

# Schwermetallentfrachtung am Limit

## Stoffflußanalyse zeigt Grenzen der mechanischen Restabfallaufbereitung im Hinblick auf die selektive Abtrennung und Konzentrierung von Schwermetallen und Chlor

Von Barbara Zeschmar-Lahl

Schwermetalle oder Chlor sind in verschiedenen Gütern wie zum Beispiel PVC (Chlor, Cadmium), Batterien (Blei, Nickel, Cadmium) oder Elektronikschrott (diverse) vorhanden. Mit einfachen mechanischen Techniken der Abfallaufbereitung wie Zerkleinern, Sieben, Magnetscheidung und Wirbelstromscheidung ist es nicht möglich, diese Stoffe selektiv abzutrennen und in einzelnen Outputströmen zu konzentrieren. Diese einfachen Techniken sondern nach mechanisch-physikalischen und nicht nach chemischen Eigenschaften aus. Nur in Einzelfällen wie der Batterieausschleusung im Rahmen der Metallabscheidung überschneiden sich diese Eigenschaften. Aber auch dieser Austrag ist, wie zum Beispiel beim Cadmium, nicht vollständig. Immer noch verbleiben beachtliche Mengen Cadmium in den anderen Outputmaterialien. Auch die anderen Schwermetalle werden auf unterschiedliche Outputströme wie heizwertreiche Leichtfraktion (Cadmium, Quecksilber, Kupfer und Zink) oder Schwerfraktion (Blei) verteilt. Dies ist das Ergebnis der Stoffflußanalyse an einer mechanischen Aufbereitungsanlage für Restabfall in Österreich.

Gemäß nationalem Klimaschutzprogramm vom 18. Oktober 2000 soll die CO<sub>2</sub>-Emission in Deutschland bis 2005 um 25 Prozent gegenüber 1990 gemindert werden. Die Maßnahmen im Bereich Siedlungsabfälle sollen dabei zu einer Reduzierung der Methanemissionen um 15 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente führen. Erreicht werden soll dies insbesondere durch die Umsetzung der Abfallablagerungsverordnung (AbfAbV): Spätestens ab 2005 dürfen nur noch Abfälle abgelagert werden, die das Erreichen der Emissionsminderungspotentiale bei Treibhausgasen nicht gefährden. Die

AbfAbV begrenzt daher den Organikgehalt im Deponiegut und verlangt, daß eine heizwertreiche Fraktion vor der Deponierung abgetrennt wird.

In anderen EU-Mitgliedsstaaten wie Österreich oder den Niederlanden wird das faktische Ablagerungsverbot organikhaltiger Abfälle noch durch finanzielle Anreize wie eine Deponieabgabe verstärkt.

### Der Markt für Ersatzbrennstoffen aus Siedlungsabfall

Die thermische Behandlung von Siedlungsabfall – vor allem Müllverbrennung – führt zu Reststoffen, welche die Anforderungen an den Organikgehalt von Deponiegut und an die Reststoffe gemäß § 4 der 17. BImSchV (novelliert) einhalten können. Nicht-thermische Verfahren setzen auf eine Trocknung und Stabilisierung des von Metallen und Inertien entfrachteten Siedlungsabfalls, zum Beispiel die Trockenstabilisierung, oder erzeugen neben der abgetrennten heizwertreichen Fraktion eine weitere Fraktion, die nach biologischer Behandlung (Rotte, Vergärung) deponiert werden darf. Den nicht-thermischen Verfahren ist gemeinsam, daß sie thermische Kapazitäten für die abgetrennte oder erzeugte Brennstofffraktion benötigen. Dieser Bedarf wird allein für Deutschland auf 4 bis 8 Millionen Tonnen pro Jahr (Mio. t/a) geschätzt<sup>39</sup>.

Als Abnehmer stehen die konventionellen Müllverbrennungsanlagen zur Verfügung. Probleme können wegen des höheren Heizwertes der Brennstofffraktion auftreten, denn dadurch sinkt die Durchsatzkapazität. Stark zerkleinertes Material kann wegen seiner geringen Korngröße insbesondere bei Monoverbrennung durch den Rost der Feuerung fallen und im Kessel zu Anbackungen führen. Die Annahmepreise von Müllver-

brennungsanlagen bewegen sich derzeit im Bereich von 100 bis 400 Euro pro Tonne (EUR/t) und sind daher wenig attraktiv.

Zu den anderen potentiellen Abnehmern zählen industrielle Feuerungen und Zementwerke. Diese haben je nach nationaler Umsetzung der EG-Verbrennungsrichtlinie ab einem bestimmten Mindestanteil von Ersatzbrennstoffen an der Feuerungswärmeleistung schärfere Emissionsgrenzwerte im Abgas einzuhalten als bei ausschließlichem Einsatz von Regelbrennstoffen. Hinzu kommen auch hier Anforderungen aus der Anlagentechnik wie Stückigkeit, Störstoffgehalt, Chlorgehalt, und der Produktqualität, zum Beispiel Chlorgehalt im Zement.

Für Betreiber von Feuerungsanlagen und Zementwerken ist es aus ökonomischer Sicht interessant, Ersatzbrennstoffe einzusetzen. Während Regelbrennstoffe zugekauft werden müssen, ist der Entsorgungsdruck für Ersatzbrennstoffe aus Siedlungsabfällen derzeit so hoch, daß die Erzeuger für die Abnahme dieses Materials in der Regel zwischen 50 bis 100 Euro pro Tonne zu zahlen müssen. Andererseits sind die Abnehmer von Ersatzbrennstoffen daran interessiert, keine Risiken für den Betrieb der Anlage oder für die Vermarktung der erzeugten Produkte (Klinker, Zement) oder verwertbaren Reststoffe (Steinkohleflugasche für Betonherstellung) einzugehen. Als Lösung zeichnet sich eine Qualitätssicherung für Ersatzbrennstoffe ab.

### Qualitätssicherung für Ersatzbrennstoffe

Seit rund zehn Jahren gibt es in Europa verschiedene Ansätze für eine Qualitätssicherung von Ersatzbrennstoffen.

Bereits 1993 hatte in der Schweiz (kein EU-Mitglied) das Bundesamt für Umwelt, Wald

und Landschaft (BUWAL) eine Arbeitsgruppe „Abfälle in Zementwerken“ mit Vertretern der Kantone, der Zementindustrie, der Abfallwirtschaft, Umweltorganisationen und Eidgenössischen Forschungsanstalten eingesetzt. Aus deren Berichten von 1994<sup>23</sup> und 1997<sup>21</sup> sowie den Folgediskussionen wurde die BUWAL-Richtlinie Entsorgung von Abfällen in Zementwerken entwickelt. Der Entwurf wurde im März 1996<sup>5</sup> an interessierte Kreise zur Stellungnahme versandt. Im April 1998 wurde die Richtlinie in der endgültigen Fassung veröffentlicht<sup>6</sup>. Sie enthält drei zentrale Elemente:

- Positivlisten für den Einsatz von Abfällen in Zementwerken
- Richtwerte für maximale Schadstoffkonzentrationen in Abfällen
- Richtwerte für den Schadstoffgehalt in Klinker.

Der Einsatz heizwertreicher Fraktionen aus Restabfall ist von der energetischen Verwertung im Zementwerk ausgeschlossen.

Bereits im Jahre 1997 hatte das Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen Richtwerte für Abfälle und Ersatzbrennstoffe<sup>36, Tafel V-1</sup> vorgeschlagen, die das Bundesumweltministerium für die Unterscheidung von Verwertung und Beseitigung herangezogen hat. Die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA)<sup>15</sup> hat 1997 eine Übernahme und Verschärfung dieser Werte insbesondere für Quecksilber diskutiert, diese Richtwerte aber nie offiziell verabschiedet. Der Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) hatte bereits die nordrhein-westfälischen Richtwerte kritisiert, weil die in deutschen Zementwerken eingesetzten Ersatzbrennstoffe diese Werte zum Teil deutlich überschritten<sup>36, S. 55</sup>.

1999 gründete sich die Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe (BGS). Sie hat sich die Gütesicherung von Ersatzbrennstoffen zum Ziel gesetzt und ein eigenes Gütezeichen – RAL-Gütezeichen GZ 724 – entwickelt<sup>7</sup>. Damit will sie unter anderem eine zunehmende Akzeptanz für Herstellung und Einsatz von gütegesicherten, von ihr so bezeichneten Sekundärbrennstoffen erreichen.

In Italien hat das Umweltministerium vom Februar 1998 Anforderungen an hochkalorische Fraktionen durch Verordnung festgelegt<sup>17</sup>. Die hochkalorische Fraktion aus Abfällen kann in hierauf spezialisierten Anlagen eingesetzt oder in Industrieanlagen mitverbrannt werden, wobei bestimmte massenbezogene Grenzwerte – Obergrenzen – zum Beispiel für Chlor und Schwermetalle einzuhalten sind. Der Einsatz dieser Fraktion ist bei den jeweiligen Provinzregierungen zu notifizieren.

In Finnland hat das nationale Normungsinstitut Grenzwerte für hochkalorische Fraktionen erarbeitet<sup>29</sup>, wobei der Luftpfad und die Sicherheit der Industrieanlage im Mittelpunkt standen. Der finnische Standard aus dem Jahr 2000 definiert drei unterschiedliche Klassen an hochkalorischen Fraktionen entsprechend den vorgesehenen Verwertungszielpfaden. Die Grenzwerte für unter anderem Chlor, Cadmium und Quecksilber sind massenbezogen festgelegt.

Die Schadstoffobergrenzen der verschiedenen Listen, die derzeit diskutiert und teilweise auch schon angewendet werden, liegen für mehrere Elemente um eine Größenordnung und mehr auseinander (siehe Tabelle 1). Die Werte der verschiedenen Listen wurden dabei einheitlich auf einen Heizwert von 16.000 Megajoule pro Tonne (MJ/t) umgerechnet. So streuen die Werte für Antimon, Cadmium und Quecksilber weit. Jene Listen, die vorrangig unter dem Gesichtspunkt der Begrenzung des Schadstoffeintrags auf das Niveau der Anwendung von Regeleinsatzstoffen erstellt wurden, zum Beispiel BUWAL- oder LAGA-Liste, sind deutlich von denen zu unterscheiden, die von Seiten der potentiellen Vermarkter und Verwerter erstellt wurden, wie das RAL-GZ 724<sup>7</sup> oder die Positivliste der österreichischen Zementindustrie (VÖZ)<sup>37</sup>.

Im Jahr 2002 hat das Europäische Komitee für Normung (CEN) von der EU-Kommission das Mandat erhalten, für den Einsatz von Ersatzbrennstoffen (sogenannten Solid Recovered Fuels, SRF) zwecks Energierückgewinnung in Verbrennungs- und Mitverbrennungsanlagen einen Satz Technischer Spezifikationen zu erarbeiten und diese in einem zweiten Schritt in Europäische Standards zu überführen. Die Arbeiten führt das Technical Committee (TC) 343 des CEN durch. Derzeit wird über die Frage der Schadstoffbegrenzung im TC und in den einzelnen Working Groups intensiv diskutiert.

