 5 l	136	189	207	109	188	195	85
5	0323	MPO	467	627	707	396	715	901	557
6	0324	Polypropylen	1.004	1.337	1.519	848	1.547	1.969	1.234
7	0329	Polyethylen	281	395	426	251	434	553	347
8	0328-1	PET Flaschen 328-1 90% Flaschen	145	208	219	133	225	291	186
10	0328-x	Misch-PET 328-2 75% Flaschen	403	543	610	347	627	810	518
11	0330	Becher (Wertstoffhof)	2	3	3	2	3	4	3
12	0331	Polystyrol	124	162	188	102	189	236	145
13	0340	Expandiertes Polystyrol (Styropor®)	1	2	2	1	2	2	1
14	0351	Formstabile Kunststoffe	176	237	267	150	270	340	210
16	0360	stoffgleiche Nichtverpackungen (KS)	11	11	16	6	14	14	6
17	0350	Mischkunststoffe	6.756	8.545	10.260	5.268	10.020	11.956	6.813
17	412	Weißblech	2.202	2.760	2.862	1.750	2.717	3.690	2.385
18	420	Aluminium	697	1.088	950	600	812	1.018	821
19	430	Stoffgleiche Fe-Metalle	124	19	78	26	47	92	25
20	435	Stoffgleiche NE-Metalle	37	14	49	22	56	53	15
21	440	Elektronikaltgeräte	21	8	33	3	13	12	4
22	510	Getränkkartonagen	1.332	2.239	1.381	1.331	2.271	3.129	1.830
23	550	PPK und PPK-Verbunde aus LVP	600	388	492	701	749	222	137
24	0361	KEG = EBS	1.287	1.351	1.533	1.225	1.861	1.642	948
25	0365	EBS-Vorprodukt	2.788	2.927	3.322	2.654	4.032	3.557	2.054
26	830	Sortierreste	10.279	8.947	11.257	9.837	16.723	10.048	4.765
	<b>Summe</b>	<b>30.400</b>	<b>34.000</b>	<b>38.700</b>	<b>27.000</b>	<b>45.800</b>	<b>43.500</b>	<b>24.700</b>	<b>10.900</b>

DS Fraktion	0 LVP Musterzusammensetzung UK
	[Mg]
0310	1.509
0320	23
0321	207
0322	154
0323	546
0324	1.171
0329	338
0328-1	177
0328-x	475
0330	3
0331	143
0340	1
0351	206
0360	10
0350	7.525
412	2.357
420	808
430	51
435	31
440	10
510	1.789
550	638
0361	1.439
0365	3.118
830	11.399
<b>Summe</b>	<b>34.128</b>

Erfassungsmenge	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]
Erfassungsmenge [Mg/1.000.000 EW]	30.400	34.000	38.700	27.000	45.800	43.500	24.700	10.900
nicht erfasste Wertstoffe [Mg/1.000.000 EW]	15.400	11.800	7.100	18.800	0	2.300	21.100	34.900

0 LVP Musterzusammensetzung UK
[Mg]
34.128
11.673

Kosten	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]
Sortierkosten [€/1.000.000 Einw.]	2.432.000 €	2.720.000 €	3.096.000 €	2.160.000 €	3.664.000 €	3.480.000 €	1.976.000 €	0 €
Verwertungserlös/kosten [€/1.000.000 Einw.]	972.020 €	739.545 €	1.033.879 €	930.852 €	1.571.839 €	766.732 €	287.954 €	-107.500 €
Transportkosten zum Verwerter [€/1000.000 Einw.]	518.202 €	592.689 €	665.172 €	458.624 €	781.346 €	769.011 €	439.609 €	222.250 €
Entsorgung nicht erfasster Wertstoffe [€/1.000.000 Einw.] (90,- €/t MVA + 15,- €/t Transport)	1.617.000 €	1.239.000 €	745.500 €	1.974.000 €	0 €	241.500 €	2.215.500 €	3.664.500 €
<b>Summe</b>	<b>5.539.222 €</b>	<b>5.291.234 €</b>	<b>5.540.551 €</b>	<b>5.523.476 €</b>	<b>6.017.185 €</b>	<b>5.257.243 €</b>	<b>4.919.062 €</b>	<b>3.779.250 €</b>

0 LVP Musterzusammensetzung UK
[€]
2.730.200 €
1.049.605 €
584.537 €
1.225.613 €
5.589.955 €

Verwertung	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]
Gesamtverwertung [Mg/1.000.000 EW] e/r/w	30.400	34.000	38.700	27.000	45.800	43.500	24.700	11.000
Zuführung zur (werk-)stofflichen Verwertung [Mg/1.000.000 EW]	9.391	12.412	12.556	8.041	13.330	16.601	10.275	6.618
Rezyklatausbeute [Mg/1.000.000 EW]	6.676	8.745	8.871	5.710	9.492	11.833	7.260	4.783

0 LVP Musterzusammensetzung UK
[Mg]
34.128
10.756
7.627

Kosten pro kg Rezyklatausbeute [€/kg]	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
	0,83 €	0,61 €	0,62 €	0,97 €	0,63 €	0,44 €	0,68 €	0,79 €

0,73 €
--------

## Rezyklatenausbeute je DS Fraktion IST-Szenarium

DS F	DS Fraktion	Bezeichnung	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
1	0310	Folien	945	1.232	1.435	760	1.408	1.693	977	711
2	0320	Flaschen / PO Flaschen (Wertstoffhof)	12	16	18	10	18	23	14	
3	0321	Flaschen / PO Flaschen (Wertstoffhof)	115	155	175	98	177	223	138	598
4	0322	Hohlkörper > 5 l	99	138	151	79	136	142	62	
5	0323	MPO	298	400	450	252	456	574	355	
6	0324	Polypropylen	745	993	1.128	630	1.149	1.462	916	
7	0329	Polyethylen	211	297	319	188	325	415	260	
8	0328-1	PET Flaschen 328-1 90% Flaschen	101	145	153	93	157	203	130	
10	0328-x	Misch-PET 328-2 75% Flaschen	174	234	262	149	270	349	223	
11	0330	Becher (Wertstoffhof)	1	2	2	1	2	3	2	390
12	0331	Polystyrol	92	121	139	76	140	175	107	
13	0340	Expandiertes Polystyrol (Wertstoffhof)	1	1	2	1	2	2	1	217
14	0351	Formstabile Kunststoffe	105	142	160	89	161	203	126	
16	0360	stoffgleiche Nichtverpackungen	6	6	9	3	8	8	3	
17	0350	Mischkunststoffe	233	294	353	181	345	412	235	152
17	412	Weißblech	1.762	2.208	2.289	1.400	2.173	2.952	1.908	1.600
18	420	Aluminium	265	414	361	228	308	387	312	114
19	430	Stoffgleiche Fe-Metalle	99	15	63	21	38	74	20	
20	435	Stoffgleiche NE-Metalle	30	11	40	18	44	42	12	
21	440	Elektronikaltgeräte	15	6	23	2	9	8	3	
22	510	Getränkekartonagen	999	1.679	1.036	998	1.703	2.347	1.372	938
23	550	PPK und PPK Verbunde aus LVP	369	239	303	431	460	136	84	62
24	0361	KEG	0	0	0	0	0	0	0	
25	0365	EBS-Vorprodukt	0	0	0	0	0	0	0	
26	830	Sortierreste	0	0	0	0	0	0	0	
	<b>Summe</b>	<b>Rezyklatenausbeute (Mg) werkstoffliches Recycling</b>	<b>6.676</b>	<b>8.745</b>	<b>8.871</b>	<b>5.710</b>	<b>9.492</b>	<b>11.833</b>	<b>7.260</b>	<b>4.780</b>

