



Wertstoffpotenzial und Abschöpfungs- möglichkeiten für Restmüll aus Haushalten in Bayern

Hermann Nordsieck
Markus Hertel
Prof. Dr. Wolfgang Rommel

Auftraggeber



Landesgruppe Bayern

Impressum

Alle Rechte (insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung) sind vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Kein Teil der bifa-Texte darf in irgendeiner Form ohne Genehmigung der Herausgeber reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Herausgeber

bifa Umweltinstitut GmbH
Am Mittleren Moos 46
86167 Augsburg

Verfasser

Hermann Nordsieck
Markus Hertel
Prof. Dr. Wolfgang Rommel

Auftraggeber

ATAB – Arbeitsgemeinschaft der Betreiber thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Bayern
VKS – Verband kommunale Abfallwirtschaft und Stadtreinigung im VKU – Landesgruppe Bayern

Gestaltung

Sonja Grazia D'Introno

Druck

Klicks GmbH

1. Auflage 2011

© bifa Umweltinstitut GmbH

INHALTSVERZEICHNIS

1	Veranlassung und Leistungsumfang.....	1
2	Vorgehensweise.....	1
2.1	Ermittlung des theoretischen Wertstoffpotenzials.....	2
2.2	Ermittlung des nutzbaren Wertstoffpotenzials und Identifikation von Maßnahmen zur Abschöpfung.....	2
3	Theoretisches Wertstoffpotenzial.....	3
3.1	Ergebnisse der Sortiergruppen	3
3.2	Wertstoffsorten.....	6
3.3	ABC-Analyse zur Identifikation wertgebender Fraktionen	10
4	Nutzbares Wertstoffpotenzial.....	14
4.1	Versuche zur Umstellung der Wertstofffassung.....	14
4.2	Wertgebende Fraktionen im Licht der Versuche zur verstärkten Wertstoffabschöpfung	14
4.3	Maßnahmen zur Abschöpfung des Wertstoffpotenzials	16
5	Fazit.....	19
6	Literatur	21

1 Veranlassung und Leistungsumfang

In der Öffentlichkeit wird vermehrt darüber diskutiert, dass „Abfall eine Rohstoffquelle der Zukunft“ ist. Diese Diskussion findet sich auch im Entwurf zur Novelle des Kreislaufwirtschaftsgesetzes wieder. Dabei wird oftmals der gesamte Siedlungsabfall mit dem Restmüll aus Haushaltungen gleichgesetzt und Potenziale für einzelne Stoffströme in der Abfallwirtschaft mit Potenzialen im Restmüll vermengt.

Zielsetzung dieses Projektes, das im Auftrag des VKS – Verband kommunale Abfallwirtschaft und Stadtreinigung im VKU, Landesgruppe Bayern – und der ATAB – Arbeitsgemeinschaft der Betreiber thermischer Abfallbehandlungsanlagen in Bayern – durchgeführt wurde, ist es, Aufschluss über theoretische und tatsächliche Potenziale von Wertstoffen im Restmüll aus Haushaltungen zu erlangen und diese sowohl ökologisch als auch ökonomisch einzuschätzen.

Der Leistungsumfang umfasst die Ermittlung des Wertstoffpotenzials und der Möglichkeiten zur Abschöpfung im Restmüll aus Haushaltungen. Zielstellung war, die Ergebnisse einer einfachen qualitativen Bewertung zu unterziehen. Eine inhaltlich tiefergehende Bewertung der Ökoeffizienz war nicht vorgesehen.

2 Vorgehensweise

Ein Teil des in Haushalten anfallenden Abfalls besteht aus Wertstoffen, die über bestehende Sammel- oder Bringsysteme wie Altpapiersammlung, Sammlung von Verpackungsabfällen oder Glascontainer abgeschöpft werden. Der nach Abschöpfen übrig bleibende Restabfall enthält noch Wertstoffe, die entweder bei der Abschöpfung nicht erfasst wurden oder in keine der erfassten Wertstofffraktionen passen. Zu letzteren gehören beispielsweise sogenannte „stoffgleiche Nichtverpackungsabfälle“ aus Kunststoff.

Die Menge der im Restabfall noch enthaltenen Wertstoffe wird im Folgenden als „Theoretisches Wertstoffpotenzial“ bezeichnet.

Ein Teil der im Restabfall enthaltenen Wertstoffe lässt sich direkt nach Abschöpfen durch Sortierung und Reinigung aufbereiten, beispielsweise Papier, Kartonagen und Anteile der Kunststoffe und Metalle. Ein weiterer Teil liegt in Verbunden vor, beispielsweise in Verbundverpackungen, Textilien, Schuhen, Spielzeug oder Elektrogeräten. Für eine Verwertung dieser Fraktionen müsste eine Auftrennung der Verbunde erfolgen. Die Menge der beiden genannten Anteile lässt sich prinzipiell durch Sortieren des Restabfalls gewinnen. Ein dritter Teil der Wertstoffe tritt in geringen Mengen und vergleichsweise fein verteilt auf, so dass er durch Abfallsortierung nicht direkt zugänglich ist. Für eine Verwertung wäre eine Anreicherung aus abgeschöpften Fraktionen erforderlich.

Nur ein Teil des theoretischen Wertstoffpotenzials kann tatsächlich genutzt werden. Einer vollständigen Nutzung steht u. a. entgegen, dass Anteile der Wertstoffe zu kleinteilig oder stark verschmutzt anfallen, dass für manche Wertstoffe kein Verwertungssystem besteht, oder dass u. U. eine Erhöhung des Abschöpfungsgrads nur zu hohen Kosten erreicht werden kann. Der Anteil des theoretischen Wertstoffpotenzials, der tatsächlich genutzt werden kann, wird im Folgenden als „Nutzbares Wertstoffpotenzial“ bezeichnet.

2.1 Ermittlung des theoretischen Wertstoffpotenzials

Als Wertstoffe werden die Stoffe angesehen, die als Sekundärrohstoff – ggf. nach Aufbereitung – mit positivem Marktwert verwertet werden können oder deren Verwertung zu einer Umweltentlastung durch Ersatz von Primärmaterial führt.

Informationen zum Gesamtgehalt an Wertstoffen im Restabfall ergeben sich nur aus Sortieranalysen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei der Abfallsortierung einerseits häufig nur der Grobmüll sortiert wird (Teile > 80 mm) und andererseits die Sortierfraktionen nicht identisch sind mit Wertstofffraktionen. Kunststoffe werden den eingeführten Sortierschemata zufolge beispielsweise nach Folien und Hohlkörper unterschieden, eine Sortierung in unterschiedliche Sorten wie Polyethen (PE) oder Polyester (PET) erfolgt jedoch nicht. Sortenreine Kunststoffe lassen sich aber weitaus besser verwerten als Mischkunststoffe.

Im Einzelnen wurden zur Ermittlung des theoretischen Wertstoffgehaltes in der Restmülltonne herangezogen:

- Sortieranalysen des Bayerischen Landesamtes für Umwelt,
- Sortieranalysen, die das bifa Umweltinstitut (teilweise mit Partnern) durchgeführt hat,
- in anderen Projekten des bifa Umweltinstituts ermittelte Daten,
- Veröffentlichungen zum Thema der Wertstoffgehalte und Potenziale im Restmüll, u. a. Auswertung von Versuchen und Erhebungen zu verschiedenen Getrennsammelsystemen,
- Literaturangaben zum Wertstoffgehalt einzelner Sortierfraktionen.

Der Unterschied zwischen den Sorten verkaufsfähiger Sekundärrohstoffe und den bei Sortieranalysen eingeteilten Fraktionen macht eine Zuordnung erforderlich, die bei der Diskussion des theoretischen Wertstoffpotentials erläutert wird.

2.2 Ermittlung des nutzbaren Wertstoffpotenzials und Identifikation von Maßnahmen zur Abschöpfung

Wie bereits dargestellt, lässt sich von dem theoretischen Wertstoffpotenzial nur ein Teil tatsächlich abschöpfen und nutzen. Für detailliertere Betrachtungen sollten die Wertstoffe ausgewählt werden, von denen der größte Nutzen im Sinn eines Netto-Ertrags oder einer Umweltentlastung erwartet wird.

Zur Auswahl wurde eine erweiterte ABC-Analyse angewandt, in der neben dem theoretischen Wertstoffpotential, die abschöpfbare Menge und die Werthaltigkeit abgeschöpfter Fraktionen sowie mögliche Einsparungen an Treibhausgas-Emissionen sowie der Entwicklungsstand von Verfahren zum Recycling berücksichtigt wurden. Zusätzlich wurde berücksichtigt, ob die Wertstoffe unter Nutzung der stofflichen Eigenschaften zur Substitution von Primärmaterial eingesetzt werden könnten bzw. eine rohstoffliche oder eine energetische Nutzung erfolgt („Erhalt der Stofflichkeit“). Dem gegenüber steht der Aufwand für ein Recycling.

Für die als wesentlich identifizierten Wertstoffe wurde anhand von Literaturangaben zu Getrennsammelsystemen bzw. Ansätzen zur automatischen Sortierung von Restmüll das tatsächlich nutzbare Potenzial unter Berücksichtigung der Produktqualität ermittelt.