Die Gütesicherung und Kennzeichnung von Ersatzbrennstoffen aus nicht gefährlichen Abfällen ebenso wie die begonnene internationale Standardisierung von Solid Recovered Fuels (SRF) verfolgt mehrere Ziele:

- freie Handelbarkeit des Ersatzbrennstoffes, bis hin zur Entlassung aus dem Abfallregime
- Erhöhung der Akzeptanz des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen in Feuerungsanlagen

gen und Zementwerken durch Qualitätssicherung

- Verdrängung von fossilen Brennstoffen in Feuerungsanlagen und Zementwerken, um die klimapolitischen Ziele (Reduktion der Emission von klimarelevantem CO<sub>2</sub>) zu erreichen
- je nach nationaler Umsetzung der RES-E-Richtlinie<sup>8</sup>: Befreiung von Steuern/Abgaben oder Zugriff auf die Vergütung für Strom, der aus im Ersatzbrennstoff enthaltener oder daraus abgetrennter Biomasse erzeugt wurde.

## Stoffflußanalyse (SFA) für die Ersatzbrennstoffherzeugung in einer mechanischen Restabfallaufbereitungsanlage

Restabfall ist eine Schadstoffsene. Daher gelten für Abfallverbrennungsanlagen europaweit schärfere Anforderungen als für industrielle Feuerungsanlagen und Zementwerke beim ausschließlichen Einsatz von Regelbrennstoffen. Die Aufbereitung von Siedlungs- oder Restabfall zu Ersatzbrennstoffen muß sich insbesondere dem Problem der im Restabfall vorhandenen Belastung mit Chlor und Schwermetallen stellen.

Bislang sind nur vereinzelt Stoffflußanalysen an mechanisch-biologischen Restabfallbehandlungsanlagen publiziert worden. Das Aufbereitungsziel der bilanzierten Anlagen bestand in allen Fällen in der Erzeugung eines Deponiegutes durch Rotte und nicht in der Erzeugung eines Ersatzbrennstoffes.

Im Sommer und Herbst 2002 hat die Autorin eine Stoffflußanalyse an einer mechanischen Aufbereitungsanlage für Restabfall in Österreich im Auftrag des Betreibers durchgeführt<sup>38</sup>. Diese Stoffflußanalyse zeigt die Verteilung der Schadstoffe auf die

|             | LAGA        | BUWAL | RAL GZ EBS aus Siedlungsabfall | RAL GZ EBS aus Gewerbeabfall | Italien     | VÖZ EBS aus Siedlungsabfall | Abstand Min-Max (Faktor) |
|-------------|-------------|-------|--------------------------------|------------------------------|-------------|-----------------------------|--------------------------|
| Grenze      | Maximalwert |       | 80. Perzentil                  |                              | Maximalwert |                             |                          |
| Element     | mg/MJ       | mg/MJ | mg/MJ                          | mg/MJ                        | mg/MJ       | mg/MJ                       |                          |
| Antimon     | 0,07        | 0,2   | 3,8                            | 2,4                          | –           | 1,3                         | 54                       |
| Arsen       | 1,9         | 0,6   | 0,8                            | 0,56                         | 0,6         | 0,9                         | 3                        |
| Beryllium   | –           | 0,20  | 0,13                           | 0,08                         | –           | –                           | 3                        |
| Blei        | 10          | 8     | –                              | 8                            | 12,5        | 31,3                        | 8                        |
| Cadmium     | 0,3         | 0,08  | 0,6                            | 0,4                          | 0,4         | 1,7                         | 21                       |
| Chrom       | 3,7         | 4     | –                              | 4,8                          | 6,3         | 18,8                        | 5                        |
| Kobalt      | 1,2         | 0,8   | 0,8                            | 0,48                         | –           | 6,3                         | 13                       |
| Kupfer      | 3,7         | 4     | –                              | –                            | 18,8        | 31,3                        | 8                        |
| Mangan      |             |       | 31,3                           | 4                            | 25          | –                           | 8                        |
| Nickel      | 3,5         | 4     | 10                             | 2                            | 2,5         | 12,5                        | 6                        |
| Quecksilber | 0,02        | 0,02  | 0,08                           | 0,048                        | 0,4         | 0,6                         | 31                       |
| Selen       | –           | 0,2   | 0,3                            | 0,24                         | –           | –                           | 2                        |
| Thallium    | 0,15        | 0,12  | 0,13                           | 0,24                         | –           | 0,6                         | 5                        |
| Vanadium    | –           | 4     | 1,6                            | 0,08                         | –           | 6,3                         | 78                       |
| Zink        | –           | 16    | k. A.                          | 1,04                         | 31,3        | 63                          | 60                       |
| Zinn        | 0,4         | 0,4   | 4,4                            | 2,8                          | –           | 4,4                         | 11                       |

Tabelle 1: Vergleich der Obergrenzen verschiedener Vorschläge zur Begrenzung des Schadstoffgehaltes in Ersatzbrennstoffen; alle Werte einheitlich berechnet für einen Hu von 16.000 MJ/t

einzelnen Outputpfade und erlaubt Aussagen über Möglichkeiten zur Steuerung der Schadstoffflüsse durch Aufbereitungstechniken.

## Beschreibung der Aufbereitungsanlage

Die Sortier- und Aufbereitungsanlage für Haus- und Sperrmüll – mechanische Abfallaufbereitungsanlage – ist mit Unterbrechungen seit Februar 2002 in Betrieb<sup>34</sup>. Ziel der Aufbereitung mit der derzeit installierten Technik ist die Erzeugung einer heizwertreichen Fraktion zur energetischen Verwertung in einem Wirbelschichtofen. Diese Anlage befindet sich derzeit im Bau und soll im Herbst 2003 ihren Betrieb aufnehmen. Um im Wirbelschichtofen eingesetzt werden zu können, muß die erzeugte heizwertreiche Fraktion weitgehend frei sein von metallischen Bestandteilen, eine Stückgröße im Bereich von 50 bis 250 mm und einen ein Heizwert von mindestens 11.000 MJ/t aufweisen.

Die Abfallaufbereitung besteht aus folgenden Schritten:

1. Annahme der Restabfälle und Beschickung der Schubbodenförderer (Walking Floor)
2. Dosierung des Abfallgemisches auf die Steigplattenbänder vor den Zerkleinerern
3. Vorzerkleinerung mit einer Rotorschere
4. Klassierung I mit Trommelsieben mit 50 mm Rundloch (2 Linien)
  - Fraktion kleiner 50 mm (Siebdurchgang I, Schwerfraktion)
    - Vereinigung der Fraktionen kleiner 50 mm aus beiden Linien zu einem Materialstrom
    - Abscheidung der Eisenmetallschrotte aus der Kornklasse kleiner 50 mm mit Überband- und nachgeschaltetem Kopftrommelmagnet
    - Abscheidung der Nichteisenmetallschrotte aus der Kornklasse kleiner 50 mm mit einem Wirbelstromscheider
    - Abwurf der Schwerfraktion in einen Verladebunker
  - Fraktion größer 50 mm (Siebüberlauf I) zur Klassierung II
5. Klassierung II des Siebüberlaufs größer 50 mm mit Trommelsieben mit 250 mm Rundloch (2 Linien)
  - Fraktion 50 bis 250 mm (Siebdurchgang II, Leichtfraktion)
    - je Linie: Abscheidung der Eisenmetallschrotte mit Überbandmagneten
    - je Linie: Abscheidung der Nichteisenmetallschrotte mit Wirbelstromscheidern
    - Verpressung der aufbereiteten Kornklasse 50 bis 250 mm aus beiden Linien durch eine Kanalballenpresse; optional: Umwicklung der Ballen mit Folie zur Verbesserung der Langzeitlagerfähigkeit
  - Fraktion größer 250 mm (Siebüberlauf II)
    - Abwurf der Kornklasse größer 250 mm in einen offenen Container und Transport zur Müllverbrennungsanlage oder Rückführung in ein Segment des Tiefbunkers.

## Erzeugte Materialströme

Mit der Anlage werden folgende Fraktionen erzeugt:

- eine Leichtfraktion 50 bis 250 mm
- eine Schwerfraktion kleiner 50 mm
- eine Grobfraktion größer 250 mm
- eine eisenhaltige Schrottfraktion (Fe)
- eine nichteisenmetallhaltige Schrottfraktion (NE)

Die Leichtfraktion wird derzeit in Ballen verpreßt und anteilig in einer Müllverbrennungsanlage unter Gewinnung von Strom und Fernwärme verbrannt. Anteilig werden die Leichtfraktion-Ballen noch mit Kunststoffolie umwickelt und für die spätere energetische Verwertung im Wirbelschichtofen auf einer Deponie zwischengelagert. Zukünftig sollen die Ballenpressung und Folierung entfallen. Statt dessen soll das Material in Preßcontainer verladen und direkt an den Wirbelschichtofen geliefert werden.

Die Schwerfraktion wird in einen Verladebunker abgeworfen, zur Deponie verbracht und dort deponiert. Diese Fraktion weist optisch insbesondere im Korngrößenbereich von etwa 30 bis 50 mm erhebliche Anteile von heizwertreichen Bestandteilen wie flugfähige Kunststoffe, zum Beispiel Überraschungseier, und Papier sowie einen hohen Anteil an regenerativer Organik wie zum Beispiel Zitrusfruchtschalen auf.

Die Eisenmetallschrottabtrennung ist auf eine Maximierung der Entschrottung der beiden Kornklassen kleiner 50 mm und 50 bis 250 mm ausgelegt. Grund hierfür ist neben der österreichischen Deponieverordnung, daß der vorgesehene Verwerter der heizwertreichen Fraktion eine weitestgehende Metallfreiheit voraussetzt. Diese Auslegung geht zu Lasten der Qualität, das heißt der Reinheit des abgetrennten Schrottes, der optisch einen hohen Grad an Störstoffen, insbesondere Kunststoff-Folien, aufweist. Nach Aussagen des Betreibers wird diese Fraktion an einen Metallschrottaufbereiter und -verwerter verkauft.

Der Nichteisenmetallschrott weist im Vergleich zur Eisenschrottfraktion optisch einen deutlich geringeren Störstoffanteil auf. Er

wird ebenfalls an einen Verwerter verkauft. Weitere Materialströme geringeren Umfangs sind:

- die ausgeschleuste Grobfraktion größer 250 mm: diese wird entweder in Container verladen und zur Müllverbrennung verbracht oder aber zur weiteren Zerkleinerung wieder dem Aufgabebereich der Zerkleinerungseinheit (Rotorschere) zugeführt,
- der Staub aus der Absaugung der verschiedenen Anlagenteile: dieser wird entsorgt.

Abbildung 1 zeigt eine Modellierung der mechanischen Abfallaufbereitungsanlage für die Stoffflußanalyse.