Sortierprodukte für die unterschiedlichen Erfassungssysteme (ZUKUNFT-Szenarium)

(= Ausgang Sortieranlage)

	Gewählte Parameter in diesem Tabellenblatt								
	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP	0 LVP Musterzusammensetzung UK
Erfassungsmenge [kg/E*a]	30,4	34	38,7	27	45,8	43,5	24,7	10,9	34128
Einwohner (Normierung)	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000	1.000.000

DS Fraktion	Bezeichnung	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
		[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]
1 0310	Folien	1.408	1.837	2.138	1.133	2.098	2.523	1.456	1.000
3 0320/0321	Flaschen / PO Flaschen (Wertstoffhof)								1.000
4 0322	Hohlkörper > 5 l	366	510	559	293	505	525	228	
6 0324	Polypropylen	2.088	2.780	3.160	1.764	3.218	4.095	2.567	
7 0329	Polyethylen	921	1.294	1.394	821	1.420	1.810	1.136	
8 0328-1	PET Flaschen 328-1 90% Flaschen	371	533	562	341	578	747	477	
10 0328-x	Misch-PET 328-2 75% Flaschen	441	575	667	367	686	886	567	
11 330	Becher (Wertstoffhof)								600
12 0331	Polystyrol	549	720	832	453	837	1.047	641	
13 340	Expandiertes Polystyrol (Wertstoffhof)								250
16 0360	stoffgleiche Nichtverpackungen (KS)	128	134	196	75	173	172	66	
17 0350	Mischkunststoffe	4.862	6.025	7.389	3.701	7.169	8.464	4.741	4.400
17 412	Weißblech	2.324	2.913	3.021	1.847	2.868	3.895	2.518	2.000
18 420	Aluminium	739	1.155	1.007	637	864	1.081	872	300
19 430	Stoffgleiche Fe-Metalle	456	70	289	96	173	341	93	
20 435	Stoffgleiche NE-Metalle	104	39	137	61	154	147	40	
21 440	Elektronikaltgeräte	245	94	387	32	159	139	49	
22 510	Getränkkartonagen	1.550	2.605	1.607	1.549	2.643	3.641	2.129	1.250
23 550	PPK und PPK Verbunde aus LVP	3.391	2.196	2.780	3.963	4.235	1.258	775	100
25 0365	EBS-Vorprodukt	1.091	1.294	1.580	827	1.764	1.844	995	
26 830	Sortierreste	9.364	9.228	10.997	9.038	16.255	10.885	5.351	
		30.400	34.000	38.700	27.000	45.800	43.500	24.700	10.900

DS Fraktion	0 LVP Musterzusammensetzung UK
	[Mg]
0310	1.598
0320/0321	
0322	415
0324	2.435
0329	1.108
0328-1	454
0328-x	510
330	
0331	632
340	
0360	123
0350	5.342
412	2.488
420	858
430	189
435	85
440	120
510	2.081
550	3.604
0365	1.212
830	10.873
Summe	34.128

Erfassungsmenge	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]
Erfassungsmenge [Mg/1.000.000 EW]	30.400	34.000	38.700	27.000	45.800	43.500	24.700	10.900
nicht erfasste Wertstoffe [Mg/1.000.000 EW]	15.400	11.800	7.100	18.800	0	2.300	21.100	34.900

0 LVP Musterzusammensetzung UK
[Mg]
34.128
11.673

Kosten	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]
Sortierkosten [€/1.000.000 Einw.]	3.040.000 €	3.400.000 €	3.870.000 €	2.700.000 €	4.580.000 €	4.350.000 €	2.470.000 €	0
Verwertungserlös/kosten [€/1.000.000 Einw.]	32.013 €	-297.122 €	-179.317 €	102.769 €	276.094 €	-588.351 €	-521.802 €	-107.500 €
Transportkosten zum Verwerter [€/1.000.000 Einw.]	551.407 €	621.481 €	701.821 €	487.594 €	822.714 €	804.654 €	459.795 €	222.250 €
Entsorgung nicht erfasster Wertstoffe [€/1.000.000 Einw.] (90,- €/t MVA + 15,- €/t Transport)	1.617.000 €	1.239.000 €	745.500 €	1.974.000 €	0 €	241.500 €	2.215.500 €	3.664.500 €
<b>Summe</b>	<b>5.240.421 €</b>	<b>4.963.359 €</b>	<b>5.138.004 €</b>	<b>5.264.364 €</b>	<b>5.678.809 €</b>	<b>4.807.803 €</b>	<b>4.623.494 €</b>	<b>3.779.250 €</b>

0 LVP Musterzusammensetzung UK
[€]
3412750
23.031 €
617.909 €
1.225.613 €
5.279.303 €

Verwertung	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]
Gesamtverwertung [Mg/1.000.000 EW] e/r/w	30.400	34.000	38.700	27.000	45.800	43.500	24.700	10.900
Zuführung zur (werk-)stofflichen Verwertung [Mg/1.000.000 EW]	14.558	17.149	18.367	12.773	19.967	22.200	13.522	6.613
Rezyklatausbeute [Mg/1.000.000 EW]	10.610	12.371	13.302	9.312	14.557	16.157	9.770	4.780

0 LVP Musterzusammensetzung UK
[Mg]
34.128
16.135
11.730

Kosten pro kg / Rezyklatausbeute	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	9 Wertstoffhof o_ SNVP
	0,49	0,40	0,39	0,57	0,39	0,30	0,47	0,79

0,45
------

## Rezyklatausbeute je DS Fraktion (ZUKUNFT-Szenarium)

	DS Fraktion	Bezeichnung	1 Wertstofftonne Stadt [Mg]	2 Gelber Sack Land [Mg]	3 Wertstofftonne Land [Mg]	4 Gelbe Tonne Stadt [Mg]	5 Gelbe Tonne Land [Mg]	6 Wertstoffsack Land [Mg]	7 DC ohne StNVP [Mg]	9 Wertstoffhof o_ SNVP [Mg]
1	0310	Folien	1.001	1.305	1.519	805	1.491	1.793	1.034	711
3	0320/0321	Flaschen / PO Flaschen (Wertstoffhof)								598
4	0322	Hohlkörper > 5 l	266	371	406	213	368	382	166	
6	0324	Polypropylen	1.550	2.064	2.346	1.310	2.389	3.040	1.906	
7	0329	Polyethylen	691	970	1.045	616	1.065	1.357	852	
8	0328-1	PET Flaschen 328-1 90% Flaschen	259	372	392	238	403	521	333	
10	0328-x	Misch-PET 328-2 75% Flaschen	190	247	287	158	295	382	244	
11	330	Becher (Wertstoffhof)								390
12	0331	Polystyrol	408	534	618	337	622	777	476	
13	340	Expandiertes Polystyrol (Wertstoffhof)								217
16	0360	stoffgleiche Nichtverpackungen	70	74	108	41	95	95	36	
17	0350	Mischkunststoffe	168	208	255	127	247	292	163	152
17	412	Weißblech	1.859	2.331	2.416	1.478	2.294	3.116	2.014	1.600
18	420	Aluminium	281	439	383	242	328	411	331	114
19	430	Stoffgleiche Fe-Metalle	365	56	231	77	139	273	74	
20	435	Stoffgleiche NE-Metalle	83	31	110	49	123	117	32	
21	440	Elektronikaltgeräte	172	66	271	23	111	97	35	
22	510	Getränkekartonagen	1.162	1.953	1.205	1.161	1.982	2.731	1.597	938
23	550	PPK und PPK Verbunde aus LVP	2.086	1.350	1.710	2.437	2.605	774	477	62
25	0365	EBS-Vorprodukt	0	0	0	0	0	0	0	
26	830	Sortierreste	0	0	0	0	0	0	0	
	<b>Summe</b>	<b>Rezyklat (Mg) durch werkstoffliches Recyclinmg</b>	<b>10.610</b>	<b>12.371</b>	<b>13.302</b>	<b>9.312</b>	<b>14.557</b>	<b>16.157</b>	<b>9.770</b>	<b>4.780</b>