Darauf aufbauend wurden Maßnahmen zur verbesserten Abschöpfung diskutiert. Die Auswirkung einer Umsetzung dieser Ansätze auf die Restabfallbehandlungsanlagen hinsichtlich Abfallmengen, Heizwert und Schadstoffbelastung wurden anhand von Informationen zur Zusammensetzung von Restabfall in Bayern [LfU Bayern, 2003; LfU Bayern, 2007; LfU Bayern, 2008] abgeschätzt.

3 Theoretisches Wertstoffpotenzial

3.1 Ergebnisse der Sortiergruppen

Die Ansätze zur Ermittlung des theoretischen Wertstoffpotenzials sind im Abschnitt 2.1 dargestellt. Die Ergebnisse der Sortieranalysen weisen bereits bei Betrachtung der Sortiergruppen eine hohe Streubreite auf, wie in Tabelle 1 und Abbildung 1 zu erkennen ist.

Tabelle 1: Streubreite wertstoffhaltiger Fraktionen im Restabfall

	Mittelwert kg/(E*a)	Min. kg/(E*a)	Max. kg/(E*a)
Summe Wertstoffe	54,8	23,3	113,3
Biomasse	27,4	10,3	49,3
Papier, Pappe, Karton	10,3	2,8	27,0
Glas	4,35	1,40	11,40
Kunststoffe gesamt	7,69	3,30	15,90
Eisen	1,81	0,70	3,68
Nichteisenmetall	0,83	0,30	2,40
Holz	1,62	0,12	6,50
Kleinelektrogeräte, E-Schrott	0,84	0,30	2,40

Diese Streuungen sind zum Teil auf die Siedlungsstruktur im Einzugsgebiet zurückzuführen. In ländlichen Gebieten sind die Wertstoffgehalte im Restabfall in der Regel deutlich geringer als in Bereichen mit dichter Wohnstruktur.

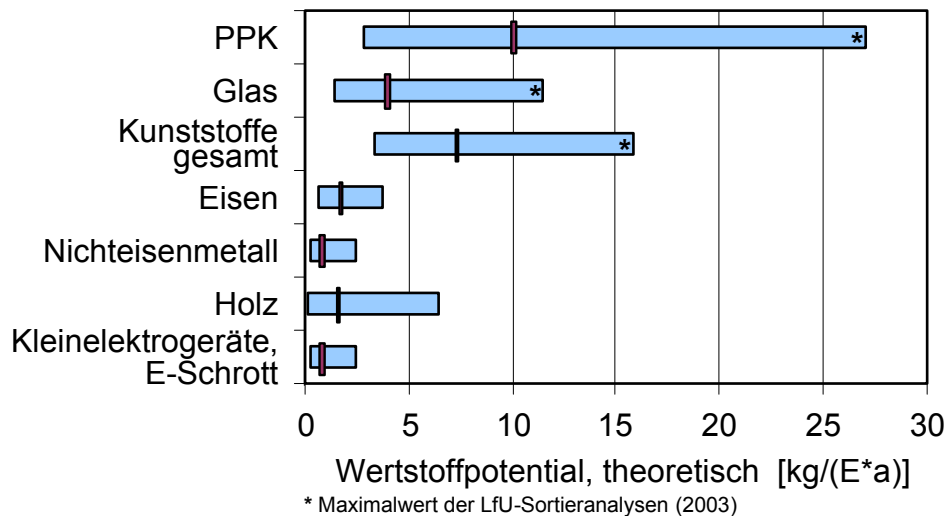


Abbildung 1: Bereiche des theoretischen Wertstoffpotentials (ohne Biomasse, Mittelwert und Bereich zwischen Minimum und Maximum)

Eine aufgrund der großen Zahl zugrundeliegender Sortieranalysen belastbare Darstellung enthält die Untersuchung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt zu Zusammensetzung und Schadstoffgehalten von Siedlungsabfällen [LfU Bayern, 2003]. Der in Abbildung 2 wiedergegebene Auszug aus der Veröffentlichung zeigt einerseits die Zunahme des Restabfallaufkommens mit zunehmender Siedlungsdichte, andererseits aber auch die Zunahme des relativen Anteils einiger wertstoffhaltiger Gruppen wie der Organik, der (Verpackungs-) Verbunde, Glas und der Gruppe Papier, Pappe, Kartonagen.

Überlagert wird der Effekt der Siedlungsstruktur von den Systemen zur Wertstoffabschöpfung. Mit Hilfe verbrauchernaher Hol-Systeme können nicht immer geringere Rest-Wertstoff-Gehalte in Restabfall erreicht werden als mit den Bring-Systemen. Die überwiegend in ländlichen Gebieten etablierten Bring-Systeme schneiden dadurch nicht schlechter ab als die in den meisten Städten betriebenen Hol-Systeme. Bei in großen Mengen anfallenden Wertstofffraktionen wie Bioabfall und Altpapier scheinen aber die Hol-Systeme im Vorteil bezüglich der Wertstoffabschöpfung zu sein (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 4).

Die Daten des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, welche zusammen mit anderen Daten als Basis für die vorliegende Untersuchung dienen, liegen nur aggregiert vor. Daher sind in der vorliegenden Studie eingehende Auswertungen hinsichtlich Siedlungsstruktur und Erfassungssystem nicht möglich. Wie Tabelle 2 zeigt, finden sich die beschriebenen Effekte aber beim Vergleich der Daten aus ländlich und städtisch geprägten Einzugsbereichen wieder.

Tabelle 2: Einfluss der Siedlungsstruktur auf den Anteil werthaltiger Fraktionen

	Mittelwert kg/(E*a)	ländlich kg/(E*a)	städtisch kg/(E*a)
Summe Wertstoffe	54,8	47,0	63,9
Biomasse	27,4	25,2	31,7
Papier, Pappe, Karton	10,3	7,2	13,0
Glas	4,35	3,7	5,2
Kunststoffe gesamt	7,69	7,0	9,3
Eisen	1,81	1,6	1,7
Nichteisenmetall	0,83	0,58	0,69
Holz	1,62	0,93	1,40
Kleinelektrogeräte, E-Schrott	0,84	0,80	0,90

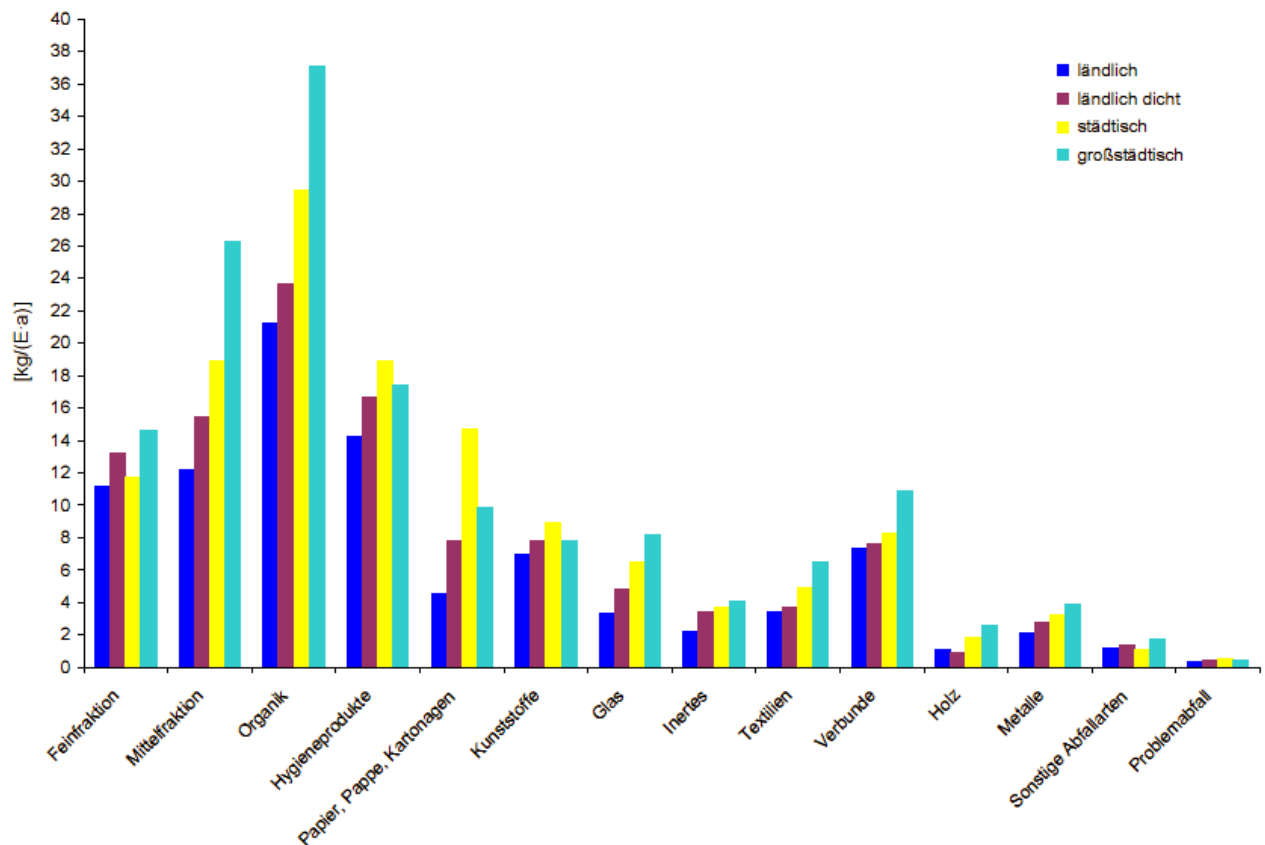


Abbildung 2: Aufkommen der Sortierobergruppen in Abhängigkeit der Einwohnerstrukturklassen
[LfU Bayern, 2003]