## Materialbilanz

Nach Untersuchungen von Thomé-Kozmiensky<sup>34</sup> wies die Aufbereitungsanlage in den Monaten Februar bis Juni 2002 die in Tabelle 2 Spalte 2 wiedergegebene Materialbilanz auf. Auf einem Workshop des Betreibers am 11. Dezember 2002 hat dieser beschlossen, zukünftig keinen Sperrmüll mehr über die Abfallaufbereitungsanlage zu fahren, sondern diesen in den Müllverbrennungsanlagen zu verbrennen. Weiterhin wird der Siebüberlauf der Abfallaufbereitungsanlage (Fraktion größer 250 mm) fortan nicht mehr in die Zerkleinerung zurückgeführt, sondern nunmehr ebenfalls in eine Müllverbrennungsanlage verbracht werden. Diese Änderungen führen insgesamt zu der ebenfalls wiedergegebenen neuen Verteilung des Outputs der Abfallaufbereitungsanlage.

In dieser Bilanz fehlt der abgesaugte Staub, dessen Aufkommen nach Angaben des Betreibers<sup>38</sup> mit maximal 1 Kilogramm pro Tonne Materialinput angegeben wird.

## Datenbasis für die Stoffflußanalyse an der Abfallaufbereitungsanlage

Für die Stoffflußanalyse ist die Konzentration an Chlor und Schwermetallen im Input und in den Outputströmen zu ermitteln. Die

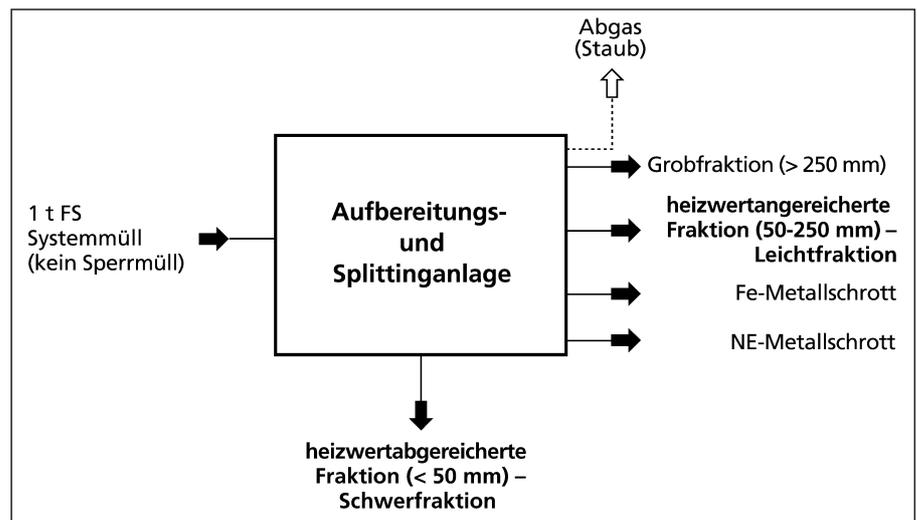


Abbildung 1: Modellierung der mechanischen Abfallaufbereitungsanlage

|   | Anteil bezogen auf den Anlagenoutput 2002 % | Anteil bezogen auf den Anlagenoutput 2003 % | Abfallmenge ab 2003 t/a |
|---|---|---|-------------------------|
| Input: Systemmüll <sup>1)</sup>                           | 73,3  | 100,0                                       | 177.000                 |
| Output, davon:  | 100,0                                       | 100,0                                       | 177.000                 |
| • Schwerfraktion  | 49,5  | 50,0  | 88.419                  |
| • Leichtfraktion  | 44,7  | 42,8  | 75.774                  |
| • Grobfraktion: Siebüberlauf > 250 mm (keine Rückführung) | 2,5   | 4,0   | 7.080                   |
| • Eisenmetallschrotte                                     | 3,5   | 3,0   | 5.258                   |
| • Nichteisenmetallschrotte                                | 0,3   | 0,3   | 469                     |

<sup>1)</sup> Rest in 2002: 19,9 % Sperrmüll von Mistplätzen, 4,4 % Straßenkehrriecht von Mistplätzen, 2,3 % Restmüll aus der Kompostaufbereitung

Quelle: Zeschmar-Lahl, B.: Integration der Abfallaufbereitungsanlage der MA 48 in das Wiener Abfallwirtschaftskonzept. Leistungsteil 2: Stoffflussanalyse für die Wiener Abfallaufbereitungsanlage. Auftraggeber: Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 48. Oytten, 31. Januar 2003.

Tabelle 2: Materialbilanz der Abfallaufbereitungsanlage ab 2003

Stoffflußanalyse wird in dieser Untersuchung auf einen als statisch eingestuftem Prozeß angewendet. Für statische Prozesse gelten die Transferfaktoren in einer gegebenen Anordnung als konstant.

### Ermittlung der Inputdaten

Für die weitere Abschätzung wird die Materialbilanz der Tabelle 2 für das Jahr 2003 verwendet, da auch die im Folgenden dargestellten Untersuchungen der verschiedenen Fraktionen bei Betrieb der Anlage ausschließlich mit Systemmüll durchgeführt wurden. Über dessen Belastung mit ausgewählten Schadstoffen liegen Informationen über Bilanzmessungen an der MVA Spittelau aus den Jahren 1993, 2000 und 2001 vor<sup>19</sup>. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Weitere Parameter, insbesondere Schwermetalle (Antimon, Arsen, Chrom, Kobalt, Mangan, Nickel, Thallium, Vanadium, Zinn) wurden nicht bestimmt. Für Eisen beruhen die berechneten Werte auf der Annahme, daß der Schrott zu 100 Prozent aus Eisen besteht<sup>27</sup>, hier Fußnote 19, was allerdings nicht der Realität entspricht.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Monats- und Tagesschwankungen können je nach Element beachtlich sein –

dies gilt insbesondere für Chlor, Quecksilber und Blei.

- Für Schwermetalle sind die Veränderungen gegenüber den Daten für das Vorjahr überwiegend gering: Die Veränderungen zwischen den beiden aufeinander folgenden Jahren – mit einer Überlappung der Monate Oktober bis Dezember 2000 – fallen für Kohlenstoff (–20 Prozent) recht groß, für Blei, Zink und Quecksilber (–10 Prozent) sowie Cadmium (–5 Prozent) mäßig aus. Für die Elemente Chlor, Aluminium, Eisen und Kupfer können in dieser Periode keine Veränderungen festgestellt werden.

Ein Vergleich dieser an der MVA Spittelau bestimmten Schwermetallgehalte von Wiener Restabfall (Systemmüll) mit den Schwermetallanalysen deutscher Gebietskörperschaften<sup>2,9</sup> ergibt teilweise deutlich höhere Konzentrationen (bei Umrechnung von Feuchtsubstanz auf Trockensubstanz mit 30 Prozent Feuchte). Die Wiener Daten decken sich aber mit denen, die ebenfalls mittels Stoffflußanalyse an einer anderen österreichischen MVA bestimmt wurden<sup>20</sup>. Die Ursache hierfür dürfte insbesondere in den unterschiedlichen Untersuchungsmethoden zu finden sein. An den österreichischen Müllverbrennungsanlagen wird aus den

| Parameter   | Stoffgehalt 1993 |                 |    | Stoffgehalt 2000 |                 |    | Stoffgehalt 2001 |                 |    |
|-------------|------------------|-----------------|----|------------------|-----------------|----|------------------|-----------------|----|
|             | g/kg FS          | Stand.-Abw. +/- | %  | g/kg FS          | Stand.-Abw. +/- | %  | g/kg FS          | Stand.-Abw. +/- | %  |
| (Bezug: FS) | g/kg FS          | g/kg FS         | %  | g/kg FS          | g/kg FS         | %  | g/kg FS          | g/kg FS         | %  |
| Chlor       | 6,4              |                 |    | 4,8              | 0,6             | 13 | 4,9              | 0,8             | 16 |
| Eisen       | 40               | 0               | 2  | 28               | 2               | 7  | 28               | 2               | 7  |
| Aluminium   | n.b.             |                 |    | 10               | 1               | 11 | 10               | 1               | 12 |
|             | mg/kg FS         | mg/kg FS        | %  | mg/kg FS         | mg/kg FS        | %  | mg/kg FS         | mg/kg FS        | %  |
| Cadmium     | 8,0              | 1,0             | 13 | 7,1              | 0,8             | 11 | 6,7              | 0,9             | 13 |
| Quecksilber | 1,3              | 0,2             | 15 | 1,0              | 0,2             | 20 | 0,89             | 0,11            | 12 |
| Blei        | 600              | 100             | 17 | 330              | 30              | 9  | 310              | 50              | 16 |
| Kupfer      | 360              | 30              | 8  | 280              | 30              | 11 | 280              | 30              | 11 |
| Zink        | 830              | 70              | 8  | 560              | 50              | 9  | 500              | 70              | 14 |

Quelle: Morf, L; Ritter, E.; Brunner, P. H., TU Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft: Online-Messung der Stoffbilanz auf der MVA Spittelau. Phase B - Messjahr 2001, im Auftrag der MA 22 und 48 der Stadt Wien und der Fernwärme Wien GmbH.

Tabelle 3: Vergleich der stofflichen Zusammensetzung des Systemmülls in den Jahren 1993, 2000 und 2001 nach Untersuchungen an der MVA Spittelau

verschiedenen Outputströmen der MVA auf den Gesamtinput zurückgerechnet. In diesem Gesamtinput sind zum Beispiel auch alle Schwermetallträger wie Batterien, Leuchtstoffröhren oder Stanniolkapseln enthalten. Bei einer direkten Analyse des Restabfalls (vgl. 2, 9) sind nach den einschlägigen Vorschriften Eisen- und Nichteisenmetalle von Hand oder mit einem Handmagnet abzutrennen, bevor die Belastung des Materials zum Beispiel mit Schwermetallen bestimmt wird. Dadurch liegen die Datenwerte für Rohmüll, die bei Analysen in Deutschland ermittelt wurden, im Unterschied zu den Messungen an österreichischen Müllverbrennungsanlagen systematisch zu niedrig. Daher ist es auch nicht zulässig, für diese Untersuchung Daten für fehlende Parameter – Antimon, Arsen, Chrom, Kobalt, Mangan, Nickel, Thallium, Vanadium, Zinn – aus anderen Untersuchungen zu übernehmen. Zwar dürften die Beiträge der Metallfraktion an der Schwermetallbelastung des Abfalls, im Vergleich zu den achtziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts, heute niedriger ausfallen, gleichwohl ist zu erwarten, daß die Abtrennung der Metalle auch heute noch zu einer nicht unbeachtlichen Schwermetallentfrachtung des Restmülls führen kann.

Im Folgenden wird daher für die Stoffflußanalyse lediglich mit den Daten des Restabfalls aus den Analysen an der MVA Spittelau aus dem Jahr 2001 gerechnet (siehe Tabelle 3).

### Ermittlung und Festlegung der Outputdaten

Für die Stoffflußanalyse sind die in den einzelnen Outputfraktionen enthaltenen Konzentrationen an Chlor und Schwermetallen zu ermitteln.