Ermittlung Kostenanteile einschließlich Fehlabweirfen (IST-Szenarium)

Sammelmengen

	DS Fraktion	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne STNVP
	0310	1.330	1.735	2.019	1.070	1.982	2.383	1.375
	0320	20	26	30	17	30	38	24
	0321	177	238	269	151	272	342	212
	0322	136	189	207	109	188	195	85
	0323	467	627	707	396	715	901	557
	0324	1.004	1.337	1.519	848	1.547	1.969	1.234
	0328-1	145	208	219	133	225	291	186
	0328-x	403	543	610	347	627	810	518
	0329	281	395	426	251	434	553	347
	0330	2	3	3	2	3	4	3
	0331	124	162	188	102	189	236	145
	0340	1	2	2	1	2	2	1
	0350	6.756	8.545	10.260	5.268	10.020	11.956	6.813
	0351	176	237	267	150	270	340	210
	0360	11	11	16	6	14	14	6
	0361	1.287	1.351	1.533	1.225	1.861	1.642	948
	0365	2.788	2.927	3.322	2.654	4.032	3.557	2.054
	412	2.202	2.760	2.862	1.750	2.717	3.690	2.385
	420	697	1.088	950	600	812	1.018	821
	430	124	19	78	26	47	92	25
	435	37	14	49	22	56	53	15
	440	21	8	33	3	13	12	4
	510	1.332	2.239	1.381	1.331	2.271	3.129	1.830
	550	600	388	492	701	749	222	137
	830	10.279	8.947	11.257	9.837	16.723	10.048	4.765
	Summe	30.400	34.000	38.700	27.000	45.800	43.500	24.700

	0 LVP Musterzusammensetzung UK
0310	1.509
0320	23
0321	207
0322	154
0323	546
0324	1.171
0328-1	177
0328-x	475
0329	338
0330	3
0331	143
0340	1
0350	7.525
0351	206
0360	10
0361	1.439
0365	3.118
412	2.357
420	808
430	51
435	31
440	10
510	1.789
550	638
830	11.399
Summe	34.128

Sortierung inkl. Fehlabweirfanteil in Excel berechnet

Hfd Nr DS Fraktion	max Störstoffanteil	Sortierfraktionen	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne STNVP
1	8,00%	0310	1.457	1.873	2.181	1.156	2.140	2.574	1.485
2	6,00%	0320	21	28	32	18	32	40	25
3	6,00%	0321	188	253	285	160	288	363	224
4	6,00%	0322	144	201	220	115	199	207	90
5	15,00%	0323	537	721	813	456	823	1.037	641
6	6,00%	0324	1.064	1.417	1.611	899	1.640	2.087	1.308
8	2,00%	0328-1	148	212	224	136	230	297	190
10	2,00%	0328-x	411	554	622	354	640	826	528
7	6,00%	0329	298	419	451	266	460	586	368
11	6,00%	0330	2	3	4	2	4	5	3
12	6,00%	0331	131	172	199	108	200	250	153
13	3,00%	0340	1	2	2	1	2	2	1
17	10,00%	0350	7.431	9.399	11.286	5.795	11.022	13.152	7.495
14	20,00%	0351	211	284	320	179	324	408	252
16	10,00%	0360	12	12	18	7	16	16	6
24	0,00%	0361	1.287	1.351	1.533	1.225	1.861	1.642	948
25	0,00%	0365	2.788	2.927	3.322	2.654	4.032	3.557	2.054
17	18,10%	412	2.600	3.259	3.380	2.067	3.208	4.358	2.817
18	10,00%	420	767	1.197	1.045	660	893	1.120	903
19	10,00%	430	136	21	86	29	52	102	28
20	10,00%	435	41	16	54	24	61	58	16
21	10,00%	440	23	9	36	3	15	13	5
22	10,00%	510	1.465	2.462	1.519	1.464	2.498	3.442	2.013
		550	660	427	541	772	824	244	150
		830	8.595	6.780	8.917	8.451	14.337	7.114	2.996
		Summe	30.400	34.000	38.700	27.000	45.800	43.500	24.700
		Teilsomme ohne 0830	21.805	27.220	29.783	18.549	31.463	36.386	21.704

	0 LVP Musterzusammensetzung UK
0310	1.650
0320	24
0321	220
0322	163
0323	628
0324	1.241
0328-1	181
0328-x	485
0329	359
0330	3
0331	151
0340	1
0350	8.278
0351	247
0360	11
0361	1.439
0365	3.118
412	2.783
420	889
430	56
435	34
440	11
510	1.967
550	701
830	9.507
Summe	34.128
	24.621

Anlage 6.1

Verwertungskosten/-erlöse

lfd Nr DS Fraktion	Erlös/Zuzahlung Verwertung	Sortierfraktionen	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP
1	-20	0310	-28.733	-37.468	-43.621	-23.113	-42.805	-51.478	-29.700
2	-80	0320	-1.672	-2.246	-2.532	-1.419	-2.561	-3.227	-1.995
3	-250	0321	-47.024	-63.163	-71.205	-39.900	-72.021	-90.753	-56.108
4	-200	0322	-28.751	-40.111	-43.936	-23.053	-39.751	-41.317	-17.964
5	-50	0323	-26.855	-36.071	-40.664	-22.786	-41.130	-51.828	-32.042
6	-240	0324	-255.423	-340.067	-386.542	-215.839	-393.607	-500.917	-313.952
8	-50	0328-1	-7.392	-10.607	-11.176	-6.779	-11.498	-14.853	-9.497
10	-10	0328-x	-4.113	-5.538	-6.219	-3.540	-6.398	-8.265	-4.847
7	-320	0329	-95.462	-134.104	-144.457	-85.142	-147.210	-187.553	-114.728
11	-140	0330	-329	-442	-498	-279	-504	-635	-393
12	-100	0331	-13.137	-17.219	-19.900	-10.842	-20.027	-25.048	-15.323
13	-230	0340	-300	-388	-454	-243	-454	-561	-338
17	60	0350	445.864	563.945	677.157	347.684	661.298	789.113	449.688
14	-100	0351	-21.146	-28.403	-32.020	-17.943	-32.387	-40.811	-25.231
16	-60	0360	-701	-734	-1.074	-412	-950	-943	-363
24	60	0361	96.518	101.342	114.999	91.883	139.600	123.141	71.118
25	75	0365	209.092	219.543	249.129	199.052	302.425	266.769	154.068
17	-40	412	-104.019	-130.376	-135.180	-82.669	-128.338	-174.310	-112.683
18	-50	420	-38.327	-59.851	-52.226	-32.987	-44.643	-55.986	-45.171
19	-40	430	-5.439	-835	-3.448	-1.145	-2.066	-4.067	-1.104
20	-50	435	-2.061	-781	-2.721	-1.210	-3.058	-2.918	-804
21	-20	440	-458	-175	-723	-61	-297	-260	-92
22	-28	510	-41.022	-68.947	-42.545	-40.996	-69.956	-96.385	-56.356
23	0	550	0	0	0	0	0	0	0
26	90	830	773.575	610.197	802.530	760.625	1.290.289	640.279	269.608
<b>Verwertungserlös/-kosten (Ist-Szenario inkl. Fehlblwürfe)</b>			<b>802.686</b>	<b>517.501</b>	<b>802.674</b>	<b>788.889</b>	<b>1.333.951</b>	<b>467.189</b>	<b>102.355</b>