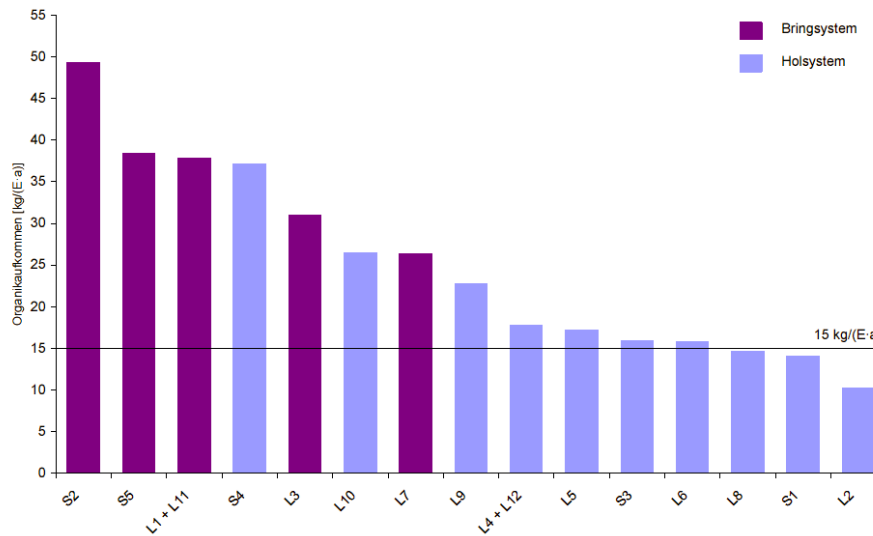


Abbildung 3: Spezifisches Aufkommen der Sortiergruppe Organik in Abhängigkeit des Erfassungssystems [LfU Bayern, 2003]

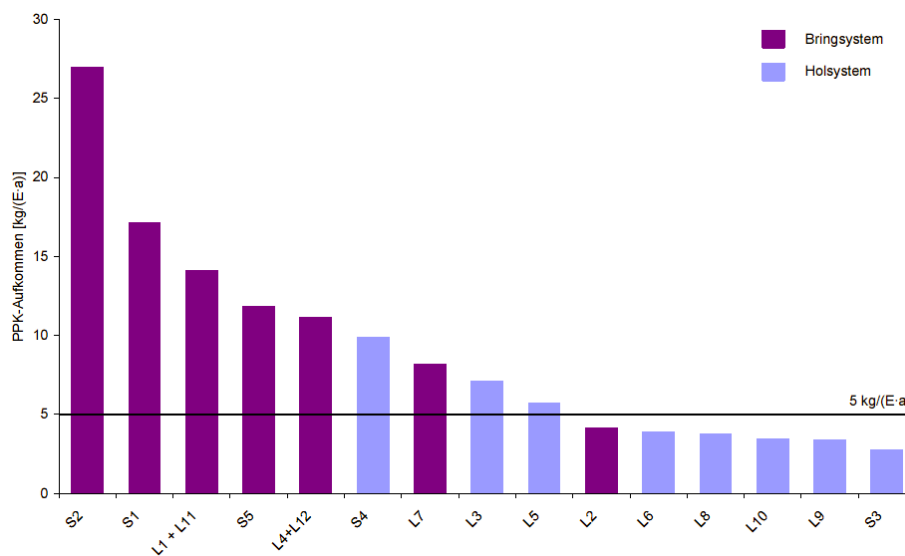


Abbildung 4: Spezifisches Aufkommen der Sortiergruppe Papier, Pappe, Kartonagen in Abhängigkeit des Erfassungssystems [LfU Bayern, 2003]

3.2 Wertstoffsorten

Für eine eingehendere Bewertung müssen den Sortiergruppen Wertstoffsorten, die sich an vermarktba-
ren Produkten orientieren, zugeordnet werden.

Die Zuordnung der Sortiergruppen wird im Zusammenhang mit den Daten für die folgende ABC-
Analyse diskutiert. Soweit nicht anders erwähnt, wurden Angaben zu Marktpreisen dem Branchenblatt
EUWID Recycling und Entsorgung (August – September 2010) entnommen. Die Angaben zu möglichen
Einsparungen an Treibhausgasemissionen beziehen sich auf die Herstellung der beim Recycling substi-
tuierten Stoffe abzüglich der beim Recycling entstehenden Emissionen. Datengrundlage war die Da-
tenbank ecoinvent, Version 2.2. Die beim Recycling theoretisch mögliche THG-Einsparung kann nur bei

1:1 Ersatz von Primärmaterial realisiert werden. Um Materialverluste beim Recycling zu berücksichtigen, werden Abschläge beim spezifischen THG-Potenzial vorgenommen. Zusätzliche Abschläge werden über einen sogenannten Substitutionsfaktor dafür angesetzt, dass recycelte Werkstoffe vielfach geringere Festigkeiten erreichen und somit beim Einsatz von Recyclingwerkstoffen mehr Material für dieselbe Festigkeit eingesetzt werden muss.

Eine hochwertige stoffliche Verwertung ist hinsichtlich der Ressourceneinsparung und in der Regel auch hinsichtlich der Treibhausgas-Einsparung günstiger als ein „Downcycling“ oder eine energetische Verwertung. Dies wurde über den Begriff „Erhalt der Stofflichkeit“ als Bewertungskriterium erfasst.

Organik / Bioabfälle

Mengenmäßig ist Biomasse der Hauptbestandteil des im Restabfall enthaltenen theoretischen Wertstoffpotentials. Trotz der Werthaltigkeit der Fraktion bei energetischer Nutzung durch Vergärung oder bei Verwendung von Komposten zur Bodenverbesserung ist die Abgabe mit einer Zuzahlung verbunden. Insofern besteht kein positiver Marktwert.

Mit der Nutzung von Biomasseabfällen beschäftigt sich eine aktuelle Studie des bifa Umweltinstituts eingehend [Pitschke et al., 2010]. Die vermehrte Abschöpfung aus dem Restabfall ist eine der untersuchten Optionen. Im Spannungsfeld zwischen Ressourcenverbrauch, Energienutzung und Umweltbelastung durch Emissionen kommt die Studie zu dem Schluss, dass die optimale Nutzung von Bioabfällen von den jeweiligen Randbedingungen abhängt, eine weitestgehende Erfassung und fachgerechte Verwertung aber grundsätzlich zu empfehlen ist. Insofern wird hier auf diese wesentlich eingehendere Studie verwiesen und keine neue Bewertung vorgenommen.

Papier, Pappe, Karton

Die Sortierfraktion Papier, Pappe, Karton ist mengenmäßig die zweitstärkste Wertstofffraktion im Restabfall. Sie könnte als gemischtes Papier verwertet werden oder aber nach Sortierung in die Wertstoffsorten als grafische Papiere und Kartonagen. Beide Fälle wurden betrachtet. Dabei ist zu beachten, dass in Tabelle 3 die Gesamtmengen kursiv dargestellt sind. Darin enthaltene Teilmengen sind dadurch mehrfach aufgeführt. Zur Ermittlung des Gesamtpotenzials darf daher nicht die ganze Spalte aufaddiert werden.

Dem Sortiergrad und den bei der Sortierung eintretenden Verlusten entsprechend wurde für das gemischte Altpapier ein Preisabschlag vorgenommen. Den Faserverlusten beim Recycling entsprechend wurde bei den höherwertigen Sorten ein weitgehender Erhalt der Stofflichkeit angesetzt, beim Mischpapier sind merkliche Sortierverluste zu berücksichtigen, so dass hier angenommen wird, dass die Stofflichkeit beim Recycling nur teilweise erhalten bleibt.

Als Treibhausgas-Einsparpotenzial (THG-Einsparpotenzial) wurde für das Recycling der Ansatz aus dem UBA-Vorhaben „Klimaschutzpotenziale in der Abfallwirtschaft“ übernommen, nach dem die Menge des substituierten Holzes als potentieller Energieträger berücksichtigt wird [Dehoust et al., 2010].

Glas

Das im Restabfall enthaltene Glas wurde in den Sortieranalysen des Bayerischen Landesamtes für Umwelt in die Fraktionen Behälterglas und sonstiges Glas sortiert. Das Massenverhältnis dieser Fraktionen wurde für die Zuordnung nicht differenzierender Sortierergergebnisse zu der Wertstoffsorte „Behälterglas, gemischt“ verwendet. Eine Unterscheidung nach Farben wurde nicht vorgenommen. Damit ist wertmäßig eine untere Kategorie von Altglas anzusetzen. Der Ansatz für die Treibhausgas-Einsparung wurde

ebenfalls aus dem UBA-Vorhaben „Klimaschutzpotenziale in der Abfallwirtschaft“ übernommen [Dehoust et al., 2010].