#### ► Grobfraktion größer 250 mm

Analysen zur stofflichen und chemischen Zusammensetzung der Fraktion größer 250 mm liegen nicht vor. Nach Aussagen des Betreibers besteht die Grobfraktion bei Verarbeitung von Systemmüll optisch überwiegend aus großflächigen oder großstückigen Kunststoffteilen, insbesondere Kunststofffolien. Kunststoffabfälle weisen zu meist einen Heizwert auf, der deutlich oberhalb des für Restabfall ausgelegten Heizwertfensters von Abfallverbrennungsanlagen liegt ( $H_u > 25.000$  MJ/t gegenüber 9.000 bis 15.000 MJ/t). So wurde auch im Jahr 2002 auf Wunsch der Betreiber der abnehmenden Müllverbrennungsanlagen der Heizwert der Grobfraktion abgesenkt, indem kurzzeitig Material kleiner 50 mm (4 Kubikmeter je 25-Kubikmeter-Container) beigemischt wurde (Mischung 1). Derzeit und zukünftig wird die Grobfraktion jedoch wieder ohne Beimischung zur Müllverbrennung geliefert werden.

Von Interesse für die Stoffflußanalyse ist insbesondere die Frage nach dem Austrag von Chlor durch PVC-Produkte (Chloranteil im PVC rein: 57 Prozent). Hinzu kommen die Additive wie Weichmacher, Stabilisatoren und Farbstoffe, die je nach Material (Weich- oder Hart-PVC) in der Summe mehr

als 50 Prozent der Produktmasse ausmachen können und die ebenfalls Chlor, zum Beispiel Chlorparaffine, oder auch Schwermetalle – insbesondere Cadmium, aber auch Kupfer – in den Abfall eintragen. Um zu klären, in welchem Maße Träger von Chlor und Cadmium in der Grobfraction verglichen mit dem restlichen Input in höherem Umfang auftreten, wurde eine Mulde Grobfraction auf PVC-Träger untersucht<sup>33</sup>. 418 Kilogramm Kunststoffe wurden händisch sortiert und optisch nach PVC oder nicht eindeutig identifizierbaren Kunststoffen getrennt. Die aussortierten Kunststoffe wurden gewogen (26 kg) und im Labor der Abfallaufbereitungsanlage wurde ihr Anteil chlorhaltiger Kunststoffe bestimmt.

Der Gewichtsanteil chlorhaltiger Kunststoffe betrug 11,5 von 418 Kilogramm, was einem Anteil von 2,75 Prozent an der Probe entspricht. Der Gewichtsanteil von PVC im Systemmüll wurde dagegen nur mit 1 Prozent ermittelt<sup>30</sup>. Als chlorhaltige Kunststoffteile sind insbesondere Schwimmartikel wie Schwimmreifen, Luftmatratzen oder Schlauchboote und Gartenschläuche, Umantelungen von Elektrokabeln, Kabelrohre, Profilleisten, Vliesbeschichtungen sowie Verpackungen wie Blister von Werkzeugverpackungen oder klarsichtige Folien identifiziert worden. Bei einigen der identifizierten PVC-haltigen Produkte wie Schwimmreifen, Luftmatratzen, Schlauchboote ist anzunehmen, daß sie nur gelegentlich in den Systemmüll gelangen. Andere wie Profilleisten und Blister dürften demgegenüber regelmäßig vorkommen. Den größten Anteil, so die Mitteilung des Betreibers der Abfallaufbereitungsanlage und des Betreibers der Müllverbrennungsanlagen (zitiert in Thomé-Kozmiensky 2002<sup>34</sup>), machen aber Folien aus.

Mangels belastbarer Analysedaten wird für die Berechnung der Stoffflußanalyse angenommen, daß 80 Prozent der Grobfraction aus Folien bestehen, während sich die restlichen 20 Prozent aus Blistern (2 %), PVC (8 %) und anderen Kunststoffen (Mischkunststoffe, 10 %), zusammensetzen. Kupferhaltige Kabel wurden nicht berücksichtigt. Insgesamt weist die Grobfraction gegenüber dem Systemmüll nicht nur erhöhte Konzentrationen an Chlor (aufgrund von PVC), sondern auch an Cadmium auf. Dies stimmt mit den Untersuchungen von Rotter<sup>25</sup> und Flamme<sup>11, 12</sup> überein. Rotter<sup>25</sup> ermittelte je nach Aufbereitungsverfahren einen Austrag von Cadmium über das Grobgut von bis zu 50 Prozent. Flamme<sup>11, 12</sup> stellte fest, daß durch die Abtrennung von PVC – hier: aus der nachzerkleinerten heizwertreichen Fraction aus einer MBA – mit einem NIR-Spektrometer eine Abreicherung des Parameters Cadmium erreicht werden kann.

### ► Heizwertreiche Fraction – Brennstoff-fraction (Leichtfraction)

Umfassende und statistisch abgesicherte Analysen der in der Abfallaufbereitungsanlage erzeugten Brennstofffraction liegen nicht vor. Es gibt lediglich einzelne Untersuchungen, deren Ergebnisse im Folgenden dargestellt werden.

Im März 2002<sup>10</sup> wurde im Auftrag des Betreibers eine Elementaranalyse von Leichtfraction aus Hausmüll über eine Kernbohrung (100 mm) aus drei Ballen aufbereiteter Leichtfraction (50 bis 250 mm) erstellt. Der Heizwert bewegte sich im Bereich von 10.400 bis 11.400 MJ/t, der Chlorgehalt lag bei 0,2 bis 0,3 Prozent und der Gehalt an Schwefel bei 0,1 bis 0,2 Prozent.

Untersuchungen zur Schwermetallbelastung der Leichtfraction liegen derzeit nicht vor, sind aber für 2003 geplant. In dieser Untersuchung wird daher anhand der übrigen Outputströme abgeschätzt, welche Schadstoffbelastung für die Leichtfraction zu erwarten ist und ob dies plausibel ist. Für die Parameter Chlor und Aluminium werden folgende Daten herangezogen:

- Chlor: Mittelwert dreier Messungen: 0,22 Prozent<sup>10</sup>
- Aluminium: Mittelwert aus Angaben für fiktive Leichtfraction größer 40 mm und fiktive Leichtfraction größer 60 mm für Nichteisenmetalle: 0,6 Prozent<sup>30</sup>.

### ► Feuchte Feinfraction – Schwerfraction

Zur Schwermetallbelastung der feuchten Schwerfraction liegen Untersuchungen aus unterschiedlichen Betriebszuständen der Anlage vor. Die Ergebnisse von Schwermetallanalysen aus dem Jahr 2001<sup>31</sup> sind allerdings nicht repräsentativ, da sie nur auf drei Proben aus einer Probenmasse mit einem Gesamtgewicht von 8 Tonnen basieren. Die Analysenergebnisse streuen für einzelne Elemente stark. Die Standardabweichung der Ergebnisse für Antimon beträgt 93 Prozent und für Blei 52 Prozent. Für Blei deutet sich eine Anreicherung in der Schwerfraction gegenüber dem Systemmüll an.

Im Oktober 2002 untersuchte die Niederösterreichische Umweltschutzanstalt GmbH

(NUA), Maria Enzersdorf, eine Mischprobe der Schwerfraction (0 bis 50 mm) von 20 Kilogramm, die für eine Beurteilungsmasse von rund 10.000 Tonnen Schwerfraction repräsentativ ist. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse dieser Untersuchung<sup>22</sup>. Angaben zum Wassergehalt liegen nicht vor, die Gehalte an Chlor, Fluor und Schwefel wurden nicht erhoben. Für die Betrachtung der Frischsubstanz wurde nach Angaben des Betreibers<sup>38</sup> mit einem mittleren Wassergehalt von 45 Prozent gerechnet.

Da der TOC-Grenzwert im Feststoff (Grenzwert: 50 Gramm pro Kilogramm Trockensubstanz) mit gemessenen 287 g/kg TS überschritten wird, ist die Ablagerung der untersuchten Schwerfraction laut DeponieVO in einer Massenabfalldeponie nicht zulässig<sup>22</sup>. Die Grenzwerte der DeponieVO für Schwermetalle werden in keinem Fall überschritten.

Für die Berechnung der Stoffflußanalyse wird die Schwerfraction anhand der verfügbaren Daten modelliert. Die Analysendaten der NUA<sup>22</sup> sind für eine Beurteilungsmasse von rund 10.000 Tonnen Schwerfraction repräsentativ. Die Analyse des Kornspektrums der Schwerfraction durch TBU<sup>31</sup> bezieht sich auf eine Menge von etwa 8 Tonnen Systemmüll oder rund 4 Tonnen Schwerfraction. Da die Beurteilungsmasse bei NUA deutlich über der von TBU liegt, werden die Analysendaten nicht arithmetisch gemittelt, sondern mit 95 : 5 gewichtet. Datenlücken werden durch Übernahme des Wertes der jeweils anderen Untersuchung geschlossen.

### ► Abgeschiedene Schrottfractionen – Eisenschrott, Nichteisenmetallschrott Abgeschiedene Eisenschrottfraction

Die abgeschiedene Eisenmetallschrottfraction weist optisch einen hohen Grad an Stör-

| Parameter               | Einheit | Trockensubstanz mg/kg TS     |                          | Frischsubstanz mg/kg FS      |                          |
|-------------------------|---------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|
|                         |         | Schwerfraction <sup>1)</sup> | Systemmüll <sup>2)</sup> | Schwerfraction <sup>1)</sup> | Systemmüll <sup>2)</sup> |
| Antimon                 | mg/kg   | b                            | n.b.                     | b                            | n.b.                     |
| Arsen                   | mg/kg   | 1,67                         | n.b.                     | 0,9                          | n.b.                     |
| Blei                    | mg/kg   | 795                          | 443 ± 71                 | 437                          | 310 ± 50                 |
| Cadmium                 | mg/kg   | 0,5                          | 9,6 ± 1,3                | 0,3                          | 6,7 ± 0,9                |
| Chrom <sub>gesamt</sub> | mg/kg   | 21,4                         | n.b.                     | 11,8                         | n.b.                     |
| Kobalt                  | mg/kg   | 7,95                         | n.b.                     | 4,4                          | n.b.                     |
| Kupfer                  | mg/kg   | 120                          | 400 ± 43                 | 66,0                         | 280 ± 30                 |
| Mangan                  | mg/kg   | 241                          | n.b.                     | 133                          | n.b.                     |
| Nickel                  | mg/kg   | 12,4                         | n.b.                     | 6,8                          | n.b.                     |
| Quecksilber             | mg/kg   | 0,304                        | 1,3 ± 0,2                | 0,2                          | 0,9 ± 0,1                |
| Thallium                | mg/kg   | b                            | n.b.                     | b                            | n.b.                     |
| Vanadium                | mg/kg   | b                            | n.b.                     | b                            | n.b.                     |
| Zink                    | mg/kg   | 208                          | 714 ± 100                | 114                          | 500 ± 70                 |
| Zinn                    | mg/kg   | b                            | n.b.                     | b                            | n.b.                     |
| Eisen                   | g/kg    | 7,47                         | 40 ± 2,9                 | 8,635                        | 28 ± 2                   |
| Aluminium               | g/kg    | 15,7                         | 14 ± 1,7                 | 4,109                        | 10 ± 1                   |