0 LVP Musterzusammensetzung UK
-32.591
-1.995
-54.954
-32.667
-31.383
-297.852
-9.034
-4.847
-114.793
-385
-15.112
-338
-675
107.948
233.855
-112.326
-44.449
-2.249
-1.687
-225
-55.089
0
855.593
<b>857.720</b>

Transportkosten zum Verwerter

lfd Nr DS Fraktion	Logistikkosten (SoA-Verwerter) - (€)	Sortierfraktionen	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP
1	15	0310	21.550	28.101	32.716	17.334	32.104	38.608	22.275
2	35	0320	731	983	1.108	621	1.120	1.412	873
3	30	0321	5.643	7.580	8.545	4.788	8.643	10.890	6.733
4	20	0322	2.875	4.011	4.394	2.305	3.975	4.132	1.796
5	25	0323	13.427	18.036	20.332	11.393	20.565	25.914	16.021
6	25	0324	26.607	35.424	40.265	22.483	41.001	52.179	32.703
8	20	0328-1	2.957	4.243	4.470	2.712	4.599	5.941	3.799
10	20	0328-x	8.226	11.077	12.438	7.079	12.797	16.530	10.569
7	25	0329	7.458	10.477	11.286	6.652	11.501	14.653	9.198
11	25	0330	59	79	89	50	90	113	70
12	25	0331	3.284	4.305	4.975	2.710	5.007	6.262	3.831
13	50	0340	65	84	99	53	99	122	74
17	17,5	0350	130.044	164.484	197.504	101.408	192.879	230.158	131.159
14	25	0351	5.287	7.101	8.005	4.486	8.097	10.203	6.308
16	25	0360	292	306	447	172	396	393	151
24	15	0361	19.304	20.268	23.000	18.377	27.920	24.628	14.224
25	15	0365	41.818	43.909	49.826	39.810	60.485	53.354	30.814
17	15	412	39.007	48.891	50.693	31.001	48.127	65.366	42.256
18	15	420	11.498	17.955	15.668	9.896	13.393	16.796	13.551
19	25	430	3.399	522	2.155	715	1.291	2.542	690
20	25	435	1.030	391	1.361	605	1.529	1.459	402
21	25	440	573	219	903	76	371	325	115
22	25	510	36.627	61.560	37.987	36.603	62.461	86.058	50.318
23	20	550	13.206	8.541	10.825	15.433	16.473	4.876	3.005
26	15	830	128.929	101.699	133.755	126.771	215.048	106.713	44.935
<b>Transportkosten zum Verwerter (€/1000.000 Einw.)</b>			<b>523.896</b>	<b>600.243</b>	<b>672.843</b>	<b>463.533</b>	<b>789.969</b>	<b>779.627</b>	<b>445.869</b>

0 LVP Musterzusammensetzung UK
24.444
855
6.595
3.267
15.692
31.026
3.614
9.695
8.968
69
3.778
74
144.857
6.178
281
21.590
46.771
41.747
13.335
1.406
844
281
49.187
14.029
142.599
<b>591.179</b>

**Anlage 6.1**

Zuführung zur (werk-)stofflichen Verwertung										
Iff Nr DS Fraktion	Zuführungsquote werk(stofflich)	Sortierfraktionen	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	
1	98,00%	0310	1.408	1.836	2.137	1.133	2.097	2.522	1.455	
2	92,00%	0320	19	26	29	16	29	37	23	
3	100,00%	0321	188	253	285	160	288	363	224	
4	97,00%	0322	139	195	213	112	193	200	87	
5	98,00%	0323	526	707	797	447	806	1.016	628	
6	99,00%	0324	1.054	1.403	1.594	890	1.624	2.066	1.295	
8	93,00%	0328-1	137	197	208	126	214	276	177	
10	82,00%	0328-x	337	454	510	290	525	678	433	
7	100,00%	0329	298	419	451	266	460	586	368	
11	100,00%	0330	2	3	4	2	4	5	3	
12	99,00%	0331	130	170	197	107	198	248	152	
13	99,00%	0340	1	2	2	1	2	2	1	
17	5,30%	0350	394	498	598	307	584	697	397	
14	92,00%	0351	195	261	295	165	298	375	232	
16	100,00%	0360	12	12	18	7	16	16	6	
24	0,00%	0361	0	0	0	0	0	0	0	
25	0,00%	0365	0	0	0	0	0	0	0	
17	100,00%	412	2.600	3.259	3.380	2.067	3.208	4.358	2.817	
18	100,00%	420	767	1.197	1.045	660	893	1.120	903	
19	100,00%	430	136	21	86	29	52	102	28	
20	100,00%	435	41	16	54	24	61	58	16	
21	100,00%	440	23	9	36	3	15	13	5	
22	100,00%	510	1.465	2.462	1.519	1.464	2.498	3.442	2.013	
23	82,00%	550	541	350	444	633	675	200	123	
26	0,00%	830	0	0	0	0	0	0	0	
Zuführung zur (werk-)stofflichen Verwertung [Mg/1.000.000 EW]			10.415	13.750	13.902	8.908	14.741	18.381	11.387	

0 LVP Musterzusammensetzung UK
1.597
23
220
158
615
1.229
168
397
359
3
150
1
439
227
11
0
0
2.783
889
56
34
11
1.967
575
123
0
11.913

Rezyklatausbeute										
Iff Nr DS Fraktion	Recyclinganteil	Sortierfraktionen	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP	
1	72,50%	0310	1.021	1.331	1.550	821	1.521	1.829	1.055	
2	65,00%	0320	12	17	19	11	19	24	15	
3	65,00%	0321	122	164	185	104	187	236	146	
4	75,00%	0322	105	146	160	84	145	150	65	
5	65,00%	0323	342	460	518	290	524	660	408	
6	75,00%	0324	790	1.052	1.196	668	1.218	1.550	971	
8	75,00%	0328-1	103	148	156	95	160	207	132	
10	52,50%	0328-x	177	238	268	152	275	356	228	
7	75,00%	0329	224	314	339	200	345	440	276	
11	65,00%	0330	2	2	2	1	2	3	2	
12	75,00%	0331	98	128	148	81	149	186	114	
13	87,50%	0340	1	1	2	1	2	2	1	
17	65,00%	0350	256	324	389	200	380	453	258	
14	65,00%	0351	126	170	191	107	194	244	151	
16	55,00%	0360	6	7	10	4	9	9	3	
24	0,00%	0361	0	0	0	0	0	0	0	
25	0,00%	0365	0	0	0	0	0	0	0	
17	80,00%	412	2.080	2.608	2.704	1.653	2.567	3.486	2.254	
18	38,00%	420	291	455	397	251	339	425	343	
19	80,00%	430	109	17	69	23	41	81	22	
20	80,00%	435	33	12	44	19	49	47	13	
21	70,00%	440	16	6	25	2	10	9	3	
22	75,00%	510	1.099	1.847	1.140	1.098	1.874	2.582	1.510	
23	75,00%	550	406	263	333	475	507	150	92	
26	0,00%	830	0	0	0	0	0	0	0	
Rezyklatausbeute [Mg/1.000.000 EW]			7.420	9.709	9.842	6.338	10.516	13.129	8.063	

