

## Diplomarbeit

# Schwermetallherkunft in den Inputfraktionen einer Alternativbrennstoffverwertungs- anlage

erstellt am

**Institut für Nachhaltige Abfallwirtschaft und  
Entsorgungstechnik**

**Vorgelegt von:**

Bakk.-techn. Gernot Kreindl  
m9930753

**Betreuer:**

Mag. Dr.mont. Wolfgang Staber, MBA (GM)  
O.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Karl E. Lorber  
Mag. Gerald Schmidt

Leoben, 24.05.2007

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

## DANKSAGUNG

An dieser Stelle danke ich allen, die durch Ihr Zutun zum Zustandekommen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein besonderer Dank gebührt meinem Betreuer IAE-Institutsvorstandstellvertreter Mag. Dr. mont. Wolfgang Staber, MBA (GM), der mir nicht nur diese interessante Arbeit verschafft hat, sondern mich auch fachlich unterstützte und mir die notwendige Freiheit für die Durchführung meiner Diplomarbeit einräumte.

Ich danke Herrn Mag. Gerald Schmidt, dem Geschäftsführer der Thermo Team Alternativbrennstoffverwertungs GmbH, der die Diplomarbeit in Auftrag gegeben hat. Außerdem möchte ich mich bei allen Thermo Team-MitarbeiterInnen, allen voran beim Betriebsleiter Herrn Josef Kulmer für die freundliche Unterstützung bedanken. Ein besonderes Lob gebührt auch Frau Heike Ettl, die mir laufend Informationen über die Betriebsanlage zukommen ließ.

Weiters möchte ich den MitarbeiterInnen des IAE-Institutes der Montanuniversität danken, insbesondere Herrn DI Hannes Menapace, der mir vor allem bei der Sortieranalyse mit Rat und Tat zur Seite stand. Ein großes Dankeschön auch an den IAE-Laborleiterstellvertreter Herrn DI Norbert Kienzl und an das gesamte Laborteam für die großartige Unterstützung.

Ein weiteres Dankeschön gilt meinen am IAE-Institut beschäftigten Kollegen und Freunden, allen voran Thomas Zmek und Franz Schöffmann, die mir bei der Durchführung der praktischen Arbeiten halfen.

Außerdem danke ich dem Ex-Studienkollegen Herrn DI Alexander Curtis, Zuständig für die Forschung und Entwicklung bei der Saubermacher Dienstleistungs AG für die anregenden Diskussionen und den Erfahrungsaustausch.

Vielen Dank auch an alle Freunde und Kollegen, die mich während meines Studiums begleiteten und moralisch unterstützten. Die Zeit an der Montanuniversität wird mir in unvergesslicher Erinnerung bleiben.

Ein ganz spezieller Dank ergeht an einen ganz besonderen Menschen, meine Freundin Bettina, die mir nicht nur eine emotionale Stütze während meines Studiums war, sondern mir auch Verständnis, Glück und Liebe geschenkt hat.

Abschließend möchte ich mich bei meiner lieben Familie bedanken, die mich nicht nur in finanzieller Hinsicht unterstützt hat, sondern mir auch in allen Lebenslagen treu beiseite gestanden ist und es weiterhin tut. Danke, dass Ihr mir mein Studium ermöglicht habt.

## **Kurzfassung**

### **Schwermetallherkunft in den Inputfraktionen einer Alternativbrennstoffverwertungsanlage**

Der Trend zum Einsatz alternativer Energieträger gegenüber der Nutzung fossiler Brennstoffe hat in den letzten Jahren global gesehen zugenommen. Vor allem bei energieintensiven Produktionsprozessen führt die thermische Verwertung heizwertreicher Abfallfraktionen zur Reduktion des Primärbrennstoffeinsatzes. Neben der Schonung von Primärressourcen (Erdöl, Erdgas und Kohle) trägt die thermische Verwertung heizwertreicher Abfallfraktionen auch zum Schutz der Umwelt bei. Für die Erzeugung hochwertiger umweltschonender Sekundärbrennstoffe spielen eine Reihe von Qualitätskriterien, u.a. der maximal zulässig Schwermetallgehalt im Abfallbrennstoff, eine wichtige Rolle. Zur Erfüllung dieser Anforderung müssen Hersteller von Sekundärbrennstoffen den Eintrag von Schwermetallen, wie Antimon und Blei in den Produktionsprozess vermeiden. Aus diesem Grund liegt das Hauptaugenmerk von Sekundärbrennstoffherstellern in der ständigen Verbesserung von betriebseigenen Qualitätssicherungskonzepten, mit dem vorrangigen Ziel, qualitätsgesicherte Sekundärbrennstoffe zu erzeugen. Neben dem Einbringen von Antimon und Blei in den Produktkreislauf wird im Zuge dieser Arbeit auch auf deren Verteilung in den Inputfraktionen einer Alternativbrennstoffproduktionsanlage eingegangen. Eine im Anschluss an die Probenahme betriebene Schwermetallanalytik gibt Aufschluss über Schwermetallgehalte in den einzelnen Inputfraktionen der Aufbereitungsanlage. Auf den gewonnenen Messergebnissen basierend, bildet den Abschluss dieser Arbeit die Vorstellung von Sortiertechniken zur Ausschleusung von Schwermetallen aus dem Abfallstrom.

## **Abstract**

### **Origin of heavy metals in the input fractions of an alternative fuels production plant**

The trend towards the use of alternative sources of energy in relation to the use of fossil sources of energy has increased globally in the last years. Particularly with energy-intensive production processes the thermal utilization of heat value-rich waste fractions leads to the reduction of the primary fuel inventory. Besides the conservation of primary resources (oil, natural gas and coal) the thermal utilization of heat value-rich waste fractions also contributes to the protection of the environment. For the production of high-quality environmentally friendly alternative fuels a set of quality criteria play, among other things the maximally permissible heavy metal content in the waste fuel, an important role. For the fulfillment of these requirements manufacturers of alternative fuels must avoid the use of heavy metals, like antimony and lead in the production process. For this reason alternative fuels manufacturers should draw special attention to the constant improvement of internal quality assurance concepts with the prior goal of producing high-quality alternative fuels. In addition to bringing antimony and lead into the product life cycle, this paper deals with the distribution of antimony and lead contained in the input fractions of an alternative fuels production plant. The sampling will be followed by heavy metal analytics. This analysis informs about heavy metal contents of the individual input fractions of the treatment plant. Based on the determined measurement results, the conception of sort techniques to remove heavy metals from waste stream forms the conclusion of this paper.

# Inhaltsverzeichnis

	<b>Seite</b>
<b>1 EINLEITUNG .....</b>	<b>3</b>
1.1 Problemstellung .....	3
1.2 Zielsetzung .....	4
<b>2 RECHTLICHE UND NORMATIVE RAHMENBEDINGUNGEN .....</b>	<b>6</b>
2.1 Genehmigungsbescheid .....	6
2.2 RAL-Gütezeichen.....	9
2.3 Positivliste für die Verbrennung von Abfällen in Anlagen der Zementherzeugung.....	11
2.4 Schwermetallanalytik – Messverfahren zur Bestimmung des Antimon- und Bleigehaltes in Feststoffproben.....	13
<b>3 ÖKOLOGISCHE UND TECHNISCHE ASPEKTE ZU ANTIMON UND BLEI .....</b>	<b>17</b>
3.1 Antimon.....	17
3.1.1 Allgemeines .....	17
3.1.2 Gewinnung .....	19
3.1.3 Einsatzgebiete .....	19
3.1.4 Vorkommen, Verteilung und Entsorgung in den Abfallfraktionen.....	21
3.1.5 Toxikologie .....	23
3.2 Blei.....	24
3.2.1 Allgemeines .....	24
3.2.2 Gewinnung .....	24
3.2.3 Einsatzgebiete .....	25
3.2.4 Vorkommen, Verteilung und Entsorgung in den Abfallfraktionen.....	26
3.2.5 Toxikologie .....	27
<b>4 AUFBEREITUNGSANLAGE FÜR ALTERNATIVBRENNSTOFFE .....</b>	<b>28</b>
4.1 Anlagendaten.....	29
4.2 Anlagenbeschreibung .....	30
4.2.1 Anlieferung und Zwischenlagerung der Inputmaterialien.....	30
4.2.2 Aufarbeitung der Inputmaterialien .....	35
4.2.3 ASB-Outputmaterial .....	39
<b>5 DURCHFÜHRUNG VORANALYTISCHER ARBEITSSCHRITTE .....</b>	<b>45</b>
5.1 Beprobung der Hauptfraktionen.....	45

5.1.1	Beprobung von Haufen nach ÖNORM S 2123-1.....	46
5.1.2	Beprobung fester Abfälle aus Stoffströmen nach ÖNORM S 2123-3 .....	49
5.2	Sortieranalyse ausgewählter Fraktionen.....	54
<b>6</b>	<b>AUSWERTUNG DER LABORERGEBNISSE .....</b>	<b>59</b>
6.1	Schwermetallanalysen der Monatsmischproben.....	59
6.2	Analyse der Hauptfraktionen.....	63
6.3	Auswertung der Sortieranalyse .....	66
6.4	Antimonanalytik bei PET-Flaschen .....	73
<b>7</b>	<b>NUTZEN EINER VORSORTIERUNG IN BEZUG AUF DIE PET-FLASCHEN- AUSSCHLEUSUNG.....</b>	<b>79</b>
7.1	Hochrechnung der PET-Flaschenfraktion.....	81
7.2	Auswirkungen einer PET-Aussortierung auf den Sb-Gehalt des ASB- Outputmaterials.....	83
7.3	Abnehmerpreise und deren Verläufe von gebrauchten PET-Flaschen am Sekundärrohstoffmarkt.....	86
7.4	Technische, ökologische und ökonomische Betrachtung der Ausschleusung einer wiederverwertbaren Wertkunststofffraktion aus Abfallströmen .....	90
7.4.1	Technische Möglichkeiten.....	90
7.4.2	Ökologische Sinnhaftigkeit.....	94
7.4.3	Ökonomische Relevanz .....	95
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>99</b>
<b>9</b>	<b>VERZEICHNISSE .....</b>	<b>102</b>
9.1	Literatur.....	102
9.2	Abkürzungsverzeichnis.....	105
9.3	Tabellen.....	108
9.4	Abbildungen.....	109
<b>ANHANG A</b>	<b>.....</b>	<b>I</b>
<b>ANHANG B</b>	<b>.....</b>	<b>I</b>

# 1 Einleitung

Der seit dem neuesten UNO-Klimabericht ständig in der Medienlandschaft präsente Begriff der Treibhausgasproblematik und dem dadurch verursachten Klimawandel geht eine Diskussion der Reduzierung des Kohlendioxid-Ausstoßes einher. Durch den Einsatz von Alternativbrennstoffen lässt sich eine deutliche Senkung der Kohlendioxid-Emissionen erzielen. Die Auswahl von Begriffen, die im Zusammenhang mit Bescheiden, Gesetzen, Normen und Vorschriften verwendet werden, gestaltet sich nicht immer einheitlich. Aus diesem Grund sind im Zuge dieser Arbeit für den Begriff „Alternativbrennstoff“ häufig auftretende Synonyme wie Ersatzbrennstoff, Sekundärbrennstoff und Substitutbrennstoff in Gebrauch. Alle Bezeichnungen repräsentieren einen aus Abfall- und Altstoffen hergestellten Energieträger zur Substitution von Primärenergieträgern. Insgesamt gesehen verringert sich mit jeder eingesetzten Tonne Abfallbrennstoff, die statt Kohle zur Energiegewinnung genutzt wird, der Kohlendioxidausstoß um etwa eine Tonne [1].

Die Aufbereitung heizwertreicher Abfälle zum Einsatz als qualitativ hochwertige Ersatzbrennstoffe hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Neben der Emissionsreduktion besteht ein weiteres Ziel darin, den Verbrauch von fossilen Primärenergieträgern zu senken, womit man zur Schonung der natürlich vorkommenden Ressourcen beiträgt. Zusätzlich ist mit dem Einsatz von Ersatzbrennstoffen ein ökonomisch positiver Effekt für Unternehmen verbunden, da teure Primärenergieträger durch günstige Ersatzbrennstoffe substituiert werden.

Durch die Substitution primärer Energieträger durch Abfallbrennstoffe wird einerseits die klimaschädigende Freisetzung von Methan-Emissionen aus Deponien verhindert, auf der anderen Seite wird durch die thermische Nutzung des Energieinhaltes von Alt- und Abfallstoffen die österreichische CO<sub>2</sub>-Bilanz verbessert. Die sichere Zerstörung organischer Inhaltsstoffe (Schadstoffe) in z.B. Drehrohröfen der Zementindustrie ist ein positiver ökologischer Effekt. Ein weiterer positiver ökologischer Effekt ist, dass durch den Verwendung von Abfällen als Alternativbrennstoff weniger Abfälle auf Deponien landen und somit Deponievolumen geschont wird.

Insgesamt gesehen stellt die Verbrennung von Alternativbrennstoffen in industriellen Feuerungsanlagen einen positiven ökologischen und ökonomischen Weg dar. Dies ist auch der Grund, warum seit etwa 13 Jahren Alternativbrennstoffe in der österreichischen Zementindustrie zum Einsatz kommen.

## 1.1 Problemstellung

Für Betreiber von Produktionsanlagen, die Alternativbrennstoffe einsetzen, gelten strenge, im Genehmigungsbescheid festgesetzte Emissionsgrenzwerte. Zur Erfüllung dieser Anforderungen müssen Hersteller von ASB-Materialien, u.a. die Thermo Team Alternativbrennstoffverwertungs GmbH im steierischen Retznei auf die Einhaltung gewisser Qualitätskriterien bei ihrer Ersatzbrennstoffproduktion achten. Dies beinhaltet nicht nur die Einhaltung von Vorgaben, die den Mindestheizwert betreffen, sondern umschließt auch

andere ASB-Kriterien wie z.B. die Homogenität, den Arsen-, Chlor- und Schwermetallgehalt. Nur durch den Aufbau eines Qualitätssicherungskonzeptes für ASB-Inputmaterialien ist man in der Lage, die hohen Erwartungen und Anforderungen, die an aufbereitete heizwertreiche Substitutbrennstoffe gestellt werden, zu erfüllen.

Beim Einsatz von Substitutbrennstoffen, die erhöhte Schadstoffkonzentrationen aufweisen, kommt es zwangsläufig zu Problemen wie z.B. zu Überschreitungen der behördlich festgelegten Emissionsgrenzwerte. Als besonders kritisch gelten erhöhte Schwermetallkonzentrationen z.B. Antimon, Blei im Abgasstrom von Anlagen zur Zementerzeugung, die auch im Outputmaterial von Alternativbrennstoffproduzenten zu finden sind. Ein hoher Antimonanteil im Ersatzbrennstoff führt u.a. in Zementwerken zur unerwünschten Braunfärbung des Klinkers und zur Schwermetallbelastung des erzeugten Baustoffes. Eine Senkung der Schwermetallgehalte im ASB-Output ist nur dann möglich, wenn die Herkunft der beiden Schwermetalle geklärt ist. Somit rückt die Ermittlung der Schwermetallherkunft von Antimon und Blei in den Inputfraktionen der Thermo Team-Anlage in den Mittelpunkt dieser Arbeit.

## 1.2 Zielsetzung

Die genaue Untersuchung der Inputfraktionen der Thermo Team-Anlage hinsichtlich ihrer Gehalte an Antimon und Blei gehört zum Schwerpunkt dieser Arbeit. Dabei soll die Analyse und Klassifizierung der Inputmaterialien einen Aufschluss über die Herkunft der erwähnten Schwermetalle geben. Hierzu ist die Ausarbeitung eines Probenahmeplans sowie die laboranalytische Auswertung des gesammelten Materials zwingend notwendig. Neben der Auswertung der Messergebnisse soll auch auf die gesetzlich, laut Bescheid vorgeschriebenen Schwermetallgrenzwerte auf die normativen Rahmenbedingungen der Schwermetallanalytik eingegangen werden. Ein weiterer Punkt ist die grafische Darstellung der Schwermetallverteilung in den einzelnen Inputfraktionen.

Zu Beginn dieser Arbeit werden die laut Genehmigungsbescheid für die Thermo Team-Anlage in Retznei geltenden Grenzwertkriterien für Ersatzbrennstoffe dargestellt. Neben den deutschen RAL-Gütezeichenrichtlinien wird auch auf die Bestimmungen der Positivliste der österreichischen Zementindustrie für die Verbrennung von Abfällen in Anlagen der Zementerzeugung eingegangen. Die Skizzierung von ÖNORM-konformen Messverfahren zur Bestimmung des Schwermetallgehalts in Feststoffproben ist ebenso Bestandteil dieser Arbeit, wie Recherchen über die Gewinnung, die Herstellung und das Einbringen von Antimon und Blei in den Produktkreislauf. Hierbei sollen einerseits auf das Vorkommen, die Verteilung und die Entsorgung von Antimon und Blei in den Abfallfraktionen eingegangen werden und andererseits Möglichkeiten der Vermeidung des Eintrages von Schwermetallen in die ASB-Produktionsanlage aufgezeigt werden. Ein kurzer toxikologischer Exkurs erläutert die Gefahren, die von den beiden Schwermetallen ausgehen. Die Darstellung der Aufbereitungsanlage mit einer genauen Anlagenbeschreibung sowie der Auflistung aller prozesstechnischen Einrichtungen zur ASB-Herstellung soll einen Einblick in den Abfallaufbereitungsprozess gewähren. Neben der Auswertung der Messergebnisse in Bezug

auf die Schwermetallgehalte der Inputströme, sollen die Erkenntnisse einer Sortieranalyse ermittelten PET-Flaschenanteile der Inputfraktionen dazu beitragen, den Eintrag von Schwermetallen in die Produktionsanlage zu vermeiden. Die Konzeptentwicklung, die technische Realisierung und mögliche Implementierung von Sortiersystemen steht dabei im Vordergrund. Den Rahmen dieser Arbeit bildet eine Abschätzung des Erlöses, der aus dem Verkauf aussortierter schwermetallhaltiger Fraktionen an Recyclingunternehmen und Weiterverwerter erzielt werden kann.

## 2 Rechtliche und normative Rahmenbedingungen

Beginnend mit einem kurzen Abriss der anlagenspezifischen Daten wird in diesem Kapitel auf abfallrechtliche Genehmigungen und abfallwirtschaftlich relevante Grenzwerte für den Betrieb der Anlage in Retznei eingegangen. Weiters werden die laut Bescheid des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung festgelegten und zu erfüllenden Anlagenparameter, insbesondere die maximal zulässigen Schwermetallgehalte diskutiert. Die Informationsgrundlage hierfür basiert auf ausgearbeiteten Grenzwertvorschlägen in Bezug auf Schwermetallgehalte des Deutschen Instituts für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. (RAL). Ein wesentlicher Punkt bei der Verwendung von Alternativbrennstoffen im Produktionsprozess von Zement ist die Einhaltung von gesicherten Brennstoffqualitätskriterien. Hierbei steht die Schaffung von Listen (Positivlisten) zur Zuordnung von Abfällen zu Mitverbrennungsanlagen im Vordergrund. Auf die Bestimmungen und Ziele dieser Positivliste für die Verbrennung von Abfällen in Anlagen zur Zementerzeugung wird in diesem Kapitel ebenfalls eingegangen. Den Abschluss des normativen Teils bilden Probenahme-, Probenaufbereitungs- und Analysevorschriften der Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e.V.

### 2.1 Genehmigungsbescheid

Nach einer 14-monatigen Planungsphase und einer anschließenden einjährigen Bauzeit wurde im Juni 2003 eine der weltweit modernsten und österreichweit größten Anlage zur Produktion von Ersatzbrennstoffen fertig gestellt. Betrieben von der im Juli 2002 gegründeten Thermo Team GmbH ist die ASB-Produktionsanlage auf dem Betriebsgelände der Firma Lafarge Perlmooser AG im südsteirischen Retznei beheimatet. Nach einem Investitionsvolumen von rd. 10 Mio. € erreicht die gegenwärtige Produktionskapazität der Anlage ca. 55.000 t/Jahr. Dies entspricht rd. 2/3 der laut Bescheid [2] genehmigten 90.000 t/Jahr [3].

Nach breiter Akzeptanz in der Bevölkerung und ohne Einwendungen im Rahmen des durchgeführten Ediktalverfahrens erfolgte am 05. August 2002 die Genehmigung der Anlage unter Einhaltung sämtlicher Kriterien des Abfallwirtschaftsgesetzes (AWG). Als IPPC-Anlage gemäß Anlage 1 zum AWG genehmigt, hat die Betriebsanlage laut Bescheid des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung folgenden Tätigkeitsbereich:

„Die ggst. Aufbereitungsanlage hat die Aufgabe, die angelieferten Inputmaterialien entsprechend den Vorgaben der thermischen Verwertung aufzubereiten und die enthaltenen stofflich zu verwertenden Anteile, im wesentlichen Metalle und Inertstoffe aus dem Materialstrom abzutrennen (mechanische Sortierung). Es können somit alternative Substitutbrennstoffe hergestellt und stofflich verwertbare Materialien zur Rückführung in den Stoffkreislauf (Wiederverwertung von sekundären Rohstoffen) gewonnen werden.“ [2, S. 2]

Die Ziele der Anlage sind wie folgt definiert:

- „• Die Aufbereitung von teilweise vorbehandelten heizwertreichen Fraktionen sowie in produktionsspezifischen Abfällen aus dem Gewerbe- und Industriebereich aber auch aus dem Bereich der Verpackungsabfälle und der abgetrennten heizwertreichen Fraktion aus dem Restmüll.
- Die Herstellung von ASB mit entsprechend hohen Qualitätskriterien zum Einsatz in thermischen Verwertungsprozessen.
- Die Gewinnung von Altstoffen.
- Die Zwischenlagerung von Altstoffen und ASB bis zur Disposition und weiteren Verwertung.“ [2, S. 3]

Entsprechend dem AWG haben die Inputmaterialien einem gewissen Anforderungsprofil zu entsprechen. So dürfen nur direkt von Lieferanten mit bestehenden Lieferverträgen ausschließlich nicht gefährliche Abfälle für die Herstellung von ASB verwendet werden. Weiters sind die Lieferanten dem ASB-Hersteller zivilrechtlich einklagbar verpflichtet, ein Mischungsverbot für Abfälle gemäß § 17 Abs. 1a AWG (Anmerkung: AWG 1990 idgF) zu beachten. Dies sind die Gründe für eine umfassende Spezifikation der zu übernehmenden Abfälle, die in den Lieferpapieren festgehalten werden, die wie folgt sind [2, S. 9]:

- „• Lieferant
- Lieferdatum
- gelieferte Menge
- Art und Beschreibung des gelieferten Abfalls (Schlüsselnummer)
- Herkunft – einschließlich Angaben zur Entstehung (Art und Menge der eingesetzten Abfallarten)
- brennstofftechnische physikalische Eigenschaften und
- chemische Zusammensetzung (Schadstoffgehalte)
- Angaben zur Qualitätssicherung durch den Lieferanten“ [2, S. 10]

Die Übernahme von Inputmaterialien ist anhand einer Spezifikationsliste geregelt. Diese Liste beinhaltet neben den Mindestheizwert ( $H_u$ ) auch die maximal zulässigen Schwermetallgehalte von Alt- und Abfallstoffen, wie z.B. Altkunststoff, Altholz. Alle übernommenen Abfälle müssen den in der Spezifikationsliste niedergeschriebenen Regeln entsprechen und dürfen erst bei Erfüllung dieser Kriterien zu einem Substitutbrennstoff verarbeitet werden.

Für die Eignung heizwertreicher Kunststoffabfallfraktionen als Substitutbrennstoff gelten die folgenden Spezifikationskriterien.

**Spezifikation – Altkunststoff:**

Eine Übernahme von Material der Spezifikation „Altkunststoff“ für eine ASB-Herstellung ist nur dann zulässig, wenn nach Abscheidung von Eisen- und Nichteisenmetallen, Inertstoffen und sonstiger Abfälle folgende Auflagen eingehalten werden können:

„Die Spezifikation des Alternativbrennstoffes „Altkunststoff“ muss einen Mindestheizwert  $H_u$  von 20 MJ/kg aufweisen und darf hinsichtlich der maximalen zulässigen Schwermetallgehalte folgende Grenzwerte nicht überschreiten.“ [2, S. 10]

Tabelle 1 geht auf die vorher erwähnten Grenzwerte im Detail ein, wobei zwischen dem 80-Perzentil- und dem Deckelungsgrenzwert unterschieden werden muss. Der erstgenannte Wert gibt an, dass 80% der Messwerte unter dem Grenzwert von 20 mg/kg TS liegen sollen. Die restlichen 20% der Messwerte können diese Konzentration ohne gesetzliche Einwände überschreiten. Die Messergebnisse dürfen dabei aber in keinem Fall den in Spalte 2 angegebenen Deckelungsgrenzwert von 30 mg/kg TS überschreiten. Dieser Wert steht für die maximal zulässige tolerierbare Konzentration. Die für diese Arbeit relevanten Antimon- und Bleigrenzwerte sind in den nachfolgenden fett gedruckt.

Tabelle 1: Grenzwerte des Alternativbrennstoffes „Altkunststoff“ [2, S. 10]

Parameter	80-Perzentil Grenzwert [mg/kg TS]	Deckelung Grenzwert [mg/kg TS]
Arsen (As)	5	10
Cadmium (Cd)	3	5
Kobalt (Co)	8	15
Chrom (Cr)	40	120
Kupfer (Cu)	100	150
Quecksilber (Hg)	0,5	1
Mangan (Mn)	100	150
Nickel (Ni)	50	100
<b>Blei (Pb)</b>	<b>50</b>	<b>100</b>
<b>Antimon (Sb)</b>	<b>20</b>	<b>30</b>
Zinn (Sn)	10	40
Thallium (Tl)	1	2
Vanadium (V)	10	30

**Spezifikation – Alternativbrennstoff:**

Die Spezifikation des Alternativbrennstoffes ASB-Retznei (ASB = Aufbereiteter Substitut Brennstoff) muss einen Mindestheizwert  $H_u$  von 20 MJ/kg aufweisen und darf hinsichtlich der maximalen zulässigen Schwermetallgehalte die in Tabelle 2 gelisteten Grenzwerte nicht überschreiten. Die Grenzwerte für Antimon und Blei sind hierbei wieder fett gedruckt.

Tabelle 2: Grenzwerte des Alternativbrennstoffes „ASB-Retznei“ [2, S. 12]

Parameter	80-Perzentil Grenzwert [mg/kg TS]	Deckelung Grenzwert [mg/kg TS]
Arsen (As)	10	15
Cadmium (Cd)	15	25
Kobalt (Co)	15	20
Chrom (Cr)	150	300
Kupfer (Cu)	300	500
Quecksilber (Hg)	0,6	1
Mangan (Mn)	200	-
Nickel (Ni)	100	200
<b>Blei (Pb)</b>	<b>150</b>	<b>500</b>
<b>Antimon (Sb)</b>	<b>20</b>	<b>30</b>
Zinn (Sn)	30	70
Thallium (Tl)	1,5	3
Vanadium (V)	30	70

## 2.2 RAL-Gütezeichen

Zu den primären Zielen der Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e.V. mit Sitz in Münster gehört u.a. die Förderung der Herstellung und Anwendung von Sekundärbrennstoffen zur Substitution fossiler Brennstoffe. Dabei diskutieren und erarbeiten Vereinsmitglieder in Expertenausschüssen Gütezeichen-Richtlinien in Bezug auf Schwermetallgehalte und Prüfmethode. Diese Güte- und Prüfbestimmungen sind nicht als Ersatz von abfallrechtlichen oder genehmigungsrechtlichen Anforderungen in Bezug auf Schadstoffemissionen zu sehen, sondern sie gelten vielmehr als Vereinbarung zwischen den Marktbeteiligten, d.h. zwischen der Behörde und der Industrie. Der Geltungsbereich der Güte- und Prüfbestimmungen für Sekundärbrennstoffe liegt sowohl bei getrennt als auch bei nicht getrennt erfassten heizwertreichen Abfällen aus der Industrie, dem Gewerbe und privaten Haushalten. Durch einheitliche Güte- und Prüfbestimmungen für Sekundärbrennstoffe wird sichergestellt, dass Sekundärbrennstoffproduzenten nur geeignete und unbedenkliche Ausgangsstoffe zur Erzeugung qualitativ hochwertiger Sekundärbrennstoffe verwenden. Im Zuge dessen, können Eingangskontrollen für Sekundärbrennstoffe bei Verwertern vereinfacht und dadurch Kosten gespart werden.

Neben der Förderung von Forschungsvorhaben bezogen auf die Brennstoffqualität und deren Sicherung liegt das Hauptaugenmerk des Vereins auf einer europaweiten Standardisierung von Sekundärbrennstoffen. Dies beinhaltet u.a. die Kennzeichnung gütegesicherter Sekundärbrennstoffe mit dem RAL-Gütezeichen RAL-GZ 724 (vgl. Abbildung 1) [4, S. 3], [5].



Abbildung 1: RAL-Gütezeichen RAL-GZ 724 für Sekundärbrennstoffe [5]

Ausschließlich Sekundärbrennstoffe, die nachweislich den Güte- und Prüfbestimmungen entsprechen, können vom Hersteller mit dem oben abgebildeten Gütezeichen gekennzeichnet werden [4, S. 4f].

Auf den zulässigen Schwermetallgehalt der in Retznei produzierten ASB-Brennstoffe bezogen würde dies die Einhaltung der in Tabelle 3 aufgelisteten Grenzwerte für Antimon und Blei bedeuten.

Tabelle 3: Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe - Schwermetallrichtwerte [4, S. 11]

Parameter	Einheit	Schwermetallgehalte	
		Medianwert	„80. Perzentil“-Wert
Antimon	mg/kg TS	25	60
Blei	mg/kg TS	70 <sup>1)</sup> bzw. 190 <sup>2)</sup>	200 <sup>1)</sup> bzw. – <sup>3)</sup>

1) Für Sekundärbrennstoffe aus produktionsspezifischen Abfällen

2) Für Sekundärbrennstoffe aus den heizwertreichen Fraktionen von Siedlungsabfällen

3) Festlegung erst bei gesicherter Datenlage aus der Sekundärbrennstoffaufarbeitung

Die in der Tabelle 3 genannten Richtwerte für Schwermetalle besitzen Gültigkeit ab einem Heizwert  $H_u$  von 16 MJ/kg TS für heizwertreiche Fraktionen aus Siedlungsabfällen. Bei produktionsspezifischen Abfällen muss der Heizwert  $H_u$  mindestens 20 MJ/kg TS betragen. Tritt eine Unterschreitung dieser Heizwerte ein, sind die o.g. Werte entsprechend linear abzusenken [4, S. 11].

## 2.3 Positivliste für die Verbrennung von Abfällen in Anlagen der Zementerzeugung

Grundlagen für die Schaffung von Positivlisten zur Zuordnung von Abfällen zu Mitverbrennungsanlagen bilden sowohl Bundesgesetze [6] als auch Richtlinien der Europäischen Union [7]. In der Positivliste für die Verbrennung von Abfällen in Anlagen der Zementerzeugung heißt es dazu unter Punkt 2, den Grundlagen wörtlich [8, S. 1]:

„Nach Art. 4 Abs. 6 RL 2000/76/EG über die Verbrennung von Abfällen, sind Mitgliedstaaten befugt, Abfallarten aufzulisten, die in festgelegten Kategorien von Mitverbrennungsanlagen mitverbrannt werden dürfen.

Gemäß § 20 Abs. 2 der Verordnung des Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie über die Verbrennung von gefährlichen Abfällen, BGBl. II 1999/22, sind unter Einbeziehung der beteiligten Wirtschaftskreise auf der Grundlage des § 29 Abs. 18 und 19 AWG Listen für die Zuordnung von Abfällen zu Mitverbrennungsanlagen (Positivlisten) zu erarbeiten.“

Eine solche Positivliste für die Zementindustrie hat die nachfolgenden Punkte zu erhalten [8, S. 1]:

- „1.) Anlagentypen für die Zuordnung der Abfälle;
- 2.) Art und Menge der Abfälle, die in den jeweiligen Anlagentypen verbrannt werden können, unter der Angabe der in der ÖNORM S 2100 verwendeten Bezeichnung und Schlüsselnummer;
- 3.) Kriterien und Grenzwerte für die Qualität der jeweiligen Abfälle, insbesondere den maximal zulässigen Gehalten an Schadstoffen, die zu gesundheits- oder umweltschädlichen Emissionen oder Anreicherungen von Produkten führen können.“

Der Inhalt von Punkt 3 ist in diesem Fall von entscheidender Bedeutung, da hier Qualitätskriterien für die eingesetzten Abfälle und Grenzparameter für die maximal zulässige Schadstoffgehalte der Einsatzstoffe definiert werden. Die nachfolgenden Tabellen (vgl. Tabelle 4 u. Tabelle 5) geben einen Einblick über die maximal zulässigen Schadstoffgehalte und Grenzwertbestimmungen in Bezug auf die Schwermetalle Antimon und Blei.

Tabelle 4: Maximal zulässige Schadstoffgehalte (Monatsmittelwerte) [8, S. 7]

Element	Einheit	Max. Gesamtgehalte für brennbare Abfälle (H <sub>u</sub> = 25 MJ/kg TS)
Antimon	mg/kg	5
Blei	mg/kg	200

Die in Tabelle 4 genannten Werte beziehen sich ausschließlich auf Abfälle, die einen Heizwert von 25 MJ/kg TS aufweisen. Liegt der Heizwert auf einem anderen Niveau, ist der maximal zulässige Schadstoffgehalt  $S_{\text{neu}}$  durch lineare Umrechnung zu ermitteln. Eine Neuberechnung kann anhand der folgenden Formel durchgeführt werden, wobei  $S_{\text{Tabelle}}$  den maximal zulässigen Schadstoffgehalt aus Tabelle 4 entspricht und  $H_{u, \text{neu}}$  den neu bestimmten Heizwert des zur Verbrennung vorgesehenen Abfalls repräsentiert [8, S. 7].

$$S_{\text{neu}} = \frac{S_{\text{Tabelle}}}{25} \cdot H_{u, \text{neu}}$$

Bei den nachfolgend in Tabelle 5 abgebildeten Daten werden insbesondere bei Blei und einigen anderen Schwermetallen mit Ausnahme von Antimon zwischen Wochen- und Monatswerte unterschieden. Alle Grenzwerte aus der Positivliste beziehen sich ausschließlich auf die dritte Tabellenspalte und sind bei Kunststoff- und heizwertreichen Abfallfraktionen (ASB-Fraktion), die in Zementwerken eingesetzt werden, vorgeschrieben [8, S. 8].

Tabelle 5: Grenzwerte für Kunststoffe und heizwertreiche Fraktionen [8, S. 8]

Element	Einheit	Kunststoffe u. heizwertreiche Fraktionen
Antimon	mg/kg	– <sup>1)</sup> bzw. 20 <sup>2)</sup> (800 <sup>3)</sup> )
Blei	mg/kg	1.000 <sup>1)</sup> bzw. 500 <sup>2)</sup>

1) Wochenwert

2) Monatswert

3) Gilt nur für SN 57130 PET

Die einzige Ausnahme, die bei einer bestimmten heizwertreichen Kunststofffraktionen zur Anwendung kommt, wird in Ziffer 3) beschrieben. Es handelt sich dabei um reines Material bestehend aus Polyethylenterephthalat (PET), bei dessen Herstellung das Schwermetall Antimon eine wesentliche Rolle spielt. Im Vergleich zu den Grenzwertbestimmungen für nicht sortenreine Kunststofffraktionen, die laut Positivliste einen max. zulässigen Sb-Monatsgehalt von 20 mg/kg TS aufweisen dürfen, liegt die Grenzwertvorgabe für PET-Kunststoffe bei einem Monatswert von 800 mg/kg TS. Dies entspricht dem 40-fachen des zulässigen Sb-Grenzwertes von Mischkunststofffraktionen.

## 2.4 Schwermetallanalytik – Messverfahren zur Bestimmung des Antimon- und Bleigehaltes in Feststoffproben

Zur Bestimmung des Antimon- sowie Bleigehalts aus den Feststoffproben der Thermo Team-Abfallfraktionen wurden international gültige Grundlagen und Verfahrensweisen herangezogen. In Anlehnung an die aktuell gültige DIN EN ISO 15586-4 [9] zur Bestimmung des Antimongehalts und der ebenfalls gültigen DIN 38406-6 [10] zur Bestimmung des Bleianteils liegt der Schwerpunkt dieses Kapitels bei der Schwermetallanalytik. Neben den erwähnten DIN-Regelwerken dienen auch institutsinterne IMS-Arbeitsplatzanweisungen dem Zweck, die Fehlerfreiheit des nachfolgend beschriebenen Analyseverfahrens und die damit verbundenen Qualitätskriterien sicherzustellen. Ausschließlich Analyseprozesse, deren Arbeitsschritte unter kontrollierten Bedingungen und unter zu Hilfenahme einheitlicher Regelungen durchgeführt werden, garantieren repräsentative und vergleichbare Ergebnisse.

Das Atomabsorptionsspektrometrie-Verfahren mittels elektrothermischer Atomisierung im Graphitrohrföfen (GFAAS) ermöglicht elementspezifische Untersuchungen von flüssigen bzw. aufgeschlossenen Proben und wird bei der Bestimmung niedriger Element-Konzentrationen angewandt. Die Durchführung der gesamten Sb-Analytik basiert auf der Grundlage des GFAAS-Verfahrens. Die genaue, normkonforme Vorgehensweise mit allen dazu nötigen Arbeitsschritten wird nachfolgend erläutert. Wichtig dabei ist zu erwähnen, dass ergänzend zu der Norm laut laborinterner Arbeitsanweisung bei allen GFAAS Messungen die Eichkurve aus mindestens drei Standards arbeitstäglich neu erstellt wurde. Dies sichert ein Erzielen von repräsentativen Ergebnissen mit geringer Fehlerstreuung.

Den ersten Arbeitsschritt nach dem Eintreffen der Feldprobe im Labor bildet die Probenaufbereitung. Als Apparatur diente dazu eine Ultra-Zentrifugalmühle (vgl. Abbildung 2). Bei dieser Art von Mühlen handelt es sich um Tischgeräte, bei denen zentral im Mahlraum der Mühle ein Rotor platziert ist, der von einem Ringsieb mit einer Lochweite von wenigen Millimetern umgeben ist (vgl. Abbildung 3). Das Mahlgut gelangt durch einen Trichter in die Mitte des Rotors und wird durch Zentrifugalkräfte nach außen getragen. Dort trifft es auf die keilförmigen Rotorzähne wo es vorzerkleinert wird. Durch die Scherwirkung zwischen Rotor und Ringsieb wird das Material zusätzlich fein zerkleinert. Hohe Umdrehungszahlen (11.000 - 15.000 Umdrehungen pro Minute) gewährleisten geringe Verweilzeiten des Mahlguts im Mahlraum und im Gegensatz zu anderen Mahlverfahren eine schonende Materialaufbereitung. Ein Vorteil dabei besteht darin, dass es zu keiner Änderung der Materialeigenschaften des aufgegebenen Gutes kommt. Das zerkleinerte Probenmaterial wird in einem Auffangbehälter gesammelt, luftdicht in Glasbehälter verschraubt und für die weitere Laboranalytik abgefüllt (vgl. Abbildung 4).



Abbildung 2: Ultra-Zentrifugalmühle mit Auffangbehälter



Abbildung 3: Zentral angeordneter Rotor mit keilförmigen Rotorzähnen und Ringsieb



Abbildung 4: Zerkleinerte Probe im Auffanggefäß

Nachdem die Probe nach 24-stündiger Lagerung im Trockenschrank bei 45 °C Gewichtskonstanz erreicht hat, erfolgt im nächsten Schritt die Bildung der Laborprobe. Dazu wird die pulverförmig gemahlene Feldprobe (Korngröße  $\leq 4$  mm) zur Laborprobe verjüngt. Dazu werden ca. 500 mg pro Probe in ein sauberes mikrowellen-geeignetes Probengefäß eingewogen. Alle Mikrowellenaufschlüsse werden grundsätzlich in PP-Gefäßen (Tubes) mit einem Behältervolumen von 50 ml durchgeführt. Die jeweiligen Proben werden tagesfrisch erstellt.