1) geschätzter Wassergehalt der Frischsubstanz = 45 %  
 2) geschätzter Wassergehalt der Frischsubstanz = 30 %  
 n.b. nicht bestimmt  
 b liegt in diesem Abfall laut NUA nur in geringeren, für die Zulässigkeit der Ablagerung nicht relevanten Mengen vor, höhere Konzentrationen sind laut NUA nicht zu befürchten, wurde daher nicht bestimmt

Quelle: NUA Niederösterreichische Umweltschutzanstalt GmbH, Maria Enzersdorf: Gesamtbeurteilung über die Restmüllschwerfraction 0/50 nach der Abfallaufbereitungsanlage der MA 48, Percostr. 2, 1220 Wien. Auftraggeber: MA 48, Auftrag-Nr. AB-548-1/3-2002, 29. November 2002

Tabelle 4: Analyse einer Mischprobe der Schwerfraction (nur SFA-relevante Parameter), im Vergleich zur stofflichen Zusammensetzung des Systemmülls aus dem Jahr 2001

|             |     | Schwermetallkonzentration im Systemmüll (Tabelle 3) | Konzentration im Eisenschrottschrott | Mit der Magnetscheidung abgetrennte Schwermetallmasse (ohne Batterien) bei einem Output von 26 kg Fe/t Systemmüll | Anteil vom Input |
|-------------|-----|---|--------------------------------------|---|------------------|
|             |     |   |                                      |   | %                |
| Cadmium     | g/t | 6,7 ± 0,9   | 3 ± 3 <sup>1)</sup>                  | 0,08 ± 0,08   | 1,2              |
| Blei        | g/t | 310 ± 50  | 380 <sup>2)</sup>                    | 9,8   | 3,2              |
| Quecksilber | g/t | 0,89 ± 0,11   | k.A.                                 |   |                  |
| Zink        | g/t | 500 ± 70  | 3.600 <sup>2)</sup>                  | 92,6  | 18,5             |

<sup>1)</sup> Rotter, S.: Potenzial und Verteilung von Schwermetallen in Haushaltsabfällen und Steuerungsmöglichkeiten durch Aufbereitung. TU Dresden, Schriftenreihe Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten, Bd. 27, 2002, Ergebnisse stichprobenartiger Analyse von ausgewählten Schwermetallträgern im Restabfall auf ihren Gehalt an Schwermetallen, in mg/kg TS, ohne Batterien

<sup>2)</sup> Stercken: Mündliche Mitteilung von Ergebnissen zum Einsatz von Müllschrott aus dem Abschlussbericht Recycling of Scrap for high Quality Products. Veröffentlichung in Vorbereitung, zit von Harant, 1999

Tabelle 5: Berechnung der in der Abfallaufbereitungsanlage mit der Eisenschrottfraktion abgetrennten Masse an Schwermetallen (26 kg Fe/t Input), ohne Berücksichtigung der Batterien

stoffen auf. Es dominierten Verunreinigungen insbesondere mit Kunststoff-Folien. Im Folgenden wird konservativ davon ausgegangen, daß der Eisenschrott maximal 15 Massenprozent an Verunreinigungen (Kunststofffolien, schwermetallarm) aufweist. Diese Annahme stützt sich mangels eigener Daten der Abfallaufbereitungsanlage auf Untersuchungen an der MBA Oberpullendorf, in der Eisenschrottschrotte aus Restabfall ebenfalls mit Überbandmagneten abgetrennt werden. Analysen der ARGEV zur Zusammensetzung des Eisenschrottes kleiner 150 mm ergaben Störstoffgehalte im Bereich von 12 bis 13 Prozent<sup>1</sup>.

Bei 3,0 oder 3,5 Prozent Eisenschrott, der aus dem Anlageninput abgetrennt wird, und unter Annahme eines Störstoffgehaltes (Nichteisen-Material) im Eisenschrott von 15 Prozent beträgt der Output 26 bis 30 Kilogramm Eisenmetall pro Tonne Anlageninput. Diese Daten stimmen mit denen der Tabelle 3 überein, nach der 1 Tonne Systemmüll im Jahre 2001 rund 28 ± 2 Kilogramm Eisen enthielt.

Als Begleitelemente im Metallschrott werden auch Schwermetalle ausgetragen. Nach Untersuchungen an der MVA Spittellau (Tabelle 3) liegt der Schwermetallgehalt von Systemmüll im Bereich von knapp einem Gramm (Quecksilber) bis einem halben Kilogramm (Zink) pro Tonne. Es liegen keine Angaben zur Belastung des abgetrennten Eisenschrottes mit relevanten Schwermetallen wie Quecksilber (zum Beispiel aus Batterien) sowie Chrom und Nickel (beide aus nichtrostenden Stählen, wenn magnetisch) vor. Anhand der aus der Literatur bekannten Daten zur Schwermetallbelastung von Metallschrott (vgl. Zeschmar-Lahl 2003<sup>39</sup>), kann die mit dem Eisenschrott aus der mechanischen Abfallaufbereitungsanlage ausgetragene Schwermetallfracht aber grob abgeschätzt

werden (siehe Tabelle 5). Danach kann die Eisenschrottabtrennung für einzelne Elemente eine deutliche Schwermetallentfrachtung des Anlageninputs bewirken und ist daher nicht zu vernachlässigen.

Zur weiteren Absicherung der Schadstoffentfrachtung durch die Eisenschrottabtrennung wurde im Auftrag des Betreibers der Gehalt an Konsumbatterien in der Eisenschrottfraktion nach dem Magnetscheider bestimmt<sup>32</sup>. Insgesamt wurden etwa 612 Kilogramm Metall sortiert, davon waren rund 1 Prozent Konsumbatterien (6,984 kg). Dieser Wert ist laut Gutachter<sup>32</sup> als untere Grenze anzusehen, da bedingt durch die Struktur des Ausgangsmaterials nicht alle Batterien erkannt werden konnten. Insbesondere für Knopfzellen (n = 6) ist der ermittelte Wert sicher zu niedrig<sup>32</sup>. Der Anteil an Nickel/Cadmium-Akkus an den aussortierten Batterien betrug 4 Prozent. Es wurden keine Nickel/Cadmium-haltigen Akku-Einheiten von Mobiltelefonen oder ähnlichen Geräten gefunden.

Anhand der Sortiererergebnisse und der aus der Literatur bekannten Daten zur Schwermetallbelastung der Batterien wurde die enthaltene Menge Schwermetall abgeschätzt, für Cadmium und Nickel nach Bräutigam und Fellmuth<sup>4</sup>. Die Batterien, die als quecksilberfrei (0 Prozent Hg) gekennzeichnet sind, garantieren einen Quecksilbergehalt von unter 5 Milligramm pro Kilogramm. Nach Europa importierte Batterien enthalten jedoch noch zum Teil erheblich größere Quecksilbermengen. Dies belegt eine im Juli 2000 abgeschlossene Studie im Auftrag des Niederländischen Umweltministeriums über Gehalte an Cadmium, Quecksilber und Blei in Batterien, die aus Asien importiert wurden. So wurden in 17 von 118 analysierten Batterien Quecksilbergehalte über 5 ppm gefunden, wodurch dieser seit 1.1.2000 in der EU geltende Grenzwert

teilweise erheblich überschritten wurde (Umweltministerium Niederlande 2000<sup>35</sup> zitiert von Rentz et al. 2001<sup>24</sup>). Gleiches gilt für die aus früheren Jahren stammenden Batterien, die erst jetzt von den Verbrauchern zurückgegeben werden. Nach Angaben der EPBA, die auf Untersuchungen von Altbatterien in den Niederlanden beruhen, liegt der Quecksilbergehalt eines typischen Gemisches der Batterietypen derzeit noch bei rund 130 ppm<sup>14</sup>. Rotter<sup>25</sup> ermittelt sogar einen gewichteten Mittelwert von 287 ppm Quecksilber.

Tabelle 6 zeigt die berechneten Konzentration der Schwermetalle Quecksilber, Cadmium und Nickel in der abgetrennten Eisenschrottfraktion und deren Austrag über diesen Aufbereitungsschritt.

Die Sortierung der Batterien aus der Eisenschrottfraktion stellt nur eine Stichprobenanalyse dar. Ihre Ergebnisse weisen darauf hin, daß insbesondere Cadmium über die Batterieerfassung in der Magnetscheidung ausgeschleust werden kann, in diesem Fall knapp 30 Prozent des Cadmiumgehaltes des Systemmülls. Für Quecksilber beträgt der Austrag nur 15 Prozent. Er wird maßgeblich durch die Knopfzellen bestimmt, die zu gut 70 Prozent zum Quecksilbergehalt der Batterien beitragen. Da der Erfassungsgrad der Knopfzellen nach Hauer<sup>32</sup> eher als Untergrenze anzusehen ist, dürften die 15 Prozent Ausschleusung der im Systemmüll enthaltenen Quecksilberfracht ebenfalls eher die Untergrenze darstellen.

**Abgeschiedene Nichteisenmetallschrottfraktion**

In der Abfallbehandlungsanlage ist auch bei der Nichteisenmetallabtrennung mit einem Wirbelstromscheider das Ziel der Aufbereitung eine weitestgehende Abtrennung der Nichteisenmetallschrotte aus den beiden Kornklassen kleiner 50 mm und 50 bis 250 mm. Dies geht auch hier zu Lasten der Qualität (Reinheit) der ausgehaltenen Nichteisenmetallschrotte. Optisch ist die Nichteisenmetallschrottfraktion aber weniger stark verunreinigt als die Eisenschrottfraktion. Es liegen keine Informationen zur stofflichen Zusammensetzung oder zur Schwermetallbelastung der in der mechanischen Abfallaufbereitungsanlage abgetrennten Nichteisenmetallschrottfraktion vor.

**Modellierung der ausgeschleusten Eisen- und Nichteisenmetallschrottfraktion**

Für die Modellierung der mit der Eisen- und Nichteisenmetallschrottfraktion ausgeschleusten Schwermetallfrachten wird zurückgegriffen auf die Sortieranalyse der Eisenschrottfraktion auf Batterien an der mechanischen Abfallaufbereitungsanlage sowie auf Literaturdaten. Diese stammen für die Eisenschrottfraktion von Rotter<sup>25</sup>, Flamme<sup>11</sup>, Stercken<sup>28</sup>, zitiert bei Harant<sup>13</sup>, Hauer<sup>32</sup>, Bräutigam und Fellmuth<sup>4</sup> sowie Korfmacher<sup>14</sup>. Für die Nichteisenmetallschrottfraktion stammen die Literaturdaten von Flamme<sup>11</sup> und Rotter<sup>25</sup>. In Bezug auf die Knopfzellen in der Eisenschrottfraktion wird angenommen, daß ihre Wiederfindungsrate in der Untersuchung an der

|   | Einheit | Quecksilber | Cadmium | Nickel |
|---|---------|-------------|---------|--------|
| Gesamtgehalt in sortierter Batteriefraktion       | g       | 3,1         | 45,2    | 78,8   |
| Konzentration in sortierter Batteriefraktion      | g/t     | 444         | 6.476   | 11.289 |
| Gesamtgehalt (g) in Eisenschrottfraktion          | g/t     | 5           | 74      | 129    |
| Austrag mit der Magnetscheidung in g/t Systemmüll | g/t     | 132         | 1.921   | 3.348  |
| Gehalt im Systemmüll (Tabelle 3)                  | g/t     | 890         | 6.700   | -      |
| Austrag über Eisenschrott                         | %       | 15          | 29      | -      |

Tabelle 6: Konzentration von Schwermetallen in der abgetrennten Eisenschrottfraktion und Schwermetallaustrag über diesen Aufbereitungsschritt

Aufbereitungsanlage nur rund 50 Prozent betrug. Diese Annahme basiert auf der Einschätzung von Hauer<sup>32</sup>, daß die bei der Sortieranalyse ermittelte Menge an Knopfzellen die Untergrenze darstellt.