Kunststoffe PE und PET

Bei einer Verwertung der Kunststoffe als Mischkunststoffe ist der Einsatz als Ersatzbrennstoff oder u.U. zur Herstellung von ansonsten aus Holz- oder aus Beton bestehenden Produkten für den Außenbereich denkbar. Aus diesen Anwendungen sind keine oder nur geringe Erträge und ebenso nur eine geringe THG-Einsparung zu erwarten.

Im Restabfall vorhandene Kunststoff-Folien bestehen in der Regel aus Polyethen (PE). Daher wurde die Sortierfraktion Kunststoff-Folien der Wertstoffsorte PE zugeordnet. Für die Verwertung wurde die Einstufung in eine einfache und in eine besser stofflich verwertbare Sorte mit entsprechenden Erlösen und THG-Einsparung je hälftig angesetzt.

Kunststoff-Hohlkörper (in der Regel Blister-Verpackungen, Obstschalen, Flaschen und Kanister) können dagegen aus PE, Polypropen (PP) oder Polyester (PET) bestehen. Hinzu kommt ein geringer Teil an Polystyrol. Die Auswertung der Fotodokumentation eigener Sortieranalysen zeigte, dass rund die Hälfte der Kunststoff-Hohlkörper aus PE bzw. PP bestand. Daher wurden 50% der Hohlkörper der Sorte PE/PP bzw. Polyolefinen zugeordnet, 50% der Sorte PET. Dabei umfasst die Sorte PE/PP sowohl Niederdruck- als auch Hochdruck-Polyethylen und Polypropylen.

Metalle

Bei Sortieranalysen wird Eisen und niedriglegierter Stahl über Magnetscheidung aus dem Sortiergut abgeschieden. Sofern hochlegierte Stähle ausreichend magnetisch sind, werden diese bei der Magnetscheidung mit erfasst. Die Angaben zu Eisenmetallen wurden vollständig der Wertstoffsorte „Stahl, niedriglegiert“ zugeordnet, weil keine Zusatzinformationen zum Anteil hochlegierter Stähle vorliegen. In Sortieranlagen erfolgt die Abscheidung von Eisen und Stahl ebenfalls mittels Magnettechnik, so dass die Zuordnung der Sortierfraktion zu der Wertstoffsorte der Praxis entspricht.

Soweit bei einzelnen Sortieranalysen keine Aufteilung in Aluminium und Kupfer angegeben war, wurden die Werte für Nichteisenmetalle anhand des Mittelwerts der Anteile von Aluminium bzw. Kupfer an den Nichteisenmetallen aus den übrigen Sortieranalysen auf Aluminium und Kupfer verteilt.

Für seltene Elemente wie Selten-Erd-Metalle, Tantal, Gold oder Indium sind keinerlei direkte Angaben zum Gehalt im Restabfall verfügbar. Hier wurde angenommen, dass diese Elemente in ggf. verwertbarer Form ausschließlich im Elektroschrott vorhanden sind. Die Anteile im Elektroschrott wurden anhand von Angaben zur Zusammensetzung von Elektrokleingeräten [Chancerel et al., 2009], deren Gehalt an Tantal-Kondensatoren bzw. LCD-Displays [Huisman et al., 2007] und dem Anteil von Tantal bzw. Indium in den Kondensatoren bzw. Displays berechnet.

Selten-Erd-Metalle werden überwiegend im industriellen Bereich als Legierungsbestandteil, als Bestandteil von Hochleistungsmagneten (Neodym), von Katalysatoren (Cer, Lanthan) und Poliermitteln (Cer) verwendet. In Haushalten werden Selten-Erd-Metalle in geringem Umfang eingesetzt, beispielsweise im Leuchtstoff von Leuchtstofflampen, in Hochleistungsmagneten von Schrittmotoren und in manchen Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren. Soweit solche Materialien als Abfall in Haushalten anfallen, sollten sie von der Elektrokleingeräte-Sammlung und der Batteriesammlung erfasst werden. Die Mengen im Restabfall werden daher als sehr gering eingeschätzt. Zahlenwerte zum Auftreten von Selten-Erd-Metallen im Elektroschrott ließen sich nicht ermitteln, so dass die Überlegungen zur Rückgewinnung als qualitative Betrachtung durchgeführt wurden.

Holz

Aus den Sortieranalysen liegen keine Informationen zur Qualität des im Restabfall enthaltenen Holzes vor. Daher wurde nur eine Wertstoffsorte „Holz“ definiert, die energetisch verwertet wird. Nach [Dehoust et al., 2010] besteht bei der alleinigen Betrachtung der Einsparung von Treibhausgasen nur ein geringer Unterschied zwischen stofflicher und energetischer Nutzung von Altholz, weil auch das in der zitierten Studie verwendete Modell der stofflichen Nutzung das Holz im Bestand für die Substitution fossiler Energieträger belässt. Insofern wird hier auf eine Differenzierung zwischen stofflicher und energetischer Nutzung verzichtet.

Tabelle 3: Zuordnung der Sortierfraktionen zu den Wertstoffsorten (Gesamtmenge sind kursiv dargestellt)

Gruppe	Sortierfraktion	Wertstoffsorte	Massenstrom [kg/(E*a)]
Biomasse	Organik > 40mm	Biomasse	27,4
Papier, Pappe, Karton <i>davon</i>	<i>Papier gesamt</i> grafische Papiere Kartonagen	<i>Mischpapier</i> grafische Papiere Kartonagen	<i>10,3</i> 4,8 3,2
Glas	Glas gesamt Behälterglas, gemischt	Behälterglas gemischt	3,6
Kunststoffe <i>davon</i>	<i>Kunststoffe gesamt</i> Folien	<i>Mischkunststoffe</i> Ansatz 100% PE PE-Folie einfach PE-Folie hochwertig	<i>7,7</i> 1,6 1,6
	Hohlkörper/Flaschen	Ansatz 50% PE, 50% PET Hohlkörper, Polyolefine (PE+PP) Hohlkörper, Polyester (PET)	1,3 1,3
	Schaumstoffe KS-Verpackungsverbunde sonstige Kunststoffe	nicht berücksichtigt nicht berücksichtigt nicht berücksichtigt	
Holz	Holz	Holz	1,6
Metalle (einschl. Anteile aus E-Schrott)	Stahl, magnetisierbar Nichteisenmetall Aluminium Kupfer (-legierungen)	Fe, niedriglegiert Aluminium Kupfer	2,0 0,41 0,51
Elektro- bzw. Elektronikschrott	<i>Metalle aus E-Schrott</i>	<i>Gesamt</i> Eisen Kupfer Aluminium Indium Tantal Selten-Erd-Metalle Silber Gold	<i>0,84</i> oben eingeschlossen oben eingeschlossen oben eingeschlossen 3×10^{-7} 6×10^{-4} keine Angaben 3×10^{-4} 1×10^{-5}

Die Zusammenstellung zeigt, dass das theoretische Wertstoffpotential (ohne Bioabfälle) rund 26 kg/(E*a) beträgt.

3.3 ABC-Analyse zur Identifikation wertgebender Fraktionen

Die ABC-Analyse ist eine Methode zur Klassifizierung von numerischen und nicht numerischen Merkmalen. Durch die Festlegung der Grenzen der Klassen A (günstig), B (mittel) und C (ungünstig) und Klassifizierung nach mehreren Kriterien lassen sich auch in dem komplexen Bereich der teilweise gegenläufigen Eigenschaften verschiedener Verwertungsmöglichkeiten Prioritäten aufstellen.

Die Wertstoffsorten fallen in unterschiedlichen Mengen an, sie haben (nach Aufbereitung) sehr unterschiedlichen Marktwert und die Aufbereitung bis zum verkaufsfähigen Sekundärrohstoff erfordert unterschiedlich hohen Aufwand. Um eine Eingruppierung nach Bedeutung durchzuführen, müssen sowohl Menge als auch Werthaltigkeit und der Aufwand zur Aufarbeitung berücksichtigt werden. Dazu ist die mögliche Umweltentlastung (z.B. Einsparung von Treibhausgasen) ein wichtiges Kriterium. Je nach Aufbereitungstiefe resultieren unterschiedliche Produkte, so dass ein breites Spektrum an Verwertungsoptionen zu bewerten ist.

Neben dem Potenzial der Wertstoffsorten wurde der Aufwand für die Aufarbeitung bis zu marktfähigen Produkten (i.d.R. Sekundärrohstoffe) und der Marktpreis dieser Produkte überschlägig ermittelt. Dabei spielt der Erhalt der Stofflichkeit eine wichtige Rolle, weil er die möglichen Einsparungen an Treibhausgasemissionen beeinflusst. Die Zuordnung erfolgte derart, dass der Verlust des Materials bei energetischer Nutzung als geringer Erhalt der Stofflichkeit angesehen wurde und der Einsatz zur direkten Substitution des entsprechenden Primärwerkstoffs als vollständiger Erhalt der Stofflichkeit eingestuft wurde. Für den Aufwand zur Bereitstellung der Sekundärprodukte wurde in ähnlicher Weise vorgegangen.