Die nun eingewogene Laborprobe wird im nächsten Arbeitsschritt in einem Mikrowellenofen durch Zugabe von Säuren (Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ), Salzsäure ( $\text{HCl}$ )) und Wasserstoff-peroxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) oxidativ aufgeschlossen. Jede der zu bestimmenden Proben wird mit 6 ml  $\text{HNO}_3$ , 1 ml  $\text{HCl}$  und 1 ml  $\text{H}_2\text{O}_2$  versetzt. Das restliche Behältervolumen wird mit endionisiertem Wasser aufgefüllt. Unter Verwendung der angeführten Reagenzien wird diese Aufschlussart auch als Königswasseraufschluss bezeichnet.

Der eigentliche Aufschluss erfolgt in einem ETHOS-Mikrowellen-Aufschlussystem. Die Temperaturkurve des Systems ist in der nachfolgenden Abbildung 5 dargestellt.

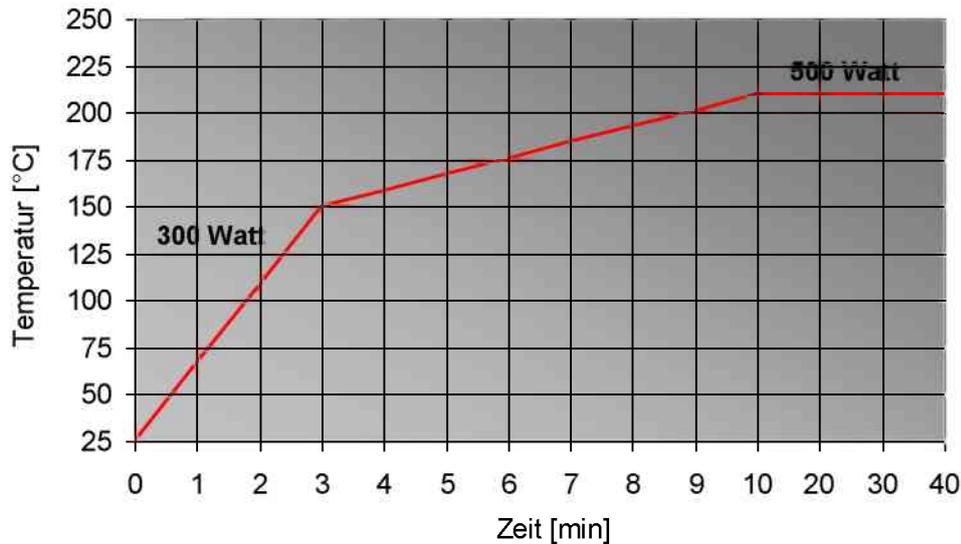


Abbildung 5: Temperaturkurve Mikrowellenaufschlusssystem vom IAE

Nach einer kurzen Aufwärmphase von ca. drei Minuten bei einer Leistung von 300 Watt wird der verschlossene Inhalt des Probebehälters auf ca. 150 °C erwärmt. Danach erfolgt innerhalb von sieben Minuten eine Temperaturerhöhung auf ca. 210 °C. Diese Maximaltemperatur bei einer Mikrowellenleistung von 500 Watt wird während des Aufschlusses für eine Zeitspanne von ca. 30 Minuten gehalten. Nach erfolgtem Aufschluss wird die erhitzte und unter Druck stehende Probe für die anschließende Analyse auf Raumtemperatur abgekühlt.

Im nächsten Schritt wird ein Teilvolumen der Probe in den elektrisch beheizten Graphitrofen eines Atomabsorptionsspektrometers injiziert. Durch schrittweise Temperaturerhöhung wird die Probe zunächst getrocknet, danach pyrolysiert und anschließend atomisiert [9, S. 10].

Die Atomabsorption beruht auf der Fähigkeit der Lichtabsorption freier Atome. Dazu emittiert eine Lichtquelle ein für ein Element oder für mehrere Elemente spezifisches Licht. Durchdringt dieser Lichtstrahl nun die im Graphitrohr befindliche Atomwolke, kommt es zu einer selektiven Absorption durch die Atome der ausgewählten Elemente. Zur Auswertung wird die Abnahme der Lichtintensität bei einer festgelegten Wellenlänge mit einem Detektor gemessen. Die Konzentration eines Elementes in einer Probe kann folglich anhand des Unterschiedes zwischen der Absorption der Probe und der Absorption von Bezugslösungen bestimmt werden. Das Ergebnis wird in Analyt-Massen ( $\mu\text{g}$  oder  $\text{mg}$ ) je Liter Wasser angegeben, im konkreten Fall (bei Sedimenten) in  $\text{mg}/\text{kg}$  TS [9, S. 10].

## 3 Ökologische und technische Aspekte zu Antimon und Blei

Die nachfolgenden Kapiteln 3.1 und 3.2 geben Einblick über die chemisch-physikalischen Eigenschaften der beiden zur Gruppe der Schwermetalle zählenden Elemente Antimon und Blei. Dabei wird sowohl auf deren Lagerstätten und Gewinnungsverfahren, als auch auf mögliche industrielle Einsatzgebiete und kommerzielle Verwendungszwecke eingegangen. Weiters wird das Aufkommen, die Verteilung und mögliche Anreicherungszenarien in Hinblick auf verschiedene Abfallfraktionen näher durchleuchtet und die Ergebnisse mit Hilfe in diesem Bereich veröffentlichten Fallstudien diskutiert. Den Abschluss bilden human- und ökotoxikologische Schlussfolgerungen.

### 3.1 Antimon

Die Nutzung des Schwermetall Antimons und dessen Verbindungen beginnt bereits in der Bronzezeit. Im Altertum diente es u.a. zur Herstellung von Bronze [12]. Im Laufe der Zeit kamen eine Vielzahl von neuen Einsatzgebieten hinzu, auf die im Anschluss im Detail eingegangen wird. Zunächst werden grundlegenden Eigenschaften des Schwermetalls erörtert.

#### 3.1.1 Allgemeines

Reines Antimon (Sb, von lat. Stibium) ist ein bläulich weißes halbmetallisches Element, das in der fünften Hauptgruppe des Periodensystems zu finden ist und die Ordnungszahl 51 besitzt. Es steht unter den Krustengesteinen an 64. Stelle und gehört damit zu den seltenen in der Erdkruste vorkommenden Elementen. Der natürliche Antimongehalt in der Erdkruste schwankt zwischen 0,2 und 1 mg/kg [11]. Die relative Atommasse von Antimon beträgt 121,75 u, der Schmelzpunkt liegt bei etwa 630 °C, der Siedepunkt bei etwa 1.750 °C und die Dichte beträgt 6,69 g/cm<sup>3</sup>. Reines festes Antimon zeigt metallische sowie nichtmetallische Eigenschaften, kommt wie Phosphor und Arsen in mehreren allotropen Formen (Modifikationen) vor und ist derart spröde, dass es sich ohne Mühe pulverisieren lässt. Am häufigsten trifft man metallisches Antimon an. Die zweite und seltenere Modifikation ist das amorphe Antimon, das im Gegensatz zur metallischen Form elektrischen Strom nicht leitet. Von den mehr als hundert bekannten Antimon-Mineralien wird überwiegend der Antimonglanz (Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>) (vgl. Abbildung 6), auch Stibnit, Grauspießglanz oder Antimonit genannt, industriell genutzt. Abbauwürdige Antimonerze sind vor allem in China, Südafrika und Bolivien vorherrschend [12].



Abbildung 6: Antimonerz „Antimonit“ [12]

### Antimontrioxid (ATO):

Neben dem elementaren Antimon tritt eine Antimonverbindung mit der Summenformel  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  weltweit sehr häufig auf. Großtechnisch durch Erhitzen von Antimontrisulfid unter Sauerstoffatmosphäre hergestellt ist Antimontrioxid (CAS-Nr. 1309-64-4) eine farblose, kristalline Verbindung. Der Schmelzpunkt liegt bei  $656\text{ }^\circ\text{C}$ , der Siedepunkt liegt unter Normaldruck bei  $1.556\text{ }^\circ\text{C}$ . Unter Hitzeeinwirkung findet eine Gelbfärbung statt. Der Dampfdruck von ATO ist bei Raumtemperatur sehr niedrig und seine Löslichkeit vom pH-Wert abhängig. Bei einem pH-Wert von 5 liegt sie bei ca.  $20\text{ mg ATO/l H}_2\text{O}$ . Mit steigendem pH-Wert nimmt die Löslichkeit zu und liegt bei einem pH-Wert von 9 bei ca.  $30\text{ mg ATO/l H}_2\text{O}$ . Antimontrioxid besitzt ein Molekulargewicht von  $291,5\text{ Dalton}$  und weist in seiner kubischen Erscheinungsform die in skizzierte Atomstruktur auf [13, S. 125].

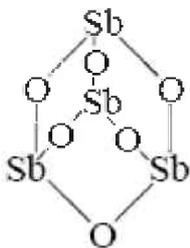


Abbildung 7: kubisches Antimontrioxid [13, S. 125]

### 3.1.2 Gewinnung

Das am häufigsten eingesetzte Verfahren zur technischen Herstellung von Antimon aus Antimonglanz beruht auf dem Abrösten und der Reduktion mit Kohlenstoff (Röstreduktionsverfahren) [14]:

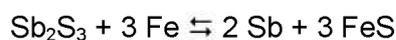


Das Produkt des oben erwähnten Röstprozesses ist in Abbildung 8 dargestellt. Der erhaltene Antimonbarren dient als Ausgangsmaterial für eine Vielzahl nachgeschalteten Weiterverarbeitungsverfahren. Einsatzgebiete von Antimon und dessen Verbindungen werden im nachfolgenden Kap. 3.1.3 aufgezeigt.



Abbildung 8: Antimonbarren

Die Reduktion des Antimonglanzes mit Eisen stellt eine andere Möglichkeit der Gewinnung dar. Dieses Verfahren wird auch als Niederschlagsverfahren bezeichnet [14]:



### 3.1.3 Einsatzgebiete

Die Einsatzgebiete von Antimon und dessen Verbindungen sind vielfältig. Ein überwiegender Anteil des hergestellten Antimons wird zu Legierungen weiterverarbeitet, z.B. zur Härtung von Blei- und Zinnlegierungen. Blei-Antimon-Legierungen sind auch bei Letternmetall, Lagermetall, Akkumulatoren-Blei (Bleiplatten im Akkumulator), Bleimantel für Erdkabel etc. vorhanden. Nicht nur als Metallveredeler wird Antimon verwendet, sondern auch in der Halbleiterindustrie findet es Einsatz. Lötzinne und Weichlote weisen ebenfalls Anteile von Antimon auf [14]. Dies erklärt die zum Teil recht hohen Elementkonzentrationen in Elektronikschrott-Fractionen.

Ein weiteres großes Einsatzgebiet neben der Metallbranche ist die Farben- und Kunststoffindustrie. Antimontrioxid ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) ist Bestandteil von zahlreichen flammfesten und flammhemmenden Farben, Kunststoffen und Textilien für Kabelummüllungen etc. Auch bei der Produktion von Autositzbezügen, Vorhangstoffen, Wandteppichen, Kinderbekleidungen usw. wird Antimon als Zusatz in bromhaltigen Flammenschutzmitteln eingesetzt. Flammenschutzmittel werden eingesetzt, um die Entflammbarkeit und Brennbarkeit von Kunststoff-Erzeugnissen herabzusetzen. Insbesondere bei der Synthese von Polyvinylchlorid und zu 90% bei der Herstellung von Polyethylenterephthalat wird ATO verwendet. Vor allem bei Kunststoffen, die auf dem Elektroniksektor z.B. für Gehäuse oder in der Automobilindustrie eingesetzt werden, dient ATO als Synergist gemeinsam neben Brom zur Herstellung von hitzebeständigen und schwer entflammbaren Materialien. Aus Gründen der Produktionssicherheit und den daraus resultierenden vorgeschriebenen Brandeigenschaften vieler Geräte und -teile sind flammenhemmend ausgerüstete Kunststoffe unumgänglich. Sie müssen den strengen Prüfanforderungen der Elektrotechnik, des Fahrzeugbaus und des Bauwesens entsprechen. Die Haupteinsatzgebiete für diese Materialien sind Fernsehgeräte, Geräte der EDV und Bürotechnik sowie „innere“ Bauteile wie Leiterplatten, Steckerverbindungen, Fassungen u.ä [14], [15, S. 6f], [16, S. 7].

Weiters dient Antimontrioxid als Katalysator zu Herstellung von Polyester, als Weißpigment zur Färbung von Polystyrol, Polyethylen und Polypropylen. Gallium- und Indiumantimonide werden zur Produktion von laser-optischen Speichermedien, wie z.B. Compact Disc (CD), verwendet [14], [15, S. 6f].

Die brandhemmende Wirkung des pulverigen ATO beruht auf die Bildung toxischer Antimonhalogenide. Dabei ist zu erwähnen, dass ATO selbst kein Flammenschutzmittel darstellt, sondern lediglich zusammen mit brom- und chlorhaltigen Flammenschutzmittel als Synergist eingesetzt wird. Diese können den Brandmechanismus entweder physikalisch durch Kühlen, Schutzschichtbildung oder Verdünnung der entstehenden Gase beeinflussen. Der chemische Mechanismus, bei dem es zu einer Reaktion in der Gasphase kommt, beruht einerseits auf der Beseitigung der die Verbrennung unterstützenden energiereichen Radikale und andererseits auf der Ausbildung einer schützenden Kohle oder Ascheschicht. Unter der Brandhitze spalten chlor- oder bromhaltige organische Verbindungen Produkte ab, die den Sauerstoffzutritt erschweren und infolgedessen Brandreaktionen chemisch verlangsamen. Die Wirkung der Halogene wird durch ATO synergistisch verstärkt [13, S. 128f], [17, S. 576f].

Die positive flammenhemmende Eigenschaft dieser Verbindung wird jedoch durch die katalytische Fähigkeit von ATO zu Beschleunigung von de novo-Synthesen von chlor/bromhaltigen Dioxinen und Furanen aufgewogen. Die Wirkung von Antimon bei thermischen Prozessen als Katalysator für die Dioxinbildung stellt ein besonderes Risiko bei der Anwendung des Synergisten ATO dar. Weiters können relativ hohe Additivzusätze bei Kunststoffen ungünstige Einflüsse auf das Gebrauchsverhalten der Erzeugnisse haben. Ein hoher Additiv-Zusatz birgt die Gefahr der Bildung von ätzenden Stoffen. Ein weiterer Nachteil besteht in der mitunter enormen Rauchentwicklung der Kunststoffe im Brandfall. Die Durchschnittskonzentration von Antimonhalogeniden im Russ liegt zwischen 0,1 und 500 mg/kg. Nicht zuletzt deswegen ist der großtechnische Einsatz von anorganischen

Füllstoffen, wie z.B. Aluminiumhydroxid ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) oder mikrofaserige Dawsonite ( $\text{Na Al}(\text{OH})_2\text{CO}_3$ ), die eine flammenhemmende Krustenbildung ohne Rauchentwicklung aufweisen, zu diskutieren [13, S. 128f], [17, S. 576f].

### 3.1.4 Vorkommen, Verteilung und Entsorgung in den Abfallfraktionen

Der größte Teil des Antimons in den Siedlungsabfällen stammt aus der Kunststofffraktion sowie aus Textilien und elektrischen Kleingeräten, d.h. aus den Fraktionen, bei denen eine Flammenschutzmittelbehandlung üblich ist [15, S. 6f].

Die Durchschnittskonzentration von Antimon in Siedlungsabfällen wurde anhand von Studien der Jahre 1986 bis 2002 ermittelt und liegt zwischen 30 - 60 mg/kg TS [15, S. 6f]. In der nachfolgenden Tabelle 6 werden Studienergebnisse zum Thema Sb-Konzentrationen in Siedlungsabfällen dargestellt.

Tabelle 6: Studien über Sb-Konzentrationen in Siedlungsabfällen [15, S. 11]

Quelle	Sb [mg/kg TS]
Schneider, 1986	59
Clapp et al., 1988	4
Chandler et. al., 1993	33
Akamura et al., 1996	8
Vehlow und Mark, 1997	31
Belevi, 1998	31
Van Velzen et. al., 1998	42
TAMARA, 2002	30

Das mit Kunststoffen verbrannte ATO gelangt nach Schätzungen zu 50% in die Schlacke. Die andere Hälfte kann in E-Filtern von Müllverbrennungsanlagen nachgewiesen werden, wobei der Anteil von Antimon im Raugas ca.  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  beträgt. Dabei ist zu erwähnen, dass noch keine Forschungsergebnisse über die Antimon-Rauchgaskonzentration abhängig vom Antimon-Input in Müllverbrennungsanlagen vorhanden sind [13, S. 128].

Neben der absoluten Sb-Konzentration stellt der Anreicherungsfaktor für Untersuchungen im Bereich der Abfallwirtschaft einen weiteren wichtigen Anhaltswert dar. Der Akkumulationsfaktor eines Elements ist definiert als Verhältnis zwischen der relativen Häufigkeit eines bestimmten Isotops in einem Isotopengemisch zur relativen Häufigkeit dieses Isotops im Isotopengemisch natürlicher Zusammensetzung. Bezogen auf die bekannte Konzentration von Antimon in Kohle, in der Lithosphäre und in Siedlungsabfällen kann man den Anreicherungsfaktor rechnerisch bestimmen. Tabelle 7 zeigt elementspezifisch den Akkumulationsfaktor für die vier Elemente Arsen, Antimon, Chrom

und Molybdän. In festen Siedlungsabfällen kann eine Sb-Anreicherung von 100 mg/kg nachgewiesen werden [15, S. 6f].

Tabelle 7: Elementkonzentrationen und Akkumulationsfaktoren [15, S. 11]

	As [mg/kg TS]	Sb [mg/kg TS]	Cr [mg/kg TS]	Mo [mg/kg TS]
Siedlungsabfälle	13	30	259	19
Kohle	17	1	38	4
Lithosphäre	6	0,3	100	1
Anreicherungsfaktor in Siedlungsabfällen	2	100	3	19
Anreicherungsfaktor in Kohle	3	3	< 1	4

Die Haupteintragsquelle von Antimon in Siedlungsabfällen stellen die in Abbildung 9 gezeigten Fraktionen dar. Anhand des Diagramms ist ersichtlich, dass Antimon und dessen Verbindungen überwiegend in der organischen Fraktion, aber auch in kunststoffreichen Fraktionen sowie in der Kleingeräte-Fraktion vorhanden sind. Der große Anteil von Antimonverbindungen in Siedlungsabfällen kann dadurch begründet werden, dass in einer Vielzahl von handelsüblichen Kunststoffartikeln für den Haushalt Antimon in Form von Antimontrioxid aufgrund seiner flammhemmenden Eigenschaft enthalten ist. Die Herkunft des hohen Antimongehaltes in der organischen Fraktion ist bisher ungeklärt [15, S. 13].

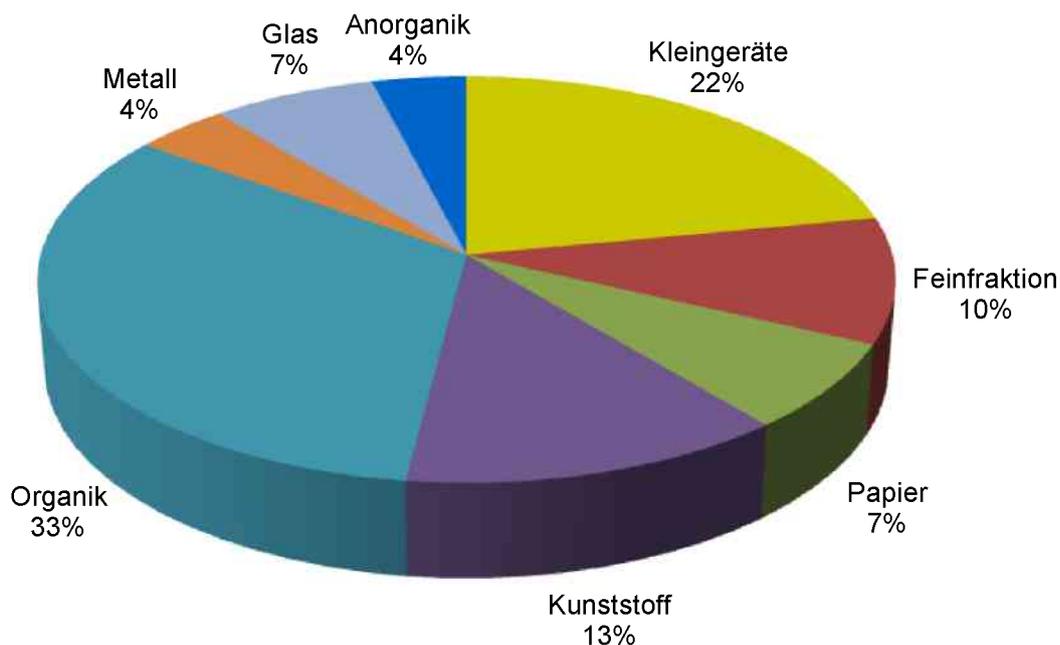


Abbildung 9: Verteilung von Antimon in Siedlungsabfällen [15, S. 13]

### 3.1.5 Toxikologie

Zum Vorkommen von Antimon in der Außenluft sind weltweite Untersuchungen vorhanden. Die nachgewiesenen Antimonkonzentrationen liegen dabei im Bereich zwischen 0,5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  und 170  $\text{ng}/\text{m}^3$  Luft. Zu den wesentlichen Emittenten zählen neben thermischen Anlagen wie Müllverbrennungsanlagen, Schmelzhütten und Kohleverbrennungsanlagen auch Zementdrehrohröfen. Der auf den Einsatz von ATO als Flammschutzmittel zurückzuführende Anteil an der Außenluftbelastung ist unbekannt. Natürliche Sb-Bodenkonzentrationen variieren je nach geologischen Bedingungen und liegen in 0 - 10 cm Bodentiefe zwischen 0,2 und 0,5  $\text{mg}/\text{kg}$  TS. Die Gewässerbelastungen liegen im Durchschnitt zwischen 0,05 und 0,4  $\mu\text{g}/\text{l}$   $\text{H}_2\text{O}$ . Hierbei ist anzumerken, dass für diese Belastungen die ATO-produzierende Industrie nur geringförmig beteiligt ist, es sei denn, es werden in unmittelbarer Nähe solcher Betriebe Sb-Gehalte in Wasser und Sediment gemessen [13, S. 125ff].

Über die tägliche menschliche Aufnahme von Antimon über das Trinkwasser und die Nahrung sind Studien vorhanden. Daraus gehen hervor, dass Personen täglich etwa 5  $\mu\text{g}$  Antimon über die Nahrung und Atemluft aufnehmen. Über geringfügige Belastungen, die aus dem ATO-Abrieb häuslicher Bedarfsgegenstände oder durch den Gegenstand-zu-Mundkontakt bei Kindern resultieren, können keine Angaben gemacht werden. Weiters sind Expositionsrechnungen auf diesem Gebiet wenig sinnvoll, da z.B. Konzentrationsangaben für den Sb-Gehalt in Hausstäuben fehlen. Aus toxikologischer Sicht betrachtet ist zu erwähnen, dass speziell zu ATO keine Angaben über die orale Resorption vorhanden sind. Für die inhalative Resorption ist die Größe der Schwebstoffteilchen entscheidend, da Antimon an Partikel gebunden ist. Eine dermale Resorption von Antimon aus Stäuben wurde tierexperimentell nachgewiesen. Dabei ist festzustellen, dass das resorbierte Antimon rasch aus dem Blut eliminiert wird und es zu Anreicherungen in der Schilddrüse, der Leber, der Milz, der Niere, dem Herzen und den Knochen kommt. Über die Halbwertszeit in den Organen liegen keine konkreten Angaben vor, lediglich bei der Ganzkörperhalbwertszeit wird eine Zeit von vier Tagen genannt. Fünfwertiges Antimon wird im Organismus meist in dreiwertiges Antimon umgewandelt. Während die Befunde sowohl bei Ratten als auch bei Menschen über Reproduktionsschäden durch übermäßigen und andauernden ATO-Kontakt einheitlich sind, sind Untersuchungen zur Mutagenität und Kanzerogenität widersprüchlich und umstritten. Für den Arbeitsplatz wird bei ATO kein MAK-Wert (Maximale Arbeitsplatzkonzentration [18]) festgelegt, es gilt jedoch der TRK-Wert (Technische Richtkonzentration [18]) von 0,3  $\text{mg ATO}/\text{m}^3$ . Abschließend ist jedoch zu erwähnen, dass die IARC (International Agency for Research on Cancer) die kanzerogene Wirkung des inhalativ aufgenommenen Antimons im Tierexperiment als hinreichend beweisen ansieht und den Verdacht einer krebserzeugenden Wirkung beim Menschen für ausreichend einschätzt. Nicht zuletzt deshalb wurde bei Antimonarbeitern, die z.T. recht hohen Sb-Belastungen ausgesetzt waren, eine signifikante erhöhte Lungenkrebsmortalität nachgewiesen [13, S. 125ff].

## 3.2 Blei

Blei zählt zu den am längsten verwendeten Metallen und ist wie eine Vielzahl von Schwermetallen (u.a. auch Antimon) giftig. Die Toxikologie von Blei wird in Kap. 3.2.5 näher durchleuchtet. Zunächst gibt ein allgemeiner Teil Aufschluss über die Eigenschaften des Elements.

### 3.2.1 Allgemeines

Blei (Pb) ist ein bläulich graues metallisches Element, das in der vierten Hauptgruppe des Periodensystems mit der Ordnungszahl 82 zu finden ist. Zu den Haupteigenschaften von metallischem Blei zählen neben der Dehnbarkeit, geringen Härte und Zugfestigkeit auch die schlechte elektrische Leitfähigkeit. Der Schmelzpunkt des Elementes liegt bei 328 °C, der Siedepunkt bei 1.740 °C. Seine Dichte beträgt 11,34 g/cm<sup>3</sup>, die Atommasse entspricht 207,20 u. Von den acht natürlich vorkommenden Isotopen sind jeweils vier stabil bzw. radioaktiv. Zu den am häufigsten in der Natur vorkommenden Bleierzen zählt der Bleiglanz (PbS), auch Galenit oder Bleisulfid genannt (vgl. Abbildung 10). In der Rangfolge der Häufigkeit der Elemente in der Erdkruste steht das Schwermetall an 36. Stelle. Neben Australien, USA und Kanada gibt es auch in Südamerika (Mexiko, Peru), Russland und Mitteleuropa (Deutschland, Polen) bedeutende Bleivorkommen. Zu den Haupterzeugerländern zählen USA, Russland, Deutschland, Japan und Frankreich [19].

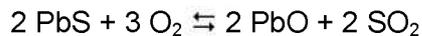


Abbildung 10: Bleierz „Galenit“ [14]

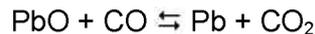
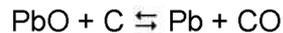
### 3.2.2 Gewinnung

Die Förderung von Bleierzen wird heutzutage sowohl im Tagebau als auch im Tiefbau betrieben. Eine Verhüttung von reinem Erz kommt nur noch sehr selten vor. Infolgedessen wird das geförderte Erz fast ausschließlich zu einem Konzentrat angereichert. Es existieren zwei Verfahren zur Herstellung von Blei aus dem Konzentrat [20].

Die wichtigste Methode zur Gewinnung des Metalls aus dem Bleiglanz stellt die Röstung des Erzes dar. Bei dem Röst-Reduktionsverfahren in Sinteranlagen entstehen Bleioxid (PbO) und Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>) [19], [20].



Bei der nachfolgenden Reduktion des Metalloxids mit Koks in speziellen Industrieöfen, sog. Schachtofen, bekommt man Blei und Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) als Produkte heraus [19], [20].



Ein in den letzten Jahren aufkommendes Verfahren zur Bleigewinnung ist in der Literatur als Reaktionsarbeit beschrieben. Dieses technische Verfahren ermöglicht die Bleierzeugung in einem Schritt. Dabei wird zunächst das Erz in Flammöfen geröstet, bis ein Teil des Metallsulfids zu Bleioxid und Bleisulfat umgesetzt ist. Danach erfolgt die Unterbrechung der Luftzufuhr im Ofen, die mit einer Erhöhung der Temperatur einhergeht. Dadurch reagiert das noch vorhandene Bleisulfid mit dem Bleisulfat und dem Bleioxid zu metallischem Blei und Schwefeldioxid [19], [20].



Nicht nur in der Primärmetallurgie finden Verfahren zur Bleigewinnung Anwendung, sondern auch bleihaltige Abfälle, z.B. verbrauchte Batterien oder Reststoffe aus bestimmten Produktionsverfahren dienen als wichtige Quellen für die Gewinnung von elementarem Blei [20].

### 3.2.3 Einsatzgebiete

Zu dem wohl wichtigsten Einsatzgebiet von Blei zählt die Verwendung des Schwermetalls in Akkumulatoren. Große Mengen an Blei werden aber auch zur Verkleidung von Elektrokabeln, zur Innenbeschichtung von Rohrleitungen und Tanks sowie zum Abschirmen von Röntgengeräten verwendet. Aufgrund der hohen Dichte des Metalls und seines Absorptionsvermögens für radioaktive Strahlung setzt man es oft als Strahlenschutz ein. Weiters besitzen neben Löt- und Lettermetallen auch verschiedenste Lagermetalle z.T. einen recht hohen Bleianteil. Beträchtliche Mengen dieses Elementes werden aber auch in Form bestimmter Bleiverbindungen, wie z.B. Mennige (Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) für Anstrichfarben und für Pigmente eingesetzt [19], [20].

Nicht nur in der Metall- und Elektroindustrie werden große Mengen an Blei eingesetzt. Ein weiterer großer Wirtschaftszweig stellt die Kunststoffindustrie dar. Zahlreiche Kunststoffe werden aus dem Chlor-Kunststoff Polyvinylchlorid (PVC) hergestellt. Um vorgesehene Haltbarkeitskriterien (z.B. Verlangsamung des Alterungsprozesses bei PVC-Rohren) einhalten zu können und um gewünschte Eigenschaften zu erzielen werden nicht selten verschiedene Zusätze, wie z.B. Stabilisatoren und Weichmacher den Ausgangsstoffen bei der Kunststoffproduktion zugegeben. Zu den am häufigsten angewendeten Weichmachern zählt die Gruppe der Phthalate. Sie machen rd. 82% der ca. 2,5 Mio. t jährlichen in den USA,

Japan und Westeuropa verwendeten Weichmacher aus. Dabei finden Salze diverser Schwermetalle, darunter auch Bleisalze Anwendung. Als Alternative zu Blei wurden Stabilisatoren auf Kalzium/Zink-Basis entwickelt, die ein weit geringeres Gefährdungspotenzial für die Umwelt aufweisen. Nicht ganz so umweltgünstig wie Kalzium/Zink verhalten sich die zinnorganischen Verbindungen, die ebenfalls zur Substitution von Blei eingesetzt werden können. Ein genereller Ersatz von Bleistabilisatoren wird gegenwärtig von der PVC-Industrie abgelehnt. Technische Faktoren (Produktqualität, Normen, Prüfanforderungen), wirtschaftliche Gründe (höhere Kosten) und das in den Augen der Industrie geringe Gefahrenpotenzial der Bleistabilisatoren gehören zu den wesentlichen Gegenargumenten für einen weiteren Bleieinsatz [21], [22].

### 3.2.4 Vorkommen, Verteilung und Entsorgung in den Abfallfraktionen

Metallisches Blei findet häufig in Form von Legierungen, Lötmaterialien und Akkumulatoren Einzug in die Abfallwirtschaft. Darüber hinaus stellt auch die Farb- und Kunststoffindustrie eine weitere wichtige Eintragsquelle des Schwermetalls dar. Wie bereits in Kap. 3.2.3 erwähnt, werden Bleiverbindungen für Farbpigmente, Füllstoffe und Stabilisatoren in der Kunststoffindustrie eingesetzt. Vor allem in PVC-Erzeugnissen können erhöhte Bleiwerte gemessen werden. PVC-Bleistabilisatoren gehören nach den Akkumulatoren zu der bedeutendsten industriellen Quellen für auftretende Bleibelastungen im Abfall. Nach Schätzungen entfällt rund ein Viertel des Bleianteils im kommunalen Abfall auf den Einsatz von PVC-Stabilisatoren. Nach der Verbrennung des bleihaltigen Kunststoffabfalls wird das Schwermetall in hohen Anteilen an den Staub gebunden und über die Rauchgasreinigung ausgeschleust. Aus diesem Grund kann eine akute Verbreitung des Stabilisatorbleis in der Umwelt nicht erfolgen [22].

Während die Bleibelastung der Luft hauptsächlich durch bleihaltige Stäube verursacht wird, resultieren Bleikonzentrationen in Gewässern durch das Ausschwemmen von Blei aus belasteten Böden. Der mittlere Bleigehalt der kontinentalen Erdkruste liegt bei etwa 15 mg/kg. Die natürlich vorkommenden Bleigehalte liegen zwischen 2 und 60 mg/kg Boden, selten über 100 mg/kg Boden. Bei bleierzhaltigen Gesteinen, wie z.B. Schiefen kann der Gehalt deutlich höher sein [23, S. 383]. Der Großteil der Bleibelastung von Böden ist jedoch anthropogen verursacht. Die Quellen dafür sind vielfältig. Hauptemittenten für Bleistäube sind neben der bleierzeugenden Industrie (Bleiraffination) und Kohleverbrennungsanlagen, der Verkehr. Durch die Verbrennung von bleihaltigen Kraftstoffen in Automotoren wurden noch bis vor wenigen Jahren enorme Mengen an Blei emittiert. Eine weitere Quelle, die mengenmäßig aber kaum ins Gewicht fällt, ist die Verbrennung von Hausmüll in Müllverbrennungsanlagen. Durch den Einsatz von geeigneten Filtersystemen können Emissionen von Bleioxidstäuben, die bei verschiedenen Raffinationsprozessen sowie bei der Verbrennung von Kohle entstehen, verringert werden [20].

### 3.2.5 Toxikologie

Elementares Blei in kompakter Form stellt für den menschlichen Organismus kein Gefahrenpotential dar. Es bildet an der Luft eine dichte, schwer wasserlösliche Schutzschicht aus Bleicarbonat. Aus diesem Grund kann in der Praxis bei metallischem Blei auf eine Gefahrstoffkennzeichnung verzichtet werden. Die Gefahr liegt vielmehr bei gelöstem Blei, Bleiverbindungen sowie Bleistäuben. Oral durch Verschlucken bzw. inhalativ durch Einatmen gelangen Bleiverbindungen in den Körper und entfalten hier ihre toxische Wirkung. Besonders giftig sind Organobleiverbindungen, z.B. Tetraethylblei, die stark lipophil sind und rasch über die Haut und die Lunge aufgenommen werden. Gelangen diese Verbindungen in das Gehirn lösen sie akut Halluzinationen, Erregungszustände und Krämpfe aus. Zu den Spätfolgen zählen Erkrankungen des vegetativen Nervensystems wie Lähmungen und Parkinsonismus [20], [24, S. 248f].

Einmalige Aufnahmen von metallischem Blei oder schwer löslichen Bleisalzen führen nur bei hohen Dosierungen zum Auftritt von Vergiftungserscheinungen. Stetig über einen längeren Zeitraum aufgenommene Kleinstmengen an Blei führen jedoch zu einer Anreicherung im Körper. Einmal in der Knochensubstanz eingelagert wird das Schwermetall nur sehr langsam wieder ausgeschieden. Blei kann so chronische Vergiftungen hervorrufen, die sich unter anderem in Kopfschmerzen, Müdigkeit, Abmagerung und Defekten der Blutbildung, des Nervensystems und der Muskulatur zeigen. Anorganische Bleiverbindungen in Knochen, Zähnen und Haaren angereichert, besitzen im Schnitt Halbwertszeiten von mehr als 20 Jahren. Ein besonderes Gefahrenpotential existiert bei Kindern und Schwangeren. Zu hohe Bleikonzentrationen im Körper können Fruchtschäden und Zeugungsunfähigkeit bewirken, im Extremfall sogar zum Tode führen. Die Giftigkeit von Blei beruht u.a. auf einer Störung der Hämoglobinsynthese. Dabei wird der Einbau des Eisens in das Hämoglobinmolekül durch die Hemmung mehrerer Enzyme behindert. Nicht zuletzt deshalb existieren an exponierten Arbeitsplätzen Grenzwerte für Schwermetalle. Die maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) für Blei liegt bei  $0,1 \text{ mg/m}^3$ . Die gegenwärtig höchste Bleibelastung durch Bleistäube ist bei Arbeitern in bleiproduzierenden und -verarbeitenden Betrieben zu finden [20], [24, S. 248f].

## 4 Aufbereitungsanlage für Alternativbrennstoffe

Der Aufgabenbereich der Thermo Team Anlage in Retznei liegt in der Aufbereitung von Abfällen zu Alternativbrennstoffen. Störstoffe bzw. andere im angelieferten Inputmaterial enthaltene Anteile, wie Metalle und Inertstoffe, werden aus dem Materialstrom abgetrennt und z. T. in den Stoffkreislauf rückgeführt (Wiederverwertung von sekundären Rohstoffen). Nicht verwertbare Reststoffe werden einer gesetzeskonformen Entsorgung zugeführt [2]. In Abbildung 11 wird auf die Stoffflüsse der Ersatzbrennstoffproduktionsanlage eingegangen.

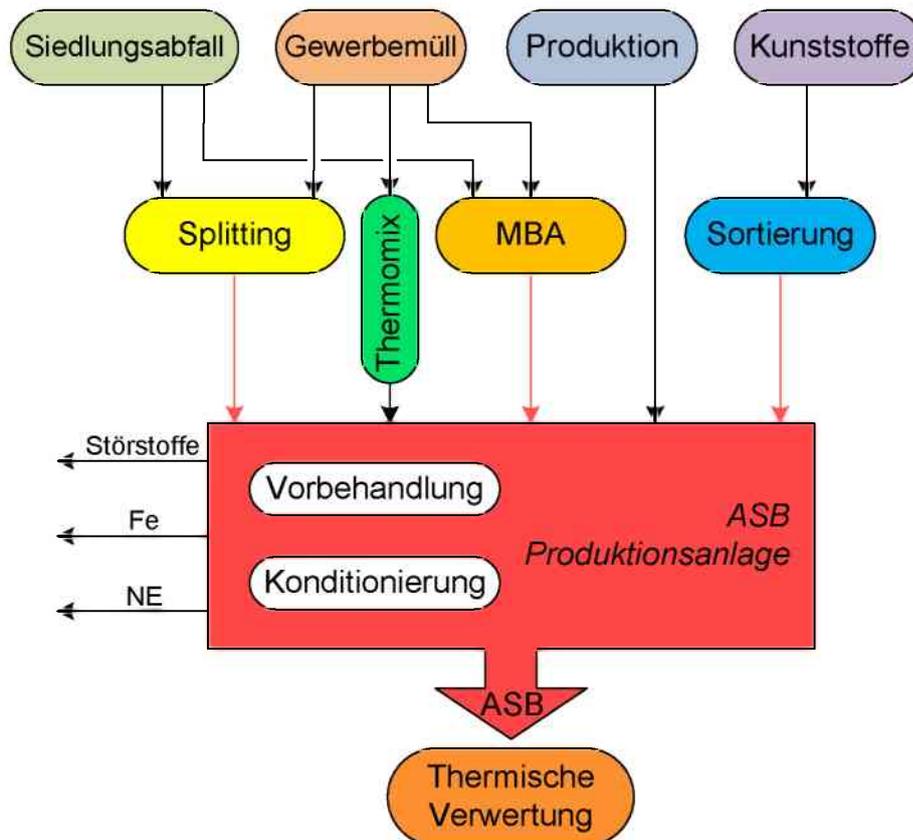


Abbildung 11: Stoffflussdiagramm der Thermo Team-Produktionsanlage [3]

Getrennt erfasste Produktionsabfälle mit definierter Zusammensetzung sowie stofflich nicht verwertbare Kunststoffe aus der Verpackungssammlung dienen neben geeigneten vorbehandelten Fraktionen aus gemischten Gewerbe- und Siedlungsabfällen als Inputmaterial für die Thermo Team-Anlage. Nachfolgend werden weitere im Betriebsprozess aufzugebene Materialien beschrieben bzw. anfallende Outputstoffe definiert [2].