Der angenommene Störstoffanteil von 15 Prozent in der Eisenschrottfraction wird anhand der Zusammensetzung von Folien modelliert, da dieses auch dem optischen Eindruck entspricht. Elektro- und Elektronikschrott werden bei der Modellierung nicht berücksichtigt. Grund für diese Festlegung ist zum einen, daß bei der Sortieranalyse keine Eisenmetallschrottfraction auf Batterien keine Elektronikakkus gefunden wurden. Zum anderen gilt die Elektro- und Elektronikschrottfraction als Träger erheblicher Schwermetallmengen. Selbst geringe Anteile in der Eisenschrottfraction würden zu einer deutlichen Erhöhung der über diesen Aufbereitungsschritt ausgetragenen Schwermetallmengen führen. Dies wäre für die Aufgabenstellung dieser Untersuchung eine zu optimistische Annahme. Mit der nun vorgenommenen Modellierung verbleiben diese potentiellen Schwermetallträger in der heizwertreichen Fraktion.

#### ► Abgas/Staub

Schwermetalle werden, abgesehen vom Quecksilber, überwiegend staubförmig in das Abgas freigesetzt. Daher kann man den Austrag von Schwermetallen über Staubanalysen abschätzen. Nach Schätzungen des Betreibers liegt das spezifische Staubaufkommen bei unter 1 Kilogramm Staub pro Tonne Input.

Im Auftrag des Betreibers wurden im Oktober 2002 vier Staubproben auf ihren Gehalt an Schwermetallen untersucht. Alle vier Proben rochen faulig<sup>16</sup>. Angaben zur jeweils untersuchten Probenmasse liegen

nicht vor. Auf eine Analyse der Korngrößenverteilung wurde verzichtet, da die Daten für eine erste Grobabschätzung verwendet werden sollten. Um die maximalen Austräge über den Output-Pfad Staub abzuschätzen, wurde für die Berechnung die jeweils höchste gemessene Konzentration im Staub herangezogen.

Danach liegt die Freisetzung von Schwermetallen über den Luft- oder Staubpfad für alle Metalle unter 0,1 Prozent des Inputs und ist damit für die Bilanz zu vernachlässigen. Dies gilt auch für Quecksilber. Selbst unter der Annahme, daß das gasförmig emittierte Quecksilber ein Zehnfaches des partikelgebundenen beträgt, resultiert daraus ein Transfer von weniger als 1 Prozent des im Input enthaltenen Quecksilbers in die Luft.

Dies deckt sich mit Ergebnissen von Flamme<sup>11</sup>. Bei ihrer Untersuchung der Aufbereitung von Spuckstoffen und gemischten Verpackungen kommt sie ebenfalls zu dem Schluß, daß das Outputgut Staub (Abgas) für die Betrachtung der Outputpfade einer Abfall- oder in diesem Fall Ersatzbrennstoffaufbereitungsanlage mengenmäßig nicht relevant ist.

Die Aussage zur Vernachlässigbarkeit des Staubpfades bezieht sich ausdrücklich nicht auf die Exposition der Beschäftigten gegen Staub oder daran adsorbierte Schwermetalle oder biologische Arbeitsstoffe. Eine Beurteilung der Abfallbehandlungsanlage unter Arbeitsschutzgesichtspunkten war nicht Aufgabe und Gegenstand dieser Stoffflußanalyse.

### Abschätzung des Stoffflusses und der Transferfaktoren

Ausgehend von den oben beschriebenen Meßdaten, Kennwerten und Literaturdaten

wurde für die mechanische Abfallaufbereitungsanlage der Stofffluß abgeschätzt (vergleiche Tabelle 7).

Da zum Input nicht für alle Parameter Daten vorlagen, verbleiben offene Felder. Die Werte der Leichtfraktion wurden mit der Schließung der Bilanzlücke zum berechneten Input ermittelt.

Die einzelnen Daten in Tabelle 7 sind keine absoluten Werte, sondern sie können ebenso wie beim Input in der Realität erheblich streuen. Sie geben lediglich den erwarteten Wertekorridor an, in welchem sich bei einer detaillierten Überprüfung anhand einer statistisch abgesicherten Anzahl von Messungen die Ergebnisse vermutlich bewegen werden.

Anhand der verfügbaren Daten konnte die Bilanz rechnerisch für insgesamt acht Elemente geschlossen werden. Für diese Elemente konnten daher Transferfaktoren bestimmt werden, die in Tabelle 8 wiedergegeben sind. Die Transferfaktoren für die Leichtfraktion (LF) sind dabei mit Ausnahme von Chlor aus der Bilanzierungslücke der Summe der übrigen Outputpfade zum Input errechnet und nicht anhand von Messungen der Leichtfraktion ermittelt.

Die Transferfaktoren zeigen die Verteilung der Stoffe auf die einzelnen Outputpfade. Für die Interpretation sind sie jedoch in Kombination mit den Massenströmen (Tabelle 9) anzuwenden.

Die Transferfaktoren und die Massenströme der bilanzierten Stoffe zeigen folgendes elementspezifisches Verhalten in der Abfallaufbereitungsanlage:

- Chlor

40 Prozent des eingetragenen Chlors werden mit der Schwerfraktion ausgetragen, die knapp 50 Prozent des Outputs aus-

| Parameter        | Einheit  | Input           |      | Output                 |              |                             |                            |                                  |                                 |       |                      |
|------------------|----------|-----------------|------|------------------------|--------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|---------------------------------|-------|----------------------|
|                  |          | Systemmüll 2001 | +/-  | Leichtfraktion > 50 mm | Grobfraktion | Schwerfraktion 2002 < 50 mm | Eisenmetallschrottfraction | Störstoffe Eisen-schrott: Folien | Nichteisenmetallschrottfraction | Staub | Summe Output         |
| Massenverteilung | kg FS    | 1.000           |      | 428                    | 40           | 498                         | 26                         | 4                                | 3                               | 1     | 1.000                |
| Wassergehalt     | %        | 30,0            |      | 29,8                   |              | 45                          |                            |                                  |                                 |       |                      |
| Chlor            | %        | 0,49            | 0,08 | 0,22                   | 4,58         | 0,39                        |                            | 0,85                             |                                 | ?     | 0,48                 |
| Eisen            | %        | 2,8             | 0,20 | 0,10                   | 0            | 0,39                        | 99                         | 0                                |                                 | 0,6   | 2,81                 |
| Aluminium        | %        | 1,0             | 0,12 | 0,60                   | 0            | 0,82                        | 0,5                        | 0                                | 96,6                            | 0,7   | 0,97                 |
| Antimon          | mg/kg FS | n.b.            | n.b. | n.b.                   | 5,1          | 1,98                        | 29                         | 4,51                             | 3,6                             | n.b.  | (2) <sup>1)</sup>    |
| Arsen            | mg/kg FS | n.b.            | n.b. | n.b.                   | 0,7          | 1,13                        | 11                         | 0,81                             | 6,6                             | n.b.  | (0,9) <sup>1)</sup>  |
| Blei             | mg/kg FS | 310             | 50   | 200                    | 64,7         | 423                         | 270                        | 43,3                             | 23                              | 107   | 306                  |
| Cadmium          | mg/kg FS | 6,70            | 0,90 | 5,0                    | 8,3          | 0,30                        | 151                        | 2,58                             | 0,1                             | 0,92  | 6,56                 |
| Chromgesamt      | mg/kg FS | n.b.            | n.b. | n.b.                   | 22,8         | 13                          | 313                        | 27,1                             | 125                             | n.b.  | (16,2) <sup>1)</sup> |
| Kobalt           | mg/kg FS | n.b.            | n.b. | n.b.                   | 2,4          | 4,3                         | 23                         | 1,66                             | 1,5                             | n.b.  | (2,8) <sup>1)</sup>  |
| Kupfer           | mg/kg FS | 280             | 30   | 450                    | 113,3        | 70                          | 1.483                      | 134                              | 1.344                           | 74    | 275                  |
| Mangan           | mg/kg FS | n.b.            | n.b. | n.b.                   | 8,5          | 134                         | 2.330                      | 10,3                             | 1.353                           | n.b.  | (132) <sup>1)</sup>  |
| Nickel           | mg/kg FS | n.b.            | n.b. | n.b.                   | 3,5          | 8                           | 453                        | 4                                | 41                              | n.b.  | (16) <sup>1)</sup>   |
| Quecksilber      | mg/kg FS | 0,89            | 0,11 | 1,3                    | 0,4          | 0,16                        | 8,6                        | 0,48                             | 0,2                             | 0,26  | 0,88                 |
| Thallium         | mg/kg FS | n.b.            | n.b. | n.b.                   | 0,2          | 0,00                        | 0,2                        | 0,29                             | 0                               | n.b.  | (0,02) <sup>1)</sup> |
| Vanadium         | mg/kg FS | n.b.            | n.b. | n.b.                   | 3,1          | 6                           | 5,3                        | 3,79                             | 5,4                             | n.b.  | (3,4) <sup>1)</sup>  |
| Zink             | mg/kg FS | 500             | 70   | 550                    | 295,2        | 118                         | 3.600                      | 352                              | 30.446                          | 200   | 493                  |
| Zinn             | mg/kg FS | n.b.            | n.b. | n.b.                   | 32,3         | 52                          | 489                        | 4,06                             | 6,8                             | n.b.  | (40) <sup>1)</sup>   |

<sup>1)</sup> Werte sind unvollständig, da wegen Datenmangel nicht alle Outputpfade berücksichtigt

Tabelle 7: Stofffluß der Abfallaufbereitungsanlage – Abschätzung der Bilanz; Leichtfraktion aus Bilanzlücke zum Input errechnet

| Element     | Fraktion         |                |                  | Eisenschrott    |              | NE-Schrott | Staub           | Summe |
|-------------|------------------|----------------|------------------|-----------------|--------------|------------|-----------------|-------|
|             | Leichtfraktion % | Grobfraktion % | Schwerfraktion % | Metallschrott % | Störstoffe % | %          |                 |       |
| Chlor       | 20               | 37             | 40               | 0               | 1            | 0          | 0 <sup>1)</sup> | 97    |
| Eisen       | 2                | 0              | 7                | 92              | 0            | 0          | 0,02            | 100   |
| Aluminium   | 26               | 0              | 42               | 1               | 0            | 30         | 0,07            | 100   |
| Blei        | 28               | 1              | 68               | 2               | 0,1          | 0,0        | 0,03            | 99    |
| Cadmium     | 32               | 5              | 2                | 59              | 0,2          | 0,0        | 0,01            | 98    |
| Kupfer      | 69               | 2              | 12               | 14              | 0,2          | 1,4        | 0,03            | 98    |
| Quecksilber | 63               | 2              | 9                | 25              | 0,2          | 0,1        | 0,03            | 99    |
| Zink        | 47               | 2              | 12               | 19              | 0,3          | 18,3       | 0,04            | 99    |

<sup>1)</sup> Wert fehlt, dürfte aber wegen des geringen Massenanteils des Staubes keine merkliche Veränderung bewirken.