0 LVP Musterzusammensetzung UK
1.158
15
143
119
400
921
126
209
269
2
112
1
285
148
6
0
0
2.227
338
45
27
8
1.476
431
0
8.465

**Zusammenfassung IST-Szenario inkl. Fehlabbwurfanteil**

Erfassungsmenge	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP
	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]
Erfassungsmenge [t/1.000.000 EW]	30.400	34.000	38.700	27.000	45.800	43.500	24.700
nicht erfasste Wertstoffe [Mg/1.000.000 EW]	15.400	11.800	7.100	18.800	0	2.300	21.100

0 LVP Musterzusammensetzung UK
[Mg]
34.128
11.673

Kosten	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP
	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]
Sortierkosten [€/1.000.000 Einw.]	2.432.000 €	2.720.000 €	3.096.000 €	2.160.000 €	3.664.000 €	3.480.000 €	1.976.000 €
Verwertungserlös/kosten [€/1.000.000 Einw.]	802.686 €	517.501 €	802.674 €	788.889 €	1.333.951 €	467.189 €	102.355 €
Transportkosten zum Verwerter [€/1000.000 Einw.]	523.896 €	600.243 €	672.843 €	463.533 €	789.969 €	779.627 €	445.869 €
Entsorgung nicht erfasster Wertstoffe [€/1.000.000 Einw.]	1.617.000 €	1.239.000 €	745.500 €	1.974.000 €	0 €	241.500 €	2.215.500 €
<b>Summe</b>	<b>5.375.581 €</b>	<b>5.076.744 €</b>	<b>5.317.017 €</b>	<b>5.386.421 €</b>	<b>5.787.920 €</b>	<b>4.968.315 €</b>	<b>4.739.724 €</b>

0 LVP Musterzusammensetzung UK
[€]
2.730.200 €
857.720 €
591.179 €
1.225.613 €
<b>5.404.711 €</b>

Verwertung	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP
	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]
Gesamtverwertung [Mg/1.000.000 EW] e/r/w	30.400	34.000	38.700	27.000	45.800	43.500	24.700
Zuführung zur (werk-)stofflichen Verwertung [Mg/1.000.000 EW]	10.415	13.750	13.902	8.908	14.741	18.381	11.387
Produktausbeute [Mg/1.000.000 EW]	7.420	9.709	9.842	6.338	10.516	13.129	8.063

0 LVP Musterzusammensetzung UK
[Mg]
24.700
11.913
8.465

Kosten pro kg Produktausbeute [€/kg]	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP
	0,72 €	0,52 €	0,54 €	0,85 €	0,55 €	0,38 €	0,59 €

0,64 €
--------

Ermittlung Kostenanteile einschließlich Fehlabbwürfen (ZUKUNFT-Szenarium)

Sammelmenen

DS Fraktion	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP			0 LVP Musterzusammensetzung UK
0310	1.408	1.837	2.138	1.133	2.098	2.523	1.456		0310	1.598
0322	366	510	559	293	505	525	228		0322	415
0324	2.088	2.780	3.160	1.764	3.218	4.095	2.567		0324	2.435
0328-1	371	533	562	341	578	747	477		0328-1	454
0328-x	441	575	667	367	686	886	567		0328-x	510
0329	921	1.294	1.394	821	1.420	1.810	1.136		0329	1.108
0331	549	720	832	453	837	1.047	641		0331	632
0350	4.862	6.025	7.389	3.701	7.169	8.464	4.741		0350	5.342
0360	128	134	196	75	173	172	66		0360	123
0365	1.091	1.294	1.580	827	1.764	1.844	995		0365	1.212
412	2.324	2.913	3.021	1.847	2.868	3.895	2.518		412	2.488
420	739	1.155	1.007	637	864	1.081	872		420	858
430	456	70	289	96	173	341	93		430	189
435	104	39	137	61	154	147	40		435	85
440	245	94	387	32	159	139	49		440	120
510	1.550	2.605	1.607	1.549	2.643	3.641	2.129		510	2.081
550	3.391	2.196	2.780	3.963	4.235	1.258	775		550	3.604
830	9.364	9.228	10.997	9.038	16.255	10.885	5.351		830	10.873
<b>Summe</b>	<b>30.400</b>	<b>34.000</b>	<b>38.700</b>	<b>27.000</b>	<b>45.800</b>	<b>43.500</b>	<b>24.700</b>		<b>Summe</b>	<b>34.128</b>

Sortierung inkl. Fehlabbwurfanteil in Excel berechnet

Nr DS Fraktion	Störstoffan	Sortierfraktionen	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP		0 LVP Musterzusammensetzung UK	
1	8,00%	0310	1.521	1.984	2.309	1.224	2.266	2.725	1.572		0310	1.725
4	6,00%	0322	387	541	592	311	536	557	242		0322	440
6	6,00%	0324	2.213	2.947	3.350	1.870	3.411	4.341	2.721		0324	2.581
8	2,00%	0328-1	379	544	573	348	589	761	487		0328-1	463
10	2,00%	0328-x	450	586	680	375	700	904	578		0328-x	521
7	6,00%	0329	976	1.371	1.477	871	1.506	1.918	1.204		0329	1.174
12	6,00%	0331	582	763	882	480	887	1.110	679		0331	670
17	10,00%	0350	5.349	6.628	8.128	4.071	7.886	9.311	5.215		0350	5.877
16	10,00%	0360	141	147	215	83	191	189	73		0360	135
25	0,00%	0365	1.091	1.294	1.580	827	1.764	1.844	995		0365	1.212
17	18,10%	412	2.745	3.440	3.567	2.182	3.387	4.600	2.974		412	2.938
18	10,00%	420	813	1.270	1.108	701	950	1.189	959		420	944
19	10,00%	430	502	77	318	106	191	375	102		430	207
20	10,00%	435	114	43	151	67	169	161	45		435	93
21	10,00%	440	270	103	425	36	175	153	54		440	132
22	10,00%	510	1.705	2.865	1.768	1.703	2.907	4.005	2.342		510	2.289
23	10,00%	550	3.730	2.415	3.058	4.360	4.659	1.384	853		550	3.965
		830	7.432	6.981	8.519	7.388	13.627	7.972	3.607		830	8.761
		<b>Summe</b>	<b>30.400</b>	<b>34.000</b>	<b>38.700</b>	<b>27.000</b>	<b>45.800</b>	<b>43.500</b>	<b>24.700</b>		<b>Summe</b>	<b>34.128</b>
		<b>Teilsumme ohne 0830</b>	<b>22.968</b>	<b>27.019</b>	<b>30.181</b>	<b>19.612</b>	<b>32.173</b>	<b>35.528</b>	<b>21.093</b>			<b>25.367</b>