Hinzugenommen wurde das Produkt von theoretischem Potenzial und Preis des Sekundärrohstoffs als „Wert“ des Recycling-Produkts.

Eine „einfache“ ABC-Analyse mit der Zuordnung in drei Kategorien (A, B und C) wird der mehrere Größenordnungen überspannenden Breite der Parameter nicht gerecht. Deshalb wurden je 5 Kategorien eingeteilt, die von 1 bis 5 bepunktet wurden. In Tabelle 4 sind die Zuordnungen dokumentiert.

Tabelle 4: Zuordnung von Bewertungspunkten

Punkte	Menge [kg/(E*a)]	Erhalt der Stofflichkeit	Aufwand für Aufarbeitung	etabliert Recycling- verfahren	THG ESP* [kg/(E*a)]	Erlös** [€/t]	Wert*** [€/E*a]
1	1 E-03	gering	sehr hoch	nein = 0	300	0	0,12
2	1	teilweise	hoch	ja = 1	1.000	100	0,25
3	4	weitgehend	mittel		3.000	1.000	0,5
4	10	sehr weitgehend	gering		10.000	10.000	1
5	> 10	vollständig	sehr gering		> 10.000	> 10.000	> 1

* THG ESP: Treibhausgas Einsparpotenzial

** Erlös bzw. Marktpreis

*** Wert = theoretisches Potenzial des Wertstoffs * Erlös bzw. Marktpreis

Tabelle 5: Bewertungsgrundlage

Kategorie	Sorte	Menge [kg/(E*a)]	Erhalt der Stofflichkeit	Aufwand für Aufarbeitung	Recyclingverfahren	THG ESP* [kg CO ₂ -Äq/t]	Marktpreis 08-09/2010 [€/t]	Wert* je Einwohner [€/E*a]
PPK	Papier gemischt	10,27	teilweise	gering	ja	720	70	0,72
davon	Papier, grafisch	4,84	weitgehend	mittel	ja	720	100	0,48
	Kartonagen	3,21	weitgehend	mittel	ja	720	100	0,32
Glas	Behälterglas gemischt	3,62	teilweise	mittel	ja	465	50	0,36
Kunststoffe	Kunststoffe gemischt	7,69	teilweise	sehr gering	ja	200	-40 – 0	-0,3 – 0
davon	PE-Folie einfache V.	1,56	teilweise	mittel	ja	315	50	0,19
	PE-Folie hochwert. V.	1,56	weitgehend	hoch	ja	630	180	0,28
	PE/PP-Hohlkörper	1,31	weitgehend	hoch	ja	630	200	0,26
	PET-Hohlkörper	1,31	weitgehend	hoch	ja	945	300	0,39
Fe	Eisen inkl. Fe in E-Schrott	2,03	sehr weitgehend	mittel	ja	1.140	200	0,41
nFe	Alu inkl. Al in E-Schrott	0,41	sehr weitgehend	hoch	ja	9.918	850	0,35
	Kupfer inkl. Cu in E-Schrott	0,51	vollständig	hoch	ja	3.005	4.800	2,45
Holz	Holz	1,62	gering	sehr gering	ja	940	-40 – 40	-0,3 – 0,3
E-Schrott	Tantal	6,00E-04	vollständig	sehr hoch	nein	160.000	170.000	0,10
	Indium	3,30E-07	vollständig	sehr hoch	nein	50.000	430.000	0,00
	Selten-Erd-Metalle	k.l.	k.l.	k.l.	nein	-	-	-
	Silber	3,1E-04	vollständig	sehr hoch	ja	87.000	480.000	0,15
	Gold	1,15E-05	vollständig	sehr hoch	ja	13.040.000	31.000.000	0,34

* Wert ohne Aufwand für Sortierung und Aufbereitung; k.l.: keine Information

Die Übersicht über die Bewertungsgrundlage zeigt, dass ein Recycling der seltenen Elemente wegen des hohen Aufwands zur Gewinnung hohe spezifische THG-Einsparungen ermöglichen könnte. Von den

untersuchten Elementen bestehen aber nur für Silber und Gold etablierte Recycling-Verfahren, weil die ersten Schritte der Wiedergewinnung Teil des Kupfer-Recyclings sind. Die Anreicherung im Anodenschlamm der elektrolytischen Raffinierung des Kupfers ergibt ein Zwischenprodukt, das direkt in die Produktion von Silber und Gold eingeschleust werden kann. Derartige Möglichkeiten bestehen bei Indium und Tantal nicht. Hier müssten die Wertstoffträger isoliert und gezielt aufgearbeitet werden.

Tabelle 6: Punkteliste der ABC-Analyse

Kategorie	Sorte	Menge [kg/(E*a)]	Hochwertigkeit der Verwertung	Geringer Aufwand für Aufarbeitung	Recyclingverfahren verfügbar	THG ESP* [kg CO ₂ -Äq/t]	Marktpreis [€/t]	Wert* je Einwohner [€/E*a]
		A	B	C	D	E	F	G
PPK	Papier gemischt	5	2	4	1	2	2	4
davon	Papier, grafisch	4	3	3	1	2	3	3
	Kartonagen	3	3	3	1	2	3	3
Glas	Behälterglas gemischt	3	2	3	1	2	2	3
Kunststoffe	Kunststoffe gemischt	4	2	5	1	1	1	5
davon	PE-Folie einfache V.	3	2	3	1	2	2	2
	PE-Folie hochwert. V.	3	3	2	1	2	3	3
	PE-Hohlkörper	3	3	2	1	2	3	3
	PET-Hohlkörper	3	3	2	1	2	3	3
Fe	Eisen inkl. Fe in E-Schrott	3	0	3	1	3	3	3
nFe	Alu inkl. Al in E-Schrott	2	0	2	1	4	3	3
	Kupfer inkl. Cu in E-Schrott	2	5	2	1	4	4	5
Holz	Holz	3	1	5	1	2	1	5
E-Schrott	Tantal	1	5	1	0	5	5	1
	Indium	1	5	1	0	5	5	1
	Selten-Erd-Metalle	-	-	-	0	-	-	-
	Silber	1	5	1	1	5	5	2
	Gold	1	5	1	1	5	5	3

Die Zuordnung von Punkten (vgl. Tabelle 6 und Tabelle 7) zeigt unabhängig davon, ob das theoretische Wertstoffpotential nach Massenstrom und Preis des Sekundärrohstoffs oder nach der möglichen Wertschöpfung bewertet wird, dass dem Recycling von Kupfer in Verbindung mit der Wiedergewinnung von Gold und Silber die höchste Bedeutung zukommt. Die nächst interessante Stoffgruppe ist das Altpapier, das wegen des hohen Stoffstroms eine herausragende Stellung einnimmt. Keine der Wertstoffsorten aus den übrigen Bereichen (Glas, Kunststoffe, Aluminium und Eisen) fällt so weit zurück, dass eine dieser Stoffgruppen uninteressant erscheint.

Tabelle 7: Zusammenfassung der ABC-Analyse

Kategorie	Sorte	Punkte nach Spalten A, B, C, D, E, F 1)	Punkte nach Spalten B, C, D, E, G 2)
PPK	<i>Papier gemischt</i>	16	13
<i>davon</i>	Papier, grafisch	16	12
	Kartonagen	15	12
Glas	Behälterglas gemischt	13	11
Kunststoffe	<i>Kunststoffe gemischt</i>	14	10
<i>davon</i>	PE-Folie einfache V.	13	10
	PE-Folie hochwert. V.	14	11
	PE-Hohlkörper	14	11
	PET-Hohlkörper	15	12
Fe	Eisen inkl. Fe in E-Schrott	13	10
nFe	Alu inkl. Al in E-Schrott	12	10
	Kupfer inkl. Cu in E-Schrott	18	17
Holz	Holz	13	10
E-Schrott	Tantal	(17)	(12)
	Indium	(17)	(12)
	Selten-Erd-Metalle	k.P.	k.P.
	Silber	18	14
	Gold	18	15

1) Bewertung nach Massenstrom und Preis Sekundärrohstoff

2) Bewertung nach möglicher Wertschöpfung

4 Nutzbares Wertstoffpotenzial

Zur Abschätzung des nutzbaren Wertstoffpotenzials wurde die inzwischen umfangreiche Literatur zu den in der Bundesrepublik durchgeführten Versuchen zur Umstellung der Wertstofffassung ausgewertet.

4.1 Versuche zur Umstellung der Wertstofffassung

In den letzten Jahren wurde eine Reihe von Versuchen zur verstärkten Abschöpfung von Wertstoffen aus dem Restabfall durchgeführt. Auf einer Fachtagung zur Kasseler Wertstofftonne wurde über die Versuche eingehend berichtet [Becker, 2009; Ehrhard, 2009; Oetjen-Dehne, 2009; Stremme und Weiß, 2009; Wieckzorek, 2009]. Die Versuche lassen sich unterteilen in

- a) Systeme, in denen die Sammlung in der gelben Tonne um stoffgleiche Nichtverpackungen und ggf. Elektrokleingeräte und Holz unter Ausschluss von Papier erweitert wird (Berlin, Leipzig, Hamburg),
- b) Systeme wie a) unter Einschluss von Papier (Rhein-Neckar-Kreis, Stadt Karlsruhe),
- c) Systeme mit Trennung von Nassmüll und trockenen Wertstoffen (Kassel),
- d) Systeme mit gemeinsamer Sammlung und Trennen entweder des gesammelten Abfalls (GiG, „Zebratonne“, Versuche der RWE) oder
- e) der in auszusortierenden Säcken getrennt gesammelten Wertstoffe (SiB, Iserlohn).