Tabelle 8: Geschätzte Transferfaktoren der Elemente an der Abfallaufbereitungsanlage

| Element     | Einheit | Input | Fraktion       |              |                | Eisenschrott/NE-Schrott |            | Staub | Schrott            |
|-------------|---------|-------|----------------|--------------|----------------|-------------------------|------------|-------|--------------------|
|             |         |       | Leichtfraktion | Grobfraktion | Schwerfraktion | Metallschrott           | Störstoffe |       |                    |
| Chlor       | kg/t    | 4,90  | 0,96           | 1,83         | 1,94           | 0,00                    | 0,03       | 0,00  | 0,00 <sup>1)</sup> |
| Eisen       | kg/t    | 28,0  | 0,43           | 0,00         | 1,94           | 25,74                   | 0,00       | 0,00  | 0,01               |
| Aluminium   | kg/t    | 9,7   | 2,57           | 0,00         | 4,09           | 0,13                    | 0,00       | 2,90  | 0,01               |
| Blei        | g/t     | 310   | 85,6           | 2,6          | 210,5          | 7,0                     | 0,2        | 0,1   | 0,1                |
| Cadmium     | g/t     | 6,70  | 2,1            | 0,3          | 0,2            | 3,9                     | 0,0        | 0,0   | 0,0                |
| Kupfer      | g/t     | 280   | 192,6          | 4,5          | 34,7           | 38,5                    | 0,5        | 4,0   | 0,1                |
| Quecksilber | g/t     | 0,89  | 0,6            | 0,0          | 0,1            | 0,2                     | 0,0        | 0,0   | 0,0                |
| Zink        | g/t     | 500   | 235,4          | 11,8         | 58,9           | 93,6                    | 1,4        | 91,3  | 0,2                |

<sup>1)</sup> Wert fehlt, dürfte aber wegen des geringen Massenanteils des Staubes keine merkliche Veränderung bewirken.

Tabelle 9: Geschätzte Massenströme der Elemente an der Abfallaufbereitungsanlage, bezogen auf 1 t Input (FS)

macht. Dem gegenüber werden rund 37 Prozent des Chlors mit der abgetrennten Grobfraktion ausgeschleust, die aber nur 4 Prozent des Outputs darstellt. Das heißt, in dieser Fraktion findet eine deutliche Schadstoffanreicherung statt, die vornehmlich auf die hohen PVC-Anteile zurückzuführen ist. Für die Schwerfraktion und die übrigen Outputpfade ist dagegen eine Schadstoffanreicherung festzustellen.

#### • Eisen

Erwartungsgemäß werden über 90 Prozent des Eisens mit der Magnetscheidung aus dem Inputmaterial abgetrennt. Die 7 Prozent, die mit der Schwerfraktion ausgetragen werden, finden sich in einem Outputstrom wieder, der knapp 50 Prozent des gesamten Outputs ausmacht.

#### • Aluminium

Mit der Nichteisenmetallabtrennung werden rein rechnerisch nur 30 Prozent des im Input enthaltenen Aluminiums erfaßt, und dies, obwohl die abgetrennte Nichteisenmetallschrottfraction mit 100 Prozent Aluminium angesetzt wurde. Ein Großteil des Aluminiums gelangt in die Outputpfade Schwer- und Leichtfraktion. In der letztgenannten wird Aluminium überwiegend in Form von Folien und Verbunden vorliegen. Der Eintrag in die Schwerfraktion ist mengenmäßig aber am bedeutendsten. In welcher Form Aluminium hier vorliegt – ob als zerkleinerte Folien oder zerkleinerte Tuben, Dosen, Drähte, Bänder oder Gebrauchsgegenstände -, wurde bislang nicht untersucht.

#### • Cadmium

Cadmium wird in erheblichem Umfang mit der Eisenfraktion ausgeschleust. Diese Daten sind sehr unsicher, da sie auf einem relativ hohen Anteil an Nickel/Cadmium-Akkus (5 Prozent der Batterien) in der Sortieranalyse der Eisenschrottfraction basieren. Die Hochrechnung für die restliche Cadmiumfracht der Eisenschrottfraction fußt ebenfalls auf unsicheren Werten: Analysen des Cadmiumgehaltes von Metallen im Restabfall von Rotter<sup>25</sup> ergaben Werte von  $3 \pm 3$  Milligramm Cadmium pro Kilogramm Trockensubstanz.

#### • Quecksilber

Der Austrag von Quecksilber mit der Metallfraktion ist deutlich geringer als der von Cadmium. Die klassischen Quecksilberträger Batterien und Knopfzellen sind aufgrund chemiepolitischer Maßnahmen rückläufig. Quecksilber verbleibt überwiegend in den massenmäßig dominierenden Materialströmen, hier insbesondere Leichtfraktion. Vergleichbares gilt auch für die Elemente Kupfer und Zink. Nach Tabelle 8 gelangen diese drei Metalle zu knapp 50 bis 70 Prozent in die Leichtfraktion.

#### • Blei

Blei zeigt ein von den anderen Metallen abweichendes Bild: Der Austrag von Blei mit der Metallfraktion ist praktisch zu vernachlässigen. Blei verbleibt überwiegend in den massenmäßig dominierenden Materialströmen, hier insbesondere in der Schwerfraktion. Dies deckt sich mit Untersuchungen zum Beispiel von Bidlingmaier und Alt<sup>3</sup>, die

durch die Absiebung der Fraktion kleiner 40 mm für den Input eines Müllheizkraftwerkes – 58 Prozent Hausmüll, 25 Prozent Gewerbeabfall, 17 Prozent Klärschlamm – eine Reduktion des Bleieintrags von knapp 70 Prozent errechneten.

## Plausibilitätsbetrachtung

Es ist davon auszugehen, daß die Transferfaktoren und Schadstoffan-/abreicherungs-faktoren für jede Anlage je nach Input variieren. Dennoch kann es hilfreich sein, die Plausibilität der erhaltenen Ergebnisse zu überprüfen, indem man sie mit den Ergebnissen anderer Verfahren vergleicht.

Die Modellierung des Stoffflusses an der Abfallaufbereitungsanlage wurde in grober Abschätzung anhand verschiedener Datensätze vorgenommen. Eine umfassende zeitgleiche Beprobung des Inputs und der verschiedenen Outputströme fand nicht statt. Die wesentlichen Massenströme „Input“ und „Output Schwerfraktion“ sind von der Datenbasis vergleichsweise gut (Input) oder befriedigend (Schwerfraktion) abgesichert. Gleiches gilt auch für den von der Masse her nicht ins Gewicht fallenden Outputpfad Abgas/Staub.

Unsicherheiten bezüglich der Daten verbleiben, nach Massenintensität gereiht, bei den Fraktionen Leichtfraktion, Eisenmetallschrotte, Grobfraktion und Nichteisenmetallschrotte.

Die Grobfraktion, die nach Aussagen des Betreibers optisch überwiegend aus großflächigen oder großstückigen Kunststoffteilen, insbesondere Kunststoff-Folien besteht, weist einen erheblichen Gehalt an PVC-Produkten auf. Diese enthalten hohe Konzentrationen an Chlor und Cadmium auf. Die Abtrennung der Grobfraktion und ihre Verbringung in die Müllverbrennungsanlage ist daher mit einer Ausschleusung von Chlor und Cadmium verbunden. Die Modellierung der Grobfraktion für die Stoffflußanalyse wurde auf Basis der Bestimmung des PVC-Anteils in der Grobfraktion vorgenommen. Die Ergebnisse sind mit denen von Flamme<sup>11, 12</sup> konsistent, nach denen durch die Abtrennung von PVC – hier: aus der nachzerkleinerten heizwertreichen Fraktion – mit einem NIR-Spektrometer eine Abreicherung des Parameters Cadmium erreicht werden kann. Nach Rotter et al.<sup>26</sup> ist eine wirkungsvolle Grobgutseparierung wichtiger Bestandteil eines Gesamtverfahrens zur Gewinnung qualitätsgesicherter Brennstoffe. Allerdings hat Rotter bei ihren Aufbereitungsversuchen lediglich 3 bis 20 Prozent Chloraustrag des Inputs mit der Grobgutabscheidung festgestellt. Für Cadmium erreichte der Austrag aber durchaus bis zu 50 Prozent des Inputs, wobei sich das Grobgut aber anders zusammengesetzt haben wird als die überwiegend nur aus Folien bestehende Grobfraktion an der Abfallaufbereitungsanlage.

Der Beitrag der Abtrennung von Eisen- und Nichteisenmetallschrotten zur Schadstoffentfrachtung wird je nach Untersuchung kontrovers beurteilt, von „zu vernachlässigen“ bis „erheblich“. Die Frage kann hier

nur indirekt geklärt werden, indem untersucht wird, ob die rechnerisch ermittelte Belastung der Leichtfraktion mit Chlor und Schwermetallen sich in einem plausiblen Bereich bewegt. Abbildung 2 zeigt, daß die errechneten Werte für die Leichtfraktion im Wertebereich liegen, der für Brennstoffe aus deutschem<sup>25</sup> und österreichischem Restabfall<sup>18</sup> berichtet wird. Sie sind daher nicht unplausibel.

## Sensitivitätsbetrachtung

Aufgabe der Sensitivitätsbetrachtung ist die Klärung der Frage, wie sich die entscheidenden Aussagen einer Bilanz ändern, wenn an den Stellschrauben der Bilanzierung gedreht wird. Die Stellschrauben sind in diesem Fall:

- die Streubreite der Ergebnisse des Inputmaterials – Standardabweichung der Systemmüllzusammensetzung,
- die Variation der Annahmen für die Metallfraktionen: geringe Masse, aber hohe Konzentration an Metallen.

## Streubreite der Ergebnisse des Inputmaterials

Für den Input Systemmüll 2001 wurden mit einer Stoffflußanalyse an einer Müllverbrennungsanlage mittlere Schadstoffbelastungen errechnet, für die auch eine Streubreite (Standardabweichung) angegeben ist. Diese bewegt sich je nach Element im Bereich von 7 Prozent (Eisen) bis maximal 16 Prozent (Blei). Verwendet man für die Berechnung des Stoffflusses die Obergrenzen der Schwermetallbelastung des Systemmülls, dann wird beim Schließen der Bilanz dieser zusätzliche Metalleintrag methodisch bedingt allein der heizwertreichen Leichtfraktion zugeschlagen.