Verwertungskosten/-erlöse

Nr DS Fraktion	Zahlung Verw	Sortierfraktionen	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP		0 LVP Musterzusammensetzung UK
1	-20	0310	-30.423	-39.672	-46.187	-24.472	-45.323	-54.506	-31.447		-34.509
4	-200	0322	-77.490	-108.107	-118.418	-62.134	-107.137	-111.357	-48.416		-88.046
6	-240	0324	-531.201	-707.234	-803.886	-448.878	-818.581	-1.041.751	-652.922		-619.441
8	-50	0328-1	-18.946	-27.188	-28.646	-17.376	-29.473	-38.072	-24.343		-23.156
10	-10	0328-x	-4.500	-5.862	-6.803	-3.747	-7.000	-9.042	-5.782		-5.206
7	-320	0329	-312.417	-438.880	-472.761	-278.642	-481.771	-613.801	-385.288		-375.681
12	-100	0331	-58.210	-76.300	-88.181	-48.042	-88.745	-110.990	-67.897		-66.966
17	60	0350	320.913	397.675	487.652	244.252	473.150	558.631	312.897		352.604
16	-60	0360	-8.440	-8.835	-12.919	-4.953	-11.431	-11.343	-4.368		-8.119
25	75	0365	81.839	97.058	118.492	62.052	132.335	138.332	74.590		90.912
17	-40	412	-109.798	-137.619	-142.690	-87.262	-135.468	-183.994	-118.943		-117.511
18	-50	420	-40.669	-63.498	-55.382	-35.033	-47.514	-59.466	-47.949		-47.200
19	-40	430	-20.062	-3.079	-12.718	-4.222	-7.622	-15.001	-4.071		-8.298
20	-50	435	-5.702	-2.161	-7.530	-3.348	-8.461	-8.075	-2.226		-4.668
21	-20	440	-5.392	-2.059	-8.508	-713	-3.493	-3.062	-1.087		-2.648
22	-28	510	-47.728	-80.219	-49.500	-47.698	-81.392	-112.141	-65.569		-64.095
23	0	550	0	0	0	0	0	0	0		0
26	90	830	668.873	628.320	766.704	664.906	1.226.449	717.491	324.625		788.445
<b>Verwertungserlös/-kosten (Ist-Szenario inkl. Fehlabbwurfanteil)</b>			<b>-199.353</b>	<b>-577.658</b>	<b>-481.283</b>	<b>-95.310</b>	<b>-41.475</b>	<b>-958.148</b>	<b>-748.196</b>		<b>-233.582</b>

Transportkosten zum Verwerter		1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP		0 LVP Musterzusammensetzung UK
1	15 0310	22.818	29.754	34.640	18.354	33.992	40.880	23.585		25.881
4	20 0322	7.749	10.811	11.842	6.213	10.714	11.136	4.842		8.805
6	25 0324	55.333	73.670	83.738	46.758	85.269	108.516	68.013		64.525
8	20 0328-1	7.579	10.875	11.459	6.950	11.789	15.229	9.737		9.262
10	20 0328-x	8.999	11.725	13.607	7.493	14.000	18.084	11.563		10.412
7	25 0329	24.408	34.287	36.934	21.769	37.638	47.953	30.101		29.350
12	25 0331	14.553	19.075	22.045	12.011	22.186	27.748	16.974		16.741
17	17,5 0350	93.600	115.989	142.232	71.240	138.002	162.934	91.262		102.843
16	25 0360	3.516	3.681	5.383	2.064	4.763	4.726	1.820		3.383
25	15 0365	16.368	19.412	23.698	12.410	26.467	27.666	14.918		18.182
17	15 412	41.174	51.607	53.509	32.723	50.801	68.998	44.603		44.067
18	15 420	12.201	19.049	16.614	10.510	14.254	17.840	14.385		14.160
19	25 430	12.539	1.924	7.949	2.639	4.763	9.376	2.544		5.186
20	25 435	2.851	1.081	3.765	1.674	4.231	4.037	1.113		2.334
21	25 440	6.741	2.574	10.635	891	4.366	3.828	1.359		3.310
22	25 510	42.615	71.624	44.197	42.587	72.671	100.126	58.544		57.228
23	20 550	74.606	48.309	61.163	87.191	93.174	77.673	17.057		79.292
26	15 830	111.479	104.720	127.784	110.818	204.408	119.582	54.104		131.408
<b>Transportkosten zum Verwerter [€/1000.000 Einw.]</b>		<b>559.126</b>	<b>630.166</b>	<b>711.195</b>	<b>494.296</b>	<b>833.489</b>	<b>816.331</b>	<b>466.524</b>		<b>626.370</b>

Zuführung zur (werk-)stofflichen Verwertung		Sortierfraktionen		1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP		0 LVP Musterzusammensetzung UK
4	98,00%	0310	1.491	1.944	2.263	1.199	2.221	2.671	1.541			1.691
4	97,00%	0322	376	524	574	301	520	540	235			427
6	99,00%	0324	2.191	2.917	3.316	1.852	3.377	4.297	2.693			2.555
8	93,00%	0328-1	352	506	533	323	348	708	453			431
10	82,00%	0328-x	369	481	558	307	574	741	474			427
7	100,00%	0329	976	1.371	1.477	871	1.506	1.918	1.204			1.174
12	99,00%	0331	576	755	873	476	879	1.099	672			663
17	5,30%	0350	283	351	431	216	418	493	276			311
16	100,00%	0360	141	147	215	83	191	189	73			135
25	0,00%	0365	0	0	0	0	0	0	0			0
17	100,00%	412	2.745	3.440	3.567	2.182	3.387	4.600	2.974			2.938
18	100,00%	420	813	1.270	1.108	701	950	1.189	959			944
19	100,00%	430	502	77	318	106	191	375	102			207
20	100,00%	435	114	43	151	67	169	161	45			93
21	100,00%	440	270	103	425	36	175	153	54			132
22	100,00%	510	1.705	2.865	1.768	1.703	2.907	4.005	2.342			2.289
23	82,00%	550	3.059	1.981	2.508	3.575	3.820	1.135	699			3.251
26	0,00%	830	0	0	0	0	0	0	0			0
Zuführung zur (werk-)stofflichen Verwertung [Mg/1.000.000 EW]			15.963	18.777	20.085	13.996	21.830	24.276	14.796			17.670

Rezyklatausbeute		Sortierfraktionen		1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne StNVP		0 LVP Musterzusammensetzung UK
1	72,50%	0310	282	1.409	1.641	869	1.610	1.936	1.117			1.226
4	75,00%	0322	1.643	393	431	226	390	405	176			320
6	75,00%	0324	264	379	400	242	411	531	340			323
8	75,00%	0328-1	194	252	293	161	301	389	249			224
10	52,50%	0328-x	732	1.029	1.108	653	1.129	1.439	903			881
7	75,00%	0329	432	567	655	357	659	824	504			497
12	75,00%	0331	184	228	280	140	272	321	180			202
17	65,00%	0350	77	81	118	45	105	104	40			74
16	55,00%	0360	0	0	0	0	0	0	0			0
25	0,00%	0365	2.196	2.752	2.854	1.745	2.709	3.680	2.379			2.350
17	80,00%	412	309	483	421	266	361	452	364			359
18	38,00%	420	401	62	254	84	152	300	81			166
19	80,00%	430	91	35	120	54	135	129	36			75
20	80,00%	435	189	72	298	25	122	107	38			93
21	70,00%	440	1.278	2.149	1.326	1.278	2.180	3.004	1.756			1.717
22	75,00%	510	2.294	1.485	1.881	2.681	2.865	851	525			2.438
23	75,00%	550	0	0	0	0	0	0	0			0
26	0,00%	830	0	0	0	0	0	0	0			0
Rezyklatausbeute [Mg/1.000.000 EW]			11.649	13.564	14.566	10.216	15.935	17.695	10.708			12.862