Während bei den Ansätzen a) und b) die Ausweitung der erfassten Wertstoffmengen im Vordergrund steht, sollen die Systeme c) bis e) auch Einsparungen bei der Sammlung erbringen, weil die Zahl der Abfallbehälter sinkt.

Abgesehen von dem Versuch, Leichtverpackungen zusammen mit dem Restabfall zu sammeln und den gesamten Abfall zu sortieren, ist den Ansätzen gemeinsam, dass die zusätzlich erfassten Wertstoffmengen geringer sind als zu Beginn der Versuche erwartet. In der Praxis wurden mit erweiterten Wertstofftonnen 5 - 10 kg/(E*a) Wertstoffe zusätzlich erfasst [Schneider, 2009].

Die Effizienz der Sortierung von Gemischen sinkt mit der Komplexität der Gemische während gleichzeitig der Sortieraufwand steigt. Dies wird als ernstes Hindernis für eine gemeinsame Sammlung von Leichtverpackungen und Restabfall gesehen, wenn weiterhin eine hochwertige stoffliche Verwertung angestrebt wird [Pretz, 2009]. Bei Verwertungsversuchen mit Kunststoffen aus Sortierversuchen mit künstlich hergestellten Mischungen von LVP und Restabfall wurde zudem ein „Müllgeruch“ im Regranulat beobachtet, der die Akzeptanz des Sekundärrohstoffs gefährden könnte [MUNLV NRW, 2005].

4.2 Wertgebende Fraktionen im Licht der Versuche zur verstärkten Wertstoffabschöpfung

Die oben dargestellten Versuche zu erweiterten Sammelsystemen erstreckten sich nur teilweise auf die beiden Wertstoffsorten, die der Potenzialanalyse zufolge die höchste Werthaltigkeit aufweisen: Papier und Kupfer bzw. Kupferlegierungen. Die PPK-Fraktion wurde vielfach wegen des Bestehens funktionierender Sammelsysteme und dem zusätzlichen Sortieraufwand nicht in die Liste der mit einer erweiterten Wertstofftonne zusätzlich zu erfassenden Stoffgruppen aufgenommen. Kupferhaltige Abfälle wurden nur dann zusätzlich erfasst, wenn die Elektrokleingeräte in die Sammlung einbezogen wurden. Alle

Versuche zielten dagegen auf im Restabfall enthaltene sog. „stoffgleichen Nichtverpackungsabfälle“, im Wesentlichen also Kunststoffe, die nicht den Dualen Systemen zuzuordnende Verpackungsabfälle darstellen, Eisen- und Aluminiumschrott.

Papier, Pappe, Kartonagen

Eine vermehrte Abschöpfung von Papier scheint entweder mittels einer um die Fraktion PPK erweiterten Wertstofftonne („Wertstofftonne PPK“) oder durch häufige verbrauchernahe Papiersammlung möglich. Bei der Sortierung von gemischten Wertstoffen verursacht die Fraktion PPK merklichen Zusatzaufwand, wenn die Produktqualität beibehalten werden soll [Pretz, 2009]. Bemühungen um das Altpapier erfolgten zu Zeiten hoher Altpapierpreise im Jahr 2008 vielerorts über das Aufstellen von zusätzlichen Papiertonnen durch private Entsorger. Eine Verbesserung der Abschöpfung von Altpapier-Restmengen ergab sich dabei aber allenfalls als Nebeneffekt. Etablierte Altpapier-Sammelsysteme müssen auch in Zeiten nachlassender Altpapierpreise bestehen können. Daher sei unstrittig, dass etablierte Altpapiersammelsysteme bestehen bleiben sollten [Urban, 2009].

In Bayern lag der Anteil der PPK-Fraktion im Restabfall zwischen 2,8 % und 27 % (Masse). Auch wenn der Spitzenwert aus einem vergleichsweise alten Datensatz stammt ([LfU Bayern, 2003]), sind die beiden höchsten Anteile in neueren Datensätzen mit 20 kg/(E*a) nicht sehr viel niedriger. Der große Unterschied zwischen den einzelnen Gebietskörperschaften weist darauf hin, dass in einzelnen Gebietskörperschaften ein hohes Potenzial an PPK abgeschöpft werden könnte, in anderen dagegen nicht. Sofern die abzuschöpfende Menge trocken erfasst wird, ist zu erwarten, dass sie tatsächlich stofflich verwertet werden kann, weil bei der Altpapiersortierung in der Regel sehr viel geringere Anteile an Sortierresten anfallen als bei der Sortierung von Leichtverpackungen.

Kupferhaltige Abfälle

Die Abschöpfung zusätzlicher Kupfermengen mit den Begleitstoffen Gold und Silber ist daran gebunden, dass Elektro- und Elektronik-Geräte vom Restabfall weg in die Wertstoffsammlung gelenkt werden. Als Ansatz dazu kommt die Erweiterung der verbrauchernahen Wertstoffsammlung um Elektrokleingeräte in Frage. Mit den entsprechend erweiterten Wertstofftonnen können 0,8 -1,2 kg/(E*a) Elektroaltgeräte erfasst werden [Oetjen-Dehne, 2009; Schneider, 2009]. Das entspricht der Menge an Elektroaltgeräten, die als theoretisches Wertstoffpotenzial im Restabfall ermittelt wurde, stellt aber weniger als die Hälfte des Aufkommens an Elektroaltgeräten in mülltonnengängiger Größe dar (in Bayern im Jahr 2005 ca. 2,6 kg/(E*a) [LfU Bayern, 2006]).

Kunststoffabfälle

Bei den Versuchen zur verbesserten Wertstoffabschöpfung über die Einführung von Wertstofftonnen bzw. der Erweiterung des Sammelspektrums wurde versucht, sowohl die im Restabfall verbleibenden Verpackungsabfälle zu erfassen als auch sonstige Kunststoffabfälle abzuschöpfen. Während in Verpackungen überwiegend Polyethen (PE-HD und PE-LD), Polypropen (PP), Polyester (PET) und Polystyrol (PS) eingesetzt werden, können in den sonstigen Kunststoffabfällen neben ABS und PVC auch PU-Schaum und andere Kunststoffsorten auftreten. Systeme zum stofflichen Recycling für post-consumer Kunststoffe bestehen für PE, PP, PET und PS, eingeschränkt auch für PVC und PU, für sonstige Kunststoffe aber allenfalls in Spezialgebieten. Aus den Erfahrungen mit der GelbenTonne^{plus} wurde berichtet, dass rund 7 kg/(E*a) Wertstoffe zusätzlich erfasst wurden, von denen 22,8% als Kunststoffe stofflich genutzt werden konnten [Langen et al., 2008]. Das ergibt eine Menge von 1,6 kg/(E*a). Diese Zahl ist in guter Übereinstimmung mit dem oben unter Einbeziehen der nur qualitativ ausgedrückten Erfahrungen anderer Modellversuche abgeschätzten nutzbaren Potenziale an stofflich verwertbaren Kunststoffen.

4.3 Maßnahmen zur Abschöpfung des Wertstoffpotenzials

Als Maßnahmen zur Abschöpfung des Wertstoffpotenzials bieten sich prinzipiell die Möglichkeiten:

- Sortierung des Restabfalls, ggf. ohne Veränderung der Sammelstruktur
- Einführen einer Wertstofftonne (trocken)
- Verbesserung der Effizienz der bestehenden Systeme

Sortierung des Restabfalls

Die erste Möglichkeit ist insbesondere ohne Änderung an der Sammelstruktur eher als eine theoretische anzusehen – die nachträgliche Sortierung des verbliebenen Restabfalls würde es weder erlauben, die Papierfraktion in brauchbarer Qualität zu erfassen, noch wäre sie angesichts der geringen Werterschöpfung und geringen möglichen THG-Einsparung vertretbar. Die Restabfallsortierung mit Änderung der Sammelstruktur („Gelb in Grau“, „Zebratonne“) ist umstritten. Neben den unter 4.1 bereits genannten technischen Aspekten wird befürchtet, dass bei einer gemeinsamen Erfassung von Leichtverpackungen und Restmüll negative Auswirkungen auf das Umweltbewusstsein der Verbraucher eintreten und dadurch auch der Sammelerfolg bei den weiterhin getrennt zu sammelnden Wertstoffen Glas und Papier sinkt [PSPC et al., 2005].