Folgende Inputmaterialien werden eingesetzt [2]:

- Vorbehandelter Gewerbe- und Industrieabfall einschließlich produktionsspezifischer Abfälle
- Vorbehandelte Gewerbe- und Baustellenabfälle
- Vorbehandelte Abfälle aus dem Hausmüllbereich (Splitting)
- Materialien aus der ÖKK-Sammlung

Folgende Outputmaterialien fallen an [2]:

- ASB (Aufbereiteter Substitut- Brennstoff)
- Fe- und Ne- Anteile
- Inertstoffe und sonstige Reststoffe zur Beseitigung

Mit Ausnahme von sortenreinen Produktionsabfällen stammen alle aufgegebenen Fraktionen aus abfallwirtschaftlichen Vorbehandlungsstufen. Dabei setzt sich der Input der Thermo Team-Anlage aus Material aus Splittanlagen, aus mechanisch-biologischen Behandlungsanlagen (MBA) oder aus Sortieranlagen zusammen. Durch vorgelagerte Qualitätssicherungskonzepte gelangt nur heizwertreiches Material mit definierter Qualität zur ASB-Produktionsanlage [3].

## 4.1 Anlagendaten

Die Anlage der Firma Thermo Team ist laut Bescheid des Land Steiermark auf eine Gesamtdurchsatzleistung von 90.000 t pro Jahr ausgelegt. Sie ist 365 Tage im Jahr in Betrieb, wobei die reine Produktionstätigkeit sich auf die Wochentage Montag bis Freitag von 6.00 - 24.00 Uhr und Samstag von 6.00 - 15.00 Uhr bezieht. An Samstagen ab 15.00 Uhr und Sonn- und Feiertagen sind lediglich reine Überwachungstätigkeiten sowie Wartungsarbeiten behördlich zugelassen. Der Betrieb des Outputlagers und die damit sichergestellte kontinuierliche Versorgung des Zementwerkes der Firma Lafarge Permooser AG mit Substitutbrennstoffen funktioniert vollautomatisch [2]. Im folgenden Luftbild (vgl. Abbildung 12) wird das komplette Betriebsgelände mit allen betriebsrelevanten Einrichtungen, vom Anlieferungslager der einzelnen Abfallfraktionen bis hin zum ASB-Output-Bunker dargestellt.



Abbildung 12: Luftaufnahme des Thermo Team-Betriebsgelände in Retznei

## 4.2 Anlagenbeschreibung

Die nachfolgenden Seiten gewähren einen Einblick in die bei der Fa. Thermo Team in Retznei stattfindenden Aufbereitungsprozesse. Hierbei wird der ASB-Produktionsablauf ausgehend von der Anlieferung des Inputmaterials, über die nachgeschalteten Aufbereitungsprozesse bis hin zum Austrag des Materials aus dem Outputlager detailliert beschreiben.

### 4.2.1 Anlieferung und Zwischenlagerung der Inputmaterialien

Die anliefernden Fahrzeuge fahren nach erfolgter Registrierung und Wiegung direkt in den überdachten Flachbunker für die Inputmaterialien um dort ihre Ladung zu entleeren. Vor der Entladung wird im Bereich des Inputlagers eine visuelle Beurteilung der Inputmaterialien vorgenommen. Bei Übereinstimmung des geladenen Materials mit den vorher spezifizierten Übernahmekriterien erfolgt die Einbringung in die entsprechenden Teilflächen des Flachbunkers. Jede der sechs voneinander abgetrennten Lagerboxen besitzt ein Volumen von etwas mehr als 500 m<sup>3</sup> (vgl. Abbildung 13).



Abbildung 13: Überdachter Flachbunker mit Boxen zur Zwischenlagerung angelieferter Inputfraktionen

Eine Materialentladung wird entweder durch Abkippen oder durch Materialmanipulation mittels Stapler realisiert. Abbildung 14 zeigt das zu Ballen gepresste Ladegut eines Transport-LKWs. Mit Hilfe von Radladern erfolgt eine Entleerung, wobei je nach Materialbeschaffenheit verschiedene Zwischenlagerbereiche zur Verfügung stehen. Entspricht das Material nicht den Übernahmekriterien oder bestehen Zweifel an der Qualität, so ist eine Entladung in einem eigens gekennzeichneten Sperrbereich vorgesehen. Hier wird die Beprobung des Materials für eine anschließende tatsächliche Einstufung vorgenommen [2].



Abbildung 14: LKW mit geladenen Kunststoffballen

Das angelieferte Material lässt sich in folgende Inputfraktionen unterteilen:

- Heizwertreiche Fraktion Gewerbe aus Splitting Anlagen (interne Nr. 440020)
- Heizwertreiche Fraktion gemischt (Thermomix) (interne Nr. 10060)
- Heizwertreiche Fraktion MBA (interne Nr. 440010)
- Heizwertreiche Fraktion VVO (interne Nr. 150360)
- Produktionsabfälle sortenrein, heizwertreich (interne Nr. 440040)

Die Zusammensetzung der verarbeiteten Inputfraktionen, die Materialmatrix wird in der nachfolgenden Tabelle 8 verdeutlicht. Dabei wird für die Jahre 2005 und 2006 der massenbezogene bzw. prozentuale Anteil am Monatsgesamteinsatz der o.g. fünf Hauptinputströme dargestellt.

Tabelle 8: Materialmatrix TT 2005 - 2006

Monat	Fraktion					Gesamt [kg]
	Thermomix (10060) [kg]	VVO, ÖKK (150360) [kg]	MBA (440010) [kg]	Gewerbe (440020) [kg]	Sortenrein (440040) [kg]	
Januar 05	156.660 (6%)	1.200.210 (50%)	222.400 (9%)	502.920 (21%)	332.080 (14%)	2.414.270
Februar 05	222.180 (24%) <sup>1)</sup>	159.000 (17%) <sup>1)</sup>	0 (0%)	162.220 (17%) <sup>1)</sup>	384.420 (41%) <sup>1)</sup>	927.820
März 05	300.740 (24%)	51.400 (4%)	36.260 (3%)	310.010 (25%)	554.540 (44%)	1.252.950
April 05	398.020 (12%)	1.368.330 (41%)	408.440 (12%)	592.050 (18%)	555.760 (17%)	3.322.600
Mai 05	330.820 (11%)	1.130.660 (38%)	326.440 (11%)	784.120 (26%)	418.960 (14%)	2.991.000
Juni 05	331.780 (8%)	949.750 (23%)	368.560 (9%)	1.966.420 (47%)	550.820 (13%)	4.167.330
Juli 05	272.580 (9%)	1.001.800 (33%)	276.980 (9%)	1.112.290 (36%)	395.050 (13%)	3.058.700
August 05	276.500 (8%)	965.660 (29%)	259.940 (8%)	1.508.640 (46%)	304.940 (9%)	3.315.680
September 05	311.920 (8%)	1.015.450 (27%)	447.770 (12%)	1.534.250 (40%)	509.330 (13%)	3.818.720
Oktober 05	256.600 (6%) <sup>1)</sup>	887.230 (22%) <sup>1)</sup>	536.180 (13%) <sup>1)</sup>	1.885.370 (47%) <sup>1)</sup>	432.580 (11%) <sup>1)</sup>	3.997.960
November 05	337.190 (8%) <sup>1)</sup>	1.307.070 (32%) <sup>1)</sup>	335.920 (8%) <sup>1)</sup>	1.772.140 (44%) <sup>1)</sup>	271.370 (7%) <sup>1)</sup>	4.023.690
Dezember 05	214.920 (6%)	889.550 (25%)	372.700 (10%)	1.788.630 (50%)	323.650 (9%)	3.589.450
Januar 06	198.780 (5%) <sup>1)</sup>	994.830 (26%) <sup>1)</sup>	411.160 (11%) <sup>1)</sup>	1.986.140 (51%) <sup>1)</sup>	306.540 (8%) <sup>1)</sup>	3.897.450
Februar 06	217.380 (7%) <sup>1)</sup>	777.260 (26%) <sup>1)</sup>	51.880 (2%) <sup>1)</sup>	1.634.540 (55%) <sup>1)</sup>	271.280 (9%) <sup>1)</sup>	2.952.340
März 06	267.840 (10%) <sup>1)</sup>	671.220 (25%) <sup>1)</sup>	92.440 (3%) <sup>1)</sup>	1.487.140 (56%) <sup>1)</sup>	124.310 (5%) <sup>1)</sup>	2.642.950
April 06	341.040 (9%)	643.280 (16%)	269.640 (7%)	2.299.390 (58%)	406.200 (10%)	3.959.550
Mai 06	274.280 (6%) <sup>1)</sup>	1.027.300 (23%) <sup>1)</sup>	244.420 (6%) <sup>1)</sup>	2.388.750 (54%) <sup>1)</sup>	450.620 (10%) <sup>1)</sup>	4.385.370
Juni 06	297.780 (8%) <sup>1)</sup>	1.001.640 (26%) <sup>1)</sup>	151.620 (4%) <sup>1)</sup>	2.074.960 (53%) <sup>1)</sup>	389.060 (10%) <sup>1)</sup>	3.915.060
Juli 06	305.000 (8%) <sup>1)</sup>	911.800 (24%) <sup>1)</sup>	276.680 (7%) <sup>1)</sup>	1.970.070 (53%) <sup>1)</sup>	274.900 (7%) <sup>1)</sup>	3.738.450
August 06	179.660 (3%)	2.524.690 (48%)	187.280 (4%)	1.937.990 (37%)	395.660 (8%)	5.225.280
September 06	312.780 (6%) <sup>1)</sup>	971.260 (18%) <sup>1)</sup>	237.640 (4%) <sup>1)</sup>	3.537.140 (64%) <sup>1)</sup>	471.280 (9%) <sup>1)</sup>	5.530.100
Oktober 06	299.940 (7%)	1.028.920 (24%)	406.580 (10%)	2.016.080 (48%)	450.140 (11%)	4.201.660

<b>November 06</b>	299.700 (6%)	942.000 (20%)	446.580 (10%)	2.435.310 (53%)	490.360 (11%)	4.613.950
<b>Dezember 06</b>	208.620 (4%)	1.155.780 (23%)	530.380 (11%)	2.785.300 (56%)	316.600 (6%)	4.996.680

1) Zeilensumme ergibt nicht 100% aufgrund Rundungsfehler

Zum besseren Überblick wird der Gesamtinput der fünf Hauptfraktionen bezogen auf die Jahre 2005 und 2006 in der nachfolgenden Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 9: Gesamtinputmenge der fünf Hauptfraktionen bezogen auf die Jahre 2005 u. 2006

Jahr	Fraktion					Gesamt [kg]
	Thermomix (10060) [kg]	VVO, ÖKK (150360) [kg]	MBA (440010) [kg]	Gewerbe (440020) [kg]	Sortenrein (440040) [kg]	
<b>2005</b>	3.409.910 (9%) <sup>1)</sup>	10.926.110 (30%) <sup>1)</sup>	3.591.590 (10%) <sup>1)</sup>	13.919.060 (38%) <sup>1)</sup>	5.033.500 (14%) <sup>1)</sup>	36.880.170
<b>2006</b>	3.202.800 (6%)	12.649.980 (25%)	3.306.300 (7%)	26.552.810 (53%)	4.346.950 (9%)	50.058.840
<b>2-Jahres- Ø</b>	3.306.360 (8%) <sup>1)</sup>	11.788.050 (27%) <sup>1)</sup>	3.448.950 (8%) <sup>1)</sup>	20.235.940 (47%) <sup>1)</sup>	4.690.230 (11%) <sup>1)</sup>	43.469.510

1) Zeilensumme ergibt nicht 100% aufgrund Rundungsfehler

Der Materialgesamtinput hat im Jahr 2006 im Vergleich zum Vorjahr um rd. 13.000 t zugenommen und einen Wert von über 50.000 t erreicht. Dies wiederum entspricht einer Steigerungsrate von 36%. Der Materialinput im Vorjahr hat somit etwas mehr als die Hälfte, rd. 56% der genehmigten Durchsatzleistung von 90.000 t pro Jahr erreicht.

Wie aus der vorigen Tabelle ersichtlich, besitzt die Gewerbefraktion den größten Anteil, im Durchschnitt 47% am Anlagengesamtinput, gefolgt vom ÖKK-Kunststoffverpackungsmaterial mit durchschnittlich 27%. Kleinere Anteile an der Gesamteinsatzmenge weisen die Fraktionen Sortenrein (11%), Thermomix und MBA mit jeweils 8% auf. Abbildung 15 verdeutlicht die monatlichen Gesamtinput der fünf Hauptfraktionen bezogen auf die Jahre 2005 und 2006.

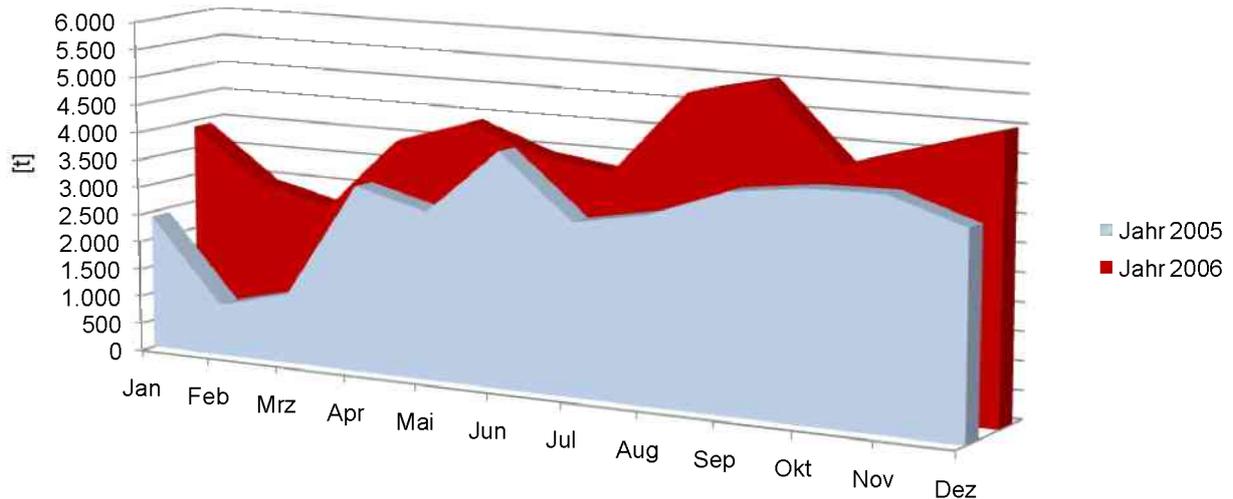


Abbildung 15: Trend des monatlichen Gesamtinputs der Jahre 2005 und 2006

#### 4.2.2 Aufarbeitung der Inputmaterialien

Von dem Zwischenlager gelangt das Inputmaterial mittels Radlader oder Stapler in den Aufgabebereich der Vorzerkleinerung (vgl. Abbildung 16 u. Abbildung 17). Zuvor werden eventuell vorhandene Störstoffe oder sperrige Anteile aus dem Aufgabegut manuell bzw. per mobilen Arbeitsgeräten entfernt. Die Drahtummantelungen von den zu Ballen gepressten Kunststoffabfällen werden in diesem Arbeitsschritt ebenfalls entfernt [2].



Abbildung 16: Radlager zur Materialmanipulation



Abbildung 17: Aufgabebereich zur Vorzerkleinerung

Nach erfolgter Vorzerkleinerung (vgl. Abbildung 18) gelangt das Material in eine Primärsichterstufe, die als Kombinationsabscheider ausgeführt ist. Abbildung 19 zeigt das Gesamtsystem. Das zerkleinerte Material kommt über ein Förderband in die Windsichterstufe. Mit Hilfe von mechanischen und lufttechnischen Einrichtungen erfolgt in diesem Arbeitsschritt eine Materialtrennung nach physikalischen Eigenschaften. Je nach Dichte und Größe (körper- oder flächenförmig) erfolgt die Trennung in zwei Fraktionen [2]:

- die Leichtfraktion, die in der Regel aus flächenförmigen Teilen besteht und
- die Schwerfraktion.

Leichte, flächenförmige Materialien (z.B. Folien, Kunststoffflaschen) werden mit dem Luftstrom mitgerissen und verlassen die Anlage auf der linken Seite. Bei schweren, dreidimensionalen Körpern erfolgt der Materialaustrag mittels Förderband auf der rechten Seite (vgl. Abbildung 19).



Abbildung 18: Keilriemenbetriebenes Vorzerkleinerungsaggregat

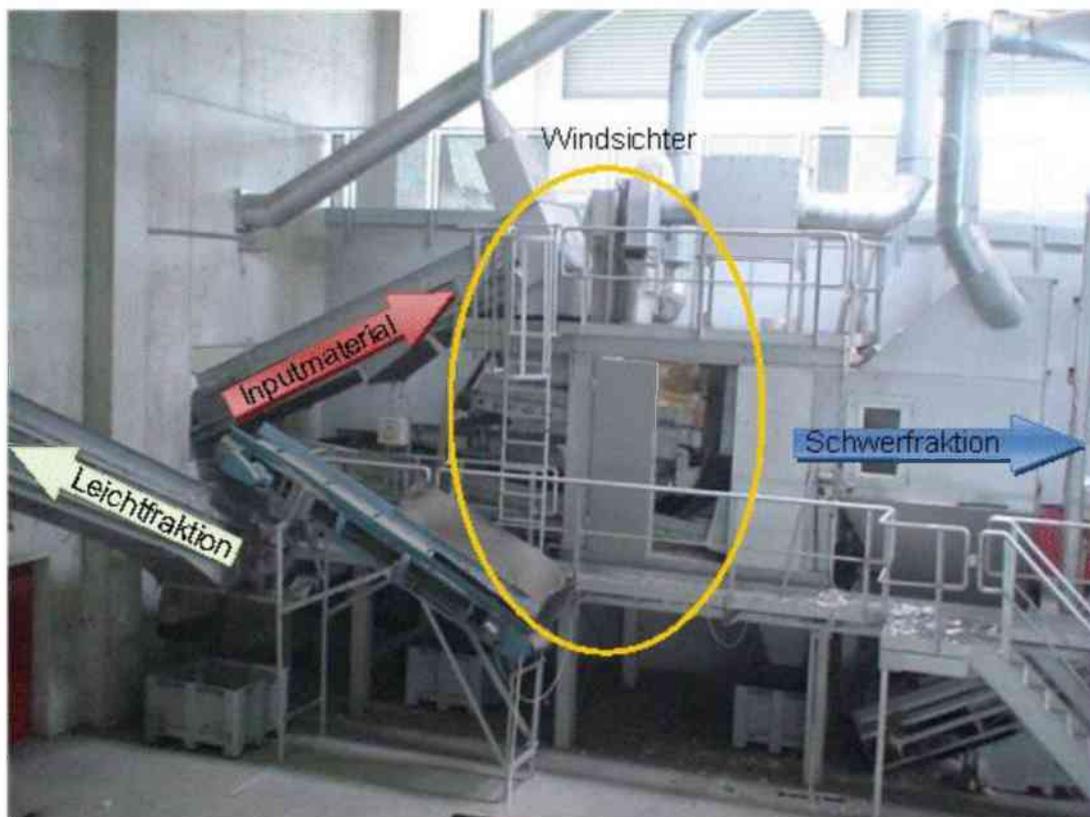


Abbildung 19: Kombinationsabscheider

Die Leichtfraktion wird über ein Förderband zu einem längsausragenden Überbandmagneten transportiert. Nach Abscheidung der Eisenanteile gelangt das verbleibende Gut in drei Nachzerkleinerer (< 30 mm), die abwechselnd bis zum Maximumwert des Füllvolumens betrieben werden (vgl. Abbildung 20). Die abgeschiedene Eisenfraktion wird getrennt von anderen Fraktionen zwischengelagert und einer späteren stofflichen Wiederverwertung zugeführt. Im Anschluss an die Nachzerkleinerung sorgt ein All-Metall-Abscheider für die Abscheidung von vorhandenen Nichteisen- und noch vorhandenen Eisenanteilen. Diese abgeschiedenen Fraktionen werden ebenfalls ausgetragen und in getrennten Boxen zwischengelagert, bevor sie einer externen Wiederverwertung zugeführt werden (vgl. Abbildung 21) [2].



Abbildung 20: Nachzerkleinerungsaggregat



Abbildung 21: Austragsboxen für v.l.n.r. Metall-, Nichtmetall-, Inertstoffe

Die Schwerfraktion aus der Primärsichterstufe wird über mehrere Zwischenaufbereitungsschritte geführt. Nach einem FE-Abscheider folgt ein NE-Abscheider und zuletzt eine sog. Sekundärsichterstufe, die aus einem Hartstoffabscheider und einem Bürstensichter besteht. Dieses Sortieraggregat trennt, wie bereits die erste Sichterstufe, die ankommenden Materialien ebenfalls entsprechen dem Dichte/Größe-Verhältnisses auf. Der wesentliche Vorteil liegt in dem genaueren Trennschnitt, der durch den wesentlich geringeren Massenstrom erzielt werden kann. Mittels Sekundärsichterstufe wird eine gezielte Entfernung von Inertstoffen (Steine, Glas, Keramik etc.) aus der Schwerfraktion ermöglicht. Auch andere Störstoffe können dadurch entfernt, einer weiteren Schwer/Leichttrenneinheit zugeführt und anschließend ausgetragen werden. Die verbleibende, gereinigte Schwerfraktion wird in drei Nachzerkleinerer für die Schwerfraktion ( $< 10 \text{ mm}$ ) eingebracht und anschließend direkt zum Outputmateriallager transportiert. Optional kann der Materialstrom vor der Förderung ins Outputlager einen All-Metall-Abscheider durchlaufen [2].

### 4.2.3 ASB-Outputmaterial

Im Outputlager angekommen, wird der Ersatzbrennstoff (ASB) mittels Kratzbandförderer den anschließenden weiteren Fördereinrichtungen zugeführt. Nach der automatischen Probenahmeverrichtung wird das Material einem weiteren Aufbereitungsschritt unterzogen. Da der mitunter noch vorhandene Metallgehalt für Abrasionen bei den Transport- und Aufgabeverrichtungen im Zementwerk hauptverantwortlich ist, sind Aggregate zur Störstoffabtrennung unabdingbar. Ein in Trommelform ausgeführter Magnetabscheider sorgt zunächst für die Ausschleusung der im Produktstrom verbliebenen, stofflich verwertbaren Metalle. Diese werden in Containern gesammelt und per LKW abtransportiert. Danach fungiert ein Scheibensieb (vgl. Abbildung 22) als eine Art „Polizei-„Sieb“. Dieses hält

Agglomerate, die durch die Lagerung z.B. aus harzgetränktem Material entstanden sein können, zurück. Weiters dient dieses Aggregat zur Abtrennung von kompressiblen, körperförmigen aber spezifisch leichten Schaumstoffen. Diese brennen in der Flamme des Drehrohrofens nicht vollständig aus, sondern schmelzen zusammen und fallen danach in die reduzierende Atmosphäre des Klinkers, wo sie für eine unerwünschte Braunfärbung sorgen. Den letzten Schritt vor den Verladeeinrichtungen bildet ein weiterer Magnetabscheider, der in Überbandform ausgeführt ist (vgl. Abbildung 23). Das Material wird hier nochmals von paramagnetischen Metallen entfrachtet. Es besitzt nun eine maximale Korngröße von 30 mm und wird entweder vollautomatisiert in Walking-floor-Fahrzeuge (vgl. Abbildung 24) verladen (ca. 60% des ASB) oder über eine stationäre Fördereinrichtung (Rohrbandförderer, vgl. Abbildung 25) in den Zement-Drehrohrofen der Firma Lafarge Perlmöoser AG transportiert (ca. 40%) [2], [25, S. 2].



Abbildung 22: Scheibensieb



Abbildung 23: Überbandmagnet zur Abscheidung paramagnetischer Stoffe



Abbildung 24: Vollautomatisierte LKW-Verladungsstation



Abbildung 25: Rohrbandförderer zur Belieferung des Zementwerkes

Die monatlichen Outputmengen an ASB-Material bezogen auf die Jahre 2005 und 2006 sind in Tabelle 10 ersichtlich. Es handelt sich dabei um den Gesamtoutput, der im ASB-Materialbunker erfasst und zwischengelagert wird.

Tabelle 10: Monatlicher ASB-Output in Tonnen bezogen auf die Jahre 2005 und 2006

Monat	Outputmenge 2005 [t]	Outputmenge 2006 [t]
Januar	764	2.952
Februar	844	3.131
März	1.570	2.590
April	3.190	3.480
Mai	3.103	3.397
Juni	3.199	3.807
Juli	2.804	3.353
August	2.623	4.747
September	2.912	4.270
Oktober	3.605	3.871
November	3.517	4.484
Dezember	3.706	4.389
<b>Gesamt</b>	<b>31.838</b>	<b>44.471</b>

Im Vergleich zum Jahr 2005 hat sich die ASB-Produktionsoutput um rd. 28% auf 44.471 t erhöht. Allgemein gesehen lag der Materialoutput im Jahr 2006 in jedem Monat höher verglichen mit der monatlichen Produktionsmenge des Vorjahres. In der nachfolgenden Abbildung 26 ist dieser Unterschied grafisch dargestellt.

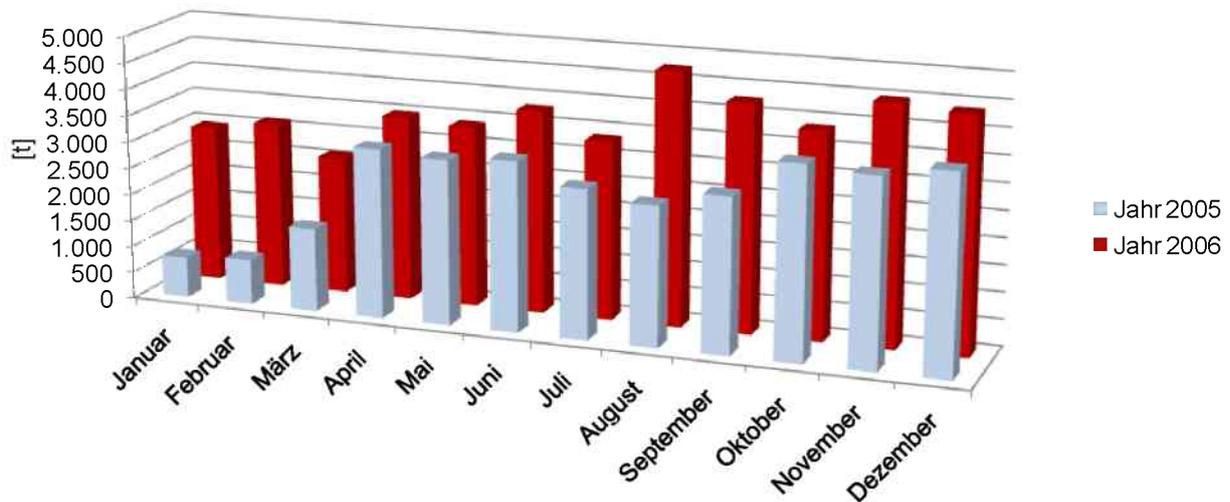


Abbildung 26: Monatliche ASB-Outputmengen 2005 - 2006

Neben dem Output an ASB-Material, das als Substitutsbrennstoff u.a. in der Zementindustrie eingesetzt werden kann, fallen beim Aufarbeitungsprozess auch ein metallischer, nichtmetallischer und inerter Rückstand an, der getrennt in Boxen erfasst wird. Dabei kann die Fe- und Ne-Fraktion einer stofflichen Verwertung zugeführt werden. Ein großer Teil der Inertfraktion wird nach einer Sortierung ebenfalls stofflich verwertet.

Die nachfolgende Tabelle 11 spiegelt die monatlichen Outputmengen der Fe-, Ne- und Inertfraktion im Jahr 2006 wieder.

Tabelle 11: Outputmengen FE/Ne/Inert im Jahr 2006

Monat	Fe [t]	Ne [t]	Inert [t]
Januar 06	50,16	5,12	33,74
Februar 06	49,11	7,46	48,88
März 06	34,48	0	12,78
April 06	34,62	6,16	0
Mai 06	45,21	0	46,50
Juni 06	81,92	0	42,02
Juli 06	51,97	0	52,64
August 06	90,64	7,82	146,00
September 06	62,22	15,30	99,16
Oktober 06	96,03	19,92	56,00
November 06	83,70	0	72,14
Dezember 06	62,46	12,48	32,22
<b>Gesamt</b>	<b>742,52</b>	<b>74,26</b>	<b>642,08</b>

## 5 Durchführung voranalytischer Arbeitsschritte

Zur Erreichung des eigentlichen Ziels der Arbeit, wissenschaftlich begründete Aussagen über die Schwermetallherkunft in den Inputfraktionen bei der TT-Anlage aufstellen zu können, war eine eingehende Untersuchung der eingesetzten Materialströme von zentraler Bedeutung. Dazu wurden Beprobungen aller vorhandenen Hauptinputfraktionen durchgeführt. Die dabei unter Einhaltung genormter Probenahmepläne gewonnenen Materialproben wurden anschließend im akkreditierten Umweltlabor der Montanuniversität Leoben untersucht. Auf Basis der Labordaten können sowohl qualitative als auch quantitative Aussagen über die Schwermetallverteilung in den einzelnen Inputfraktionen bei der TT-Anlage getätigt werden.

Neben der objektiven Beurteilung, welche Inputfraktionen für eine in Kap. 5.2 beschriebene Sortieranalyse in Frage kommen, dient das gesammelte Datenmaterial als Basis zur Entwicklung von Konzepten zur Ausschleusung schwermetallhaltiger Inputstoffe aus Materialströmen. Um dies zu verwirklichen war es nötig, die anschließend im Kap. 5.1 und 5.2 beschriebenen voranalytischen Schritte zu durchlaufen. Dabei wird auf die einzelnen Beprobungsszenarien eingegangen und der zeitliche Ablauf der Beprobung geschildert. Anhand der Farbabbildungen ist eine lückenlose Dokumentation der Probenahmen möglich. Die eigentliche Datenauswertung findet im darauf folgenden Kap. 6 statt.

### 5.1 Beprobung der Hauptfraktionen

In der Regel gilt bei Probenahmen die Forderung, dass diese die Eigenschaften des zu untersuchenden Abfalls widerspiegeln müssen und repräsentativ zu sein haben. Die Durchschnittseigenschaften des zu beprobenden Abfalls sollen sich in der gezogenen Probe wieder finden. Aus diesem Grund wurden alle Probenahmen nach einer statistisch-mathematisch abgesicherten Methode durchgeführt. Die für Österreich gültige Methode ist in der ÖNORM S 2123-1 bzw. ÖNORM S 2123-3 niedergeschrieben [26], [27].

Der Ablauf einer Abfalluntersuchung lässt sich in die Bereiche Probenahmeplan, Durchführung der Probenahme, Herstellung der Feldproben, Herstellung und Analyse der Laborprobe und Abschlussbericht unterteilen.

Der zeitlich korrekte Ablauf von Probenahmen ist besonders wichtig. Daher ist vor der Durchführung der Probenahme ein Probenahmeplan zu erstellen. Dieser Plan beinhaltet die folgenden Punkte [26]:

- Beurteilung der Homogenität/Heterogenität
- Massebestimmung (gegebenenfalls Ermittlung des Volumens bzw. der Schüttdichte)
- Festlegung der Probenanzahl
- Festlegung der Mindestprobenmengen der Proben

- gesetzliche Vorgaben

### 5.1.1 Beprobung von Haufen nach ÖNORM S 2123-1

Im konkreten Fall handelt es sich bei dem Abfallhaufen um zerkleinerte ÖKK-Kunststoff-Rejecte. Diese stammen aus Produktionsprozessen der Kunststoffindustrie, sind vorsortiert bzw. vorgereinigt und werden aufgrund ihres hohen Heizwertes zur thermischen Verwertung in der Zementindustrie eingesetzt. Die nachfolgende Abbildung 27 zeigt die lose Lagerung der Rejecte vor der Probenahme. Die gesamte Koje zur Lagerung der Rejecte besitzt ein Fassungsvermögen von ca. 500 m<sup>3</sup>. Das Gewicht des zwischengelagerte Materials entspricht mehreren hundert Tonnen.



Abbildung 27: ÖKK-Kunststoff-Rejecte

Die Beprobung des Haufens erfolgte unter zu Hilfenahme einer Hebebühne (vgl. Abbildung 28). Das vorliegende Material konnte als eindeutig heterogen definiert werden, da es sich hierbei um Abfall aus unterschiedlichen Prozessen der Kunststoffindustrie handelt. Die Konsistenz des Haufens war fest, trocken und rieselförmig. Das Material hatte eine graue Farbe mit bunten Einschlüssen und roch nach geschredderten Kunststoff. Aufgrund des sehr feinen Schüttgutes mit einer Korngröße zwischen 0,1 und 5 cm, wurde die Dichte anhand eines Schätzwertes aus der Tabelle der ÖNORM S 2123-1 (Shredderleichtfraktion) mit  $< 0,5 \text{ g/cm}^3$  angenommen. Die Zahl der qualifizierten Stichproben wurde mit 14 festgelegt. Eine Handschaufel fungierte als Probenahmegerät. Als Probenahmebehälter diente eine

blaue Kunststoffbox (vgl. Abbildung 29) mit einem Volumen von  $0,045 \text{ m}^3$ . Jeweils zwei Stichproben wurden in einem Behälter zusammengefasst. Wie aus Abbildung 30 ersichtlich, wurde bei der Probennahme darauf geachtet, dass das Material aus den obersten 50 cm des Haufens infolge von oberflächlichen Umwelteinflüssen nicht für die Erstellung der Sammelprobe herangezogen wurde. Die Einhaltung der Tiefenstufe für die Beprobung war nicht möglich, da es sich bei dem Haufen um einen annähernd stumpfen Kreiskegel handelte. Insgesamt siebenmal wurde der Behälterinhalt abseits des zu beprobenden Haufens auf einer vorher gereinigten Fläche entleert. Die daraus resultierende Sammelprobe, ein Haufen mit einer Masse von ca. 10 kg, wurde aus Gründen der Homogenisierung zu einem Kegel aufgeschüttet (vgl. Abbildung 31) und anschließend nach der  $\frac{1}{4}$ -Methode zur Feldprobe verjüngt. Zum Probentransport ins Labor dienten zwei Kübel aus Polypropylen (vgl. Abbildung 32) mit einem Volumen von jeweils  $0,1 \text{ m}^3$  die luftdicht verschlossen und ungekühlt zur Analyse ins Labor gebracht wurden.



Abbildung 28: Beprobung des Reject-Haufens mit Hilfe einer Hebebühne



Abbildung 29: Probenahmebehälter mit den Abmessungen (L)54x(B)24x(T)35 cm für Reject-Haufen



Abbildung 30: Probenahmestellen des Reject-Haufens



Abbildung 31: Herstellung der Sammelprobe aus 14 qualifizierten Reject-Stichproben



Abbildung 32: Gefäße der Rejectproben

### 5.1.2 Beprobung fester Abfälle aus Stoffströmen nach ÖNORM S 2123-3

Im vorangegangenen Kap. 5.1.1 wurde auf die Beprobung eines Haufens, der als Kunststoff-Rejecten bestand, eingegangen. Bei allen übrigen Abfallfraktionen der Thermo Team-Anlage war eine direkte Beprobung in den Lagerboxen nicht möglich. Die Heterogenität und das

Größtkorn von über 0,5 m machten eine Zerkleinerung der einzelnen Fraktionen notwendig. Bei den Versuchen wurden die Hauptfraktionen ausschließlich über die 3D-Linie der Anlage gefahren. Dies hatte den Effekt, dass das Material nach der Vorzerkleinerung und Störstoffabscheidung ein definiertes Korngrößenspektrum aufwies und für eine Beprobung geeignet war.

Die Begutachtung des aufzugebenden Materials lässt bei keiner der Hauptfraktionen einen Zweifel über die Inhomogenität aufkommen (vgl. Abbildung 33). Obwohl bei der Probenahme auf die Einhaltung einer ausreichenden Vor- und Nachlaufzeit geachtet wurde und das Material getrennt von anderen Fraktionen aufbewahrt wurde, kann man nach rein optischen Eindrücken sagen, dass die Zusammensetzung des Materials sehr heterogen ist.



Abbildung 33: Heterogenität der Inputfraktionen (ÖKK-Fraktion)

Die eigentliche Beprobung des Materials fand durch eine kleine quadratische Öffnung am Förderbandabwurf statt (vgl. Abbildung 34). Nach dieser Probenahmestelle gelangt das verkaufsfertige Material über ein Förderband direkt in das Outputmateriallager. Als Probenahmegerät fungierte eine Schöpfkelle (vgl. Abbildung 35). Die Aufgabemenge der einzelnen Fraktionen war schwer zu bestimmen, schwankte aber schätzungsweise im Bereich zwischen zehn und 15 Tonnen. Die Korngrößen des zerkleinerten Materials hingegen lagen alle im Bereich zwischen 0,1 und 3 mm. Die Konsistenz aller Fraktionen konnte als fest trocken und rieselförmig beschrieben werden (vgl. Abbildung 36). Die Färbung der Proben war durchgängig grau mit bunten Einschlüssen. Ausnahmen bildeten die Fraktionen ASA, Thermische Graz und Transbeton, deren Farben braun bis grau waren. Bei der Probe von Magna Steyr, die überwiegend aus Verpackungsfolien aber auch

Kunststoffteilen aus der Automobilproduktion bestand, fiel ein hoher Styroporgehalt auf (vgl. Abbildung 37). Sowohl bei der ASA-Fraktion, als auch bei den Fraktionen Transbeton und Thermische Graz waren Beimengungen von Schaumstoff und anderen Füllmaterialien erkennbar (vgl. Abbildung 37). Alle Fraktionen mit Ausnahme jener der Thermomix, die einen leichten Gummigeruch besaß, waren geruchsneutral. Die Dichte wurde auf Basis einer Schätzung ermittelt und betrug für alle Fraktionen  $< 0,5 \text{ g/cm}^3$ . Der Schätzwert basiert dabei auf Orientierungswerte für Schüttdichten in Abhängigkeit von der Art des Abfalls und kann in der gültigen ÖNORM S 2123-1 [26, S. 8] nachgelesen werden. Insgesamt wurden pro Fraktion 52 Stichproben im 20-Sekunden-Takt gezogen. Jeweils vier Stichproben wurden zu einer qualifizierten Stichprobe von ca. 2 kg zusammengeführt. Daraus ergaben sich 13 qualifizierte Stichproben, die zu einer Sammelprobe mit einer Masse von ca. 26 kg vereinigt wurden. Nach anschließender Probenverjüngung nach der  $\frac{1}{4}$ -Methode wurden die Proben luftdicht in weiße Polypropyleneimer verpackt, die ein Volumen von  $0,1 \text{ m}^3$  aufwiesen (vgl. Abbildung 38 u. Abbildung 39). Der Transport zur Analyse ins Labor verlief ungekühlt.



Abbildung 34: Probenahmestelle vor dem Austrag in das ASB-Outputlager



Abbildung 35: Probenahme mittels Schöpfkelle



Abbildung 36: Feines, trockenes und rieselförmiges Material am Ort der Probeentnahme



Abbildung 37: Hoher Styroporanteil bei der Magna Steyr Fraktion (links), Beimengungen von Schaumstoff und Füllmaterialien bei der ASA-Fraktion (rechts)



Abbildung 38: Probenverjüngung nach der 1/4-Methode



Abbildung 39: Probennahmegefäße der Hauptfraktionen

## 5.2 Sortieranalyse ausgewählter Fraktionen

Der erste Teil der Beprobung vor Ort wurde im Kap. 5.1 beschrieben. Hierbei wurde aus einer Schüttgut bzw. aus einem kontinuierlich anfallenden Güterstrom für jede Hauptinputfraktion Proben gezogen, anschließend zu einer Sammelprobe vermischt und zuletzt nach erfolgter Verjüngung im Labor auf verschiedene Parameter, u.a. den Schwermetallgehalt untersucht.