Zusammenfassung ZUKUNFT-Szenarium inkl. Fehlabwehranteil

Erfassungsmenge	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne STNVP
	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]
Erfassungsmenge [Mg/1.000.000 EW]	30.400	34.000	38.700	27.000	45.800	43.500	24.700
nicht erfasste Wertstoffe [Mg/1.000.000 EW]	15.400	11.800	7.100	18.800	0	2.300	21.100

0 LVP Musterzusammensetzung UK
[Mg]
34.128
11.673

Kosten	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne STNVP
	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]	[€]
Sortierkosten [€/1.000.000 Einw.]	3.040.000 €	3.400.000 €	3.870.000 €	2.700.000 €	4.580.000 €	4.350.000 €	2.470.000 €
Verwertungserlös/kosten [€/1.000.000 Einw.]	-199.353 €	-577.658 €	-481.283 €	-95.310 €	-41.475 €	-958.148 €	-748.196 €
Transportkosten zum Verwerter [€/1.000.000 Einw.]	559.126 €	630.166 €	711.195 €	494.296 €	833.489 €	816.331 €	466.524 €
Entsorgung nicht erfasster Wertstoffe [€/1.000.000 Einw.]	1.617.000 €	1.239.000 €	745.500 €	1.974.000 €	0 €	241.500 €	2.215.500 €
<b>Summe</b>	<b>5.016.773 €</b>	<b>4.691.508 €</b>	<b>4.845.412 €</b>	<b>5.072.987 €</b>	<b>5.372.014 €</b>	<b>4.449.683 €</b>	<b>4.403.829 €</b>

0 LVP Musterzusammensetzung UK
[€]
3.412.750 €
-233.582 €
626.370 €
1.225.613 €
<b>5.031.151 €</b>

Verwertung	1 Wertstofftonne Stadt	2 Gelber Sack Land	3 Wertstofftonne Land	4 Gelbe Tonne Stadt	5 Gelbe Tonne Land	6 Wertstoffsack Land	7 DC ohne STNVP
	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]	[Mg]
Gesamtverwertung [Mg/1.000.000 EW] e/r/w	30.400	34.000	38.700	27.000	45.800	43.500	24.700
Zuführung zur (werk-)stofflichen Verwertung [Mg/1.000.000 EW]	15.963	18.777	20.085	13.996	21.830	24.276	14.796
Rezyklausbeute [Mg/1.000.000 EW]	11.649	13.564	14.566	10.216	15.935	17.695	10.708

0 LVP Musterzusammensetzung UK
[Mg]
34.128
17.670
12.862

Kosten pro kg / Rezyklausbeute	0,43	0,35	0,33	0,50	0,34	0,25	0,41
--------------------------------	------	------	------	------	------	------	------

0,39
------

## Ausbringungsdaten Szenario IST

Nr	Feinsortierung Intecus Ebene 3	UK Ebene 1	UK Ebene 2	0310	0320	0321	0322	0323	0324	0328-1	0328-x	0329	0330	0331	0340	0350	0351	0360	0361	0365	412	420	430	435	440	510	550	830	Summe
4	Alu, Alu Verb. Verp.	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Aluminiumhaltig / NE-Metall																			85,00%						15,00%	100,00%
5	aluh.-Verb. PPK frei	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Aluminiumhaltig / NE-Metall																			85,00%						15,00%	100,00%
6	aluh.-Verb. PPK haltig	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Aluminiumhaltig / NE-Metall																			85,00%						15,00%	100,00%
7	Alu Pfand	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Aluminiumhaltig / NE-Metall																			85,00%						15,00%	100,00%
8	Alu NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Aluminiumhaltig / NE-Metall																			42,50%		16,25%				41,25%	100,00%
9	NE-Schrott	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Aluminiumhaltig / NE-Metall																			42,50%		16,27%				41,23%	100,00%
29	Eimer, Kanister - VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Eimer, Kanister				33,39%									56,62%			2,73%	5,92%								1,33%	100,00%
30	Eimer, NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Eimer, Kanister				33,39%									56,62%			2,73%	5,92%								1,33%	100,00%
31	FKN	Systemzugehörige LVP-Verpackung	FKN																6,08%	13,17%					77,35%			3,40%	100,00%
10	Folien < DIN A 4 - VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Folien < DIN A 4													85,00%			4,03%	8,72%								2,25%	100,00%
11	Folie < Din A4 NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Folien < DIN A 4													85,00%			4,03%	8,72%								2,25%	100,00%
12	Folie > Din A4 VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Folien > DIN A 4	85,00%												12,75%			0,62%	1,33%								0,30%	100,00%
13	Folie > Din A4 NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Folien > DIN A 4	85,00%												12,75%			0,62%	1,33%								0,30%	100,00%
20	PET Flaschen transparent	Systemzugehörige LVP-Verpackung	PET Flächen transparent							35,11%	32,31%								8,74%	18,94%								4,89%	100,00%
24	KS-Flaschen Pfand	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	PET Flächen transparent							35,13%	32,30%								8,74%	18,94%								4,89%	100,00%
21	PET Flaschen opak	Systemzugehörige LVP-Verpackung	PET sonstig								55,05%								12,07%	26,14%								6,74%	100,00%
22	sonstige PET Verp.	Systemzugehörige LVP-Verpackung	PET sonstig								55,05%								12,07%	26,14%								6,74%	100,00%
23	PET-NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	PET sonstig								55,05%								12,07%	26,14%								6,74%	100,00%
14	PE-VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Polyethylen (PE)	0,69%	6,21%		16,35%					27,50%	0,08%			36,56%	6,17%		1,77%	3,83%								0,86%	100,00%
15	PE-NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Polyethylen (PE)	0,79%	7,10%		18,69%					19,25%	0,09%			38,07%	7,05%	2,24%	1,84%	3,98%								0,90%	100,00%
16	PP-VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Polypropylen (PP)	0,50%	4,51%		11,86%	43,28%					0,06%		30,03%	4,48%			1,45%	3,14%								0,71%	100,00%
17	PP-NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Polypropylen (PP)	0,66%	5,91%		15,55%	30,29%					0,07%		33,49%	5,87%	2,24%		1,62%	3,50%								0,79%	100,00%
18	PS-VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Polystrol (PS)										20,31%	0,20%	67,57%				3,26%	7,07%								1,59%	100,00%
19	PS-NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Polystrol (PS)										14,22%	0,19%	70,85%			2,24%	3,42%	7,41%								1,67%	100,00%
32	PPK Verbunde	Systemzugehörige LVP-Verpackung	PPK Verbunde																13,27%	28,75%							15,95%	42,03%	100,00%
33	Papier VP	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	PPK, kein LVP																13,27%	28,75%							15,95%	42,03%	100,00%
34	Papier-NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	PPK, kein LVP																13,27%	28,75%							15,95%	42,03%	100,00%
35	Papier, Zellstoff -NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	PPK, kein LVP																13,27%	28,75%							15,95%	42,03%	100,00%
27	sonstige MKS-VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	sonstige Kunststoffe													68,00%			8,59%	18,61%								4,80%	100,00%
28	MKS NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	sonstige Kunststoffe													68,00%			8,59%	18,61%								4,80%	100,00%
36	CD's	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	sonstige Kunststoffe																15,79%	34,21%								50,00%	100,00%
37	CD's verpackt	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	sonstige Kunststoffe																15,79%	34,21%								50,00%	100,00%
48	trennbare Kombi VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	trennbare Kombi VP																13,38%	28,99%		4,25%					1,59%	51,79%	100,00%
25	PVC-VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
26	PVC-NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
38	Holz VP	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
39	Holz-NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
40	Gummi VP	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
41	Gummi-NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
42	Kork VP	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
43	Kork NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
44	Glas VP	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
45	Glas NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
46	Keramik VP	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
47	Keramik NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
49	Haushaltskleinger.	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																						3,40%			96,60%	100,00%
50	IT und Telek.-geräte	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																						3,40%			96,60%	100,00%
51	Geräte der Unterh.	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																						3,40%			96,60%	100,00%
52	elekt. Werkzeug	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																						3,40%			96,60%	100,00%
53	elekt. Spilezeuge	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																						3,40%			96,60%	100,00%
54	Glühbirnen, Leuchtm.	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																						3,40%			96,60%	100,00%
55	Rest Windeln	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
56	Rest Leder	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
57	Textilien	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
58	Batterien	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																		90,00%							10,00%	100,00%
59	Küchen-/ Gartenab.	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
60	Rest /Störstoffe/Verderbnisabfälle/ Feinkorn	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																									100,00%	100,00%
1	WB und WB Verb. VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Weißblech / Fe-Metall																		90,00%							10,00%	100,00%
2	WB-Verb. Pfand	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Weißblech / Fe-Metall																		90,00%							10,00%	100,00%
3	FE Schrott	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Weißblech / Fe-Metall																		45,00%		12,88%					42,12%	100,00%