Wertstofftonne

Für den Fall, dass eine trockene Wertstofftonne zur Abschöpfung von Leichtverpackungen, stoffgleichen Nichtverpackungen sowie Papier, Pappe, Kartonagen und Elektrokleingeräten eingeführt würde, ergäbe sich folgendes Bild:

Es wird angenommen, dass mit 5–10 kg/(E*a) knapp ein Drittel des theoretischen Wertstoffpotenzials von 26 kg/(E*a) zusätzlich abgeschöpft werden kann. Damit ergibt sich eine Menge von insgesamt 8 kg/(E*a) und, hochgerechnet auf Bayern, 102.000 t/a. Bei einer energetischen Verwertung der abgeschöpften Kunststoffe werden zwar fossile Brennstoffe eingespart, es ergibt sich aber keine Einsparung an Treibhausgasemissionen, weil die Kunststoffe selbst aus fossilen Kohlenstoffquellen hergestellt werden. Die energetische Verwertung abgeschöpfter Papiermengen ergibt eine Treibhausgas-Einsparung, in ähnlicher Höhe wie bei der stofflichen Verwertung.

Zur Berechnung der möglichen Treibhausgas-Einsparungen bei der Verwertung der abgeschöpften Wertstoffmengen wird daher davon ausgegangen, dass diese überwiegend stofflich verwertet werden. Damit berechnet sich das Treibhausgaseinsparpotenzial ohne Berücksichtigung des zusätzlichen Aufwands für die Sortierung auf rund 87.000 t CO₂-Äq/a in Bayern. Die Mitsortierung der Fraktion PPK erfordert erhöhten Aufwand bei der Sortierung. Wenn die Fraktion PPK nicht in die erweiterte Erfassung einbezogen wird, sinkt zwar der Aufwand, die zusätzlich verwertbaren Mengen und die erzielbaren THG-Einsparungen sinken jedoch ebenfalls stark, nämlich auf rund 60.000 t/a bzw. 56.000 t CO₂-Äq/a (jeweils auf Bayern bezogen). Wenn angenommen wird, dass nicht abgeschöpfte PPK-Anteile zusammen mit dem verbleibenden Restabfall energetisch verwertet werden, verringert sich der Unterschied entsprechend dem mittleren energetischen Wirkungsgrad der Abfallheizkraftwerke. Die Realisierung der berechneten Ressourcen- und Treibhausgaseinsparungen durch die Verwertung abgeschöpfter Elektro-Altgeräte setzt voraus, dass im Gegensatz zu teilweise (noch) praktizierten Ansätzen eine hochwertige Verwertung erfolgt. Der nachvollziehbare Nachweis einer vollständigen Verwertung ist daher Bedingung, um die errechneten Einsparungen ansetzen zu können.

Tabelle 8: Auswirkungen der Abschöpfung über eine erweiterte Wertstofftonne

Kategorie	Sorte	Theoretisches Wertstoffpotenzial [kg/(E*a)]	Nutzbares Wertstoffpotenzial (1/3 des theoretischen Wertstoffpotenzials)		THG ESP ohne Sortieraufwand	Wertstoffeffassung (Bayern 2008, o. Bioabf.) [kg/(E*a)]	Mögliche Steigerung Wertstoffeffassung
			[kg/(E*a)]	[t/a]	[t CO ₂ -Äq/a]		
Summe	ohne PPK	26,15	8,19 4,76	102.323 59.544	86.826 56.025	155	5%
PPK	Papier gemischt	10,27	3,42	42.779	30.801	83,4	4%
davon	Papier, grafisch	4,84	1,45	18.150	13.068	-	-
	Kartonagen	3,21	0,96	12.029	8.661	-	-
Glas	Behälterglas gemischt	3,62	1,08	13.561	6.306	24,0	4%
Kunststoffe	Kunststoffe gemischt	7,69	2,31	28.832	5.766	18,5	9%
davon	PE-Folie einfache V.	1,56	0,47	5.852	1.843	-	-
	PE-Folie hochwert. V.	1,56	0,47	5.852	3.687	-	-
	PE-Hohlkörper	1,31	0,39	4.910	3.094	-	-
	PET-Hohlkörper	1,31	0,39	4.910	4.640	-	-
Fe	Eisen inkl. Fe in E-Schrott	2,03	0,61	7.611	8.677	10,7 (Summe Eisen, nicht-Eisen-Metalle)	6%
nFe	Alu inkl. Al in E-Schrott	0,41	0,12	1.544	15.311		
	Kupfer inkl. Cu in E-Schrott	0,51	0,15	1.913	5.748		
Holz	Holz	1,62	0,49	6.079	5.715	18,8	2%
E-Schrott	Tantal	6,0E-04	1,8E-04	2,3E+00	360	-	-
	Indium	3,3E-07	9,9E-08	1,2E-03	0,1	-	-
	Selten-Erd-Metalle	k.A.	k.A.	-	-	-	-
	Silber	3,1E-04	9,4E-05	1,2E+00	102	-	-
	Gold	1,1E-05	3,3E-06	4,2E-02	543	-	-

Mit Abschöpfen von Holz, Kunststoffen, Papier, Pappe und Kartonagen werden heizwertreiche Fraktionen dem Restabfall entzogen. Bei einem mittleren Aufkommen an Haus- und Geschäftsmüll von 146 kg/(E*a) [LfU Bayern, 2009] und einem mittleren Heizwert von 9 MJ/kg Restabfall beträgt der Energieanfall je Einwohner und Jahr rechnerisch 1.314 MJ/(E*a). Mit den Wertstoffen werden 163 MJ/(E*a) entzogen. Damit sinkt der mittlere Heizwert rechnerisch auf 8,4 MJ/kg.

Auch wenn den Untersuchungen des LfU zufolge [LfU Bayern, 2003] Elektroaltgeräte im Restabfall zur Gesamt-Schadstofffracht nicht überwiegend beitragen, ist doch auf den vergleichsweise hohen Schadstoffgehalt der Elektroaltgeräte hinzuweisen. Mit einer verbesserten Abschöpfung der Elektroaltgeräte ließe sich daher auch eine Verbesserung der Schadstoffentfrachtung des Restabfalls erzielen.

Verbesserung der Effizienz der bestehenden Systeme

Eine Verbesserung der bestehenden Systeme kann im Rahmen des Auftrags nur qualitativ bewertet werden, darüber hinausgehende Betrachtungen können im Rahmen dieser Studie nicht vorgenommen werden.

In der bestehenden Struktur in Bayern werden stoffgleiche Nichtverpackungen bereits in großem Maß über Wertstoffhöfe erfasst. Dieses Bringsystem hat sich in ländlichen Einzugsgebieten bewährt. In Gebieten mit verdichteter Wohnstruktur haben sich Hol-Systeme bewährt, so dass zu prüfen wäre, welcher Effekt sich allein durch Ausweiten der Holsysteme auf alle Gebiete mit verdichteter Wohnstruktur ergeben würde.

In der Praxis werden die Holsysteme bereits teilweise zur Erfassung von stoffgleichen Nichtverpackungen aus Kunststoff genutzt. Diese Praxis könnte legalisiert und propagiert werden, was aber letztlich eine geringfügige Erweiterung der LVP-Sammlung bedeutet. Über die Kostenverteilung müsste im Vorfeld Klarheit geschaffen werden.

Eine Verbesserung der Effektivität der bestehenden Systeme über Aufklärungskampagnen sollte gezielt dort einsetzen, wo derzeit eine besonders geringe Zielerreichung besteht. Im Vorfeld dazu wäre eine örtlich auflösende Bewertung der derzeitigen Effizienz erforderlich. Wenngleich nicht so groß wie bei PPK bestehen deutliche Unterschiede auch in den Potenzialen der anderen Wertstoffe zwischen den einzelnen Gebietskörperschaften.

Die in Bayern überwiegende energetische Nutzung des Restabfalls nutzt bereits den Energiegehalt der im Abfall verbliebenen Wertstoffe. Eine Verbesserung könnte durch Effizienzsteigerung der Verbrennungsanlagen erfolgen. Hier steht die Wärmenutzung im Vordergrund, da alle bestehenden Anlagen bereits Strom produzieren.

Die Wiedergewinnung von Eisen- und Nichteisenmetallen erfolgt über die Aufarbeitung der Rostaschen (Schlacken) nach der Verbrennung. Diese kann somit als thermischer Aufschluss des Verbundes „Restabfall“ angesehen werden. Im Bereich der Nichteisenmetalle scheinen noch Potenziale zur Verbesserung der Nutzung zu bestehen: derzeit beträgt die Ausbeute an Nichteisenmetallen bei der Schlackeaufarbeitung vielfach unter 30% [Böni, 2010], technisch möglich ist in den bestehenden Systemen eine Ausbeute von rund 40% [Kersting, 2008; MUNLV NRW, 2009]. Nach den ersten Erfahrungen mit trockenem Austrag der Rostasche in der Schweiz erscheint dieser Ansatz viel versprechend, um hohe Ausbeute an Nichteisenmetallen zu erhalten [Böni, 2010]. Bislang sind aber die Aufbereitung der Grobschlacke und die Staubkontrolle noch zu verbessern. Sobald die entsprechenden Systeme sich in der Praxis bewährt haben, erscheint eine Umstellung auf trockenen Schlackenaustrag erwägenswert.