Anhand der analytischen Ergebnisse dieser Beprobung ließen sich die nachfolgenden Untersuchungsschritte festlegen. Da vor allem bei der Herstellung von PET-Material für z.B. PET-Flaschen hohe Gehalte an Antimon zu Einsatz kommen, erschien es für einen weiteren Arbeitsschritt sinnvoll, den Anteil dieser PET-Flaschen in den einzelnen Hauptinputfraktionen zu kennen. Darüber hinaus kann man bei Kenntnis der Verteilung der PET-Flaschen im Abfallgut Verfahren implementieren, um diese vor einem nachfolgenden Aufbereitungsschritt (z.B. Zerkleinerung) auszuschleusen.

Da in den einzelnen Inputfraktionen, neben kaum sortiertechnisch erfassbare PET-Folien, auch transparente sowie bunte PET-Flaschen zu finden sind, erfolgte an zwei Tagen im Dezember 2006 direkt bei der Anlage vor Ort eine Sortieranalyse. Dabei galt es neben PET-

Flaschen auch die Fraktionen Papier, Pappe und PVC aus dem Abfall auszusortieren. Die drei zuletzt genannten Fraktionen wurden im Rahmen eines anderen Projektes bei der Sortierung miterfasst. Die Grundlage für die Auswahl der zu beprobenden Inputströme bildete ein zuvor durchgeführter Plausibilitätscheck. Dabei einigte man sich auf folgende sieben Inputfraktion, die einer Sortierung unterzogen werden sollten:

- ASA
- Transbeton
- Thermische Graz
- Thermische Wien
- ÖKK
- AEVG
- Thermomix

Alle oben genannten Fraktionen wurden einzeln mittels Radlader aufgegeben. Pro Inputfraktion entsprach dies ca. 8 - 10 t Material, das über die Aufbereitungsanlage gefahren wurde. Genauere Angaben über die aufgegebene Materialmenge waren aufgrund einer fehlenden Einwägevorrichtung nicht möglich. Anhand dessen ergab sich ein Beprobungsfenster von ca. einer 3/4 Stunde, wobei in den ersten sowie letzten zehn Minuten aus Gründen der Sortenreinheit keine Beprobung stattfand. Die Ausschleusung der Materialmenge zur Sortierung erfolgte direkt nach dem Vorzerkleinerungsaggregat. Dazu wurde das Zulieferförderband für den nachgeschalteten Windsichter alle 4 - 4 ½ Minuten für wenige Sekunden gestoppt und zurückgefahren. Der dadurch entstehende Förderbandabwurf wurde in einem leeren Stahlbehälter mit einem Fassungsvermögen von 0,5 m<sup>3</sup> aufgefangen (vgl. Abbildung 40). Nach Erreichen des maximalen Auffangvolumens wurde der Gurtabwurf wiederum gestoppt und das Förderband wieder in die ursprüngliche Richtung laufen gelassen. Der volle Probenbehälter wurde anschließend in die Maschinenhalle gerollt, für die Durchführung der manuellen Sortierung an einer vorher gesäuberten Fläche ausgeleert und danach wieder unter den Förderbandabwurf gestellt. Dieser Vorgang wiederholte sich je nach Schüttdichte und Korngrößenverteilung der Inputfraktion zwischen neun und zwölf Mal. Somit war der Output einer vorher definierten repräsentativen Probenmenge zwischen 250 und 450 kg je Fraktion gewährleistet.



Abbildung 40: Probenahmestelle mit Probenahmebehälter

Die eigentliche Sortierung fand wie bereits erwähnt in der Maschinenhalle der TT-Anlage statt. Dabei wurde jede der sechs Abfallfraktionen manuell einer Sortierung nach PET-Flaschen, Papier, Karton und PVC-hältigen Abfällen (Installationsrohre, Kabelummantelungen, Bodenbeläge etc.) unterzogen. Als Sortierhilfe kam ein 0,57 m<sup>3</sup> fassender Metallbehälter mit aufgelegtem Gitterrost (Maschenweite 10 mm) zum Einsatz (vgl. Abbildung 41 u. Abbildung 42). Der Rost diente zur Erfassung des Feinanteils.



Abbildung 41: Metallbehälter mit aufgesetztem Gitterrost (li.) zur Erfassung des Feinanteils (re.)



Abbildung 42: Manuelle Sortierung der Abfallfraktionen

Jener Abfall, der keiner Fraktionen zurechenbar war, wurde nach genauer Verwiegung beiseite geräumt und abtransportiert, um nach der Sortierung wieder als Inputmaterial eingesetzt zu werden (vgl. Abbildung 43).



Abbildung 43: ASA-Restfraktion

Die übrig gebliebenen aussortierten Stoffe wurden nach Beendigung der Sortierung ebenfalls mengenmäßig dokumentiert (vgl. Abbildung 44 u. Abbildung 45). Dabei gilt zu erwähnen, dass es durch die z.T. lange Lagerung in zu Ballen gepresster Form zu gegenseitigen Anhaftungen und durch Verunreinigungen bedingt zu Fehlern bei der gewichtsmäßigen Erfassung kommen kann. Das augenscheinlichste Merkmal der untersuchten Inputfraktion ist die Heterogenität des Materials. Neben dieser war auch das Korngrößenspektrum äußerst weit gestreut. Es rangierte zwischen wenigen Millimetern bis in den zweistelligen Zentimeterbereich.



Abbildung 44: Aussortierte PET-Flaschen (li.) und Papier-Fraktion (re.)



Abbildung 45: Aussortierte Karton- (li.) und PVC-Fraktion (re.)

## 6 Auswertung der Laborergebnisse

Der Inhalt des sechsten Kapitels ist der Auswertung der Laborergebnisse gewidmet. Dabei werden analytisch gewonnene Messdaten einzelner Monate bzw. Jahre miteinander verglichen und grafisch dargestellt. Des Weiteren wird auf Inputfraktionen, die erhöhte Schwermetallkonzentrationen aufweisen eingegangen und Grenzwertüberschreitungen quantitativ diskutiert.

### 6.1 Schwermetallanalysen der Monatsmischproben

Der Schwermetallgehalt des von der Fa. Thermo Team gelieferten Substitutionsbrennstoffes wird in regelmäßigen Abständen vom Empfänger, der Fa. Lafarge Perlmooser AG, analysiert. Dazu werden Monatsmischproben erstellt, die zur Analyse dem österreichischen Forschungszentrum Seibersdorf übergeben werden. Die erhaltenen Messergebnisse, die nach Monaten geordnet in der nachfolgenden Tabelle 12 abgebildet sind, geben Aufschluss über mögliche Sb- und Blei-Grenzwertüberschreitungen in Hinblick auf das im Drehrohrföfen zugefeuerte ASB-Material. Fett gedruckte Werte repräsentieren Überschreitungen des Deckelung-Grenzwertes, der für Sb bei 30 mg/kg TS und für Pb bei 500 mg/kg TS liegt.

Tabelle 12: Schwermetallanalysen ASB 2005 - 2006 Seibersdorf

Monat	Sb [mg/kg TS]	Pb [mg/kg TS]
Januar 05	<b>43</b>	168
Februar 05	<b>41</b>	87
März 05	<b>39</b>	230
April 05	27	210
Mai 05	<b>40</b>	210
Juni 05	13	220
Juli 05	18	92
August 05	12	114
September 05	30	153
Oktober 05	<b>64</b>	135
November 05	<b>48</b>	156
Dezember 05	20	101
Januar 06	<b>77</b>	165
Februar 06	–*	–*
März 06	30	194
April 06	<b>63</b>	400
Mai 06	<b>52</b>	194
Juni 06	<b>140</b>	98
Juli 06	<b>42</b>	117
August 06	14	220
September 06	<b>81</b>	158
Oktober 06	<b>122</b>	150

November 06	<b>54</b>	136
Dezember 06	<b>41</b>	210

\* Anlagenstillstand wegen Revisionsarbeiten

Zusätzlich zu den oben dargestellten Schwermetallkonzentrationen wurde im Zuge der Analyse des ASB-Outputmaterials eine weiterführende Analytik betrieben. Diese zusätzlichen ASB-Parameter sind für den weiteren Verlauf dieses Kapitels von untergeordneter Bedeutung, können aber in den Tabellen im Anhang A dieser Arbeit nachgelesen werden.

An die vorherige Tabelle 12 anschließend wird in den nachfolgenden Abbildung 46 und Abbildung 47 die gewonnenen Analysewerte für Sb und Pb anhand eines Säulendiagramms grafisch dargestellt. Die dicken Linien repräsentieren dabei den jeweiligen 80-Perzentil- bzw. den Deckelungsgrenzwert.

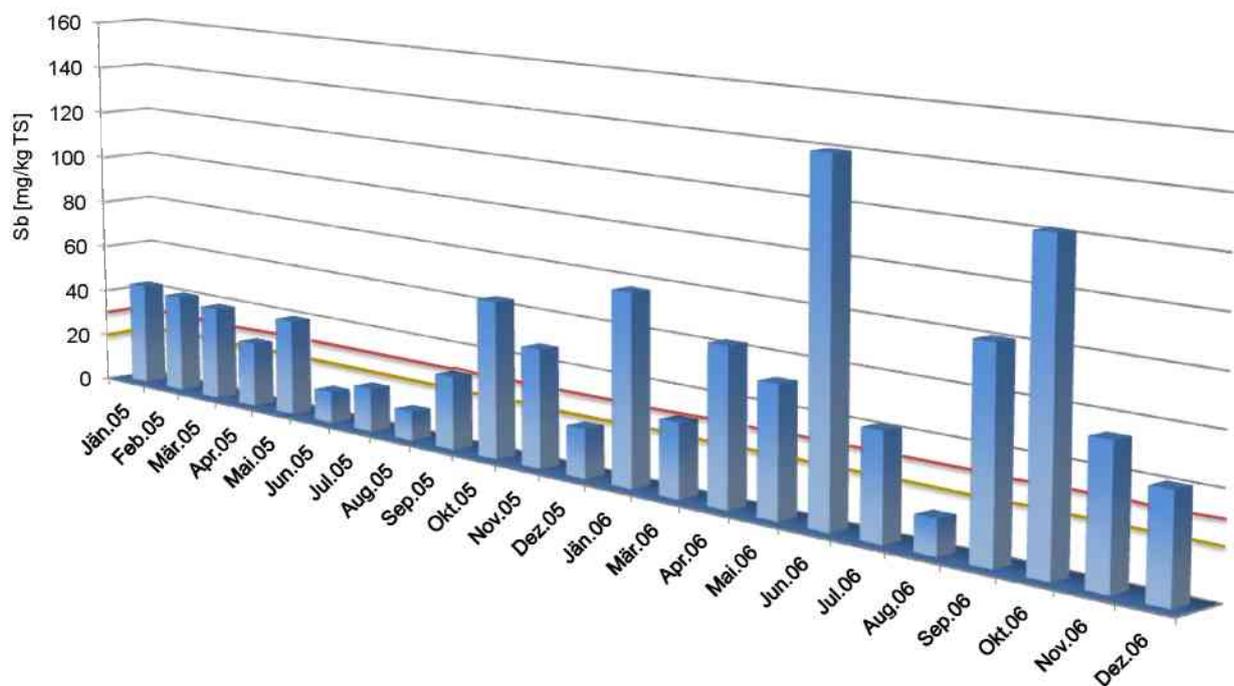


Abbildung 46: Sb-Analysen ASB Seibersdorf 2005 - 2006

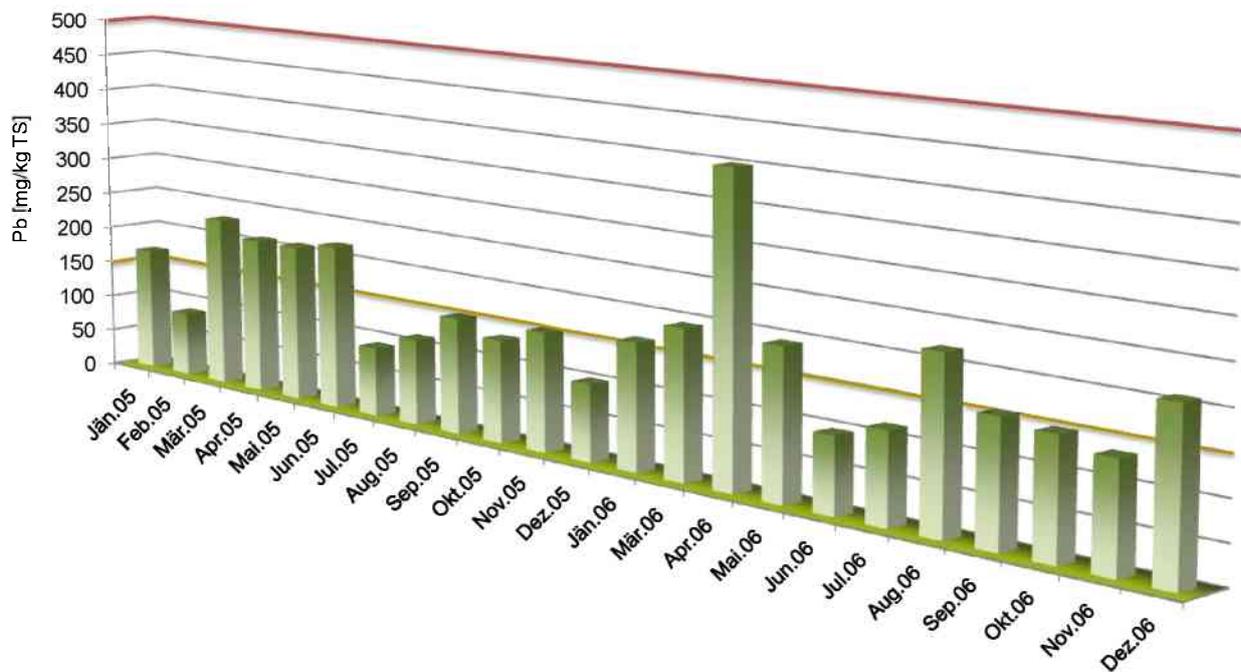


Abbildung 47: Pb-Analysen ASB Seibersdorf 2005 – 2006

Unter Einbeziehung des der oben dargestellten Analyseergebnissen der Monatsmischproben und den in Tabelle 10 aufgelisteten monatlichen Produktionsdaten kann der monatlich anfallende Antimon- bzw. Bleioutput enthalten im ASB-Substitutbrennstoff abgeschätzt werden. Die Ergebnisse der hochgerechneten Schwermetallfrachten sind in der nachfolgenden Tabelle 13 dargestellt.

Tabelle 13: Monatlicher Antimon- und Bleioutput der Betriebsanlage

Monat	Sb [kg]	Pb [kg]
Januar 05	33	128
Februar 05	35	73
März 05	61	361
April 05	86	670
Mai 05	124	652
Juni 05	42	704
Juli 05	50	258
August 05	31	299
September 05	87	446
Oktober 05	231	487
November 05	169	549
Dezember 05	74	374
Januar 06	227	487
Februar 06	–*	–*
März 06	78	502
April 06	219	1.392

Mai 06	177	659
Juni 06	533	373
Juli 06	141	392
August 06	66	1.044
September 06	346	675
Oktober 06	472	581
November 06	242	610
Dezember 06	180	922

\* Anlagenstillstand wegen Revisionsarbeiten

In den Jahren 2005 und 2006 lag der Antimonoutput der Betriebsanlage bei durchschnittlich 161 kg pro Monat. Im gleichen Zeitraum enthielt der produzierte ASB-Substitutbrennstoff eine durchschnittliche monatliche Bleimenge von 549 kg. Zur besseren Illustration der monatlich anfallenden Antimon- und Bleimengen im ASB-Produkt dienen die nachfolgenden Abbildungen (vgl. Abbildung 48 u. Abbildung 49).

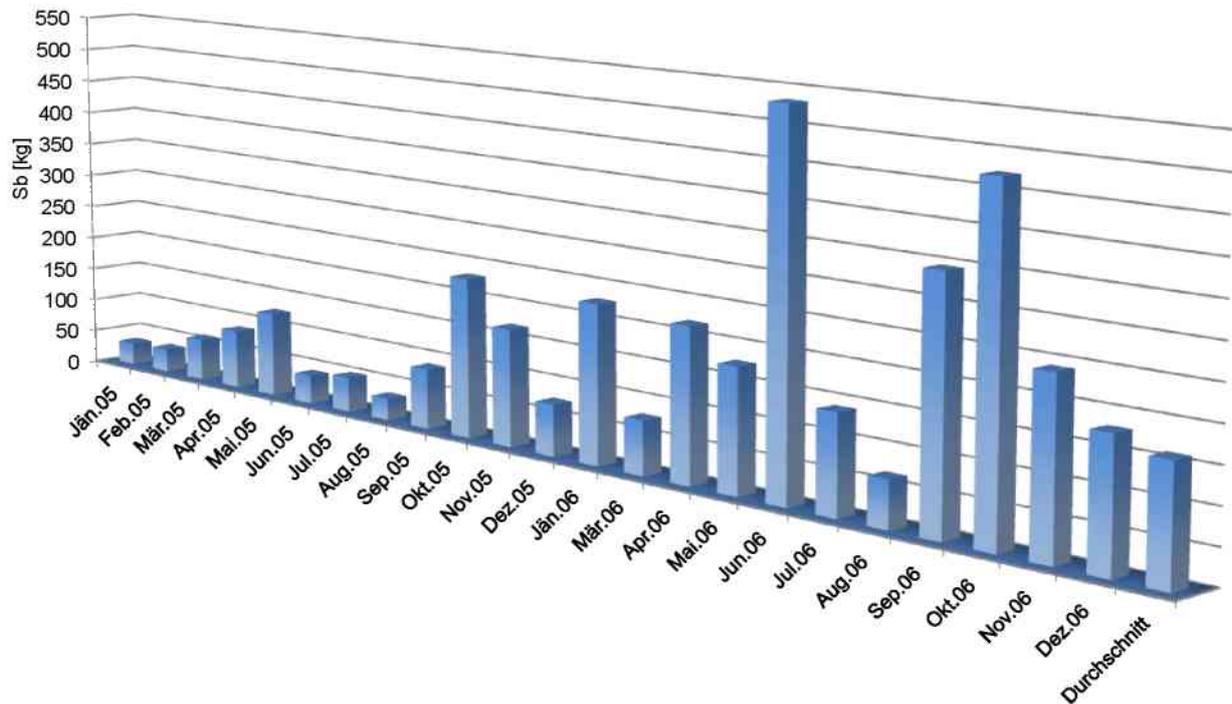


Abbildung 48: Monatlicher Sb-Anlagenoutput in kg

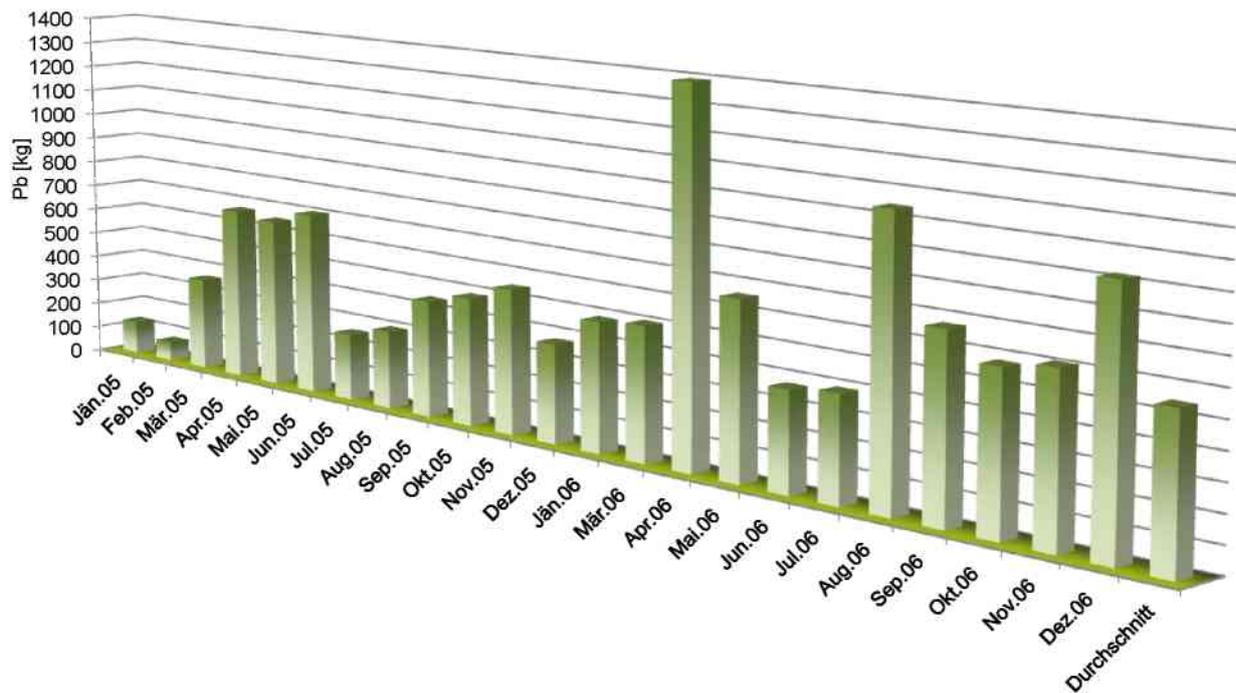


Abbildung 49: Monatlicher Pb-Anlagenoutput in kg

## 6.2 Analyse der Hauptfraktionen

Die in Kap. 5 beschriebenen Probenahmeszenarien dienten als Ausgangspunkt für die anschließende Laboranalyse. Dabei wurde bei jeder Feststoffprobe dieselbe Analytik angewandt. Weiters ist zu erwähnen, dass die Proben vor der Aufbereitung keiner Konservierung unterzogen wurden, sie bis zur Vorbereitung luftdicht verschlossen und bei Raumtemperatur lagerten. Neben dem eigentlichen Vorhaben, der Bestimmung des Schwermetallgehalts, insbesondere von Antimon und Blei, wurden noch zusätzliche Parameter ermittelt. In den nachfolgenden Tabellen (vgl. Tabelle 14 u. Tabelle 15) sind neben den Schwermetallgehalten der Chlorgehalt, unterer und oberer Heizwert ( $H_u$ ,  $H_o$ ) sowie der Störstoffgehalt und der Trockenrückstand aller beprobten Input-Fraktionen aufgelistet. Dabei ist anzumerken, dass alle Werte störstoffkorrigiert sind und der Messwert innerhalb gewisser Streubanden liegt. Zur besseren Übersicht sind Überschreitungen hinsichtlich des behördlich vorgeschriebenen Grenzwertes fett gedruckt.

Tabelle 14: Antimon-, Blei- und Chlorgehalte der TT-Input-Fractionen

Bezeichnung	Sb [mg/kg TS]	Pb [mg/kg TS]	Cl [mg/kg TS]
Thermische Wien	<b>70,0±2,7</b>	90,0±14	8.600±1.500
AEVG	<b>40,0±10</b>	93,0±8	7.200±800
ÖKK	23,0±2,4	97,0±5	<b>11.100±1.300</b>
Magna Steyr	22,0±0,1	49,0±3	4.000±300
Transbeton	<b>150±13</b>	350±10	<b>12.300±1.600</b>
Thermomix	<b>180±30</b>	80,0±11	9.800±1.400
ASA	<b>44,0±8</b>	130±23	<b>20.000±900</b>
Thermische Graz	<b>36,0±9</b>	120±17	<b>15.600±1.600</b>
Kunststoff-Rejecte	10,0±2,4	130±12	8.200±1.600
Autoteppich	<b>108±3</b>	17,0±1,4	1.200±200

Tabelle 15: Brennwert, Heizwert, Störstoffgehalt und Trockenrückstand der TT-Input-Fractionen

Bezeichnung	H <sub>o</sub> [kJ/kg TS]	H <sub>u</sub> [kJ/kg OS]	Störstoffe gesamt [% TS]	Trockenrückstand [%]
Thermische Wien	25.200±1700	21.500±1500	0	93,43
AEVG	20.700±150	15.000±110	1,11	81,22
ÖKK	30.300±400	25.200±290	0	91,13
Magna Steyr	29.000±1100	26.400±1000	0	99,04
Transbeton	23.400±400	19.500±270	0,92	91,43
Thermomix	21.800±190	18.300±160	0,72	91,99
ASA	24.200±800	20.000±700	0,90	90,71
Thermische Graz	23.600±900	19.300±800	0,04	89,94
Kunststoff-Rejecte	32.100±400	22.800±290	0,47	78,87
Autoteppich	23.700±260	21.700±230	0	99,45

Deutliche Grenzwertüberschreitungen sind bei den Fraktionen Thermische Wien, Transbeton, Thermomix und bei den Autoteppichen zu verzeichnen. Dabei ist zu erwähnen, dass die Fraktionen Transbeton und Thermomix den behördlich vorgeschriebenen Sb-Deckelungsgrenzwert von 30 mg/kg TS um das fünf- bzw. sechsfache überschreiten. Zudem liegt bei dem Material Thermische Wien ein Sb-Wert vor, der mehr als das Doppelte des erlaubten Grenzwertes überschreitet. Geringfügig erhöhte Schwermetallwerte sind bei den Inputströmen AEVG, ASA und Thermische Graz zu verzeichnen. Die übrigen drei Fraktionen (ÖKK, Magna Steyr, Kunststoff-Rejecte) liegen z.T. deutlich unter dem Grenzwert. Die nachfolgende Abbildung 50 zeigt die Sb-Konzentrationen in den einzelnen Inputströmen. Der behördliche Deckelungsgrenzwert ist bei 30 mg/kg TS eingezeichnet.

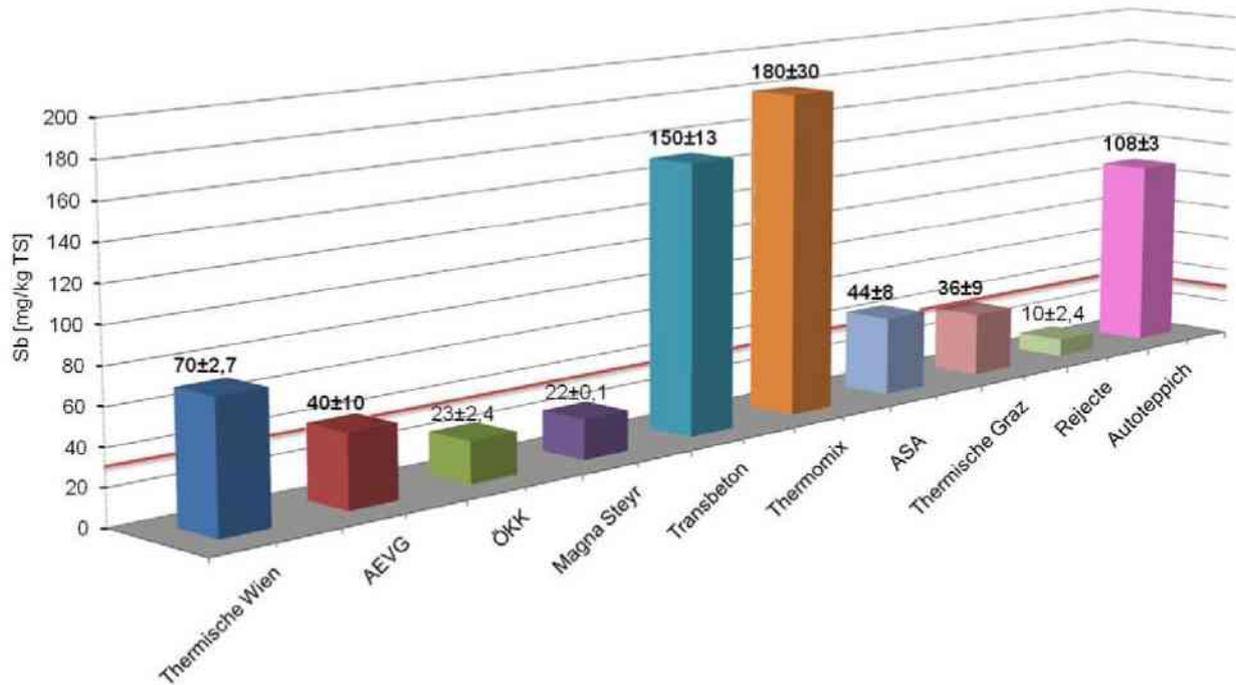


Abbildung 50: Sb-Konzentrationen der Hauptinputfraktionen

Alle gemessenen Pb-Konzentrationen der Hauptinputströme liegen im Rahmen des gesetzlich vorgeschriebenen Pb-Deckelungsgrenzwertes von 500 mg/kg TS. Bei einem Großteil der untersuchten Fraktionen liegt der Messwert für Blei im Bereich zwischen 80 und 130 mg/kg TS. Ausnahmen bilden die Autoteppiche sowie der Stoffstrom Magna Steyr, deren Pb-Werte mit 17 bzw. 49 mg/kg TS weit unter dem behördlichen Grenzwert angesiedelt sind. Die einzige Ausnahme nach oben hin ist beim Material von Transbeton zu verzeichnen. Dessen Pb-Konzentration liegt mit 350 mg/kg TS zwar eindeutig unter dem Deckelungsgrenzwert, im Vergleich zu den anderen Messergebnissen aber um einiges höher. Eine grafische Aufbereitung der Pb-Konzentrationen gibt Abbildung 51 wieder. Der behördlich festgelegte Deckelungsgrenzwert ist bei 500 mg/kg TS eingetragen.

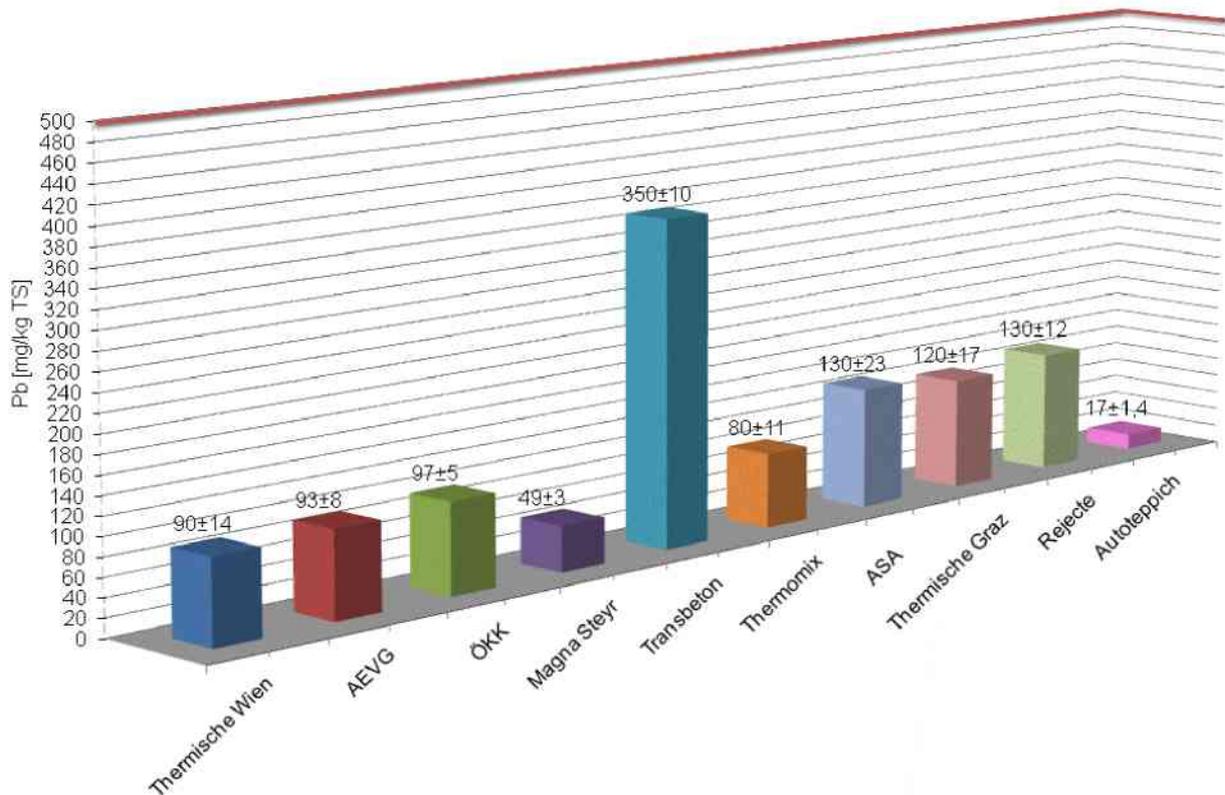


Abbildung 51: Pb-Konzentrationen der Hauptinputfraktionen

### 6.3 Auswertung der Sortieranalyse

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Auswertung der im Kap. 5.2 durchgeführten Sortierung. Neben der sortierten Menge, dem Rest und dem Feinanteil ist dabei vor allem die Mengenverteilung der PET-Verpackungen, insbesondere PET-Flaschen von besonderem Interesse. Sortierergebnisse weiterer Fraktionen, die im Zuge eines anderen, parallel ablaufenden Projektes ermittelt wurden und für die Thematik dieser Arbeit von untergeordnetem Interesse sind, werden in den Tabellen und Abbildungen im Anhang B dargestellt.

In der nachfolgenden Tabelle 16 wird ein Einblick in die Ergebnisse der Sortieranalyse in Bezug auf den PET-Flaschengehalt gewährt. Dabei ist zu erwähnen, dass der Feinanteil ( $\leq 1$  mm) ausschließlich bei den drei letzten Fraktionen (ÖKK, AEVG u. Thermomix) berücksichtigt wurde. Weiters lässt sich die bei allen Fraktionen vorhandene Gewichtsdivergenz gegenüber der sortierten Gesamtmenge aufgrund der gleichzeitigen Aussortierung anderer Fraktionen erklären.

Tabelle 16: Ergebnisse der Sortieranalyse

Bezeichnung	sortierte Menge [kg]	PET-Verpackung [kg]	PET-Verpackung [M-%]	Rest <sup>1)</sup> [kg]	Feinanteil [kg]
ASA	344,2	2,0	0,57	335,7	k.A.
Transbeton	442,9	3,3	0,74	417,3	k.A.
Thermische Graz	423,6	7,9	1,88	393,8	k.A.
Thermische Wien	316,8	7,2	2,27	270,2	k.A.
ÖKK	421,5	24,4	5,79	358,1	7,4
AEVG	446,1	5,4	1,21	385,6	10,0
Thermomix	239,1	3,8	1,59	217,0	7,2

1) Die Mengendifferenz gegenüber der sortierten Gesamtmenge aus Spalte 2 ergibt sich aufgrund der gleichzeitigen Aussortierung anderer Fraktionen (Papier, Karton, PVC) im Zuge eines weiteren Projektes.

Der Anteil an PET-Flaschen ist mit 0,57 bzw. 0,74 M-%, gefolgt von der Fraktion AEVG mit 1,21 M-%, bei den Fraktionen ASA und Transbeton am niedrigsten. Beim ASA und Transbeton wurden nur 2 bzw. 3,3 kg PET-Flaschenmaterial aussortiert (vgl. Abbildung 52). Beim Thermomix-Material konnte ein PET-Flaschenanteil von 1,59 M-% nachgewiesen werden, dies entspricht 3,8 kg PET-Flaschen (vgl. Abbildung 53). Die Fraktionen Thermische Graz und Thermische Wien setzen sich bei der Sortierung aus 7,9 bzw. 7,2 kg PET-Verpackungen zusammen (vgl. Abbildung 54). Der Anteil am Gesamtgewicht beläuft sich dabei auf 1,88 bzw. 2,27 M-%. Das gewichtsmäßig größte PET-Flaschenaufkommen kann der ÖKK-Fraktion zugerechnet werden. Rd. 6 M-% bzw. 24,4 kg PET-Getränkeflaschen lieferte das Sortierergebnis bei dieser Fraktion (vgl. Abbildung 55).

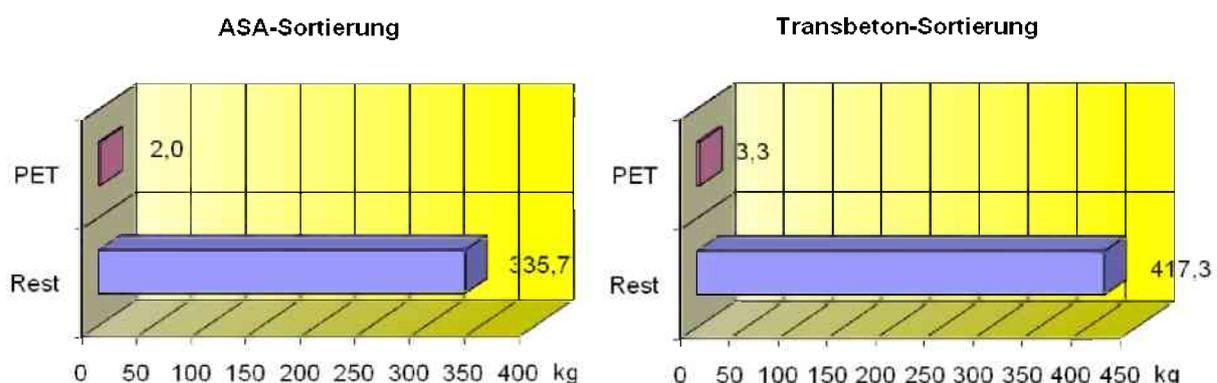


Abbildung 52: PET-Flaschenanteil der ASA- und Transbetonfraktion bei der Sortierung in kg

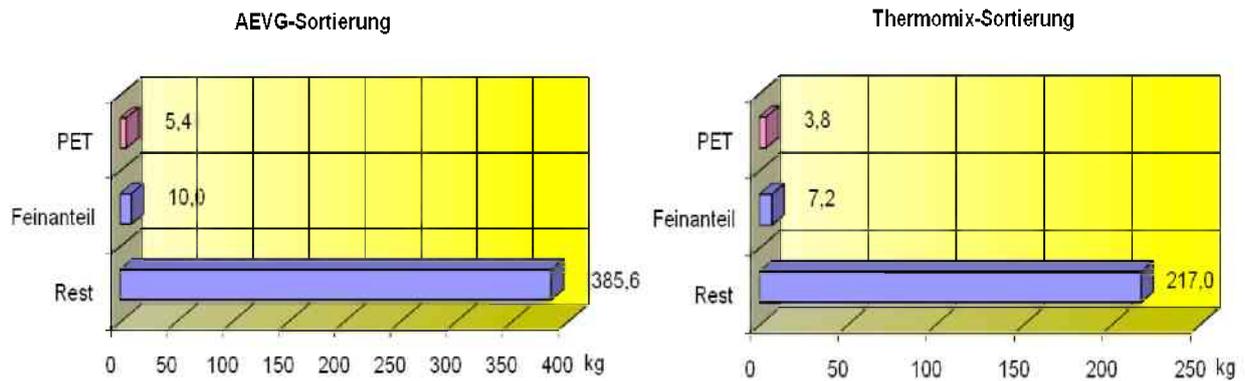


Abbildung 53: PET-Flaschenanteil der AEVG- und Thermomixfraktion bei der Sortierung in kg

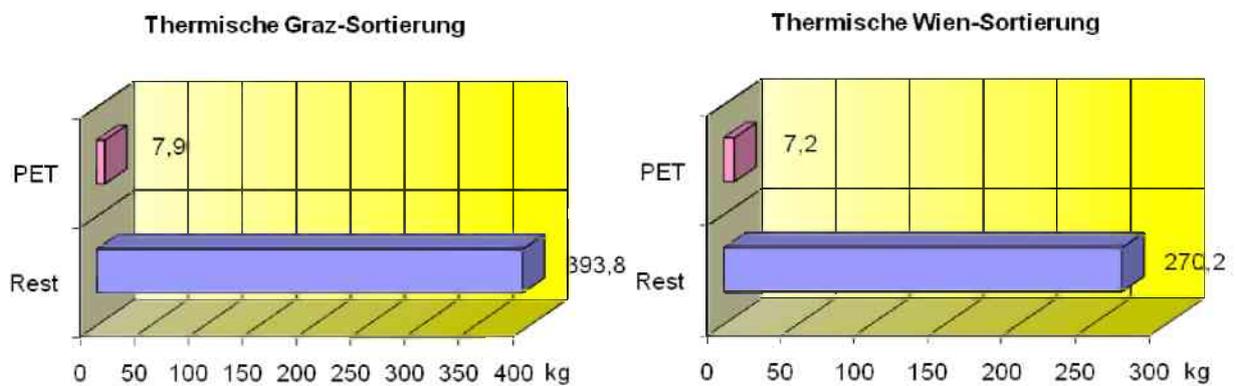


Abbildung 54: PET-Flaschenanteil der Thermische Graz- und Thermische Wien-Fraktion bei der Sortierung in kg

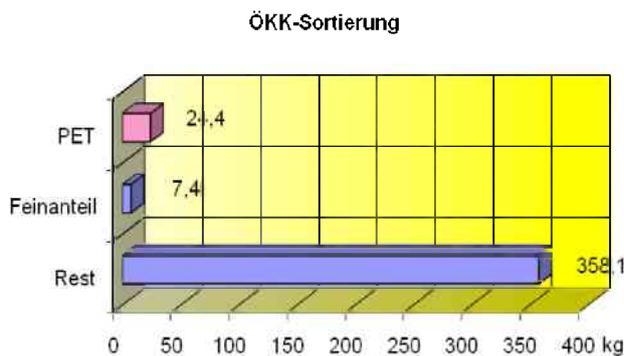


Abbildung 55: PET-Flaschenanteil ÖKK-Fraktion bei der Sortierung in kg

Im Allgemeinen ist anzumerken, dass die aus den oben erwähnten Hauptinputfraktionen aussortierten PET-Flaschen im ungepressten Zustand ein relativ großes Volumen einnehmen, im Gegenzug dazu aber einen vergleichsweise geringen Masseanteil aufweisen.