## Ausbringungsdaten Szenario Zukunft

Feinsortierung Nr	Feinsortierung Intecus Ebene 3	UK Ebene 1	UK Ebene 2	0310	0322	0324	0328-1	0328-x	0329	0331	0350	0351-5	0360	0365	412	420	430	435	440	510	550	830	Summe	
4	Alu, Alu Verb. Verp.	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Aluminiumhaltig / NE-Metall													90,00%						10,00%	100,00%	
5	aluh.-Verb. PPK frei	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Aluminiumhaltig / NE-Metall													90,00%						10,00%	100,00%	
6	aluh.-Verb. PPK haltig	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Aluminiumhaltig / NE-Metall													90,00%						10,00%	100,00%	
7	Alu Pfand	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Aluminiumhaltig / NE-Metall													90,00%						10,00%	100,00%	
8	Alu NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Aluminiumhaltig / NE-Metall													45,00%		45,00%				10,00%	100,00%	
9	NE-Schrott	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Aluminiumhaltig / NE-Metall													45,00%		45,00%				10,00%	100,00%	
29	Eimer, Kanister - VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Eimer, Kanister		90,00%																	10,00%	100,00%	
30	Eimer, NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Eimer, Kanister		90,00%																	10,00%	100,00%	
31	FKN	Systemzugehörige LVP-Verpackung	FKN																	90,00%		10,00%	100,00%	
10	Folien < DIN A 4 - VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Folien < DIN A 4								90,00%											10,00%	100,00%	
11	Folie < Din A4 NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Folien < DIN A 4								90,00%											10,00%	100,00%	
12	Folie > Din A4 VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Folien > DIN A 4	90,00%																		10,00%	100,00%	
13	Folie > Din A4 NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Folien > DIN A 4	90,00%																		10,00%	100,00%	
20	PET Flaschen transparent	Systemzugehörige LVP-Verpackung	PET Flächen transparent				90,00%															10,00%	100,00%	
24	KS-Flaschen Pfand	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	PET Flächen transparent				90,00%															10,00%	100,00%	
21	PET Flaschen opak	Systemzugehörige LVP-Verpackung	PET sonstig					90,00%														10,00%	100,00%	
22	sonstige PET Verp.	Systemzugehörige LVP-Verpackung	PET sonstig					90,00%														10,00%	100,00%	
23	PET-NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	PET sonstig					90,00%														10,00%	100,00%	
14	PE-VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Polyethylen (PE)						90,00%													10,00%	100,00%	
15	PE-NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Polyethylen (PE)						63,00%				27,00%									10,00%	100,00%	
16	PP-VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Polypropylen (PP)			90,00%																10,00%	100,00%	
17	PP-NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Polypropylen (PP)			63,00%							27,00%									10,00%	100,00%	
18	PS-VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Polystrol (PS)							90,00%												10,00%	100,00%	
19	PS-NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Polystrol (PS)							63,00%			27,00%									10,00%	100,00%	
32	PPK Verbunde	Systemzugehörige LVP-Verpackung	PPK Verbunde																		90,00%	10,00%	100,00%	
33	Papier VP	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	PPK, kein LVP																			90,00%	10,00%	100,00%
34	Papier-NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	PPK, kein LVP																			90,00%	10,00%	100,00%
35	Papier, Zellstoff -NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	PPK, kein LVP																			90,00%	10,00%	100,00%
27	sonstige MKS-VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	sonstige Kunststoffe								67,50%					22,50%						10,00%	100,00%	
28	MKS NV	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	sonstige Kunststoffe								67,50%					22,50%						10,00%	100,00%	
36	CD's	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	sonstige Kunststoffe												50,00%							50,00%	100,00%	
37	CD's verpackt	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	sonstige Kunststoffe																			100,00%	100,00%	
48	trennbare Kombi VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	trennbare Kombi VP											45,00%		5,00%					10,00%	40,00%	100,00%	
25	PVC-VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
26	PVC-NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
38	Holz VP	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
39	Holz-NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
40	Gummi VP	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
41	Gummi-NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
42	Kork VP	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
43	Kork NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
44	Glas VP	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
45	Glas NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
46	Keramik VP	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
47	Keramik NV	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
49	Haushaltskleinger.	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																	40,00%		60,00%	100,00%	
50	IT und Telek.-geräte	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																	40,00%		60,00%	100,00%	
51	Geräte der Unterh.	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																	40,00%		60,00%	100,00%	
52	elekt. Werkzeug	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																	40,00%		60,00%	100,00%	
53	elekt. Spilezeuge	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																	40,00%		60,00%	100,00%	
54	Glühbirnen, Leuchtm.	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																	40,00%		60,00%	100,00%	
55	Rest Windeln	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
56	Rest Leder	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
57	Textilien	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
58	Batterien	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material												95,00%							5,00%	100,00%	
59	Küchen-/ Gartenab.	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
60	Rest /Störstoffe/Verderbnisabfälle/ Feinkorn	Reste bzw. ungeeignetes Zusatzmaterial im LVP	ungeeignetes LVP Material																			100,00%	100,00%	
1	WB und WB Verb. VP	Systemzugehörige LVP-Verpackung	Weißblech / Fe-Metall													95,00%						5,00%	100,00%	
2	WB-Verb. Pfand	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Weißblech / Fe-Metall													95,00%						5,00%	100,00%	
3	FE Schrott	geeignetes Zusatzmaterial im LVP	Weißblech / Fe-Metall													47,50%		47,50%				5,00%	100,00%	