5 Fazit

Die Ergebnisse der Studie lassen sich in folgenden Punkten zusammenfassen:

- Biomasse hat den größten Anteil am theoretischen Wertstoffpotenzial im Restmüll. Den Ergebnissen der Studie „Ökoeffiziente Verwertung von Bioabfällen und Grüngut in Bayern“ zufolge ist eine möglichst flächendeckende Getrennterfassung mit Verwertung nach guter fachlicher Praxis zu empfehlen [Pitschke et al., 2010].
- Nach ökologischen und ökonomischen Kriterien stellt die Nichteisenmetall-Fraktion wegen des Gehalts an Kupfer, Silber und Gold die wertstoffhaltigste Fraktion dar.
- Das nutzbare Potential an Papier, Pappe und Kartonagen im Restabfall ist stark unterschiedlich zwischen den Gebietskörperschaften, teilweise ist es beträchtlich.
- Die bisher vorliegenden Ergebnisse von Modellversuchen zur zusätzlichen Wertstoffabschöpfung lassen erwarten, dass im Mittel etwa 1,7 kg/(E*a) Kunststoffe zusätzlich stofflich verwertbar sein werden.
- Eine Nachsortierung des Restabfalls zur zusätzlichen Gewinnung hochwertiger Wertstoffe ist nicht zu empfehlen.
- Bei einer Prüfung der bestehenden Erfassungssysteme und Alternativen für eine erweiterte Erfassung müssen lokal unterschiedliche Randbedingungen berücksichtigt werden.
- Zur Erfassung der Wertstoffe sind bestehende Systeme gegebenenfalls zu erweitern, wobei unter dem Gesichtspunkt der Effizienz und der Ressourcenschonung eine erweiterte Erfassung in Konkurrenz zu bestehenden Systemen zu vermeiden ist.
- Funktionierende Systeme zur getrennten Wertstofferrfassung (Papier, Glas) sollten nicht verändert werden.
- Die Möglichkeit einer nennenswerten Rückgewinnung Seltener Metalle oder Seltener Erden direkt aus dem Restmüll ist nicht abzuleiten.
- Eine verbrauchernahe E-Schrottsammlung ist zu empfehlen. Mit einem hohen Erfassungsgrad für Elektro-Altgeräte können Gold-, Silber- und Kupfer-Anteile abgeschöpft werden.
- Die Treibhausgas-Einsparung durch die Nutzung von Abfällen betrug in Bayern im Jahr 2005 rund 720.000 t CO₂-Äquivalente (netto, [Pitschke, Kreibe, 2007]). Das Potenzial an Treibhausgas-Einsparung von zusätzlich 87.000 t CO₂-Äquivalenten jährlich in Bayern ohne den zusätzlichen Aufwand für Erfassung und Sortierung lässt erwarten, dass netto gegenüber der gesamten Treibhausgaseinsparung durch die Abfallwirtschaft in Bayern nur ein vergleichsweise geringer ökologischer Nutzen entsteht.
- Der Wert der nutzbaren Wertstoffe im Restabfall (ohne Biomasse) wurde auf rund 2 €/E*a abgeschätzt. Dem müssen die in dieser Studie nicht ermittelten Kosten der zusätzlichen Erfassung und Sortierung gegen gerechnet werden. Daher ist eine Einsparung von Kosten durch verbesserte Wertstoffnutzung aus der Datenlage nicht abzuleiten.

6 Literatur

Becker, G. (2009): Modellversuche zu alternativen Erfassungssystemen – eine aktuelle Übersicht. In: A. Urban und G. Halm (Hrsg.): Kasseler Modell – mehr als Abfallentsorgung. Schriftenreihe des Fachgebiets Abfalltechnik. Bd. 9. S. 49-56. kassel university press GmbH, Kassel.

Böni, D. (2010): Ausbeute aus der Trockenschlacke. In: R. Warnecke (Hrsg.): VDI-Fachkonferenz Feuerung und Kessel – Beläge und Korrosion in Großfeuerungsanlagen. S. 145-159. VDI Wissensforum GmbH, Düsseldorf.

Chancerel, P., Meskers, C., et al. (2009): Assessment of metal flows during pre-processing of waste electrical and electronic equipment focusing on precious metals. J. Industrial Ecology 13(5): 791 – 810.

Dehoust, G., Schüler, D., et al. (2010): Klimaschutzpotentiale in der Abfallwirtschaft. Bericht FKZ 3708 31 302, Umweltbundesamt, Dessau.

Ehrhard, A. (2009): Grüne Tonne plus – ein alternatives Wertstofffassungssystem. In: A. Urban und G. Halm (Hrsg.): Kasseler Modell – mehr als Abfallentsorgung. Schriftenreihe des Fachgebiets Abfallwirtschaft. Bd. 9. S. 71 – 80. kassel university press GmbH, Kassel.

Huisman, J., Magalini, F., et al. (2007): 2008 Review of Directive 2002/96 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Bericht 07010401/2006/442493/ETU/G4, United Nations University, Bonn.

Kersting, D. (2008): Ausbeuten an Eisen- und Nichteisenmetallen bei der Schlackeaufbereitung. Persönliche Mitteilung, zitiert in MUNLV NRW 2009.

Langen, M., Weber, H., et al. (2008): Erfahrungen mit dem System GelbeTonne plus in der Stadt Leipzig und dem Land Berlin. Müll und Abfall 2008: 236-240.

LfU Bayern (2003): Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen. Bericht 3-936385-42-4, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.

LfU Bayern (2006): Abfallwirtschaft. Hausmüll in Bayern. Bilanzen 2005, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.

LfU Bayern (2007): Restmüllzusammensetzung in Phasing-Out-Gebieten (EU Ziel-2-Programm Bayern). Abschöpfbares Wertstoffpotenzial als Funktion abfallwirtschaftlicher Rahmenbedingungen, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.

LfU Bayern (2008): Restmüllzusammensetzung, Einflussfaktoren, Abhängigkeit von lokalen abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen (EFRE-Ziel 2 – Gebiete in Bayern), Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.

LfU Bayern (2009): Informationen aus der Abfallwirtschaft. Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2008, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg.

MUNLV NRW (2005): Ökologische und ökonomische Bewertung von Sammelsystemen für Haushaltsabfälle in Nordrhein-Westfalen. Bericht 3-9810063-4-8, Ministerium für Umwelt, Naturschutz Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

MUNLV NRW (2009): Ressourcen- und Klimaschutz in der Siedlungsabfallwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf.

Oetjen-Dehne, R. (2009): Erfahrungen mit dem System Grüne Tonne plus in Leipzig und Berlin. In: A. Urban und G. Halm (Hrsg.): Kasseler Modell - mehr als Abfallwirtschaft. Schriftenreihe des Fachgebiets Abfallwirtschaft. Bd. 9. S. 57 - 70, Kassel.

Pitschke, T. und Kreibe, S. (2007): Aktualisierung der Ökoeffizienzanalyse für die Entsorgungsstrukturen Bayerns, Deutschlands und der Schweiz. bifa-Text Nr. 38. bifa Umweltinstitut, Augsburg.

Pitschke, T., Kreibe, S., et al. (2010): Ökoeffiziente Verwertung von Bioabfällen und Grüngut in Bayern. bifa-Text Nr. 47. bifa Umweltinstitut GmbH, Augsburg.

Pretz, T. (2009): Neue Sammelsysteme - Auswirkungen auf die Sortiertechnologien und erzielbare Produktqualitäten. In: K. Fricke, C.-G. Bergs, G. Kosak und R. Wallmann (Hrsg.): Trennen oder Verbrennen? 70. Symposium des ANS e.V. Schriftenreihe des ANS. Bd. 51. S. 87-97. Orbit e.V, Weimar.

PSPC, TU Berlin und Prof Versteyl Rechtsanwälte (2005): Die Kosten der Abfallpolitik für Verbraucher (Kurzfassung). Verbraucherverband Bundeszentrale e.V., Berlin.

Schneider, I. (2009): Hamburger Wertstofftonne. In: K. Fricke, C.-G. Bergs, G. Kosak und R. Wallmann (Hrsg.): Trennen oder Verbrennen? 70. Symposium des ANS e.V. Schriftenreihe des ANS. Bd. 51. S. 81 - 86. Orbit e.V., Weimar.

Stremme, S. und Weiß, K. (2009): Umsetzung und Erfahrungen im Bereich der Sammlung mit dem System "Nasse und Trockene Tonne". In: A. Urban und G. Halm (Hrsg.): Kasseler Modell - mehr als Abfallentsorgung. Schriftenreihe des Fachgebiets Abfallwirtschaft. Bd. 9. S. 81 - 92. kassel university press GmbH, Kassel.

Urban, A. (2009): Neue Sammelsysteme - Mengen, Qualitäten, Kosten. In: K. Fricke, C.-G. Bergs, G. Kosak und R. Wallmann (Hrsg.): Trennen oder Verbrennen? 70. Symposium des ANS e.V. Schriftenreihe des ANS. Bd. 51. S. 69 - 80. Orbit e.V., Weimar.

Wieckzorek, M. (2009): "Sack im Behälter" - das zukunftsweisende Entsorgungssystem. In: A. Urban und G. Halm (Hrsg.): Kasseler Modell - mehr als Abfallentsorgung. Schriftenreihe des Fachgebiets Abfallwirtschaft. Bd. 9. S. 81 - 88. kassel university press GmbH, Kassel.

bifa Umweltinstitut GmbH

Am Mittleren Moos 46

86167 Augsburg

Tel. +49 821 7000-0

Fax. +49 821 7000-100

www.bifa.de