Zusammenfassend wird in der nachfolgenden Abbildung 56 die prozentuelle PET-Massenverteilung der Hauptinputfraktionen grafisch dargestellt.

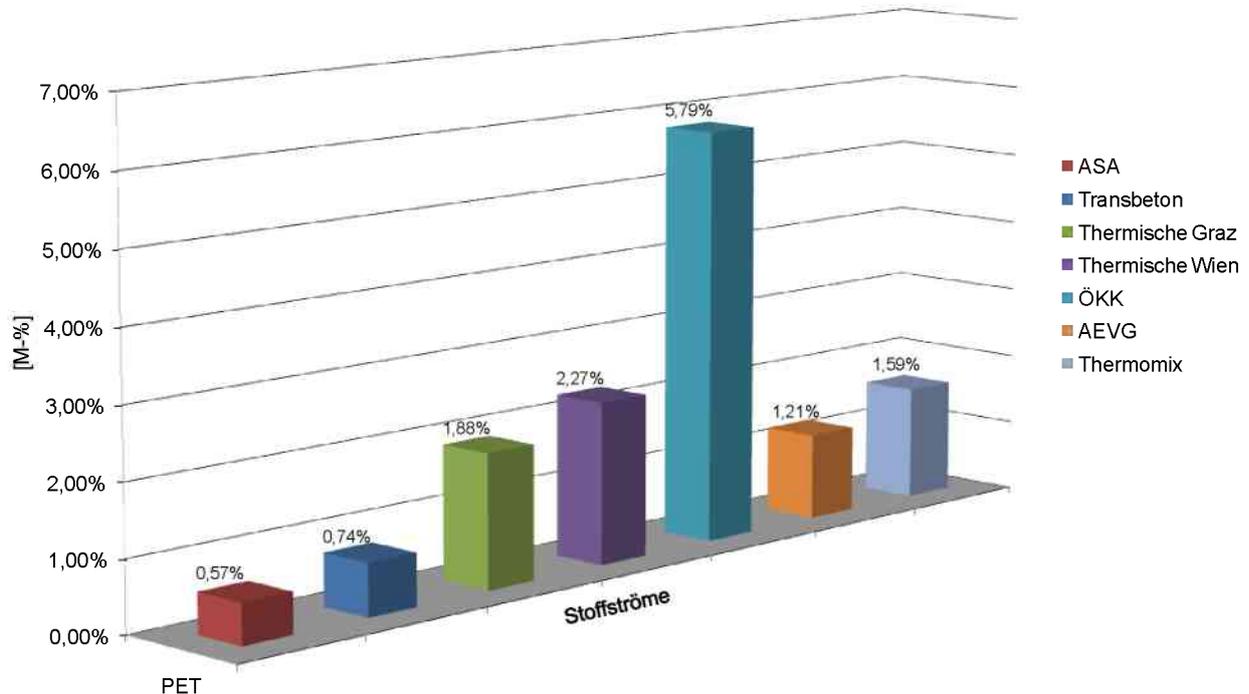


Abbildung 56: M-%-Verteilung an PET-Flaschen in den Hauptfraktionen

Der Anteil an PET-Flaschen ist, wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt, am niedrigsten bei der ASA- und Transbeton-Inputfraktion und mengenmäßig am größten bei der ÖKK-Fraktion. Dies resultiert wiederum aus der Tatsache, dass in der ÖKK-Fraktion primär Kunststoffverpackungen aus den kommunalen Gelben Tonnen zu finden sind. Ein großer Anteil dieses Materials besteht aus PET-Verpackungen u.a. auch Getränkeflaschen, Verpackungen von Haushaltsreinigern und Hygieneartikel (Waschlotionen, Shampoos) etc.

Im Nachfolgenden wird auf den fraktionell sortierten Materialinput pro Monat der TT-Anlage eingegangen (vgl. Tabelle 17). Es wurden dazu vier Monate herangezogen, in denen der Sb-Output den vorgeschriebenen Grenzwert um ein vielfaches überschreitet. Zusätzlich zu den angegebenen Monateinsätzen wurde auf einen Monatsdurchschnitt hochgerechnet. Die letzte Tabellenspalte verdeutlicht diesen Mittelwert.

Tabelle 17: Materialinput pro Monat

Hauptgruppe	Fraktion	Materialinput TT 2006 in kg				Monats-Ø in kg
		April	Mai	Juni	Oktober	
MBA (440010)	ASA	269.640	244.420	151.620	406.580	268.065
Gewerbe (440020)	ASA (Transbeton)	167.840	247.260	186.820	129.520	182.860
	Rieger	60.380	105.400	0	22.400	47.045
	AEVG-EBG	301.000	374.840	361.000	174.320	302.790
	Thermische Graz	433.220	433.700	345.320	995.740	551.995
	Thermische Wien	715.000	633.660	698.940	378.340	606.485
	Schlager	96.600	122.680	122.200	22.160	90.910
	Transbeton	316.280	237.640	133.960	51.160	184.760
	Rest	141.340	169.640	162.680	242.440	179.025
	<b>Gesamt</b>		<b>2.231.660</b>	<b>2.324.820</b>	<b>2.010.920</b>	<b>2.016.080</b>
ÖKK (150360)	ÖKK	643.280	1.027.300	1.001.640	1.028.920	925.285
Thermomix (10060)	Thermomix	341.040	274.280	297.780	299.940	303.260

Beim massenmäßig größten Inputstrom, der Gewerbeabfallfraktion, sind unterschiedliche Zulieferer berücksichtigt worden. Zur weiteren Darstellung wurde unter Berücksichtigung der Hauptlieferanten in den Monaten April, Mai, Juni und Oktober 2005 ein Monatsmittelwert gebildet. Die Grundlage für die Auswahl dieses Vier-Monatsdurchschnitts bildeten deutliche Sb-Grenzwertüberschreitungen der ASB-Outputfraktion in den angegebenen Zeiträumen. In der nachfolgenden Abbildung 57 ist die durchschnittliche Monatszusammensetzung der Gewerbeabfallfraktion grafisch dargestellt.

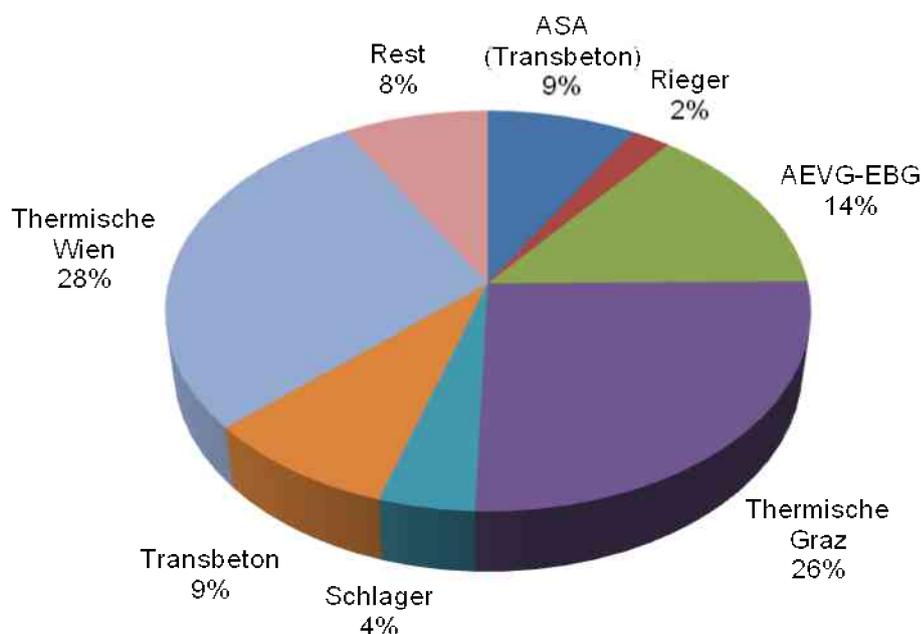


Abbildung 57: Zusammensetzung der Gewerbeabfallfraktion (Vier-Monatsdurchschnitt)

Den mengenmäßig größten Anteil am Gewerbeabfall halten die heizwertreichen Fraktionen aus den Splittinganlagen in Wien mit 28 M-% und in Graz mit 26 M-%. Das AEVG-EBG-Material ist mit 14 M-% an dritter Stelle gelegen, gefolgt von den Fraktionen ASA (Transbeton) und Transbeton Graz mit jeweils 9 M-%. Den quantitativ kleinsten Zulieferer von heizwertreichem Gewerbeabfall sind die Fa. Schlager und Rieger mit 4 bzw. 2 M-%. In der Fraktion mit dem Begriff „Rest“ sind alle übrigen Klein- und Kleinstzulieferer zusammengefasst. Deren Anteil am Gesamtaufkommen liegt bei durchschnittlich 8 M-%.

Wird nicht nur die Gewerbefraktion einzeln betrachtet, sondern geht man vom monatlichen Gesamtinputs aller Fraktionen aus, ergibt sich die folgende Durchschnittsverteilung (vgl. Abbildung 58). Grundlage für die prozentuelle Verteilung bildet ein Vier-Monatsdurchschnitt der in Tabelle 17 aufgelisteten Inputmengen.

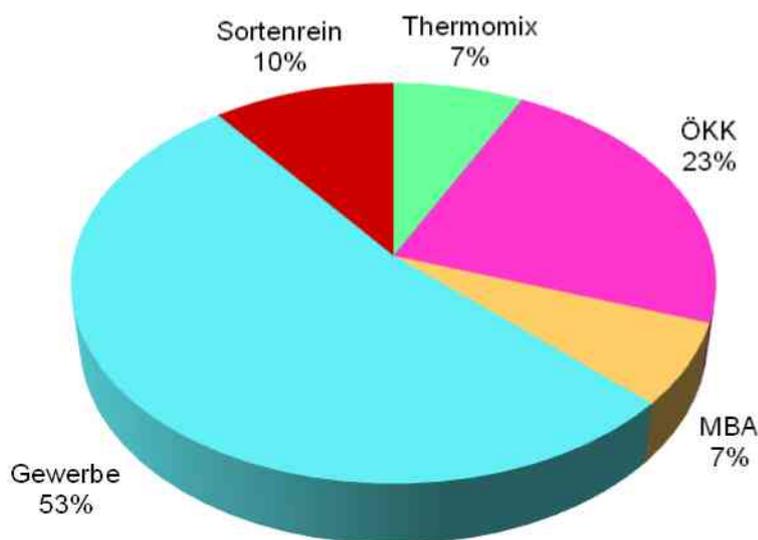


Abbildung 58: Monatsdurchschnitt 2006 TT-Inputmaterialien

Der am häufigsten zum Einsatz kommende Input ist folglich die Gewerbe-Fraktion. Sie setzt sich aus mehreren Einzellieferanten zusammen und macht in Summe gut mehr als die Hälfte des monatlichen Gesamtinputs aus. Zu den Hauptanlieferern zählen Sammler von Gewerbeabfällen wie z.B. die Firma Transbeton Lieferbeton GmbH mit Firmensitz in Bruck an der Mur, die neben einem Containerservice auch über eine Gewerbemüllsortieranlage verfügt. Ein weiterer Zulieferer ist die Abfall Entsorgungs- und Verwertungs GmbH Graz (AEVG) mit Sitz in der Sturzgasse in Graz. Das hierbei angelieferte Material setzt sich aus Kunststoff-Leichtfraktionen, Verpackungsmaterialien sowie aus vorsortierten heizwertreichen Abfällen aus dem kommunalen Bereich zusammen. Ein ebenfalls aus dem Sektor der Siedlungsabfälle stammender, jedoch zum Gewerbeabfall zählender Inputstrom der TT-Anlage besteht aus dem Output von Abfallsplittinganlagen. Dieses heizwertreiche Material wird z.T. aus der Splittinganlage vom Standort Graz-Puchstraße (Thermische Graz) oder aus der Splittinganlage in Wien (Thermische Wien) angeliefert. Das zur weiteren Sortierung und

Aufbereitung bei der TT-Anlage in Retznei angelieferte Gewerbeabfallaufkommen in einem Durchschnittsmonat kann mit rd. 2.100 t beziffert werden.

Rd. ein Viertel des monatlichen TT-Inputs setzt sich aus Material des Österreichischen Kunststoff Kreislaufs (ÖKK) zusammen. Die Österreichische Kunststoff Kreislauf AG ist als eine sog. Branchenrecyclinggesellschaft im Rahmen der Altstoff Recycling Austria AG mit dem firmeneigenen ARA System für die Organisation der Verwertung von Verpackungen aus Kunststoffen und textilen Faserstoffen zuständig [28]. Ein Teil der in den "Gelben Tonnen" und "Gelben Säcken" gesammelten Kunststoff-Verpackungen gelangt nach einer Vorsortierung und einer Pressung zu Ballen per LKW direkt in den Inputbunker der TT-Anlage. Im Monat beläuft sich die angelieferte und eingesetzte Menge auf rd. 900 - 1.000 t.

Die restlichen 25% des Inputmaterials setzt sich aus den Fraktionen Sortenrein (10%), MBA (7%) und Thermomix (7%) zusammen. Diese Kleinfraktionen setzen sich inhaltlich aus mehreren Zulieferern zusammen und spielen quantitativ auf die Gesamtinputmenge gesehen eine untergeordnete Rolle. Der Vollständigkeit halber wird dennoch in den nachfolgenden Absätzen kurz darauf eingegangen.

Sortenreine Abfälle aus dem Gewerbe und der Industrie fallen je nach Inputmaterialien bei der Produktion in verschiedenen Zusammensetzungen und Qualitäten sowie Quantitäten an. Meist handelt es sich hierbei um Verpackungsmaterialien (Folien, Kunststoff-Spritzgussteile usw.), aber auch aussortierte, mangelhafte Kunststoffteile und Fehlchargen sowie Verschnitte (z.B. Innenverkleidungen von PKWs, Autoteppiche, Sitzbezüge etc.) und Produktionsausschüsse werden unter der Fraktion „Sortenrein“ zusammengefasst. Der monatliche Gesamtinput dieses Materials beläuft sich auf rd. 400 - 450 t. Zu dem Hauptmerkmal dieser Fraktion zählt die große Schwankung der Zusammensetzung der einzelnen Abfälle. Trotz ein und demselben Abfallerzeuger können aufgrund Änderungen im Produktionsprozess die Zusammensetzungen zu früheren Anlieferungen stark variieren, obwohl optisch gesehen bei der Eingangskontrolle dasselbe Material vorliegt. Zulieferer dieser Fraktion sind u.a. der steirische PKW-Produzenten Magna Steyr. Lieferverträge für sortenreines Material wurden nicht nur mit inländischen Firmen geschlossen. Kooperationen mit Gewerbeabfallsammlern im Ausland, wie z.B. mit der Firma Saubermacher & Komunala in Slowenien werden ebenfalls forciert.

Der überwiegende Anteil (rd. 95%) der MBA-Fraktion setzt sich aus ASA-Material zusammen. Die Abfall Service Austria AG (A.S.A) bietet sowohl auf kommunaler als auch auf gewerblicher Ebene ein flächendeckendes Entsorgungskonzept für Abfälle aller Art an [29]. Der Ursprung des von der ASA stammenden Materials, das als Input für die die TT-Anlage dient, stammt aus einer mechanisch-biologischen Aufbereitung. Der monatliche Materialinput schwankt im Bereich zwischen 250 und 400 t.

Beim Thermomix-Material handelt es sich im Wesentlichen um eine heizwertreiche Fraktion des Gewerbemülls. Nicht lizenzierte Verpackungsmaterialien, verschmutzte Papierabfälle, Kunststoff-Papier-Verbundmaterialien sowie diverse Gummi- und Kunststoffabfälle aus dem Gewerbe und der Industrie dienen hierbei als Inputstoffe. Das Material stammt einerseits von größeren Abfallerzeugern sowie -sammlern, wie kommunalen Altstoffsammelzentren und

untersteirischen Gewerbebetrieben. Auf der anderen Seite werden auch heizwertreiche Kunststoffabfälle (Verpackungsmaterialien, Folien, verschmutzte Kartonagen, Etiketten etc.) von vielen kleineren Abfallproduzenten entgegengenommen. Der Monatsgesamtinput der Thermomix-Fraktion, der sich mit ca. 7% beziffern lässt, ist mit jenem der MBA-Fraktion zu vergleichen. Absolut gesehen werden monatlich zwischen 300 - 350 t Thermomix-Material eingesetzt.

## 6.4 Antimonanalytik bei PET-Flaschen

Wie bereits im Kap. 3.1.3 beschrieben fungiert Antimontrioxid u.a. bei der PET-Flaschenerzeugung als Katalysator. Quantitative Angaben über das Vorhandensein von Antimonverbindungen in Getränkeflaschen werden aufgrund von Produktionsgeheimnissen von Seiten der PET-Flaschenerzeuger nicht Preis gegeben. In der einschlägigen Literatur zu diesem Thema sind recht hohe Sb-Konzentrationsbereiche in PET-Erzeugnissen zu finden. Das angegebene Konzentrationsspektrum für Sb liegt im Allgemeinen zwischen 150 und 300 mg/kg TS [30, S. 96]. Je nach Flaschenproduzenten und Herstellungsverfahren können die Sb-Konzentrationen stark variieren. Wie bereits in 3.1.3 erwähnt, wird weltweit zu 90% ATO im PET-Herstellungsprozess eingesetzt. Andere Studien, die das Migrationspotential von Sb enthalten in PET-Mineralwasserflaschen untersuchten, lieferten Sb-Spitzenkonzentrationen in Getränkeflaschen, die Werte von bis zu 397 mg/kg TS erreichten [31, S. 291]. In weiteren Untersuchungen auf diesem Gebiet wurden Sb-Konzentrationen in PET-Getränkeflaschen von 170 - 220 mg/kg TS ermittelt [32, S. 8]. Die eben erwähnten recht unterschiedlichen Sb-Konzentrationen in Getränkeflaschen, die im Lebensmittelbereich eingesetzt werden, waren der ausschlaggebende Grund eine Teilmenge der bei der Sortierung erhaltenen PET-Flaschenfraktion laboranalytisch in Hinblick auf den Sb-Gehalt zu untersuchen.

Den ersten Schritt bildete die farbliche Trennung der benutzen, z.T. mit deutlichen Gebrauchsspuren versehenen PET-Getränkeflaschen (vgl. Abbildung 59). Eine Unterscheidung zwischen drei Farben erschien sinnvoll, da diese im Abfallstrom am häufigsten vertreten waren.



Abbildung 59: Aussortierte PET-Verpackungen insbesondere PET-Getränkeflaschen

Im nachfolgenden Schritt wurden zunächst farblose bzw. transparente gefolgt von blauen sowie grünen PET-Flaschen aussortiert. Die nachfolgende Abbildung 60 zeigt die farblich in Kunststoffboxen getrennten Fraktionen vor der Wiegung.



Abbildung 60: Farblich sortierte PET-Flaschen

Eventuell vorhandene Drehverschlüsse und Etiketten wurden von den Flaschen entfernt. Die nachfolgende Tabelle 18 gibt Aufschluss über die vorhandenen Farben und deren Massenanteil an der Gesamtmasse.

Tabelle 18: PET-Flaschensortierung nach Farben und Menge

Farbe	sortierte Menge [g]	Anzahl der aufbereiteten PET-Flaschen	Massenanteil an Gesamtmenge [%]	Gewicht des erhaltenen PET-Granulats [g]
farblos	3.836	5	49,2	61,3
blau	2.299	5	29,5	77,4
grün	1.660	6	21,3	79,2
<b>Summe</b>	<b>7.795</b>	<b>16</b>	<b>100</b>	<b>217,9</b>

Nachdem die PET-Flaschen farblich sortiert und gewogen waren, wurden der Reihe nach fünf bis sechs Flaschen jeder Farbe zu kleinen fingernagelgroßen Teilen aufgearbeitet. Bei der Auswahl der Flaschen wurde darauf geachtet, dass sich ein Querschnitt der vorhandenen Farbschattierungen, von dunkel bis hell, in den zu erstellenden Laborproben wiederfindet. Die nachfolgende Abbildung 61 gibt die Farbverteilung der PET-Getränkeflaschen wieder.



Abbildung 61: Farbverteilung PET-Getränkeflaschen

Der von Hand, mittels einer Schere durchgeführte Vorzerkleinerungsprozess, der für jede der drei Farben getrennt voneinander stattfand, zeigt Abbildung 62. Dabei war es wichtig, dass Reste mit eventuell vorhandenen Klebstoffrückständen, die von den abgelösten Etiketten stammten, aussortiert wurden und nicht in den anschließenden Mahlprozess gelangten.



Abbildung 62: Vorzerkleinerung der PET-Getränkeflaschen

Zur Erreichung der Analysenfeinheit wurde eine Ultra-Zentrifugalmühle verwendet, die mit einer Umdrehungsgeschwindigkeit von 15.000 Umdrehungen pro Minute betrieben wurde. Das zum Einsatz kommende Ringsieb hatte eine Maschenweite von 0,4 mm. Abbildung 63 zeigt den Innenraum der Mühle mit dem Mahlgut.



Abbildung 63: Innenraum der Ultra-Zentrifugalmühle mit Rotorzähnen, engmaschigen Siebring und aufbereitetem PET-Granulat

Nach dem Mahlvorgang wurde das Feingut für die anschließende Sb-Analyse in saubere Glasbehälter abgefüllt und zum Schutz vor Kontaminationen mit luftdichten Drehverschlussdeckeln verschlossen. Um sicher zu stellen, dass der Feuchtgehalt des feinkörnigen Granulats möglichst gering ist wurden die drei Probenbehälter in geöffnetem Zustand 24 Stunden im Trockenschrank bei einer konstanten Temperatur von 45 °C zwischengelagert, bevor aus ihnen drei Laborproben erstellt wurden. Das fertig aufbereitete in Glasbehälter abgefüllte färbige PET-Granulat ist in Abbildung 64 dargestellt.

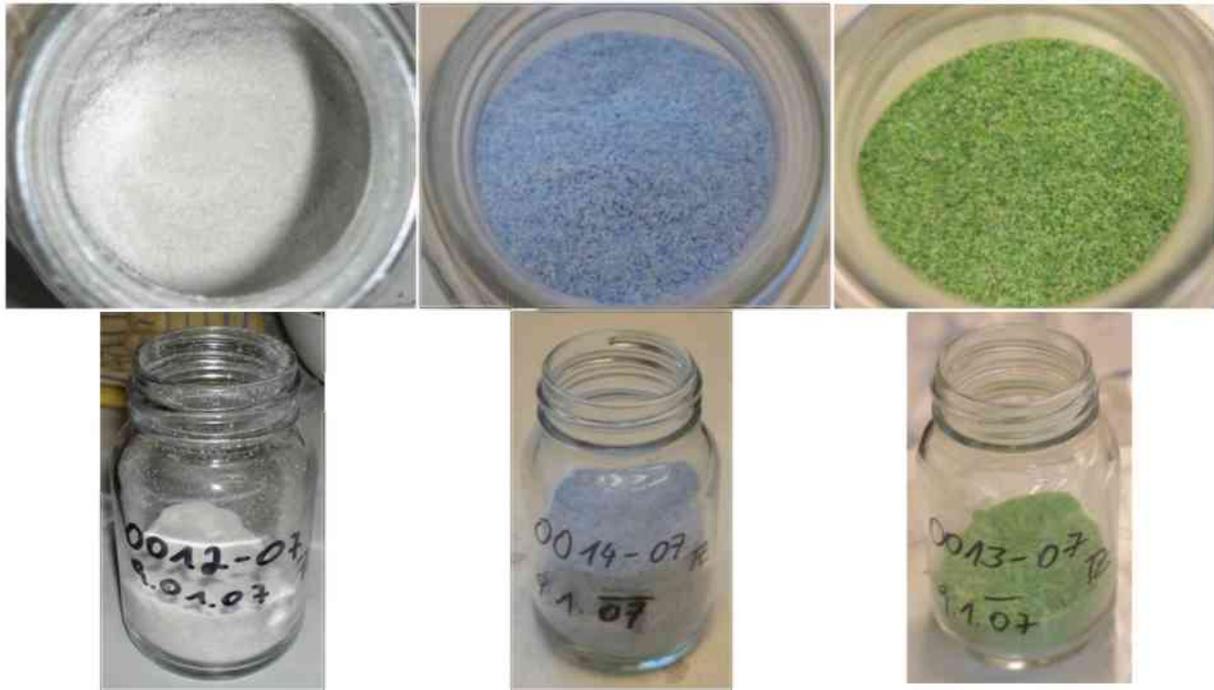


Abbildung 64: Gemahlene PET-Granulat

Nach der Trocknung und der Einwaage einer bestimmten Menge an Laborprobe erfolgte die Bestimmung des Sb-Schwermetallgehaltes mit einer ICP-MS. Eine Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-MS) ist eine robuste und sehr empfindliche Analysenmethode der anorganischen Elementanalytik., die sich u.a. für die Spurenanalyse von Schwermetallen eignet. Im Gegensatz zur AAS, die bei der Bestimmung des Pb- und Sb-Gehaltes der TT-Inputfraktionen eingesetzt wurde, können mit Hilfe einer ICP-MS unter Einhaltung von Nachweisgrenzen im Bereich von ng/l eine noch präzisere Schwermetallanalytik betrieben werden. Die Analyseergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Antimongehalte PET-Flaschen

Farbe	Messwert [mg/kg TS]
farblos	280±10
blau	310±10
Grün	250±20

Die o.g. Antimongehalte von PET-Getränkeflaschen liegen im Mittel bei 280 mg/kg TS. Eine zu einem früheren Zeitpunkt durchgeführte Sb-Bestimmung einer blauen PET-Einweg-

Mineralwasserflasche mittels AAS lieferte einen Sb-Gehalt von  $274 \pm 4$  mg/kg TS. Dieser Wert liegt exakt in der Streuungsbreite der Analysewerte aus Tabelle 19 und deckt sich auch mit den eingangs erwähnten, in der einschlägigen Literatur zu findenden Konzentrationen. Dies lässt den Schluss zu, dass beide Messmethoden, sowohl ICP-MS als auch AAS als Analyseverfahren zur Bestimmung des Antimongehalts von PET-Getränkeflaschen eingesetzt werden können und vergleichbare Ergebnisse liefern.

Die geringe Streuung der Messergebnisse bestätigt, dass es keine farbspezifischen signifikanten Unterschiede bei den Sb-Gehalten der PET-Flaschen gibt. Die Farbe hat folglich keinen bzw. nur einen unwesentlichen Einfluss auf den Sb-Gehalt. Vielmehr haben die produktionsspezifischen Parameter der einzelnen PET-Flaschenerzeuger, u.a. die Einsatzmenge des Katalysators ATO bei der Erzeugung der PET-Flaschen einen entscheidenden Einfluss auf das Vorhandensein des Schwermetalls.

## 7 Nutzen einer Vorsortierung in Bezug auf die PET-Flaschen-Ausschleusung

Im Verpackungsbereich werden jährlich weltweit über zehn Millionen Tonnen Polyethylenterephthalat (PET) verarbeitet. Beachtliche Zuwachsraten der PET-erzeugenden Industrie von ungefähr 10% jährlich sind nicht zuletzt auf den Erfolg von PET-Flaschen zurückzuführen [33]. Die großen Mengen an produzierten PET-Materialien, die zu einem Großteil in relativ kurzlebige Verpackungsanwendungen fließen, führen zwangsläufig auch zu der Frage, wie das Material nach dem Gebrauch wiederverwertet werden kann. Strenge Umweltschutzaufgaben bei der Verbrennung von Kunststoffen in thermischen Anlagen zur Erzeugung von Energie und ständig steigende Deponierungskosten sind wichtige Argumente für den Einsatz eines umwelt- und ressourcenschonenden Recyclingkonzeptes. Dabei steht die Möglichkeit aus gebrauchten PET-Altstoffen u.a. neue Verpackungsmaterialien zu produzieren im Vordergrund. Ein mit dem Prinzip der Nachhaltigkeit vereinbares Recycling gegenüber einem umweltbelastenden Downcycling ist insbesondere im Bereich von PET-Getränkeverpackungen vorzuziehen.

Weiters stellen gebrauchte Getränkeflaschen, die im Zuge der Beprobungen des TT-Inputmaterials in jeder Fraktion, mit Ausnahme der sortenreinen Fraktion zu finden waren, einen nicht unerheblichen Marktwert dar. Die im Kap. 6.3 beschriebene Sortierung der TT-Hauptfraktionen lieferte insbesondere bei der ÖKK-Fraktion mit einem PET-Massenanteil an Getränkeflaschen von rd. 6 M-% ein recht hohes Ergebnis. Nicht nur das ÖKK-Material, sondern auch die Inputfraktionen Thermische Graz sowie Thermische Wien besitzen mit rd. 2 M-% einen erhöhten PET-Flaschenanteil.

Je nach Farbe und Verschmutzungsgrad lassen sich durch den Verkauf auf Sekundärrohstoffmärkten der Kunststoffindustrie Erträge in Höhe von 130 - 370 € pro Tonne PET-Material erzielen. Nachfolgend soll veranschaulicht werden, mit welchen Mengen an PET-Flaschen in den einzelnen Inputströmen zu rechnen ist. Weiters wird in Kap. 7.1 der monatliche bzw. jährliche quantitative Output an PET-Material nach Fraktionen getrennt dargestellt und in Kap. 7.3 über dafür am Rohstoffmarkt erzielbare Preise diskutiert. Abschließend soll Kap. 7.4 auf die technischen Möglichkeiten einer PET-Aussortierung eingehen. Dabei soll die wirtschaftliche Relevanz im Vordergrund stehen und auf eine mögliche Senkung der Schwermetallkonzentration des ASB-Outputmaterials eingegangen werden. Auswirkungen auf einzelne Parameter, die für die Produktqualität (Heizwertkriterium) von entscheidender Bedeutung sind, müssen im Zuge eines möglichen Implementierung eines Abfallvorsortierungsschrittes ebenfalls berücksichtigen werden. Eine solche Sortierungsstufe kann aus platztechnischen Gründen nicht direkt vor Ort in die Anlage integriert werden. Vielmehr ist es notwendig ein ausgeklügeltes System zur Transportlogistik zu etablieren, dass ausgewählte Abfallströme vor ihrer eigentlichen Einbringung in den Aufbereitungsprozess einem Vorsortierungsschritt zugeführt werden. Die Abwägung zwischen dem ökonomisch vertretbaren und dem ökologisch sinnvollen ist in jedem Fall notwendig.

Die Recherchen über den Eintrag von Blei in die Hauptinputfraktionen lieferten keine konkreten Ergebnisse. Die Pb-Analysen des ASB-Outputmaterials der letzten 24 Monate liegen, abgesehen von einigen Ausreißern, auf relativ konstantem Niveau. Insgesamt betrachtet wurde eine Bleikonzentration im Substitutbrennstoff von über 200 mg/kg TS innerhalb der letzten beiden Jahre nur in den Monaten März-Juni 05, April 06, August 06 und Dezember 06 erreicht (vgl. Kap. 6.1, Tabelle 12). Der 80-Perzentil-Grenzwert für Blei, der bei 150 mg/kg TS liegt, wurde in den Jahren 2005 und 2006 14mal überschritten. Die weitaus wichtigere, vom Gesetzgeber festgelegte max. tolerierbare Pb-Höchstkonzentration von 500 mg/kg TS (Deckelungsgrenzwert) hingegen wurde in diesem Zeitraum nie erreicht bzw. überschritten. Neben den in Tabelle 12 aufgelisteten ASB-Schwermetallkonzentrationen, die auf Monatsmischproben basieren und deren Ausarbeitung durch das österreichische Forschungszentrum Seibersdorf erfolgte, wurden unabhängig von diesen Ergebnissen im Zuge dieser Arbeit eine eigenständige Schwermetallanalytik durchgeführt. Die aus der Beprobung der Hauptinputfraktionen erhaltenen Messergebnisse sind im Kap. 6.2 zusammengefasst. Aus Tabelle 14 ist ersichtlich, dass sich die Pb-Konzentration der einzelnen Inputströme mit Messwerten zwischen 49 und 130 mg Pb/kg TS auf relativ konstantem Niveau bewegt. Mit Ausnahme der Transbeton-Fraktion, die einen Pb-Wert von  $350 \pm 10$  mg/kg TS lieferte, lag der Schnitt bei ca. 98 mg/kg TS. Bei der ebenfalls beprobten Fraktion „Autoteppich“ kam eine erstaunlich niedrige Pb-Konzentration von nur 17 mg/kg TS zu Tage. Der Antimongehalt derselben Fraktion lag aber mit 108 mg/kg TS um das 3,6-fache über dem erlaubten Deckelungsgrenzwert von 30 mg/kg TS. Dieses, im Zuge der Diplomarbeit ermittelte Ergebnis, führte zu einem generellen Annahmestopp von flammhemmenden und schwermetallbelasteten Innenraumverkleidungen von Automobilausstatern.

Aus der Tatsache heraus, dass die gemessenen Pb-Konzentrationen aller Hauptinputfraktionen unter dem Deckelungsgrenzwert, mit Ausnahme der Transbeton-Fraktion auch unter dem 80-Perzentil Grenzwert liegen, kann der Schluss gezogen werden, dass die Ausschleusung von metallischen Blei im Zuge des ASB-Aufbereitungsprozesses funktioniert. Spuren des Schwermetalls sind in einer Vielzahl von Kunststoffprodukten enthalten, zum größten Teil diffus verteilt, sodass eine Aussortierung schwierig wäre und ökonomisch in den meisten Fällen auch nicht sinnvoll.

Im Zuge der Beprobung der Inputmaterialien und der anschließenden Auswertung der Analyseergebnisse liegt der Schluss nahe, dass neben Blei auch das Schwermetall Antimon äußerst diffus in den Abfallströmen der TT-Anlage verteilt ist. Eine Aussortierung ist demnach nur bei antimonhaltigen PET-Flaschen möglich. Ein solcher Schritt kann bei flaschenhaltigen Fraktionen zur Senkung der Antimonbelastung beitragen. Im Zuge dieser Überlegung ist aber auch anzumerken, dass PET-Getränkeflaschen nur eine Eintragsquelle für Antimon darstellen. Eine Vielzahl von Kunststoffen, die aus Gründen der Betriebssicherheit flammhemmende Eigenschaften aufweisen müssen, sind in erster Linie für den Eintrag verantwortlich. Sie sind nur schwer identifizierbar und tragen dazu bei, dass eine vollständige Aussortierung von Sb-haltigen Material praktisch gesehen nicht realisiert werden kann. Dennoch werden in Kapitel 7.2 eine zum Stand der Technik

gehörenden Aussortierung von PET-Flaschen und deren Auswirkungen auf die Sb-Konzentration im ASB-Produkt diskutiert.

## 7.1 Hochrechnung der PET-Flaschenfraktion

Unter Berücksichtigung der PET-Flaschenanteile und durch Kenntnis des monatlichen bzw. jährlichen Materialeinsatzes einzelner TT-Abfallfraktionen ist eine Abschätzung des PET-Flaschenoutput möglich. Die nachfolgenden Tabellen (vgl. Tabelle 20 u. Tabelle 21) geben Aufschluss über den monatlichen bzw. jährlichen Anfall an PET-Verpackungsmaterial ausgewählter Fraktionen. Beprobungen des Güterstroms fanden wie in Kap. 5.2 erwähnt wegen logistischen und kostenrelevanten Gründe ausschließlich bei den beschriebenen Fraktionen statt. Der PET-Flaschenanteil anderer ebenfalls genannter, insbesondere beim Gewerbeabfall auftretender Unterfraktionen, konnte nicht ermittelt werden. Das existierende Datenmaterial beschränkt sich somit beim Gewerbeabfall auf die Fraktionen AEVG-EBG, Thermische Graz, Thermische Wien und Transbeton. Aufgrund der fehlenden Daten kann der tatsächliche PET-Flaschenanteil höher eingeschätzt werden.

Tabelle 20: Durchschnittlicher monatlicher PET-Flaschenoutput sortiert nach Fraktionen

Hauptgruppe	Fraktion	PET-Flaschenoutput 2006 in kg				Monats-Ø in kg
		April	Mai	Juni	Oktober	
MBA (440010)	ASA	1.538	1.394	865	2.319	1.529
Gewerbe (440020)	ASA (Transbeton)	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Rieger	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	AEVG-EBG	3.629	4.520	4.353	2.102	3.651
	Thermische Graz	8.126	8.135	6.477	18.676	10.353
	Thermische Wien	16.213	14.368	15.849	8.579	13.752
	Schlager	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Transbeton	2.326	1.747	985	376	1.359
	Rest	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	<b>Gesamt</b>		<b>30.293</b>	<b>28.770</b>	<b>27.663</b>	<b>29.733</b>
ÖKK (150360)	ÖKK	38.700	59.468	57.983	59.562	53.929
Thermomix (10060)	Thermomix	5.428	4.366	4.740	4.774	4.827
	<b>Summe</b>	<b>106.253</b>	<b>122.768</b>	<b>118.914</b>	<b>126.121</b>	<b>118.514</b>

Tabelle 21: Durchschnittlicher jährlicher PET-Flaschenoutput sortiert nach Fraktionen

Hauptgruppe	Fraktion	Jahres-Ø in kg
MBA (440010)	ASA	18.344
Gewerbe (440020)	ASA (Transbeton)	k.A.
	Rieger	k.A.
	AEVG-EBG	43.812
	Thermische Graz	124.240
	Thermische Wien	165.025
	Schlager	k.A.
	Transbeton	16.303
	Rest	k.A.
	<b>Gesamt</b>	<b>349.381</b>
	ÖKK (150360)	ÖKK
Thermomix (10060)	Thermomix	57.923
	<b>Summe</b>	<b>1.422.171</b>

Der durchschnittliche monatliche Output an PET-Flaschen ist nach Inputfraktionen getrennt in der nachfolgenden Abbildung 65 dargestellt. Dabei wird sowohl auf die prozentuale als auch auf die mengenmäßige Verteilung eingegangen.

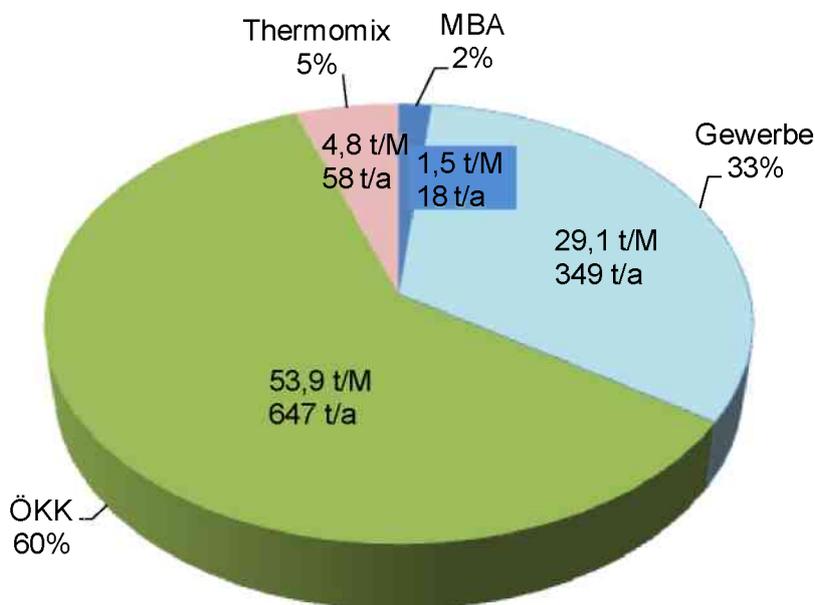


Abbildung 65: Monatlicher bzw. jährlicher PET-Flaschenoutput getrennt nach Inputfraktionen

## 7.2 Auswirkungen einer PET-Aussortierung auf den Sb-Gehalt des ASB-Outputmaterials

Die Fragestellung, in wie fern eine Ausschleusung von PET-Materialien aus den TT-Inputfraktionen zur Senkung des Sb-Gehaltes beitragen kann wird in diesem Kapitel erörtert. Neben Abschätzungen des durchschnittlichen monatlichen Sb-Outputs, der sich auf Grund der Aussortierung des PET-Flaschenmaterials aus den verschiedenen Hauptinputfraktionen ergibt, werden auch mögliche Auswirkungen auf andere Parameter (u.a. eine Änderung des ASB-Heizwertes) diskutiert.

Eine vor dem eigentlichen Abfallaufbereitungsprozess geschaltete Aussortierungsstufe hat den Vorteil, dass unerwünschte Schwermetallfrachten von vorne herein nicht in die Aufbereitungsanlage eingeschleust werden. Wie hoch der Eintrag von Antimon in Form von PET-Hohlkörperfraktionen wirklich ist und welche Relevanz PET-Flaschen an der Antimon-Grenzwertproblematik haben, ist in der nachfolgenden Tabelle 26 dargestellt. Dabei ist zu erwähnen, dass die nachfolgenden Sb-Outputmengen auf den in Kap. 6.4 für PET-Flaschen ermittelten Mittelwert von 280 mg/kg TS basieren.

Tabelle 22: Durchschnittlicher monatlicher Sb-Output aus PET-Flaschen

Hauptgruppe	Fraktion	Sb-Output 2006 in kg				Monats-Ø in kg
		April	Mai	Juni	Oktober	
MBA (440010)	ASA	0,4	0,4	0,2	0,6	0,4
Gewerbe (440020)	AEVG	1,0	1,3	1,2	0,6	1,0
	Thermische Graz	2,3	2,3	1,8	5,2	2,9
	Thermische Wien	4,5	4,0	4,4	2,4	3,9
	Transbeton	0,7	0,5	0,3	0,1	0,4
	<b>Gesamt</b>	<b>8,5</b>	<b>8,1</b>	<b>7,7</b>	<b>8,3</b>	<b>8,2</b>
ÖKK (150360)	ÖKK	10,8	16,7	16,2	16,7	15,1
Thermomix (10060)	Thermomix	1,5	1,2	1,3	1,3	1,4
	<b>Summe</b>	<b>21,3</b>	<b>26,3</b>	<b>25,6</b>	<b>27,0</b>	<b>25,0</b>

Im Vergleich zur monatlichen Sb-Gesamtoutputmenge der Betriebsanlage (vgl. Tabelle 13) ist die Menge an Antimon, deren Eintragungspfad über die PET-Getränkeflaschenfraktion verläuft, quantitativ gesehen zu vernachlässigen. Abgesehen von dem geringen Gewicht und durchwegs großem Volumen dieser PET-Unterfraktion, spielt der Heizwert dieser Getränkeverpackungen in Hinblick auf die Einhaltung gewisser Heizwertkriterien des ASB-Brennstoffes eine nicht unwesentliche Rolle. So zeigt sich anhand von Erfahrungswerten, dass beim Wegfall von PET-Flaschen in den Inputströmen der Heizwert ( $H_u$ ) von durchschnittlich ca. 22,5 MJ/kg um rd. 0,5 MJ/kg sinkt. Dies wiederum hat zur Folge, dass ein festgelegter Mindestheizwert ( $H_u$ ) von 20 MJ/kg bei stark schwankenden und heizwertarmen Inputfraktionen nicht ständig garantiert werden kann.

In Bezug auf die Sb-Mengen der vorangegangenen Tabelle kann generell die Aussage getroffen werden, dass eine Aussortierung der PET-Hohlkörperfraktion bei allen dargestellten Hauptinputfraktionen eine Senkung des Sb-Eintrages des ASB-Brennstoffes zur Folge hat. Durch den Wegfall von PET-Flaschen fällt im Monatsschnitt rd. 33 kg weniger Antimon an. Die absolut gesehen höchsten Antimonanteil in Form von PET-Getränkeflaschen hat die ÖKK-Fraktion. Nahezu die Hälfte des gesamten Antimonaufkommens aus PET-Getränkeflaschen geht auf die ÖKK-Flaschenfraktion zurück.

Zuverlässige Aussagen über die Auswirkungen einer vollständigen Abtrennung der PET-Flaschenfraktion aus den Hauptinputströmen können nur bedingt getroffen werden. Bekannte, durch vorangegangene Sortieranalysen gewonnene PET-Flaschen-Konzentrationen spielen dabei ebenso eine Rolle, wie die durchschnittliche, im Zuge dieser Arbeit ermittelte Antimonkonzentration in PET-Getränkeflaschen (vgl. Kap. 6.4). Die angestellten Berechnungen, deren Ergebnisse in den nachfolgenden Tabellen (vgl. Tabelle 23 u. Tabelle 25) dargestellt sind, dienen dem Ziel, mögliche Auswirkungen und Zusammenhänge zwischen einer Aussortierung von PET-Getränkeflaschen und einer damit einhergehenden Senkung der Sb-Konzentration in den Hauptinputfraktionen aufzuzeigen.

Tabelle 23: Sb-Frachten in den Inputfraktionen

Fraktion	enthaltene Sb-Mengen 2006 in kg				Monats-Ø in kg
	April	Mai	Juni	Oktober	
ASA	11,9	10,8	6,7	17,9	11,8
AEVG	12,0	15,0	14,4	7,0	12,1
Thermische Graz	15,6	15,6	12,4	35,8	19,9
Thermische Wien	50,1	44,4	48,9	26,5	42,5
Transbeton	47,4	35,6	20,1	7,7	27,7
ÖKK	14,8	23,6	23,0	23,7	21,3
Thermomix	61,4	49,4	53,6	54,0	54,6

Die in der oberen Tabelle dargestellten Sb-Mengen beziehen sich auf die monatlichen Gesamtinputmengen der einzelnen Fraktionen. Der Weg zu diesen Ergebnissen führt über die Multiplikation der in Tabelle 13 aufgelisteten Antimonkonzentrationen der einzelnen Inputfraktionen mit den monatlichen eingesetzten Inputmengen aus Tabelle 17. Betrachtet man die Sb-Monatsdurchschnittsmenge aller Fraktionen ergibt sich ein Sb-Wert von rd. 27,1 kg.

Die nachfolgenden Tabelle 24 gibt die Differenz zwischen der Sb-Konzentration der monatlichen Gesamtinputmenge ( $Sb_{ges}$ ) und dem Sb-Aufkommen aufgrund von in den jeweiligen Abfallfraktionen enthaltenen PET-Flaschen ( $Sb_{PET}$ ) wieder. Die unten angeführten Werte stehen für Antimonmengen, deren Einträge in die Inputfraktionen nicht über PET-Flaschen erfolgten.

Tabelle 24: Differenz zwischen den Sb-mengen

Fraktion	Differenz zwischen $Sb_{ges}$ und $Sb_{PET}$ in kg				Monats-Ø in kg
	April	Mai	Juni	Oktober	
ASA	11,4	10,4	6,4	17,2	11,4
AEVG	11,0	13,7	13,2	6,4	11,1
Thermische Graz	13,3	13,3	10,6	30,6	17,0
Thermische Wien	45,5	40,3	44,5	24,1	38,6
Transbeton	46,8	35,2	19,8	7,6	27,3
ÖKK	4,0	7,0	6,8	7,0	6,2
Thermomix	59,9	48,1	52,3	52,7	53,2

Im nächsten Schritt wird die im monatlich eingesetzten Materialinput, durch die Sortieranalyse ermittelte, PET-Flaschenfraktion abgezogen. Werden nun die in der vorherigen Tabelle ermittelten Antimonmengen (ohne PET-Flaschen) mit dem Kehrwert des eben errechneten Materialeinsatzes (ohne PET-Flaschen) multipliziert, erhält man die in Tabelle 25 - Spalte 2 aufgelisteten Sb-Konzentrationen ohne PET-Flaschenanteil.

Tabelle 25: Sb-Konzentrationen der Hauptinputfraktionen mit/ohne PET-Hohlkörperfraktion

Fraktion	Sb-Konzentration mit PET-Fraktion [mg/kg TS]	Sb-Konzentration ohne PET-Fraktion [mg/kg TS]	Differenz [%]
ASA	44	43	3,1
AEVG	40	37	7,3
Thermische Graz	36	31	13
Thermische Wien	70	65	7,0
Transbeton	150	149	0,6
ÖKK	23	7	70
Thermomix	180	178	0,9
<b>Durchschnitt</b>	<b>78</b>	<b>73</b>	<b>6,1</b>

Eine Aussortierung von PET-Getränkeflaschen vor dem eigentlichen Aufbereitungsprozess führt wie die obere Tabelle zeigt nur zu einer geringen Senkung des Sb-Gehaltes im ASB-Outputmaterial. Der Sb-Gehalt sinkt durch die Maßnahme um durchschnittlich 6,1%. Weiters gehen die Sb-Konzentrationen in den meisten Inputströmen bei einer vollständige Ausschleusung von PET-Getränkeflaschen nur mäßig zurück. Die Reduktion liegt im Allgemeinen im einstelligen Prozentbereich. Einzige Ausnahmen bilden die Fraktionen Thermische Graz und ÖKK. Beim ÖKK-Material wäre eine theoretische Senkung der Sb-Konzentration von 70% möglich. Dies würde bedeuten, dass durch den Wegfall der PET-Flaschenfraktion der Antimongehalt von gegenwärtig 23 mg/kg TS auf rd. 7 mg/kg TS gesenkt werden könnte. Im Gegenzug muss daran gedacht werden, dass diese Maßnahme

mit einem Heizwertverlust einhergehen würde. Abgesehen von den festgelegten Heizwertkriterien, kann durch den Verkauf von PET-Recyklaten neben den Erlösen aus dem ASB-Brennstoffvertrieb eine zusätzliche Einnahmequelle erschlossen werden.

Vollautomatisierte und mit hohen Abscheidegraden arbeitende Sortieranlagen, die nicht nur PET-Hohlkörperfraktionen, sondern auch bleihaltige PVC-Fraktionen aus den aufgegebenen Kunststoffabfallströmen ausschleusen können, werden im übernächsten Unterkapitel (Kap. 7.4.1) beschrieben. Zuvor wird jedoch im Zuge des nachfolgenden Kap. 7.3 ein Überblick in den PET-Sekundärrohstoffmarkt gegeben und über die erzielbaren Preise für PET-Flaschenware diskutiert.

### **7.3 Abnehmerpreise und deren Verläufe von gebrauchten PET-Flaschen am Sekundärrohstoffmarkt**

Verpackungsabfälle aus PET, insbesondere gebrauchte und getrennt gesammelte Ein- bzw. Mehrweggetränkeflaschen bilden einen Ausgangsstoff für die Produktion anderer Konsumgüter und werden aus diesem Grund als Sekundärrohstoff auf dem Altkunststoffmarkt gehandelt. Wie bereits im vorangegangenen Kap. 5.2 erwähnt gibt es große Preisunterschiede beim Handel mit PET-Flaschenmaterial. Die Bandbreite der Preise erstreckt sich dabei von rd. 300 €/t für qualitativ hochwertige glasklare PET-Mehr- bzw. Einwegware und rd. 85 €/t für geringerewertige PET-Qualitäten mit hohem Braunanteil [34].

Die nachfolgenden Tabellen spiegeln den PET post user-Preistrend der letzten beiden Jahre wieder. Bei den Angaben handelt es sich um Preise, die für Abschlüsse zwischen Sortierern bzw. Händlern einerseits und Weiterverarbeitern andererseits genannt wurden. Sie beziehen sich im Regelfall auf die Abnahme von großen Mengen ( $\geq 20$  t) ab Station und werden monatlich vom Europäischen Wirtschaftsdienst GmbH (EUWID GmbH) mit Sitz in Gernsbach, Deutschland herausgegeben. Die Preisentwicklung für verschiedene PET-Flaschenqualitäten sind in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: PET post user-Preise im Zeitraum zwischen Dezember 2004 und Dezember 2006 [34]

PET post user (Ballen)	Einheit	PET-Mehrweg natur	PET-Einweg natur	PET-Mehrweg hellblau	PET-Einweg bunt
Dezember 04	[€/t]	235 - 370	200 - 270	200 - 270	135 - 200
Januar 05	[€/t]	270 - 370	200 - 300	200 - 270	135 - 200
Februar 05	[€/t]	270 - 370	200 - 300	200 - 270	135 - 200
März 05	[€/t]	300 - 370	220 - 320	220 - 280	135 - 220
April 05	[€/t]	300 - 370	220 - 320	220 - 280	135 - 220
Mai 05	[€/t]	300 - 370	220 - 320	220 - 280	135 - 220
Juni 05	[€/t]	300 - 370	220 - 320	220 - 280	135 - 220
Juli 05	[€/t]	300 - 370	220 - 320	220 - 280	135 - 220
August 05	[€/t]	310 - 370	220 - 320	240 - 280	135 - 220
September 05	[€/t]	310 - 370	280 - 320	240 - 280	135 - 220
Oktober 05	[€/t]	310 - 370	280 - 320	250 - 290	135 - 220
November 05	[€/t]	310 - 370	280 - 320	250 - 290	120 - 200
Dezember 05	[€/t]	310 - 370	280 - 320	250 - 290	100 - 200
Januar 06	[€/t]	310 - 370	280 - 320	250 - 290	100 - 200
Februar 06	[€/t]	320 - 370	280 - 320	260 - 290	100 - 200
März 06	[€/t]	320 - 370	280 - 320	260 - 290	100 - 200
April 06	[€/t]	320 - 370	280 - 320	260 - 290	100 - 200
Mai 06	[€/t]	235 - 370	200 - 270	200 - 270	135 - 200
Juni 06	[€/t]	320 - 370	280 - 320	250 - 290	80 - 200
Juli 06	[€/t]	300 - 350	260 - 300	240 - 280	60 - 160
August 06	[€/t]	280 - 350	240 - 300	240 - 280	50 - 150
September 06	[€/t]	270 - 340	230 - 280	220 - 260	40 - 140
Oktober 06	[€/t]	270 - 340	230 - 280	220 - 260	40 - 140
November 06	[€/t]	270 - 330	215 - 270	210 - 250	40 - 130
Dezember 06	[€/t]	270 - 330	215 - 270	210 - 250	40 - 130

Gegenwärtig hat sich die Situation auf dem Markt für PET-Flaschen stabilisiert. Aus Abbildung 66 geht hervor, dass der Preis für hochwertiges glasklares PET aus Flaschen im gesamten Jahr 2005 bis Mitte 2006 auf konstant hohem Niveau gelegen ist. PET-Mehrweg natur kostete im Durchschnitt 340 - 350 €/t ab Station. Ausreißer nach oben in Richtung 400 €/t waren eher die Ausnahme. Ab dem zweiten Halbjahr 2006 hat der PET-Sekundärrohstoffmarkt mit einem stetigen Preisverfall unabhängig von der Qualität der Flaschenware zu kämpfen. Gründe für den Druck auf die Preise für Flakes und Regranulate aus PET sind laut EUWID-Experten der schwankende und gegenüber den Euro an Wert verlierende Dollarkurs. Weiters empfindet China als ein starker Nachfrager von PET-Alt Kunststoffen die gegenwärtigen europäischen Preise für PET-Flakes und Flaschen als zu teuer. Laut Analysten kann in Asien und den USA das Material günstiger gekauft werden [34].

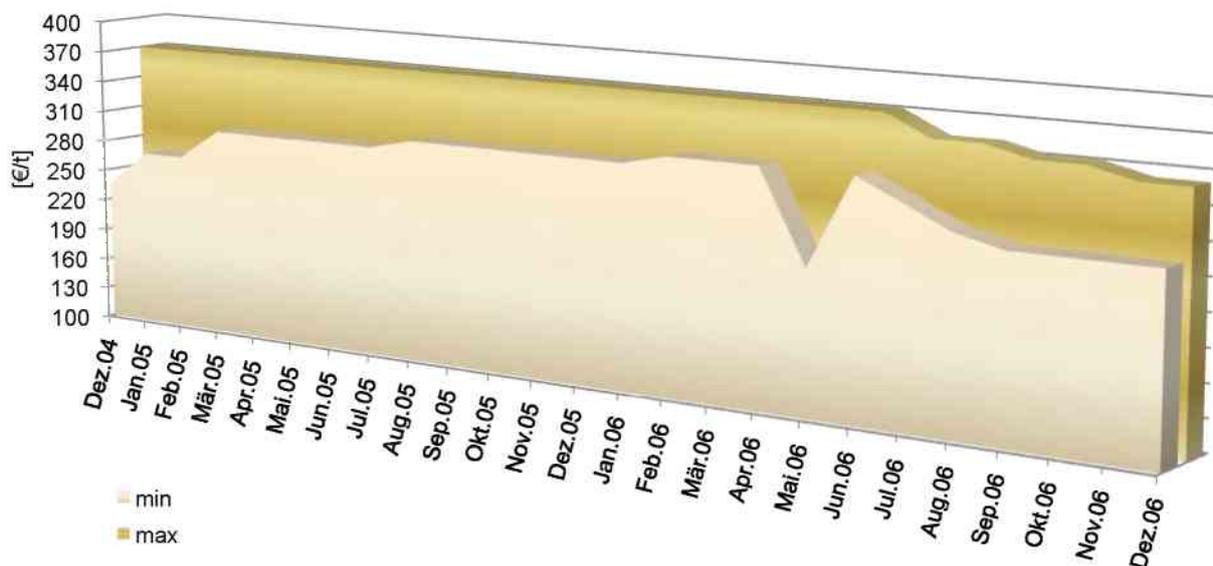


Abbildung 66: Preisentwicklung PET-Mehrweg natur [34]

Bei der Preisentwicklung der PET-Einweg natur Flaschenverpackung zeichnet sich ein ähnliches Bild wie bei den PET-Mehrweg natur Verpackungen ab (vgl. Abbildung 67). Auch hier ist der erzielbare Erlös aus dem Verkauf von einer Tonnen Material merklich zurückgegangen. Lag die Preisspanne von September 2005 bis April 2006 zwischen 280 und 320 €/t ab Station, geht momentan der Trend in Richtung 215 - 270 €/t.

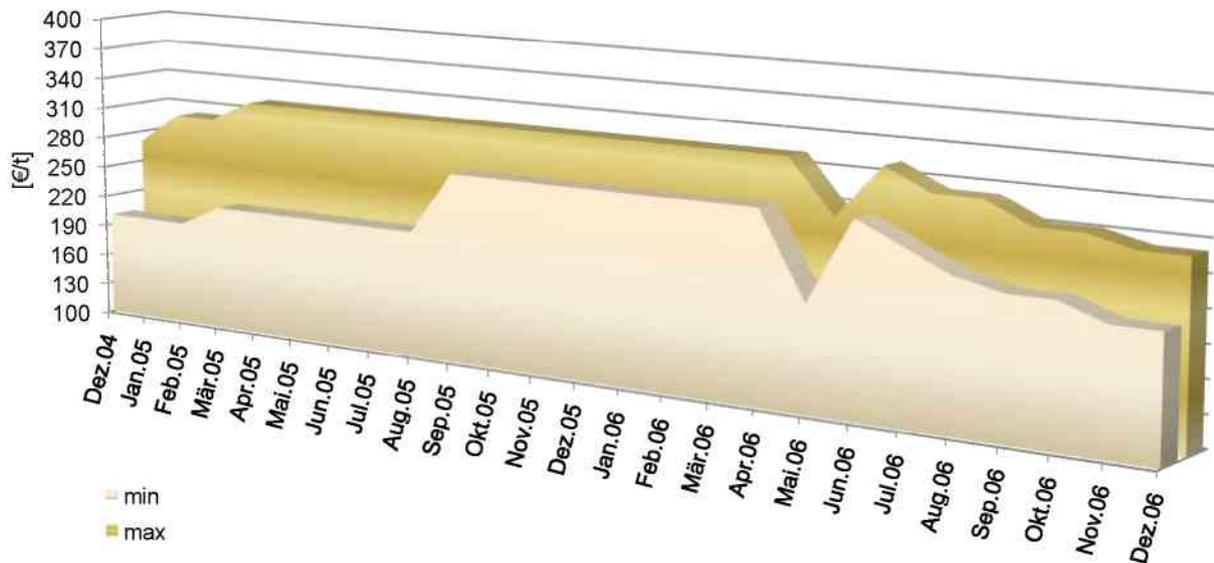


Abbildung 67: Preisentwicklung PET-Einweg natur [34]

Die Preisentwicklung von PET-Mehrweg hellblau-Flaschen innerhalb der letzten beiden Jahre verläuft größtenteils analog zu jener des PET-Einweg natur Materials, wobei der Unterschied z.Z. im etwas geringeren Erlös von 210 - 250 €/t ab Station liegt. Dieser Preistrend zeichnet sich auch in Abbildung 68 ab.

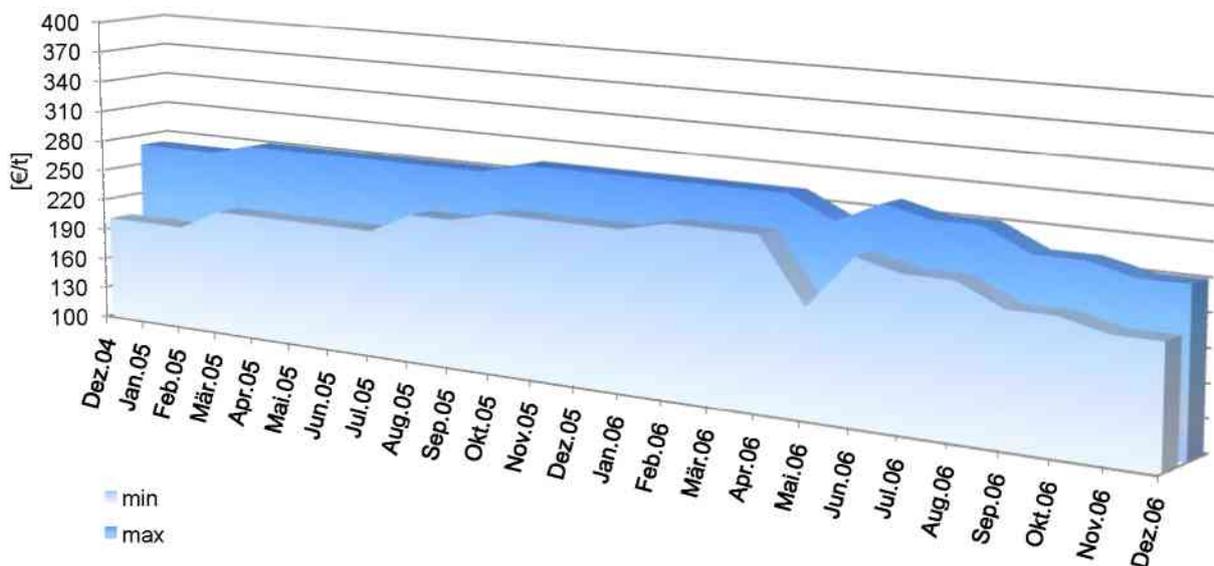


Abbildung 68: Preisentwicklung PET-Mehrweg hellblau [34]

Die größten Einbrüche sind bei den bunten PET-Flaschen zu verzeichnen (vgl. Abbildung 69). Die Marktpreise bewegen sich gegenwärtig zwischen 40 und 130 €/t ab Station. Im Jahr 2005 noch auf durchschnittlich hohem Preisniveau von 135 - 220 €/t ab Station fielen die Preise ab Juni 2006 von 80 - 200 €/t auf den seit September 2006 untersten Wert von 40 €/t um rd. 70%. Preisreduzierende Gründe dafür sind neben mit PE-Sammelsäcken

„verunreinigte“ Ballen, Metalldosen und sonstige Abfälle in den Lieferungen, die z.T. auch geringen Ladungsgewichte.

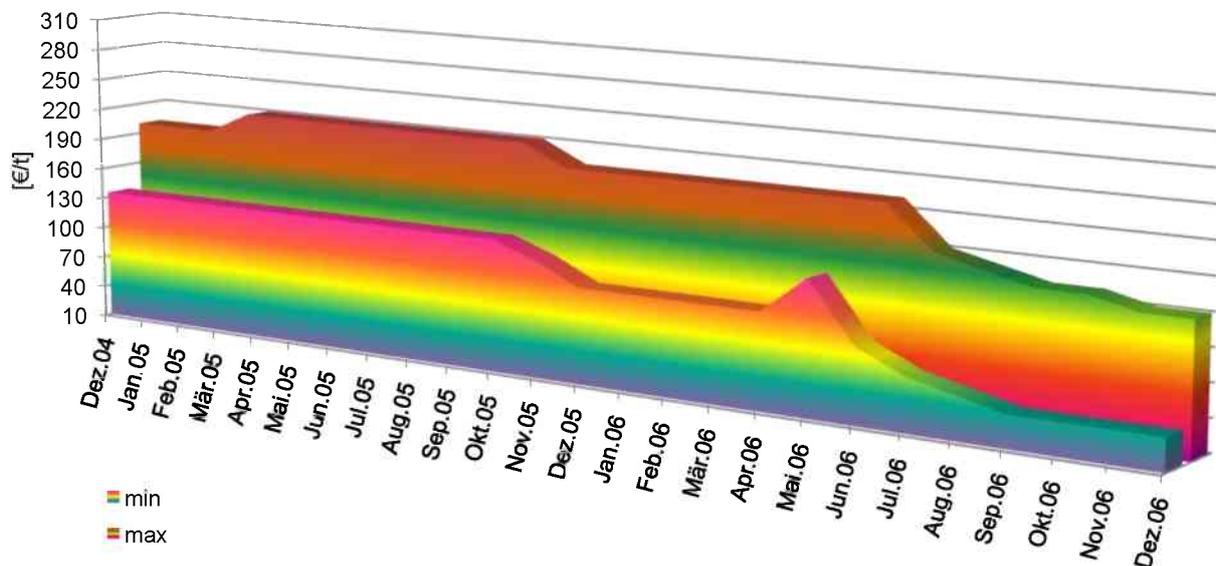


Abbildung 69: Preisentwicklung PET-Einweg bunt [34]

## 7.4 Technische, ökologische und ökonomische Betrachtung der Ausschleusung einer wiederverwertbaren Wertkunststofffraktion aus Abfallströmen

Die nachfolgenden Seiten sollen einen Einblick über technische Verfahrensmöglichkeiten zur Ausschleusung von wiederverwertbaren Kunststofffraktionen aus Abfallströmen geben. Weiters wird neben der Umweltrelevanz auch auf die ökologische Sinnhaftigkeit des gewählten Recyclingweges eingegangen. Den Rahmen dazu bildet eine kostenbezogene Darstellung und Abwägung der gegenwärtigen Situation. Hierbei wird versucht einen ökologisch wichtigen und ökonomisch vertretbaren Lösungsansatz in Bezug auf die Antimon- und Bleiproblematik zu finden.

### 7.4.1 Technische Möglichkeiten

Moderne Verfahrensweisen zur Sortierung, Reinigung und Aufbereitung gebrauchter PET-Getränkeflaschen wurden bereits entwickelt, gehören zum Stand der Technik und kommen großtechnisch mit hoher Zuverlässigkeit bereits zum Einsatz. Weiters existieren sowohl am europäischen als auch am internationalen Markt zahlreiche Anbieter, die Erfahrungen in der Entwicklung und Umsetzung von PET-Recyclingtechnologien mitbringen.

Die Technologie, die bei der Erfassung und Aussortierung der PET-Flaschen, der sog. Hohlkörperfraktion, aus dem Abfallstrom angewandt wird, basiert häufig auf einer Kombination zwischen Nahinfraroterkennung (NIR) und farbempfindlichen Sensoren. Licht im nahen Infrarot-Wellenlängenbereich ist für das menschliche Auge nicht sichtbar. Bei

Bestrahlung im Infrarotbereich kommt es bei einer Vielzahl von Materialien zur Ausprägung ganz spezifischer Reflexionseigenschaften. Durch die Ausnutzung dieses Effektes ist es möglich Materialarten eindeutig bestimmen zu können. Vergleichbar mit einem Fingerabdruck sind die Spektren, die durch das reflektierte Licht wiedergegeben werden, für jede Materialart (PET, PP, PE, Tetra Pack etc.) einmalig. Ein NIR-Sensor registriert das reflektierte Licht und erzeugt ein zweidimensionales Bild (Spektrum). Neben den Materialarten, den Objektgrößen und -formen können mit Hilfe einer speziellen Software zeitgleich auch die Positionen verschiedenen Objekte auf dem Förderband bestimmt werden.

Abbildung 70 zeigt ein innovatives Sortieranlagenkonzept der Fa. TiTech, das eine vollautomatische Trennung von wiederverwertbaren Materialien, u.a. auch von PET-Getränkeflaschen ermöglicht. Das Eingangsmaterial wird mittels Förderband (1) in die Anlage transportiert. Ein oberhalb des Förderbandes platzierter Scanner (2) identifiziert je nach Bedarf Material, Form, Struktur, Farben sowie die Lage der Objekte. Das zuvor definierte Zielmaterial wird mit einer Düsenleiste am Ende des Förderbandes (3) pneumatisch aussortiert. Auf Förderbänder getrennt (4 u. 5), kann das Material nachgeschaltete Systemstufen durchlaufen, wobei eine Abtrennung weiterer Stoffe möglich ist [35].

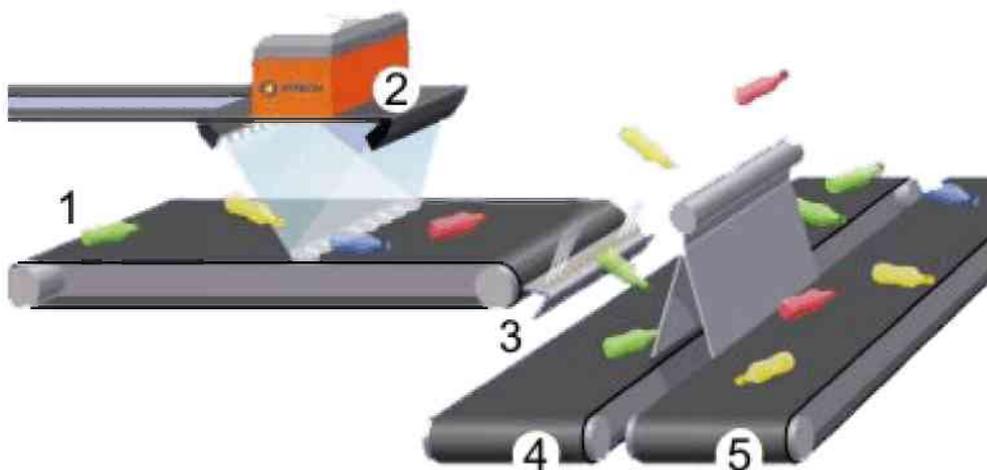


Abbildung 70: Kunststoff-Flaschensortierung der Fa. TiTech [35]

Anlagen zur Abtrennung von Hohlkörperfraktionen weisen Durchsatzleistungen zwischen einer und zehn Tonnen pro Stunde auf. Mit Hilfe moderner Verfahrensweisen lassen sich hohe Reinheitsgrade bei den aussortierten Materialien erzielen. Sie liegen im Schnitt zwischen 90 und 93%; bei einigen Anwendungen bis zu 98%. Analog zu den Reinheitsgraden liegt auch die Ausbringung auf hohem Niveau. Wertstoffausbringungsraten von 80 - 90% (materialabhängig), in manchen Fällen sogar noch höher, sind bei NIR-Verfahren Stand der Technik [35]. Geringer mechanischer Verschleiß, gute

Durchsatzleistungen und Ausbringungsraten sowie eine hohe Zuverlässigkeit des Gesamtsystems mit geringen Ausfallszeiten gehören zu den prägenden Eigenschaften moderner NIR-Techniken im Abfallwirtschaftssektor.

Zusätzlich zur NIR-Technologie wird mittels Farbsensorik unter Einsatz von VIS-Sensoren die Möglichkeit geschaffen, die unterschiedlichen Färbungen durchsichtiger und undurchsichtiger Objekte wie z.B. PET- und PE-Flaschen eindeutig zu bestimmen. Ausgestattet mit einem Farbsensor ist es in einem Arbeitsgang möglich stofflich reine Fraktionen nach ihren Farben getrennt zu erhalten. Dabei detektiert ein Sensor die Reflektion im visuellen Bereich eines angestrahlten Objektes. Mit Hilfe spezieller Softwareapplikationen können neben der Farbe, der Größe und der Form verschiedener Objekte auch deren Position auf dem Förderband bestimmt werden (vgl. Abbildung 71).

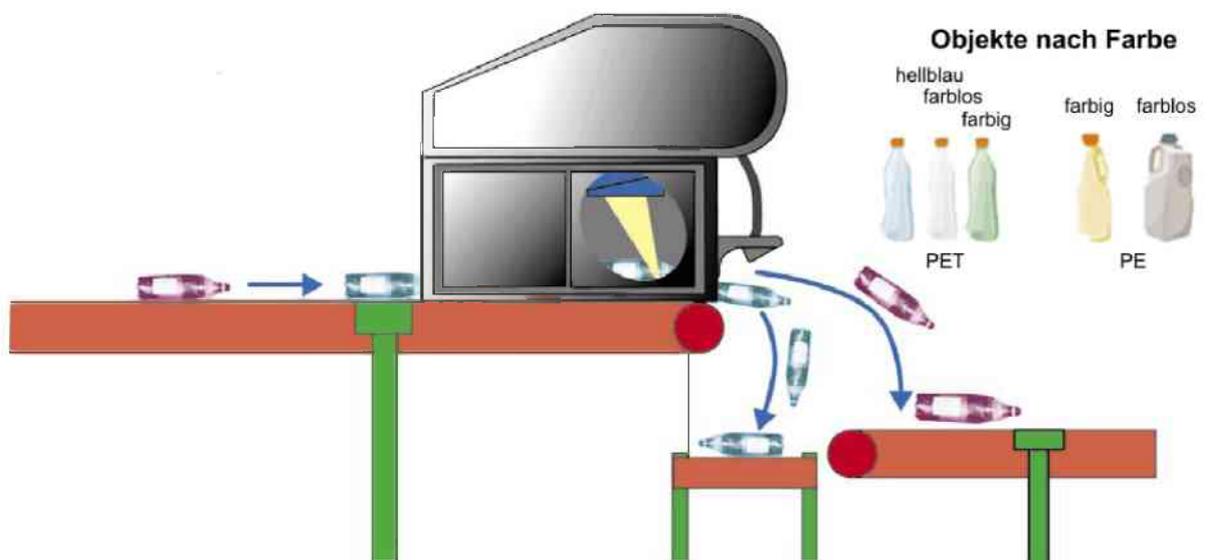


Abbildung 71: Hohlkörpersortierung nach vordefinierten Parametern (Farbe, Größe, Form) [36]

Hochauflösende NIR-Spektroskopietechnologien, die in Systemen für die Sortierung von Kunststoffhohlkörper eingesetzt werden (vgl. Abbildung 72), arbeiten dem jeweiligen Anforderungsprofil entsprechend entweder mit Auflicht- oder Durchlichtsystemen. Der Durchsatz richtet sich nach der Sortierbreite und liegt im Bereich zwischen 3 - 7 t/h. Ausscheidegrade von bis zu 97% sind durch optimale Einstellung der Betriebsparameter realisierbar [37].



Abbildung 72: Hohlkörpersortieranlage vom Typ Criterion der Fa. Binder [37]

Die nachfolgende Abbildung 73 zeigt eine schematische Darstellung einer Hohlkörpersortieranlage der Fa. Binder. Das System besitzt neben einer Kunststofferkennung mittel NIR-Technik auch eine nachgeschaltete VIS-Sensorik zur Farberkennung.

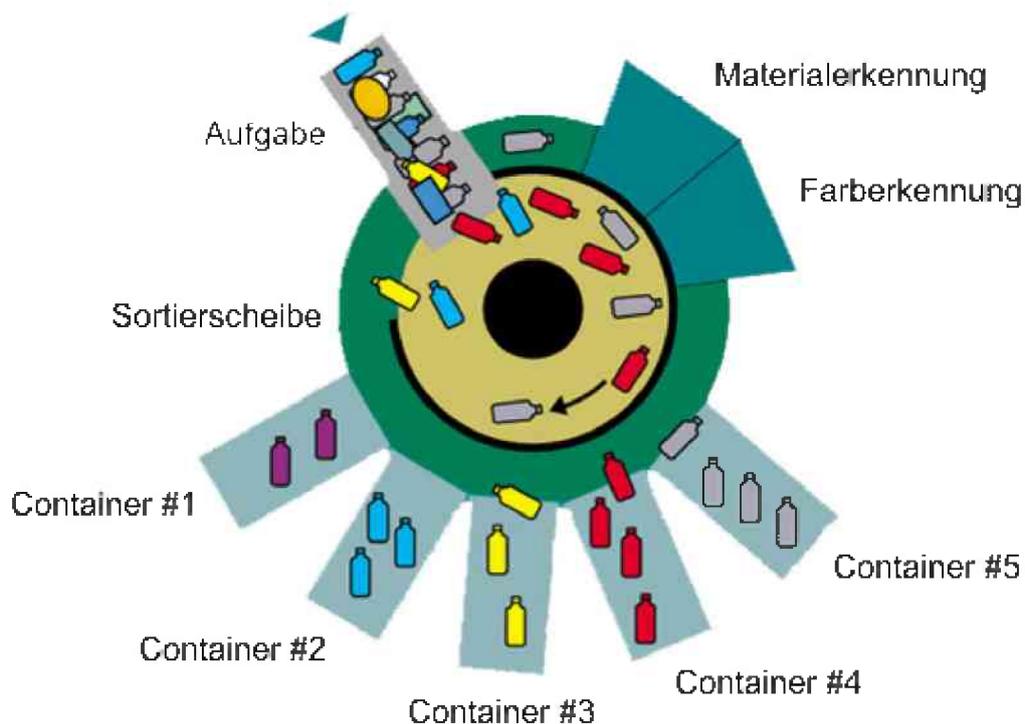


Abbildung 73: Hohlkörpersortieranlage mit Material- und Farberkennung der Fa. Binder [37]

Neben einem maximalen Materialdurchsatz von bis zu 10 t/h, liegen die in der Praxis erreichbaren Durchsatzleistungen bei 6 - 8 t/h. Anvisierte Sortierausbeuten von 90 - 98 % mit

durchschnittlichen Reinheitsgraden von 98% bei einem Input von 4,5 - 5 t/h einerseits, stehen auf der anderen Seite z.T. recht hohen Investitionskosten, die sich bei modernen NIR-Anlagen inklusive Maschinenhalle auf mind. 4,5 Mio. € belaufen, gegenüber. Der Platzbedarf derartiger Sortieranlagen liegt im Mittel zwischen 2.000 und 2.500 m<sup>2</sup> [38].

#### 7.4.2 Ökologische Sinnhaftigkeit

Durch eine kontrollierte Ausschleusung von PET-Getränkeflaschen aus Abfallströmen würden unerwünschte Inhaltsstoffe u.a. Antimontrioxid, das als Synergist bei der PET-Erzeugung eingesetzt wird, von vorne herein nicht in das ASB-Produkt gelangen. Mit der Abtrennung einer primären und eindeutig nachgewiesenen Sb-Quelle aus dem TT-Gesamtinputstrom würde die in den Abfallaufbereitungsprozess eingebrachte Sb-Fracht um durchschnittlich 5 mg/kg TS reduziert werden (vgl. Tabelle 25). Eine Senkung der Sb-Konzentration im ASB-Produkt fällt mit ca. 6% zwar nicht groß aus, sie wäre jedoch ein Schritt in die richtige Richtung. Somit käme es bei der Verbrennung von ASB-Materialien in industriellen Feuerungsanlagen, u.a. im Zementwerk der Lafarge Perlmöser AG, zu keiner unmittelbaren Sb-Beladung des Rauchgasstromes durch den Einsatz von Sb-belasteten PET-Material. Bei der Klinkererzeugung würde es durch den Wegfall von antimonbelasteten Einsatzstoffen zu keiner unerwünschten Braunfärbung des Klinkers kommen. In weiterer Folge würde die Sb-Belastung des erzeugten Produktes (Beton, Zement, Gips etc.) gesenkt werden. Allein die in PET-Getränkeflaschen anhand von Schwermetallanalysen nachgewiesenen Antimongehalte von mehreren hundert mg/kg TS bilden neben dem Einsatz von brandhemmenden Autoteppichen eine Haupteintragsquelle für Antimon in den ASB-Produktionsprozess. Die Einhaltung von gesetzlich vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerten bezogen auf Schwermetallgehalte sowie produktspezifische Parameter und Vorschriften der Zementindustrie in Bezug auf Klinkerinhaltstoffe würden durch einen vorgeschalteten Sortierungsprozess forciert werden. Eine generelle Senkung der Sb-Konzentration unter den Deckelungsgrenzwert wäre durch eine Aussortierung von PET-Flaschen nicht möglich.

Dem Abfallstrom entnommene, farblich sortierte PET-Flaschen müssen vor dem industriellen Wiedereinsatz weitere Sortier- und Reinigungsstufen durchlaufen. Bei allen zur Anwendung kommenden Aufbereitungstechnologien müssen der Schutz der Umwelt und die Schonung der natürlichen Ressourcen an erster Stelle stehen. Entscheidend dabei ist, dass zur Aufbereitung von PET-Flaschenmaterial nur biologisch abbaubare Substanzen eingesetzt werden. Ein Negativbeispiel dazu ist ein in der Vergangenheit häufig aber z.T. auch noch heutzutage angewandtes Verfahren zur Abtrennung von Verunreinigungen mittels erhitzter Natronlauge. Einerseits verursacht die Erwärmung der Natronlauge auf ungefähr 70 °C einen hohen Energieaufwand, andererseits stellt der entstehende Laugenabfall eine Gefahr für Grund- und Oberflächengewässer dar. Neben den aufkommenden Entsorgungs- und Neutralisationskosten, machen die aggressiven Eigenschaften der Natronlauge einen kostenintensiven Korrosionsschutz der Anlage sowie spezielle Arbeitsschutzmaßnahmen erforderlich [33].

Moderne Wasch- und Trennmedien auf Basis von Zitronensäure, pflanzlichen Ölen und Hefebakterien entfernen anhaftende Etiketten-, Klebstoff- und Leimreste zuverlässig und helfen Verunreinigungen, die beim Recyclingprozess eine störende Wirkung haben, sicher abzutrennen. Nur wenn die durch den Zerkleinerungsprozess entstandenen PET-Flakes frei von Störstoffen sind, kann das Recykat anschließend wieder für hochwertige Anwendungen eingesetzt werden [33].

### 7.4.3 Ökonomische Relevanz

PET-Einwegmaterial, das in fast allen Hauptabfallfraktionen der TT-Anlage zu finden ist, wird in der Kunststoffwirtschaft als sortenreiner Rohstoff angesehen und eignet sich für das Recycling. Dadurch ist man in der Lage nicht nur das Antimonaufkommen im Outputmaterial zu senken, sondern durch den Verkauf von PET als Rohstoff an die Kunststoffindustrie auch Geld zu lukrieren.

Laut einer Statistik der non-profit Handelsorganisation Petcore (PET containers recycling Europe) mit Sitz in Brüssel erfuhr die Menge der in Europa gesammelten gebrauchten PET-Artikel 2005 im Vergleich zum Vorjahr eine Volumensteigerung von 15,1%. In Tonnen ausgedrückt entspricht dies einem Sammelvolumen von rd. 796.000 t. Auf europäischer Ebene soll laut Prognosen im Jahr 2010 erstmals die Eine-Million-Tonnengrenze überschritten werden. Bereits heutzutage geht europaweit der Trend in die Richtung, dass deutlich mehr PET-Materialien gesammelt als verbraucht werden. Den größten Anteil an der Sammelrate besitzt Deutschland mit rd. 32%. Im Jahre 2005 wurden in der Bundesrepublik mehr als 200.000 t PET-Materialien gesammelt [39], [40].

Der Preis für europäische PET-Flascheneinwegware bunt lag im Jahr 2005 bei durchschnittlich 135 - 220 €/t. Der Verkaufserlös transparenter PET-Einwegware lag im selben Jahr im Durchschnitt bei 220 - 320 €/t. Im zweiten Halbjahr 2006 begann ein Preisrutsch für bunte und transparente PET-Einwegflaschen. Die Anfang 2007 erzielbaren Erlöse für PET-Einweg natur bzw. PET-Einweg bunt haben sich bei 215 - 270 €/t bzw. 40 - 130 €/t eingependelt. Aus den z.T. äußerst unterschiedlichen Qualitäten der PET-Erzeugnisse, die den Aufbereitern angeboten werden, ergeben sich entsprechende Preisschwankungen, wobei bunte PET-Flaschen (Braunware) deutliche Preisabschläge verursachen [34], [41].

Eine detaillierte Darstellung der Preisverläufe am PET-Sekundärrohstoffmarkt für Ein- bzw. Mehrweg-Flaschen wurde bereits im Kap. 7.2 gegeben. Dabei wurde neben den Richtpreisen für qualitativ hochwertige Flaschenkunststoffe wie PET-Mehrweg natur und PET-Einweg natur auch auf die erzielbaren Erlöse von PET-Mehrweg hellblau und die qualitativ schlechteren „Braunwaren“ wie PET-Einweg bunt eingegangen.

Am Markt für Sekundärkunststoffe werden nur gute Qualitäten nachgefragt. Das geringe Mengenangebot an qualitativ hochwertigen Kunststoffabfällen führt dazu, dass viele Produzenten inzwischen ihre Produktionsabfälle fast zu Gänze selbst verarbeiten. Durch dieses Verhalten gelangen sortenreine Kunststoffregulate, die in letzter Zeit auch verstärkt aus dem Ausland, vor allem aus China nachgefragt werden, kaum mehr auf den

Markt. Der Export von zurückgegangenen PET-Flaschen nach Fernost ging im Laufe der vergangenen zwei Jahre von 18,8% auf 17,6% oder 14.000 t leicht zurück. Aus diesem Grund ist mit Preiserhöhungen der Rohstoffe, für PET im Durchschnitt mit 15 €/t zu rechnen [39], [41].

Die Einsatzgebiete von Flakes aus aufbereiteten PET-Flaschen sind sehr vielfältig. Dabei spielt, wie bereits erwähnt, die Ausgangsqualität sowie die Flaschenfärbung eine entscheidende Rolle. Das Verwendungsgebiet von PET-Recyklaten reicht von Verpackungsbändern über neue PET-Flaschen bis hin zu synthetischen Kleidungsstücken. Die nachfolgende Abbildung 74 gewährt einen Einblick in die Einsatzgebiete von aufbereiteten PET-Flaschenrecyklaten.

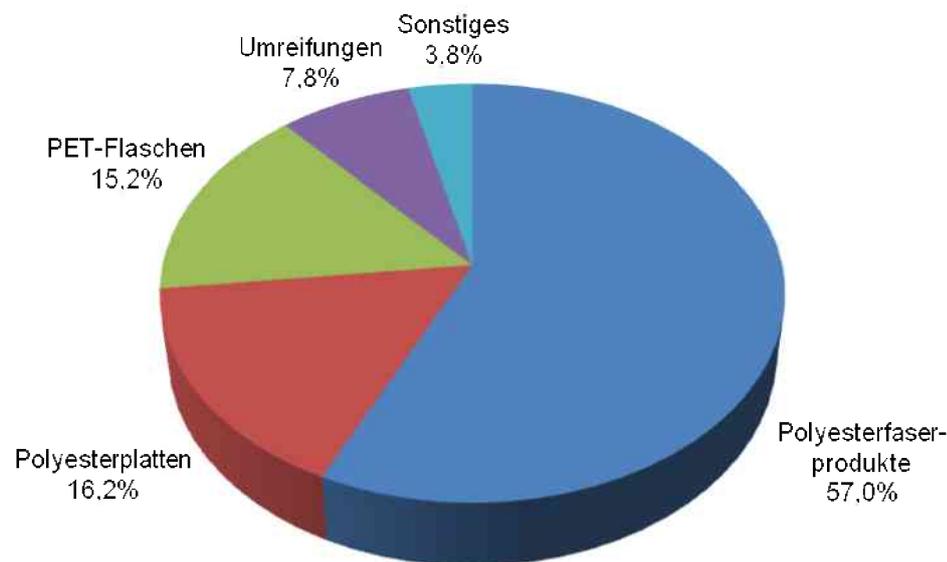


Abbildung 74: Einsatzgebiete von PET-Recyclingmaterial [39]

Etwas mehr als die Hälfte, rd. 57% der rückgeführten PET-Materialien werden zu Polyesterfaserprodukten recycelt, wobei dieser Anteil mit 70% im Jahre 2003 gegenüber 65% im Jahre 2004 rückläufig ist. Im Gegensatz dazu kam es beim Einsatz von PET-Recykat für Polyesterplatten für thermogeformte Anwendungen zu einer Verdreifung innerhalb der letzten beiden Jahre auf 16,2%. Die Wiederverwendung in PET-Flaschen (bottle-to-bottle) erfuhr in den letzten Jahren eine stetige Steigerung und lag im Sommer 2006 bei ca. 15,2%. Andere in Zukunft u.U. aufstrebende Absatzmärkte wie Produzenten von Umreifungsbändern liegen derzeit mit 7,8% auf einem relativ geringen Niveau [39].

Der durchschnittliche monatliche Output an PET-Flaschenmaterial wurde bereits im Kap. 7.1 näher gebracht. Die PET-Ausbringungsmenge reicht von durchschnittlich 1,5 t pro Monat bei der MBA-ASA-Fraktion, über rd. 5 t pro Monat bei der Thermomixfraktion bis hin zu etwas mehr als 29 t pro Monat beim Gewerbeabfall. Den mit Abstand größten Anteil an PET-Flaschen besitzt das ÖKK-Material. Im Durchschnitt können aus dieser Fraktion mehr als

50 t Kunststoffflaschen pro Monat aussortiert werden. Addiert man den durchschnittlichen monatlichen PET-Flaschenoutput der vier Hauptfraktionen (MBA, Gewerbe, ÖKK und Thermomix) zusammen, würde dies eine Gesamtmenge von rd. 119 t ergeben.

Die Abtrennung von PET-Materialien aus TT-Inputströmen wäre in erster Linie für PET-reiche Fraktionen sinnvoll (vgl. Kap. 6.3, Tabelle 16). Dies würde primär das ÖKK-Material, das einen Flaschenanteil von bis zu 6 M-% aufweist und im monatlichen Durchschnitt bis zu 60 t PET-Flaschen enthält, betreffen. Aber auch bei den Fraktionen Thermische Wien (14 t PET-Flaschen/M) und Thermische Graz (10 t PET-Flaschen/M) wäre eine Vorsortierung mit PET-Hohlkörperausschleusung von wirtschaftlichem Interesse.

In der nachfolgenden Tabelle 27 wird der monatliche Materialwert von aussortierten PET-Flaschen abgeschätzt. Unterteilt in PET-Flaschenqualitäten werden für sieben Hauptinputfraktionen (ÖKK, Thermische Wien, Thermische Graz, Thermomix, AEVG, ASA, Transbeton) die am Sekundärrohstoffmarkt erzielbaren Preise für PET-Verpackungsmaterialien überschlagen. Die folgende Abschätzung basiert auf den durchschnittlichen, im Kap. 7.1, Tabelle 20 dargestellten monatlichen PET-Flaschenoutput der erwähnten Inputfraktionen. Zieht man zu diesem Mengenverhältnis die Farbverteilung der Flaschen aus Kap. 6.4, Tabelle 18 heran, lassen sich beim Weiterverkauf der farblich sortierten Getränkeflaschen an PET-Weiterverarbeiter die folgenden Preise erzielen.

Tabelle 27: Erzielbare Erlöse der PET-Flaschenfraktion aus ÖKK-Ausgangsmaterial

Input-Fraktion	Flaschensorte	Monats- Ø Output an PET-Flaschen [kg]	Materialwert [€/kg]	Materialwert pro Monat [€]
ÖKK	PET-Einweg natur	26.533	0,215 - 0,270	5.705 - 7.164
	PET-Einweg bunt	27.396	0,040 - 0,130	1.096 - 3.561
	<b>Gesamt<sub>ÖKK</sub></b>	<b>53.929</b>	–	<b>6.801 - 10.725</b>
Thermische Wien	PET-Einweg natur	6.766	0,215 - 0,270	1.455 - 1.827
	PET-Einweg bunt	6.986	0,040 - 0,130	279 - 908
	<b>Gesamt<sub>Therm. Wien</sub></b>	<b>13.752</b>	–	<b>2.363 - 2.735</b>
Thermische Graz	PET-Einweg natur	5.094	0,215 - 0,270	1.095 - 1.375
	PET-Einweg bunt	5.259	0,040 - 0,130	210 - 684
	<b>Gesamt<sub>Therm. Graz</sub></b>	<b>10.353</b>	–	<b>1.305 - 2.059</b>
Thermomix	PET-Einweg natur	2.375	0,215 - 0,270	511 - 641
	PET-Einweg bunt	2.452	0,040 - 0,130	98 - 319
	<b>Gesamt<sub>Thermomix</sub></b>	<b>4.827</b>	–	<b>609 - 960</b>
AEVG	PET-Einweg natur	1.796	0,215 - 0,270	386 - 485
	PET-Einweg bunt	1.855	0,040 - 0,130	74 - 241
	<b>Gesamt<sub>AEVG</sub></b>	<b>3.651</b>	–	<b>460 - 726</b>
ASA	PET-Einweg natur	752	0,215 - 0,270	162 - 203
	PET-Einweg bunt	777	0,040 - 0,130	31 - 101

	<b>Gesamt<sub>ASA</sub></b>	<b>1.529</b>	–	<b>193 - 304</b>
<b>Transbeton</b>	PET-Einweg natur	669	0,215 - 0,270	144 - 181
	PET-Einweg bunt	690	0,040 - 0,130	28 - 90
	<b>Gesamt<sub>Transbeton</sub></b>	<b>1.359</b>	–	<b>172 - 271</b>
<b>Gesamt</b>		<b>89.400</b>	–	<b>11.903 - 17.780</b>

Die Reihung der Inputmaterialien beginnend mit dem ÖKK-Material wurde absteigend nach dem durchschnittlichen monatlichen PET-Flaschenoutput vorgenommen. Fraktionen, die einen hohen Anteil an transparenten und färbigen PET-Flaschen aufweisen kommen für einen Vorsortierungsschritt eher in Frage, als Inputmaterialien mit einem kleineren Flaschenanteil. Somit würde eine Sortierung von etwas mehr als 1.000 t ÖKK-Material/Monat mit einer Ausschleusung von ca. 54 t PET-Verpackungsmaterialien (Flaschen) einen durchschnittlichen monatlichen Erlös von rd. 8.800 € bringen. Bei der Inputfraktion „Thermische Wien“ fallen pro Monat im Durchschnitt ca. 14 t PET-Flaschen an. Das Preisniveau, das man auf dem Sekundärrohstoffmarkt für eine sortenrein getrennten Hohlkörperfraktion erzielen würde, liegt zwischen 2.400 und 2.700 €.

Bei Inputfraktionen, die einen vergleichsweise geringen PET-Flaschenanteil aufweisen (Thermomix, AEVG, ASA, Transbeton) liegt der monatlich durch den Verkauf erzielbare finanzielle Erlös deutlich niedriger als bei PET-reichen Fraktionen. Im Schnitt beträgt die Wertschöpfung beim Verkauf von PET-armen Inputfraktionen zwischen 360 und 570 €/Monat. Da eine Hohlkörpersortieranlage aus platztechnischen Gründen ohnehin nicht direkt vor Ort in die Aufbereitungsanlage integriert werden kann, müsste der PET-Flaschenanteil bereits vor Anlieferung aus den Inputfraktionen entfernt werden. Dies würde sich aus ökonomischer Sichtweise nur bei PET-reichen Fraktionen (ÖKK, Thermische Wien, Thermische Graz) rentieren.

Die oben erwähnten Aussortierungs- und Verkaufsszenarien dienen rein der Abschätzung und sind nur als grobe Richtwerte zu verstehen. Die zusätzlichen Mehreinnahmen durch den Verkauf farblich vorsortierter PET-Flaschenware am Sekundärrohstoffmarkt würden den Bau einer Anlage zur Ausschleusung von gebrauchten Kunststoff-Getränkeflaschen in vielen Fällen rentabel machen. Der Handel mit aussortierten PET-Verpackungsmaterialien am Sekundärrohstoffmarkt zur Schonung des Einsatzes von natürlichen Ressourcen und die gleichzeitige leichte Senkung des Schwermetallgehalts im Substitutbrennstoff würde sich nicht nur auf die Umwelt positiv auswirken, sondern auch in finanzieller Hinsicht für die Fa. Thermo Team lohnen.

## 8 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Herkunft und dem Einbringen von Schwermetallen, insbesondere von Antimon und Blei in den aufbereiteten Substitutbrennstoff einer Ersatzbrennstoffproduktionsanlage (Thermo Team-Anlage). Ein besonderes Augenmerk gilt den kunststoffreichen Hauptinputfraktionen der Thermo Team-Anlage. Diese Inputmaterialien weisen z.T. recht hohe Konzentrationen der erwähnten Schwermetalle auf. Ein über den zulässigen Grenzwerten erhöhter Gehalt an Antimon bzw. Blei im Alternativbrennstoff führt bei der Verbrennung, u.a. in Zementwerken zu Emissionsproblemen. Weiters wirkt sich ein erhöhter Schwermetallgehalt negativ auf die Qualität der erzeugten Produkte aus. Hohe Konzentrationen von Antimon und Blei in der Atmosphäre haben nicht nur negative Auswirkungen auf die Pflanzenwelt, sondern schädigen auch Mensch und Tier. Aus diesem Grund gilt es Schwermetallemissionen weitgehend zu verringern, bzw. gänzlich zu vermeiden.

Kapitel 2 beschäftigt sich mit den gesetzlich festgelegten Schwermetallgrenzwerten, die für Substitutbrennstoffe gelten. Im Zuge dessen wird auch ein Einblick in den Genehmigungsbescheid der Thermo Team-Anlage gegeben. Nicht nur die rechtlich verbindlichen Grenzwertvorgaben werden diskutiert, sondern auch normative Rahmenbedingungen in Bezug auf die komplexe Schwermetallanalytik werden durchleuchtet. Ein weiterer Schwerpunkt dieses Kapitels liegt in der Darstellung eines Anforderungsprofils für qualitativ hochwertige Sekundärbrennstoffe. Im Zuge des RAL-Gütezeichens für Sekundärbrennstoffe werden von Experten festgelegte, einheitliche und auf freiwilliger Basis basierende Richtlinien für Substitutbrennstoffe diskutiert. Dabei wird vorrangig auf moderne, dem Stand der Technik entsprechende Güte- und Prüfbestimmungen eingegangen. Die Positivliste der österreichischen Zementindustrie beschäftigt sich ebenfalls mit derselben Thematik und schreibt Grenzwerte vor, die bei der Verbrennung von heizwertreichen Kunststofffraktionen zum Schutz der Umwelt einzuhalten sind. Den Abschluss des rechtlich-normativen Kapitels bildet die Schwermetallanalytik. Hierbei wird auf genormte Messverfahren eingegangen, die auch im Zuge dieser Arbeit zur Bestimmung von Antimon und Blei in Feststoffproben angewandt wurden.

Das dritte Kapitel bringt die Schwermetalle Antimon und Blei näher. Neben Recherchen über die Gewinnung, die Herstellung und das Einbringen der Schwermetalle in den Produktkreislauf, wird auch das Vorkommen, die Verteilung und Entsorgung von Antimon und Blei in Abfallströmen diskutiert. Ein besonderes Augenmerk wird hierbei auf das Vorhandensein der erwähnten Schwermetalle in den kunststoffreichen Inputfraktionen der Thermo Team-Anlage gelegt. Der Schwerpunkt dieses Kapitels liegt in der Beschreibung der Eigenschaften von Antimon und Blei und die daraus resultierenden Einsatzgebiete in der Kunststoffindustrie. Der theoretische Teil endet jeweils mit einem kurzen toxikologischen Exkurs.

Im Anschluss geht Kapitel 4 auf die detaillierte Beschreibung der ASB-Produktionsanlage der Fa. Thermo Team ein. Auf der einen Seite wird in diesem Kapitel ein kurzer Einblick in die Anlagendaten gewährt, andererseits der betriebliche Ablauf einer

Ersatzbrennstoffproduktionsanlage skizziert. Die chronologisch richtige Darstellung der Abfolge der Aufbereitungsaggregate hilft, unterstützt mit Abbildungen und Skizzen, den am ersten Blick komplizierten und komplex erscheinenden Abfallaufbereitungsprozess zu durchleuchten. Dabei wird der komplette ASB-Herstellungsprozesses beginnend mit der Anlieferung der Hauptinputfraktionen bis hin zur Herstellung des Substitutbrennstoffes mit allen dazu notwendigen Prozessschritten näher gebracht. Produktionsspezifische Daten, wie die monatlichen In- und Outputmengen werden dabei ebenso diskutiert, wie Maßnahmen zur Sicherung der ASB-Produktqualität.

Der Inhalt des fünften und sechsten Kapitels ist ausschließlich dem praktischen Teil dieser Arbeit gewidmet. Während im Kapitel 5 auf alle notwendigen voranalytischen Arbeitsschritte eingegangen wird, findet im sechsten Kapitel die Auswertung der Laborergebnisse statt. Die genaue Beschreibung der Beprobung der Inputfraktionen direkt vor Ort bei der Betriebsanlage gehört ebenso zu den Schwerpunkten des fünften Kapitels, wie die Planung und Durchführung einer aufwändigen und zeitintensiven Sortieranalyse. Bei allen Probenahmen wurde darauf geachtet, dass aus Gründen der Repräsentierbarkeit die angewendeten Methoden den Vorgaben der ÖNORM S2123-1 und ÖNORM S2123-3 entsprechen. Daraus resultierend wurden Materialströme ausgewählter Inputfraktionen nach bestimmten in den Normen festgelegten Kriterien untersucht, die Vorgehensweise und der zeitliche Ablauf der Probenahmeszenarien exakt dokumentiert.

Das sechste Kapitel fasst, wie bereits erwähnt, die ermittelten Untersuchungs- und Messergebnisse zusammen. Dabei werden nicht nur die z.T. stark erhöhten Schwermetallgehalte der Monatsmischproben, die den eigentlichen Ausgangspunkt für die Durchführung dieser Arbeit gebildet hatten, aufgegriffen, sondern auch eigene im Zuge der praktischen Untersuchung der Inputfraktionen ermittelte Antimon- und Bleibelastungen dokumentiert. Infolgedessen wird auch die Massenverteilung der PET-Hohlkörperfraktion bezogen auf die verschiedenen Hauptinputströme der Betriebsanlage dargestellt. Die Abschätzung des monatlichen PET-Flaschenoutputs ist ein weiterer Schwerpunkt des sechsten Kapitels und kann als Basis für die Entwicklung eines Ausschleusungskonzeptes für diese Fraktion herangezogen werden. Die abschließend im selben Kapitel betriebene Schwermetallanalytik bei PET-Getränkeflaschen spiegelt die Schwermetallverteilung in der Hohlkörperfraktion wieder.

Manuell aussortierte Fraktionen bildeten die Grundlage der in Kapitel 7 zusammengefassten Überlegungen bezüglich der technischen, ökologischen und ökonomischen Sinnhaftigkeit einer Abfall-Vorsortierung. Hierbei wird nicht nur auf die aus den Inputströmen monatlich bzw. jährlich aussortierbare PET-Flaschenmenge hochgerechnet und die erzielbaren Preise am PET-Sekundärrohstoffmarkt verglichen, sondern auch auf mögliche Auswirkungen einer PET-Ausschleusung auf das Outputmaterial eingegangen. Im Mittelpunkt steht dabei die Senkung des Sb-Gehaltes des ASB-Materials. Die Vermeidung des Eintrages von PET-Flaschen in die Produktionsanlage hat neben den positiven Auswirkungen (Senkung der Sb-Fracht) auch negative Erscheinungen zur Folge. Dazu gehört in erster Linie, wie im Laufe des siebten Kapitels beschrieben, die Senkung des ASB-Heizwertes. Die Einhaltung des vorgegebenen Heizwertkriteriums ( $\geq 20$  MJ/kg) ist ein wichtiger Qualitätsparameter und trägt

zur Absetzbarkeit des ASB-Produktes bei. Auf der anderen Seite ist mit der Aussortierung verschiedener PET-Flaschenqualitäten aus ausgewählten Inputfraktionen eine finanzielle Wertschöpfung verbunden. Die Höhe der Erlöse, die aus dem Verkauf der PET-Wertkunststofffraktion lukriert werden können, bilden den Abschluss des Kapitels bzw. der Arbeit.

## 9 Verzeichnisse

### 9.1 Literatur

- [1] Flamme, S.: Qualitätssicherung in Aufbereitungsanlagen zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen. In Thomé-Kozmiensky, K. (Hrsg.): Energie aus Abfall – Band 1. Nietwerder: TK Verlag – Verlag für Kreislaufwirtschaft, 2006.
- [2] Bescheid vom 05. August 2002 ausgestellt von der Steiermärkischen Landesregierung – Fachabteilung 13A an die Fa. Thermo Team Alternativbrennstoffverwertungs GmbH.
- [3] Homepage der Thermo Team Alternativbrennstoffverwertungs GmbH, Zahlen, Daten Fakten URL: <http://www.thermoteam.at> (Stand: 11.12.2006)
- [4] RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. (Hrsg.): Sekundärbrennstoffe – Gütesicherung RAL-GZ 724. Sankt Augustin: RAL, 2006.
- [5] Homepage der Gütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe und Recyclingholz e.V. (BGS), RAL-Gütezeichen 724 – Güte- und Prüfbestimmungen, URL: <http://www.bgs-ev.de> (Stand: 27.02.2007)
- [6] BGBl. II 22/1999: Verordnung des Bundesministeriums für Umwelt, Jugend und Familie über die Verbrennung von gefährlichen Abfällen
- [7] RL 2000/76/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Dezember 2000 über die Verbrennung von Abfällen
- [8] Homepage der österreichischen Zementindustrie, Positivliste für die Verbrennung von Abfällen in Anlagen zur Zementerzeugung, URL: <http://www.zementindustrie.at/page.asp?c=125> (Stand: 28.02.2007)
- [9] Norm DIN EN ISO 15586:2003-E4: Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von Spurenelementen mittels Atomabsorptionsspektrometrie mit dem Graphitrohr-Verfahren.
- [10] Norm DIN 38406-6: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser- und Schlammuntersuchung – Kationen (Gruppe E) – Teil 6: Bestimmung von Blei mittels Atomabsorptionsspektrometrie
- [11] Seiler, H. (Hrsg.): Handbook on Toxicity of Inorganic Compounds. New York: Marcel Dekker, 1988. – ISBN 0-8247-7727-1
- [12] Wiederhold, M.: „Antimon“. Microsoft Encarta 2007 [DVD]. Microsoft Corporation, 2006.

- [13] Leisewitz, A.; Kruse, H.: Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel. Frankfurt/M.: Öko-Recherche – Büro für Umweltforschung und -beratung, 2000.
- [14] Homepage der freien Online-Enzyklopädie Wikipedia, URL: <http://www.wikipedia.org> (Stichwort: Antimon, Stand: 13.11.2006)
- [15] Paoletti, F.: Behavior of oxyanions forming heavy metals in municipal solid waste incineration. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe, 2002.
- [16] Novak, E.: Verwertungsmöglichkeiten für ausgewählte Fraktionen aus der Demontage von Elektroaltgeräten – Kunststoffe. Wien: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft, 2001.
- [17] Saechtling, H.: Kunststoff-Taschenbuch. 26. Ausg., München, Wien: Carl Hanser Verlag, 1995. – ISBN 3-446-17855-4
- [18] Falbe, J.; Regitz, M. (Hrsg.): Römpp Lexikon Chemie – 10. Auflage. Stuttgart/New York: Thieme, 1996-1999. – ISBN 3-13-107830-8
- [19] Microsoft GmbH (Hrsg.): „Blei“. Microsoft Encarta 2007 [DVD]. Microsoft Corporation, 2006.
- [20] Homepage der freien Online-Enzyklopädie Wikipedia, URL: <http://www.wikipedia.org> (Stichwort: Blei, Stand: 13.11.2006)
- [21] Homepage von [www.marktcheck.at](http://www.marktcheck.at), Augen auf beim Spielzeugkauf! URL: <http://marktcheck.greenpeace.at/1194.html> (Stand: 20.11.2006)
- [22] Homepage des Forschungszentrum Karlsruhe – Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS), TA-Datenbank-Nachrichten Nr. 4/9. Jahrgang – Dezember 2000, S. 117-122 URL: <http://www.itas.fzk.de/deu/tadn/tadn004/jesk00a.htm> (Stand: 04.12.2006)
- [23] Scheffer, F. (Hrsg.): Lehrbuch der Bodenkunde, 15. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2002. – ISBN 3-8274-1324-9
- [24] Eisenbrand, G., Metzler, M.: Toxikologie für Chemiker: Stoffe, Mechanismen, Prüfverfahren. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1994. – ISBN 3-13-127001-2
- [25] Prochaska, M.; Pomberger, R.: Aufbereitungsanlage für Ersatzbrennstoffe (Thermo Team-Anlage) – Qualitätsrelevante Anlagenmodifikationen und Weiterentwicklung der Qualitätssicherung. Leoben: Institut für nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik, 2004.
- [26] Norm ÖNORM S 2123-1: Probenahmepläne für Abfälle – Teil 1: Beprobung von Haufen.

- [27] Norm ÖNORM S 2123-3: Probenahmepläne für Abfälle – Teil 1: Beprobung fester Abfälle aus Stoffströmen.
- [28] Homepage der Österreichische Kunststoffkreislauf AG, Die ÖKK AG, URL: [http://www.okk.co.at/okk\\_ag.html](http://www.okk.co.at/okk_ag.html) (Stand: 30.12.2006)
- [29] Homepage der A.S.A Abfall Service AG, Unternehmen URL: <http://www.asa.at/Unternehmen.htm> (Stand: 30.12.2006)
- [30] Bundesamt für Gesundheit (Hrsg.): Bulletin 44/05. Bern: Bundesamt für Gesundheit, 2005. – ISSN: 1420-4266
- [31] Shotyk, W.; Krachler, M.: Contamination of Canadian and European bottled waters with antimony from PET containers. London: Journal of Environmental Monitoring, 2006.
- [32] Nishioka, K.; Hirahara, A.: Bull. Inst. Life Sci. Hiroshima: Prefectural Women's University, 2002
- [33] Homepage Kunststoffe.de, PET-Recycling ohne Natronlauge, URL: [http://www.kunststoffe.de/ku/overview\\_news.asp](http://www.kunststoffe.de/ku/overview_news.asp)
- [34] EUWID, Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH: EUWID Recycling & Entsorgung, Jhg. 2006 Nr. 1-49. Gernsbach: EUWID.
- [35] Homepage der Fa. Titech, Produkte, URL: <http://www.titech.com> (Stand: 07.03.2007)
- [36] Homepage der Fa. Pellenc Selective Technologies, URL: <http://www.pellencst.com> (Stand: 07.03.2007)
- [37] Homepage der Fa. Binder+Co, Produkte – Umwelttechnik – Kunststoffaufbereitung, URL: <http://www.binder-co.com> (Stand: 07.03.2007)
- [38] Curtis, A (Fa. Sauerbacher Dienstleistungs AG): Verfahrenstechnik von Hohlkörpersortieranlagen. Telefonat, 2007-03-06 11:15 – 12:00 Uhr
- [39] Homepage Plastverarbeiter, Newsarchiv, URL: <http://www.plastverarbeiter.de/news/> (Stand: 31.08.2006)
- [40] Homepage der non-profit Handelsorganisation Petcore, URL: <http://www.petcore.org> (Stand: 24.12.2006)
- [41] Homepage Plasticker, Newsarchiv, URL: <http://www.kunststoff.de/news/> (Stand: 24.12.2006)

## 9.2 Abkürzungsverzeichnis

~	ungefähr
<	kleiner
≤	kleiner/gleich
≥	größer/gleich
/	pro
µg	Mikrogramm
a	Jahr
abh.	abhängig
Abs.	Absatz
AG	Aktiengesellschaft
Apr	April
As	Arsen
ARA	Altstoff Recycling Austria
A.S.A	Abfall Service Austria
ASB	Aufbereiteter Substitut Brennstoff
ATO	Antimontrioxid
Aug	August
AVV	Abfallverbrennungsverordnung
AWG	Abfallwirtschaftsgesetz
B	Breite
BGBI	Bundesgesetzblatt
bzw.	beziehungsweise
°C	Grad Celsius
ca.	circa
Cr	Chrom
CAS	Chemical Abstracts Service
cm	Zentimeter
cm <sup>3</sup>	Kubikzentimeter
Dez	Dezember
dgl.	dergleichen
d.h.	das heißt
€	Euro
etc.	et cetera
EUWID	Europäischer Wirtschaftsdienst
Fe	Eisen
Feb	Februar
g	Gramm
GFAAS	Grafitrohratomabsorptionsspektroskopie
ggf.	gegebenenfalls
ggst.	gegenständlich(e)

GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
H <sub>2</sub> O	Wasser
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Wasserstoffperoxid
H <sub>o</sub>	oberer Heizwert (Brennwert)
H <sub>u</sub>	unterer Heizwert
HCl	Salzsäure
HNO <sub>3</sub>	Salpetersäure
IAE	Institut für Nachhaltige Abfallwirtschaft und Entsorgungstechnik
IARC	International Agency for Research on Cancer
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry
id(g)F	in der (gültigen) Fassung
i.d.R.	in der Regel
IMS	Integriertes Management System
inkl.	inklusive
IPPC	Integrated Pollution Prevention and Control
Jan	Januar
Jun	Juni
Jul	Juli
k.A.	keine Angaben
Kap.	Kapitel
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
KFZ	Kraftfahrzeug
km	Kilometer
l	Liter
L	Länge
lat.	lateinisch
li.	links
LKW	Lastkraftwagen
M	Monat
m	Meter
M-%	Massenprozent
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
MAK	maximale Arbeitsplatzkonzentration
max.	maximal
mg	Milligramm
mind.	mindestens
Mio.	Million(en)
MJ	Megajoule
Mo	Molybdän
Mrz	März
Ne	Nichteisen

NIR	Nahinfrarot
ng	Nanogramm
Nov	November
o.g.	oben genannt(en)
OS	Organische Substanz
Okt	Oktober
ÖKK	Österreichischer Kunststoff Kreislauf
S.	Seite
Sb	Antimon
Sep	September
SN	Schlüsselnummer
sog.	so genannt(e/n)
T	Tiefe
therm.	thermische
TRK	technische Richtkonzentration
TS	Trockensubstanz
TT	Thermo Team
Pb	Blei
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PVC	Polyvinylchlorid
re.	rechts
rd.	rund
u	atomare Masseneinheit
u.	und
u.a.	unter anderem
u.ä.	und ähnliche(s)
UNO	United Nations Organization (Organisation der Vereinten Nationen)
usw.	und so weiter
u.U.	unter Umständen
v.a.	vor allem
VIS	visible (sichtbar)
vgl.	vergleiche
v.l.n.r	von links nach rechts
z.T.	zum Teil
z.Z.	zur Zeit

### 9.3 Tabellen

Tabelle 1: Grenzwerte des Alternativbrennstoffes „Altkunststoff“ .....	8
Tabelle 2: Grenzwerte des Alternativbrennstoffes „ASB-Retznei“ .....	9
Tabelle 3: Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe - Schwermetallrichtwerte .....	10
Tabelle 4: Maximal zulässige Schadstoffgehalte (Monatsmittelwerte).....	11
Tabelle 5: Grenzwerte für Kunststoffe und heizwertreiche Fraktionen .....	12
Tabelle 6: Studien über Sb-Konzentrationen in Siedlungsabfällen.....	21
Tabelle 7: Elementkonzentrationen und Akkumulationsfaktoren.....	22
Tabelle 8: Materialmatrix TT 2005 - 2006 .....	33
Tabelle 9: Gesamtinputmenge der fünf Hauptfraktionen bezogen auf die Jahre 2005 u. 2006 .....	34
Tabelle 10: Monatlicher ASB-Output in Tonnen bezogen auf die Jahre 2005 und 2006 .....	42
Tabelle 11: Outputmengen FE/Ne/Inert im Jahr 2006.....	44
Tabelle 12: Schwermetallanalysen ASB 2005 - 2006 Seibersdorf .....	59
Tabelle 13: Monatlicher Antimon- und Bleioutput der Betriebsanlage .....	61
Tabelle 14: Antimon-, Blei- und Chlorgehalte der TT-Input-Fraktionen .....	64
Tabelle 15: Brennwert, Heizwert, Störstoffgehalt und Trockenrückstand der TT-Input- Fraktionen .....	64
Tabelle 16: Ergebnisse der Sortieranalyse .....	67
Tabelle 17: Materialinput pro Monat .....	70
Tabelle 18: PET-Flaschensortierung nach Farben und Menge .....	75
Tabelle 19: Antimongehalte PET-Flaschen.....	77
Tabelle 20: Durchschnittlicher monatlicher PET-Flaschenoutput sortiert nach Fraktionen ....	81
Tabelle 21: Durchschnittlicher jährlicher PET-Flaschenoutput sortiert nach Fraktionen.....	82
Tabelle 22: Durchschnittlicher monatlicher Sb-Output aus PET-Flaschen .....	83
Tabelle 23: Sb-Frachten in den Inputfraktionen .....	84
Tabelle 24: Differenz zwischen den Sb-mengen.....	85
Tabelle 25: Sb-Konzentrationen der Hauptinputfraktionen mit/ohne PET-Hohlkörperfraktion .....	85
Tabelle 26: PET post user-Preise im Zeitraum zwischen Dezember 2004 und Dezember 2006.....	87
Tabelle 27: Erzielbare Erlöse der PET-Flaschenfraktion aus ÖKK-Ausgangsmaterial .....	97

## 9.4 Abbildungen

Abbildung 1: RAL-Gütezeichen RAL-GZ 724 für Sekundärbrennstoffe.....	10
Abbildung 2: Ultra-Zentrifugalmühle mit Auffangbehälter.....	14
Abbildung 3: Zentral angeordneter Rotor mit keilförmigen Rotorzähnen und Ringsieb.....	14
Abbildung 4: Zerkleinerte Probe im Auffanggefäß.....	15
Abbildung 5: Temperaturkurve Mikrowellenaufschlusssystem vom IAE.....	16
Abbildung 6: Antimonerz „Antimonit“.....	18
Abbildung 7: kubisches Antimontrioxid.....	18
Abbildung 9: Verteilung von Antimon in Siedlungsabfällen.....	22
Abbildung 11: Stoffflussdiagramm der Thermo Team-Produktionsanlage.....	28
Abbildung 12: Luftaufnahme des Thermo Team-Betriebsgelände in Retznei.....	30
Abbildung 13: Überdachter Flachbunker mit Boxen zur Zwischenlagerung angelieferter Inputfraktionen.....	31
Abbildung 14: LKW mit geladenen Kunststoffballen.....	32
Abbildung 15: Trend des monatlichen Gesamtinputs der Jahre 2005 und 2006.....	35
Abbildung 16: Radlager zur Materialmanipulation.....	35
Abbildung 18: Keilriemenbetriebenes Vorzerkleinerungsaggregat.....	37
Abbildung 19: Kombinationsabscheider.....	37
Abbildung 21: Austragsboxen für v.l.n.r. Metall-, Nichtmetall-, Inertstoffe.....	39
Abbildung 22: Scheibensieb.....	40
Abbildung 23: Überbandmagnet zur Abscheidung paramagnetischer Stoffe.....	41
Abbildung 24: Vollautomatisierte LKW-Verladungsstation.....	41
Abbildung 25: Rohrbandförderer zur Belieferung des Zementwerkes.....	42
Abbildung 26: Monatliche ASB-Outputmengen 2005 - 2006.....	43
Abbildung 27: ÖKK-Kunststoff-Rejecte.....	46
Abbildung 28: Beprobung des Reject-Haufens mit Hilfe einer Hebebühne.....	47
Abbildung 29: Probenahmebehälter mit den Abmessungen (L)54x(B)24x(T)35 cm für Reject- Haufen.....	48
Abbildung 30: Probenahmestellen des Reject-Haufens.....	48
Abbildung 31: Herstellung der Sammelprobe aus 14 qualifizierten Reject-Stichproben.....	49
Abbildung 32: Gefäße der Rejectproben.....	49
Abbildung 33: Heterogenität der Inputfraktionen (ÖKK-Fraktion).....	50

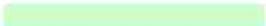
Abbildung 34: Probenahmestelle vor dem Austrag in das ASB-Outputlager .....	51
Abbildung 35: Probenahme mittels Schöpfkelle.....	52
Abbildung 36: Feines, trockenes und rieselförmiges Material am Ort der Probeentnahme ...	52
Abbildung 37: Hoher Styroporanteil bei der Magna Steyr Fraktion (links), Beimengungen von Schaumstoff und Füllmaterialien bei der ASA-Fraktion (rechts) .....	53
Abbildung 38: Probenverjüngung nach der ¼-Methode .....	53
Abbildung 39: Probennahmegefäße der Hauptfraktionen .....	54
Abbildung 40: Probenahmestelle mit Probenahmebehälter .....	56
Abbildung 41: Metallbehälter mit aufgesetztem Gitterrost (li.) zur Erfassung des Feinanteils (re.).....	56
Abbildung 42: Manuelle Sortierung der Abfallfraktionen .....	57
Abbildung 43: ASA-Restfraktion .....	57
Abbildung 45: Aussortierte Karton- (li.) und PVC-Fraktion (re.).....	58
Abbildung 46: Sb-Analysen ASB Seibersdorf 2005 - 2006 .....	60
Abbildung 47: Pb-Analysen ASB Seibersdorf 2005 – 2006.....	61
Abbildung 48: Monatlicher Sb-Anlagenoutput in kg .....	62
Abbildung 49: Monatlicher Pb-Anlagenoutput in kg .....	63
Abbildung 50: Sb-Konzentrationen der Hauptinputfraktionen .....	65
Abbildung 51: Pb-Konzentrationen der Hauptinputfraktionen .....	66
Abbildung 52: PET-Flaschenanteil der ASA- und Transbetonfraktion bei der Sortierung in kg .....	67
Abbildung 53: PET-Flaschenanteil der AEVG- und Thermomixfraktion bei der Sortierung in kg .....	68
Abbildung 54: PET-Flaschenanteil der Thermische Graz- und Thermische Wien-Fraktion bei der Sortierung in kg .....	68
Abbildung 55: PET-Flaschenanteil ÖKK-Fraktion bei der Sortierung in kg.....	68
Abbildung 56: M-%-Verteilung an PET-Flaschen in den Hauptfraktionen .....	69
Abbildung 59: Aussortierte PET-Verpackungen insbesondere PET-Getränkeflaschen.....	74
Abbildung 60: Farblich sortierte PET-Flaschen.....	74
Abbildung 61: Farbverteilung PET-Getränkeflaschen .....	75
Abbildung 62: Vorzerkleinerung der PET-Getränkeflaschen.....	76
Abbildung 63: Innenraum der Ultra-Zentrifugalmühle mit Rotorzähnen, engmaschigen Siebring und aufbereitetem PET-Granulat .....	76

Abbildung 64: Gemahlene PET-Granulat.....	77
Abbildung 65: Monatlicher bzw. jährlicher PET-Flaschenoutput getrennt nach Inputfraktionen .....	82
Abbildung 66: Preisentwicklung PET-Mehrweg natur .....	88
Abbildung 67: Preisentwicklung PET-Einweg natur .....	89
Abbildung 68: Preisentwicklung PET-Mehrweg hellblau .....	89
Abbildung 69: Preisentwicklung PET-Einweg bunt .....	90
Abbildung 70: Kunststoff-Flaschensortierung der Fa. TiTech .....	91
Abbildung 71: Hohlkörpersortierung nach vordefinierten Parametern (Farbe, Größe, Form)	92
Abbildung 72: Hohlkörpersortieranlage vom Typ Criterion der Fa. Binder .....	93
Abbildung 73: Hohlkörpersortieranlage mit Material- und Farberkennung der Fa. Binder .....	93
Abbildung 74: Einsatzgebiete von PET-Recyclingmaterial.....	96

## Anhang A

Tabelle 1: Schwermetallanalysen ASB 2005

Parameter	Dimension	80-Perzentil Grenzwert	Deckelung Grenzwert	Jän.05	Feb.05	Mär.05	Apr.05	Mai.05	Jun.05	Jul.05	Aug.05	Sep.05	Okt.05	Nov.05	Dez.05	Ø 2005
Feuchte	Gew-%			15,4	14,0	11,8	5,3	5,1	4,6	6,8	6,1	10,7	7,8	9,8	12,4	9,1
Heizwert	MJ/kg		20	18,1	23,5	23,8	25,1	25,2	23,2	23,8	25,8	23,8	24,3	22,6	22,2	23,4
Heizwert	MJ/kg TS			21,6	27,4	27,0	26,3	26,4	24,2	25,6	27,4	26,6	26,3	25,0	15,6	25,8
Chlor	Gew-%			0,43	0,84	1,01	1,17	0,91	1,39	0,71	0,87	0,87	1,10	0,64	1,35	0,9
As	mg/kg TS	10	15	14	2	5	2,0	8,0	4,0	11,0	3,0	3,0	4,0	3,0	2,0	5,1
Be	mg/kg TS			< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cd	mg/kg TS	15	25	2	3	4	8	14	7	3	6	6	3	6	18	6,7
Co	mg/kg TS	15	20	4	5	4	4	2	4	10	3	4	3	4	8	4,6
Cr	mg/kg TS	150	300	121	143	154	79	71	113	96	96	140	71	101	110	108
Cu	mg/kg TS	300	500	250	152	230	460	310	830	98	480	141	96	105	520	306
Hg	mg/kg TS	0,6	1	0,06	0,04	0,11	0,06	0,09	0,36	0,08	0,19	0,17	0,04	0,17	0,05	0,12
Mn	mg/kg TS	200	-	117	95	80	127	100	110	85	94	82	72	114	102	98
Ni	mg/kg TS	100	200	46	76	53	55	29	48	42	34	28	21	40	24	41
Pb	mg/kg TS	150	500	168	87	230	210	210	220	92	114	153	135	156	101	156
Sb	mg/kg TS	20	30	43	41	39	27	40	13	18	12	30	64	48	20	33
Sn	mg/kg TS	30	70	9	11	9	8	10	11	7	19	8	11	12	19	11,2
Zn	mg/kg TS			420	310	340	520	320	320	270	200	270	260	320	300	321
Tl	mg/kg TS	1,5	3	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
V	mg/kg TS	30	70	7	4	6	4	4	9	8	4	4	4	6	6	5,5

 = Wert kleiner gleich 80-Perzentil Grenzwert

 = Wert zwischen 80-Perzentil und Deckelung Grenzwert

 = Wert größer Deckelung Grenzwert

## Schwermetallanalysen ASB 2006

(Österr. Forschungszentrum Seibersdorf)

### Monatsmischproben ASB/Thermo Team

Parameter	Dimension	80-Perzentil Grenzwert	Maximal- wert	Jän.06	Feb.06	Mär.06	Apr.06	Mai.06	Jun.06	Jul.06	Aug.06	Sep.06	Okt.06	Nov.06	Dez.06	Ø 2006
Feuchte	Gew-%			16,5	17,0	10,2	9,8	7,3	7,7	6,9	9,2	13,6	12,2	9,0	11,5	10,9
Heizwert	kJ/kg			20.147	20.848	22.170	22.622	23.477	23.894	23.007	24.120	21.579	22.383	23.156	22.031	22.453
Heizwert	kJ/kg TS			24.331	25.321	24.676	25.067	25.244	25.805	24.619	26.519	25.088	25.538	25.415	24.935	25.213
Chlor feucht	Gew-%			0,93	1,05	1,21	0,78	1,58	0,97	1,26	0,89	0,94	1,29	1,26	1,22	1,12
As	mg/kg TS	10	15	2,6		1,8	1,1	1,9	0,9	1,2	0,8	1,3	1,5	1,3	1,3	1,4
Be	mg/kg TS			< 0,1		< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cd	mg/kg TS	15	25	2,4		1,6	1,4	14,0	4,0	9,3	3,3	7,5	9,6	5,0	3,2	5,6
Co	mg/kg TS	15	20	3,0		1,8	5,3	7,5	3,3	4,4	4,8	4,5	3,9	3,6	5,3	4,3
Cr	mg/kg TS	150	300	93		37	115	73	109	97	97	76	157	102	153	101
Cu	mg/kg TS	300	500	590		144	1100	520	180	1000	880	1260	600	1200	1400	807
Hg	mg/kg TS	0,6	1	0,08		0,08	0,05	0,14	0,04	0,38	0,06	0,12	0,04	0,11	0,07	0,11
Mn	mg/kg TS	200	-	114		55	117	92	102	131	114	129	116	91	121	107
Ni	mg/kg TS	100	200	26		13	20	23	22	48	26	29	26	31	57	29
Pb	mg/kg TS	150	500	165		194	400	194	98	117	220	158	150	136	210	186
Sb	mg/kg TS	20	30	77		30	63	52	140	42	14	81	122	54	41	65
Sn	mg/kg TS	30	70	21,0		6,2	12,0	22,0	14,0	15,0	111	26,0	11,0	25,0	23,0	26,0
Zn	mg/kg TS			320		141	420	320	360	420	410	510	420	810	670	436
Tl	mg/kg TS	1,5	3	0,05		0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
V	mg/kg TS	30	70	4,6		2,7	4,6	4,5	6,5	4,9	5,2	6,5	7,5	4,2	4,6	5,1

 = Wert kleiner gleich 80-Perzentil Grenzwert  
 = Wert zwischen 80-Perzentil- und Maximalwert  
 = Wert größer Maximalwert

## Anhang B

Tabelle 1: Auswertung der Sortieranalyse hinsichtlich des Monats- bzw. Jahresoutputs an Papier und Karton

Hauptgruppe	Fraktion	Materialinput 2006 in kg				Monats-Ø in kg	kg Papier				Monats-Ø in kg	Jahres-Ø in kg
		April	Mai	Juni	Oktober		April	Mai	Juni	Oktober		
440010 MBA	ASA	269.640	244.420	151.620	406.580	268.065	2.194	1.989	1.234	3.308	2.181	26.174
440020 Gewerbe	ASA (Transbeton)	167.840	247.260	186.820	129.520	182.860	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Rieger	60.380	105.400	0	22.400	47.045	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	AEVG-EBG	301.000	374.840	361.000	174.320	302.790	19.170	23.872	22.991	11.102	19.284	231.402
	Thermische Graz	433.220	433.700	345.320	995.740	551.995	7.157	7.165	5.705	16.450	9.119	109.433
	Thermische Wien	715.000	633.660	698.940	378.340	606.485	29.875	26.476	29.204	15.808	25.341	304.090
	Schlagler	96.600	122.680	122.200	22.160	90.910	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Transbeton	316.280	237.640	133.960	51.160	184.760	3.348	2.515	1.418	541	1.956	23.466
	Rest	141.340	169.640	162.680	242.440	179.025	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Gesamt	2.231.660	2.324.820	2.010.920	2.016.080	2.145.870	59.549	60.029	59.317	43.902	55.699	668.392
150360 OKK	OKK	668.540	1.027.300	1.001.640	1.028.920	931.600	6.557	10.076	9.824	10.092	9.137	109.647
10060 Thermomix	Thermomix	341.040	274.280	297.780	299.940	303.260	5.786	4.654	5.052	5.089	5.145	61.742
	Summe	5.742.540	6.195.640	5.472.880	5.767.600	5.794.665	133.636	136.776	134.745	106.293	127.862	1.534.347

Hauptgruppe	Fraktion	Materialinput 2006 in kg				Monats-Ø in kg	kg Karton				Monats-Ø in kg	Jahres-Ø in kg
		April	Mai	Juni	Oktober		April	Mai	Juni	Oktober		
440010 MBA	ASA	269.640	244.420	151.620	406.580	268.065	2.444	2.215	1.374	3.685	2.430	29.155
440020 Gewerbe	ASA (Transbeton)	167.840	247.260	186.820	129.520	182.860	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Rieger	60.380	105.400	0	22.400	47.045	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	AEVG-EBG	301.000	374.840	361.000	174.320	302.790	10.793	13.441	12.945	6.251	10.857	130.289
	Thermische Graz	433.220	433.700	345.320	995.740	551.995	9.313	9.323	7.423	21.405	11.866	142.393
	Thermische Wien	715.000	633.660	698.940	378.340	606.485	46.738	41.421	45.688	24.731	39.644	475.732
	Schlagler	96.600	122.680	122.200	22.160	90.910	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Transbeton	316.280	237.640	133.960	51.160	184.760	9.772	7.342	4.139	1.581	5.709	68.502
	Rest	141.340	169.640	162.680	242.440	179.025	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Gesamt	2.231.660	2.324.820	2.010.920	2.016.080	2.145.870	76.616	71.527	70.195	53.968	68.076	816.916
150360 OKK	OKK	668.540	1.027.300	1.001.640	1.028.920	931.600	42.767	65.718	64.076	65.821	59.596	715.148
10060 Thermomix	Thermomix	341.040	274.280	297.780	299.940	303.260	8.264	6.646	7.215	7.268	7.348	88.177
	Summe	5.742.540	6.195.640	5.472.880	5.767.600	5.794.665	206.706	217.633	213.055	184.709	205.526	2.466.312

Tabelle 2: Auswertung der Sortieranalyse hinsichtlich dem Monats- bzw. Jahresoutput an PET und PVC

Hauptgruppe	Fraktion	Materialinput 2006 in kg				Monats-Ø in kg	kg PET			Monats-Ø in kg	Jahres-Ø in kg	
		April	Mai	Juni	Oktober		April	Mai	Juni			Oktober
440010 MBA	ASA	269.640	244.420	151.620	406.580	268.065	1.538	1.394	865	2.319	1.529	18.344
	ASA (Transbeton)	167.840	247.260	186.820	129.520	182.860	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Rieger	60.380	105.400	0	22.400	47.045	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
440020 Gewerbe	A.E.V.G.-EBG	301.000	374.840	361.000	174.320	302.790	3.629	4.520	4.353	2.102	3.651	43.812
	Thermische Graz	433.220	433.700	345.320	995.740	551.995	8.126	8.135	6.477	18.676	10.353	124.240
	Thermische Wien	715.000	633.660	698.940	378.340	606.485	16.213	14.368	15.849	8.579	13.752	165.025
	Schlagler	96.600	122.680	122.200	22.160	90.910	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Transbeton	316.280	237.840	133.960	51.160	184.760	2.326	1.747	985	376	1.359	16.303
Rest	141.340	169.840	162.680	242.440	179.025	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
Gesamt		2.231.660	2.324.820	2.010.920	2.016.080	2.145.870	30.293	28.770	27.663	29.733	29.115	349.381
150360 ÖKK	ÖKK	668.540	1.027.300	1.001.640	1.028.920	931.600	38.700	59.468	57.983	59.562	53.929	647.142
10060 Thermomix	Thermomix	341.040	274.280	297.780	299.940	303.260	5.428	4.366	4.740	4.774	4.827	57.923
	Summe	5.742.540	6.195.640	5.472.880	5.767.600	5.794.665	106.253	122.768	118.914	126.121	118.514	1.422.171

Hauptgruppe	Fraktion	Materialinput 2006 in kg				Monats-Ø in kg	kg PVC			Monats-Ø in kg	Jahres-Ø in kg	
		April	Mai	Juni	Oktober		April	Mai	Juni			Oktober
440010 MBA	ASA	269.640	244.420	151.620	406.580	268.065	495	449	278	746	492	5.906
	ASA (Transbeton)	167.840	247.260	186.820	129.520	182.860	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Rieger	60.380	105.400	0	22.400	47.045	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
440020 Gewerbe	A.E.V.G.-EBG	301.000	374.840	361.000	174.320	302.790	484	615	592	266	497	5.962
	Thermische Graz	433.220	433.700	345.320	995.740	551.995	5.893	5.890	4.889	13.522	7.486	89.951
	Thermische Wien	715.000	633.660	698.940	378.340	606.485	12.258	10.864	11.983	6.486	10.398	124.774
	Schlagler	96.600	122.680	122.200	22.160	90.910	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	Transbeton	316.280	237.840	133.960	51.160	184.760	2.835	2.130	1.201	459	1.656	19.872
Rest	141.340	169.840	162.680	242.440	179.025	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	
Gesamt		2.231.660	2.324.820	2.010.920	2.016.080	2.145.870	21.470	19.498	18.465	20.753	20.047	240.560
150360 ÖKK	ÖKK	668.540	1.027.300	1.001.640	1.028.920	931.600	825	1.267	1.236	1.269	1.149	13.792
10060 Thermomix	Thermomix	341.040	274.280	297.780	299.940	303.260	1.817	1.461	1.587	1.588	1.616	19.389
	Summe	5.742.540	6.195.640	5.472.880	5.767.600	5.794.665	46.077	42.174	40.031	45.120	43.351	520.207

### ASA-Sortierung

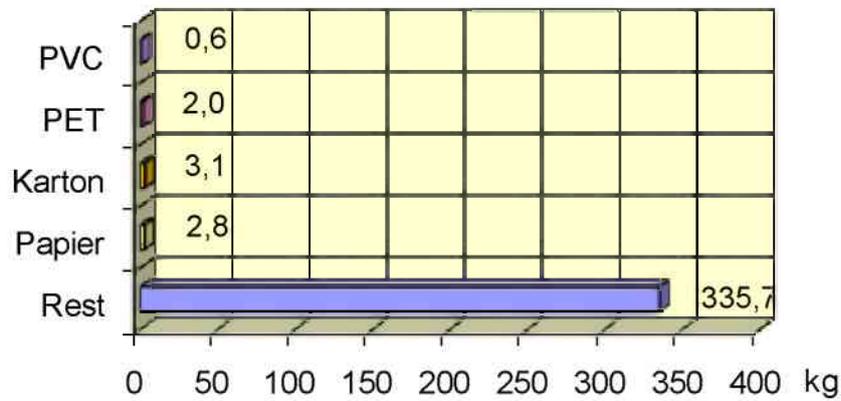


Abbildung 1: ASA-Sortierergebnis in kg

### Transbeton-Sortierung

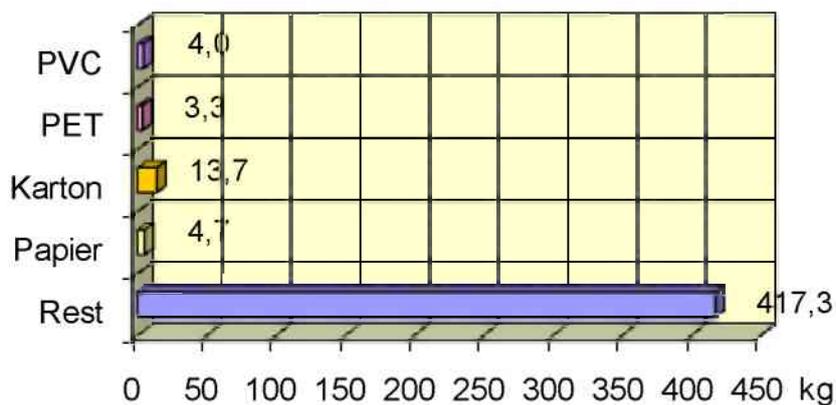


Abbildung 2: Transbeton-Sortierergebnis in kg

### Thermische Graz-Sortierung

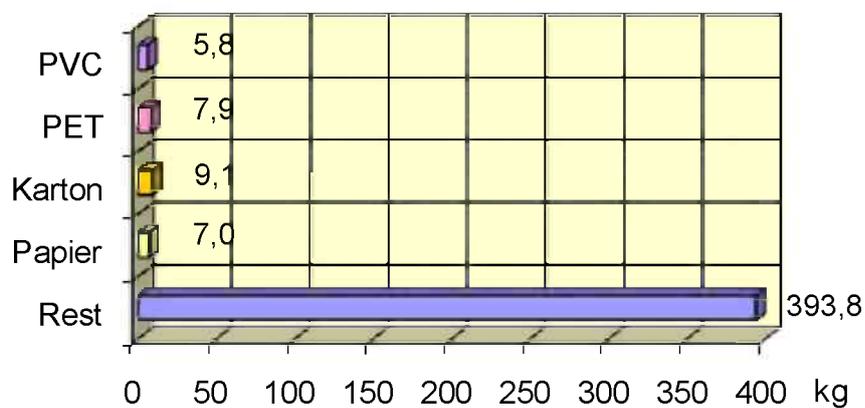


Abbildung 3: Thermische Graz-Sortierergebnis in kg

### Thermische Wien-Sortierung

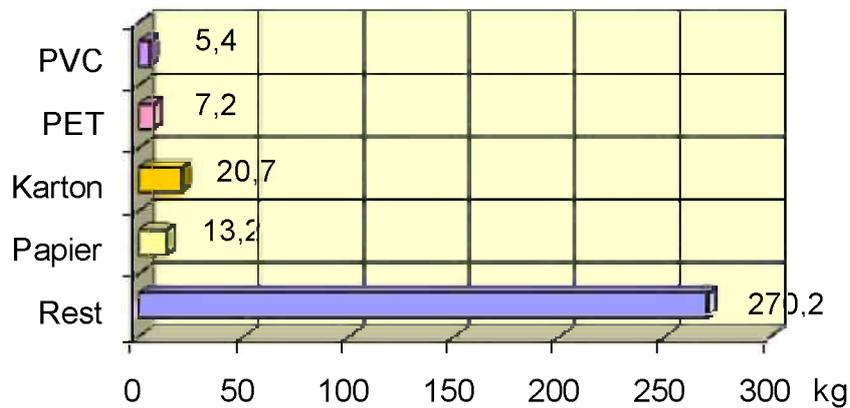


Abbildung 4: Thermische Wien-Sortierergebnis in kg

### ÖKK-Sortierung

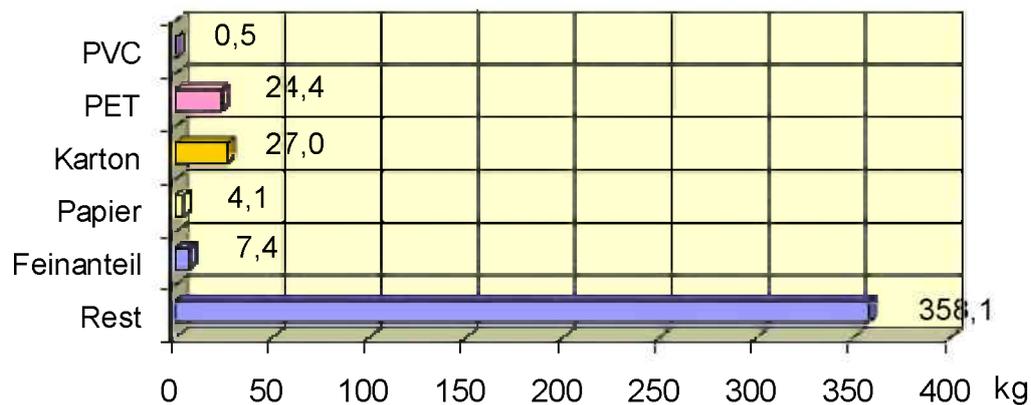


Abbildung 5: ÖKK-Sortierergebnis in kg

### AEVG-Sortierung

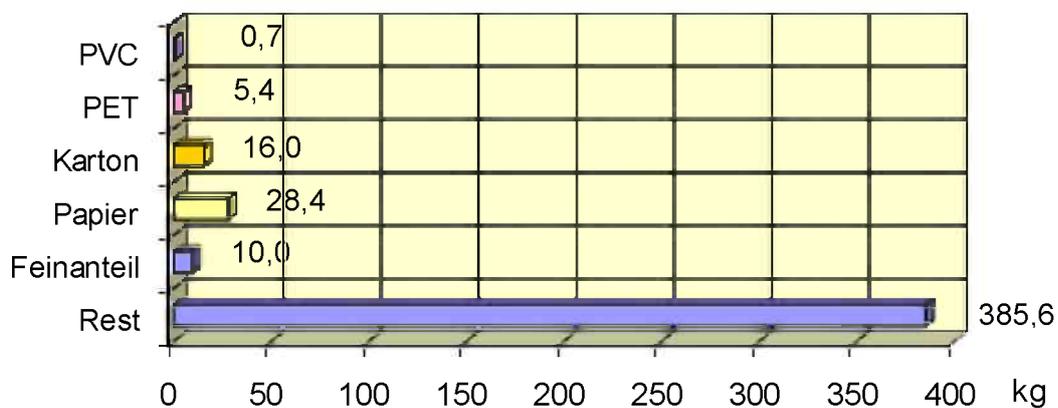


Abbildung 6: AEVG-Sortierergebnis in kg

### Thermomix-Sortierung

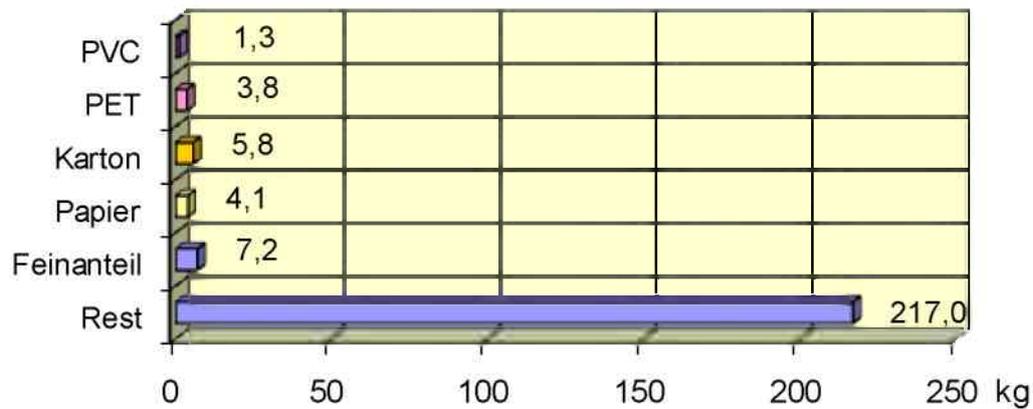


Abbildung 7: Thermomix-Sortierergebnis in kg

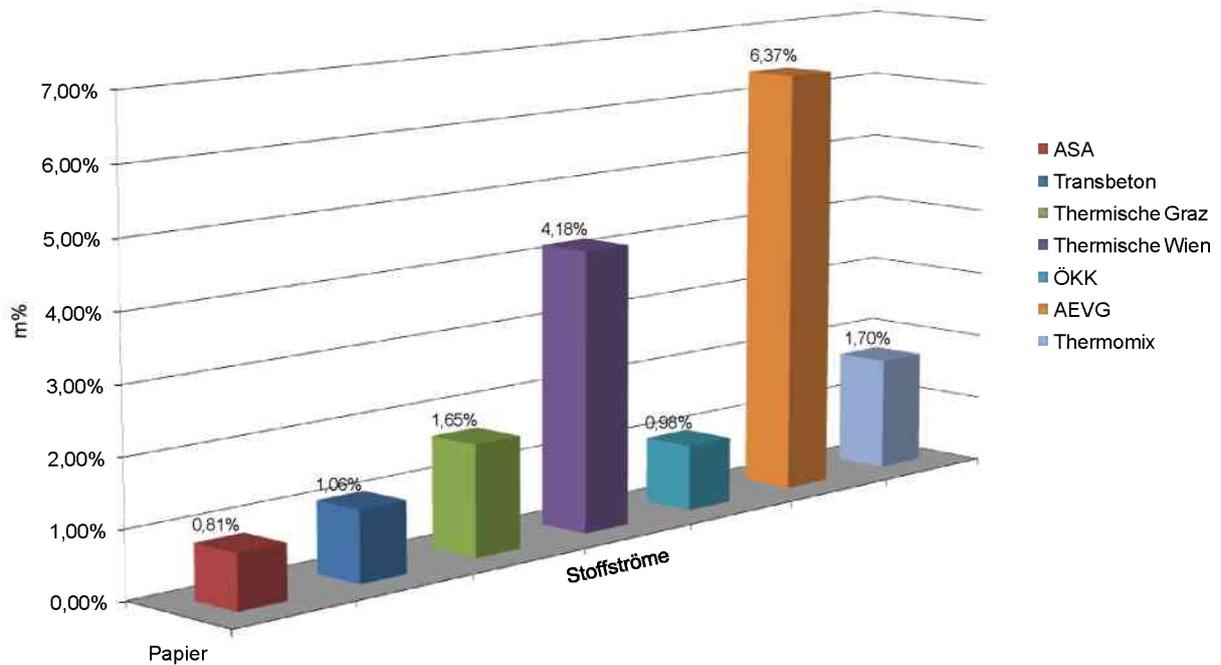


Abbildung 8: Papier-Massenverteilung in den Hauptfraktionen

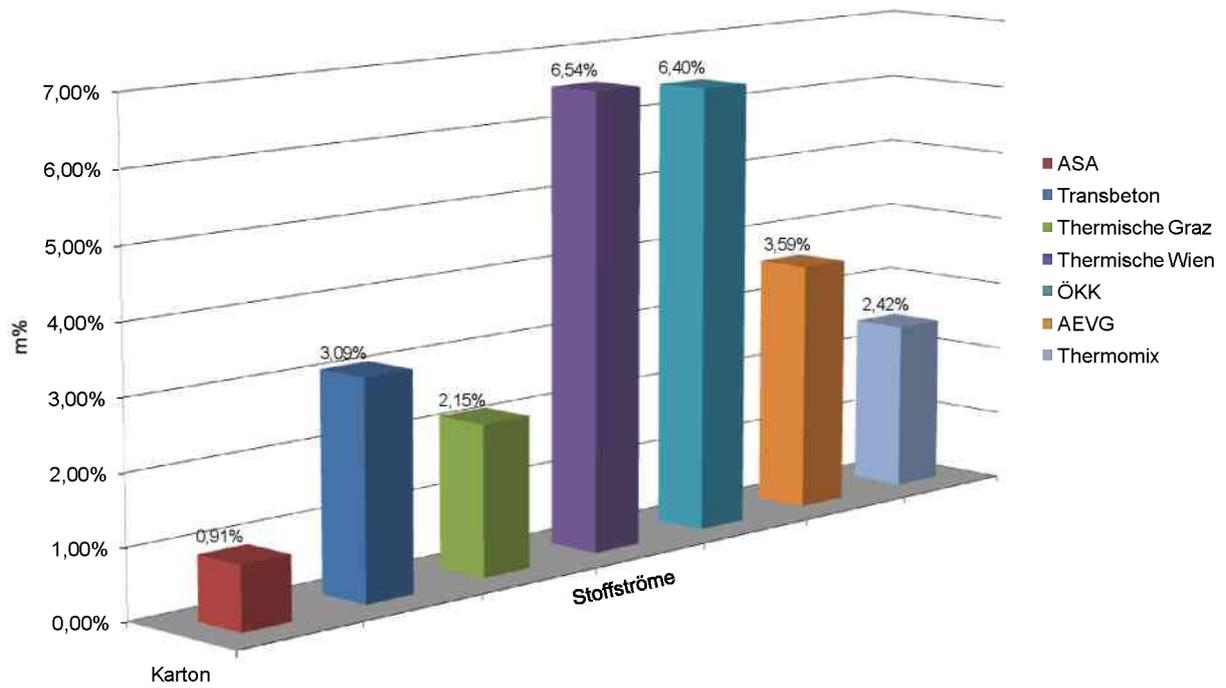


Abbildung 9: Karton-Massenverteilung in den Hauptfraktionen

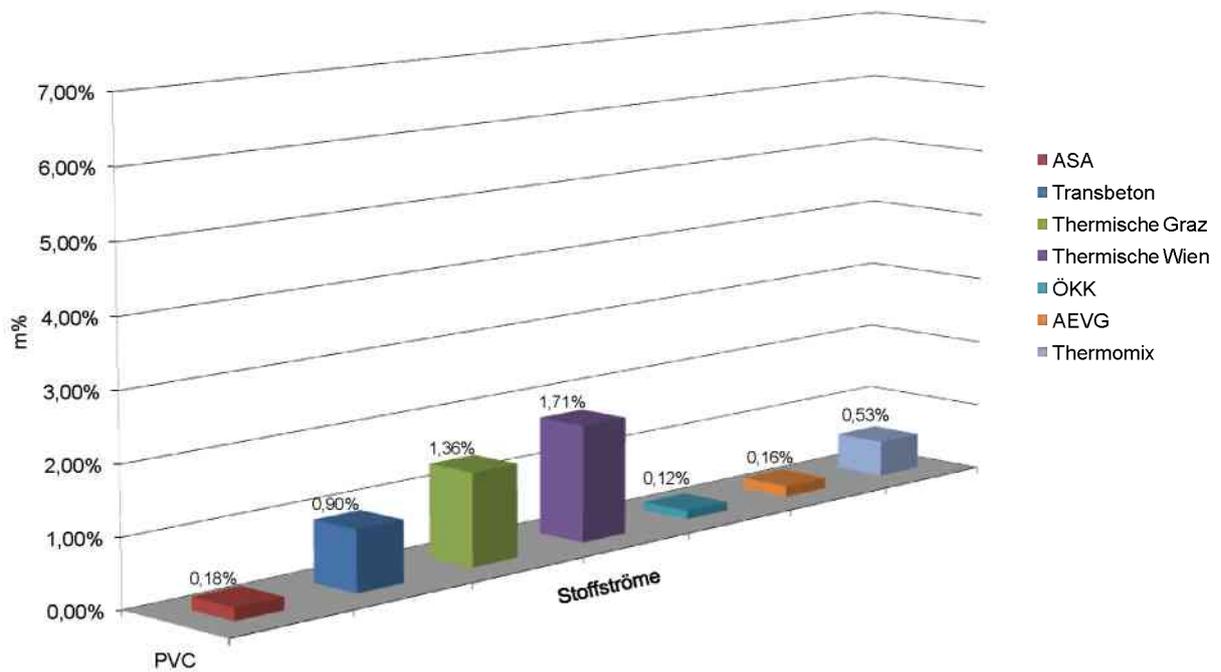


Abbildung 10: PVC-Massenverteilung in den Hauptfraktionen

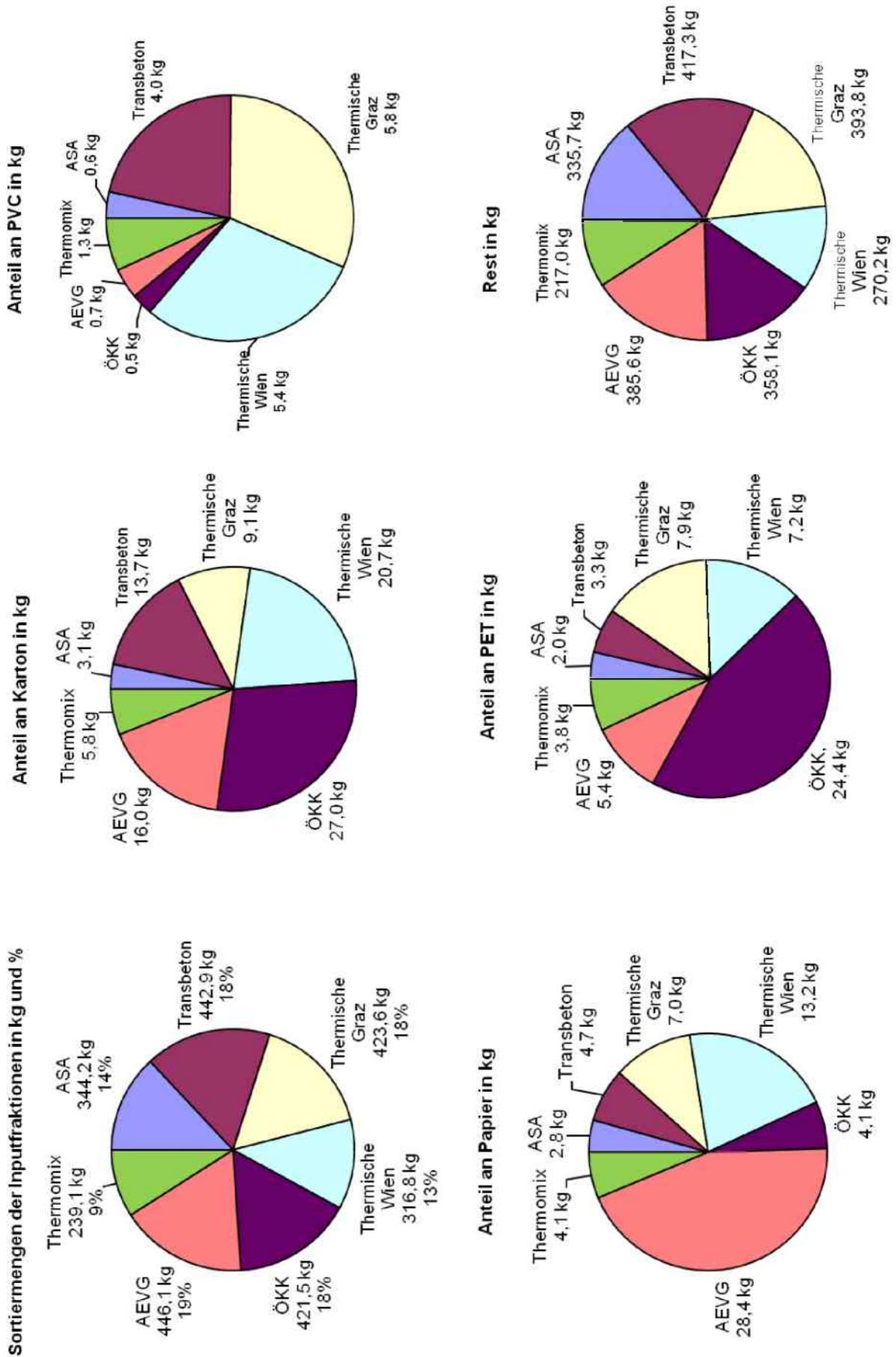


Abbildung 11: Grafische Gesamtauswertung aller sortierten Hauptinputfraktionen