Auch die unter Annahme der maximalen Schwermetallkonzentrationen im Systemmüll errechnete Belastung der heizwertreichen Leichtfraktion liegt im Bereich, der in der Literatur für Ersatzbrennstoffe aus Hausmüll oder Restabfall berichtet wird.

## Variation der Annahmen für die Metallfraktionen

Als eine wichtige Schadstoffsенke – außer für Blei – gilt in der vorgenommenen Modellierung der Abfallaufbereitungsanlage die Eisenschrottfraction. Beispielsweise wird Cadmium in erheblichem Umfang mit der Eisenschrottfraction ausgeschleust. Diese Daten sind sehr unsicher. Im Folgenden wird abgeschätzt, wie sich die Ergebnisse verändern, wenn diese Senkenfunktion der Eisenschrottfraction für Schwermetalle deutlich niedriger ausfällt. Es wird modelliert, daß die für die Eisenschrottfraction angenommenen Schwermetallgehalte um Faktor 100 geringer ausfallen. Es zeigt sich, daß die Auswirkungen auf die Leichtfraktion bei jenen Schwermetallen besonders hoch sind, bei denen die Eisenschrottfraction zuvor als Senke diente, hier insbesondere beim Cadmium. Für Blei hingegen sind die Auswirkungen auf die Leichtfraktion eher gering, da diese auch schon vorher eine der beiden

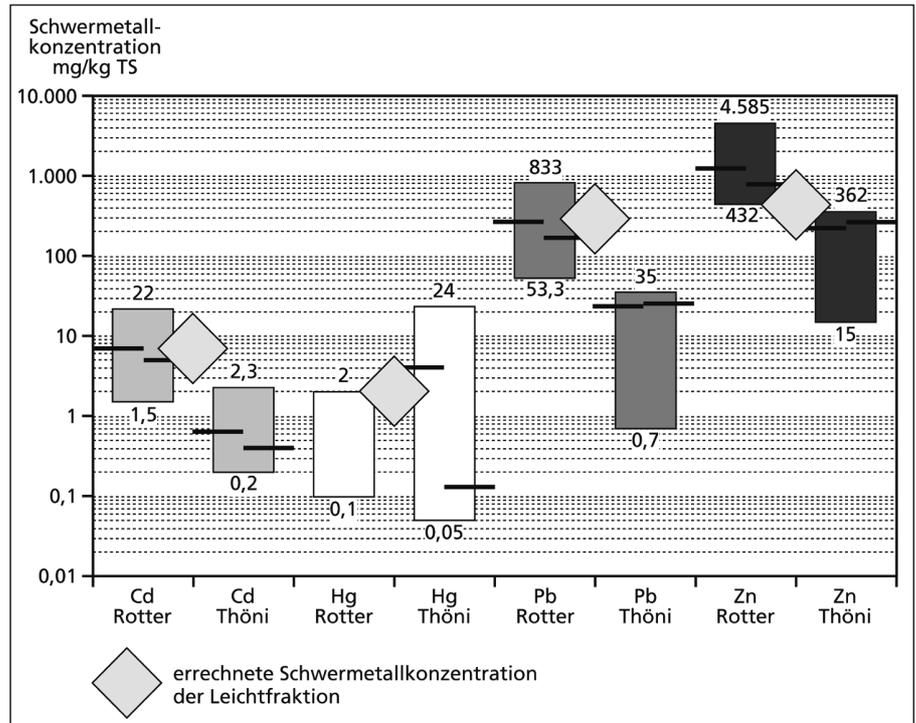


Abbildung 2: Vergleich der errechneten Schwermetallkonzentrationen der Leichtfraktion (Symbol Raute) mit Daten anderer Autoren

Blei-Senken – die zweitgrößte nach der Schwerfraktion – darstellte.

Auch unter Annahme, daß mit der Eisenschrottfraction deutlich weniger Schwermetalle ausgeschleust werden (1 Prozent der für die Stoffflußanalyse verwendeten Werte), liegen die Konzentrationen für die Leichtfraktion noch immer im Bereich anderer in der Literatur wiedergegebener Belastungswerte von hochkalorischen Fraktionen/Brennstoffen aus Restabfall.

Auf der anderen Seite führt die Berücksichtigung von Elektronikschrott in der Metallschrottfraction dazu, daß der Schwermetallaustrag über diesen Outputpfad deutlich höher ausfällt. Dadurch wird die durch die Leichtfraktion zu schließende Bilanzlücke noch geringer. Das hat zur Folge, daß die Leichtfraktion deutlich niedrigere Konzentrationen an insbesondere Cadmium, Blei, Kupfer und Zink aufweisen wird als hier modelliert.

## Ergebnisse und Schlußfolgerungen

Aufgrund der verfügbaren Datenbasis konnte eine Input-Output-Bilanz der Abfallaufbereitungsanlage nur für acht Elemente – Chlor, Eisen, Aluminium, Cadmium, Quecksilber, Blei, Kupfer, Zink – erstellt werden. Für die übrigen Stoffe standen keine Inputdaten zur Verfügung. Diese konnten auch nicht durch Summenbildung der Outputpfade ermittelt werden, da für einen mengenmäßig relevanten Outputpfad – die Leichtfraktion – derzeit ebenfalls keine Daten verfügbar sind.

Die für die Abfallaufbereitungsanlage abgeschätzten Transferfaktoren zeigen, daß sich die mit dem Systemmüll eingetragenen Elemente unterschiedlich auf die Outputpfade verteilen.

- Chlor aus dem Systemmüll gelangt überwiegend in die Schwerfraktion und über PVC in die Grobfraktion.
- Eisen wird größtenteils im Metallschrott aus der Abfallbehandlungsanlage ausgelesen.
- Die Nichteisenmetallschrottabtrennung erfaßt weniger als 30 Prozent des im Systemmüll enthaltenen Aluminiums. Mehr als 40 Prozent und damit der größte Teil des Aluminiums gelangt in die Schwerfraktion.
- Rund 60 Prozent des Cadmiums werden mit dem Eisenmetallschrott ausgelesen, ein weiteres knappes Drittel ist in der Leichtfraktion zu finden.
- In die Leichtfraktion gelangen 50 bis 70 Prozent des im Systemmülls enthaltenen Quecksilbers, Kupfers und Zinks.
- Blei dagegen gelangt zu knapp 70 Prozent in die Schwerfraktion.

Die Stoffflußanalyse hat gezeigt, daß einfache mechanische Techniken zur Abfallaufbereitung wie Zerkleinern, Sieben, Magnetscheidung und Wirbelstromscheidung nicht im Stande sind, die im Hausmüll oder Restabfall enthaltenen relevanten Schadstoffe selektiv abzutrennen und in einem Strom zu konzentrieren. Diese einfachen Techniken diskriminieren nach mechanisch-physikalischen und nicht nach chemischen Eigenschaften. Nur in Einzelfällen wie der Batterieausschleusung durch die Metallabscheidung überschneiden sich diese Eigenschaften, so daß damit ein gezielter Schadstoffaustrag vorgenommen werden kann. Aber auch dieser Austrag ist, wie das Beispiel Cadmium zeigt, nicht vollständig. Zwar kann die Eisenmetallschrottabtrennung über die Abscheidung von Batterien relevante Cadmiummengen ausschleusen,

doch verbleiben immer noch beachtliche Mengen dieses Schwermetalls in den anderen Outputmaterialien.

Die heutigen einfachen technischen Möglichkeiten der Abfallaufbereitung reichen nicht aus, die Anforderungen an schadstoffarme Ersatzbrennstoffe aus Restabfall zu erfüllen. Auch die Untersuchungen von Rotter<sup>25, 26</sup> und Flamme<sup>11, 12</sup> zeigen, daß eine übliche Aufbereitung von Restabfall mit rein mechanischen Verfahren nicht ausreicht, um gezielt Schadstoffe in der daraus erzeugten hochkalorischen Fraktion abzureichern. Hier bestehen jedoch insbesondere nach Flamme weitere Optimierungspotentiale, die einen teilweise erheblichen technischen Aufwand wie Nah-Infrarot-Detektion (NIR) erfordern. Daher müssen abfallwirtschaftliche Entwicklungsszenarien mit einem hohen Anteil an Abfallmitverbrennung nicht zwangsläufig in einer Sackgasse enden. Dabei kommt der Standardisierung und nachfolgenden Normung in der EU eine wichtige Steuerungsfunktion zu. Derzeit ist allerdings nicht erkennbar, wie die Begrenzung von Schadstoffen im Ersatzbrennstoff ausfallen wird.

Letztlich entscheidet sich aber an diesem Problem die Zukunftsfähigkeit der Ersatzbrennstoffherzeugung und -vermarktung. Wenn die europäischen Anforderungen an die zulässige Schadstoffbelastung von standardisierten Ersatzbrennstoffen hoch ausfallen, wird der Aufwand für die Aufbereitung von Ersatzbrennstoffen aus Siedlungsabfällen steigen. Dies wird zu deutlichen Kostensteigerungen beim Erzeuger und Aufbereiter führen, mit der Folge höherer Kosten oder Zuzahlungen an den Abnehmer. Ersatzbrennstoffe aus schadstoffarmen Gewerbeabfällen dürften dagegen wegen des geringeren Aufbereitungsaufwandes deutlich kostengünstiger auf den Markt zu bringen sein und damit die Absetzbarkeit der hochkalorischen Fraktion aus Siedlungsabfällen weiter verschlechtern.

Sollten sich jedoch Bestrebungen durchsetzen, den Anteil an regenerativem Kohlenstoff im Ersatzbrennstoff für die Erzeugung von „grüner“ Energie anzuerkennen, öffnen sich neue ökonomisch interessante Perspektiven. Ob dieser Weg in Deutschland beschritten werden wird, ist noch offen. Die europäischen Nachbarn, allen voran die Niederlande, haben hierfür aber bereits die Weichen gestellt. ♦

## Literatur

- 1 **ARGEV:** Technischer Versuch zur Sortierung und Verwertung von ARGEV-Verpackungen aus MBA. Projekt 125/99, Vortrag und Folien von Erwin Janda (ARGEV), Oberpullendorf, 25. Februar 2000
- 2 **AWISTA:** Landeshauptstadt Düsseldorf, Düsseldorf der Abfallwirtschafts- und Stadtreinigungsbetrieb AWISTA: Tabellarische Auswertung der Messwerte (1996/97) hinsichtlich der Schadstoffbelastung von Hausmüll / Restmüll (und hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen). Faxmitteilung vom 26. Januar 1998
- 3 **Bidlingmaier, W.; Alt, M.:** Die Beeinflussung von Schwermetallemissionen aus Müllheizkraftwerken durch Vorsortierung des Inputmaterials; In: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Müllverbrennung und Umwelt, EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, Berlin, S. 535 – 569, 1985
- 4 **Bräutigam, A.; Fellmuth, P.:** Aufkommen, Umweltrelevanz, Sammlung und Sortierung zur Verwertung von Altbatterien. Müllhandbuch, Kz. 8528.1, Lfg. 9/99, 1999
- 5 **Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL):** Richtlinie Entsorgung von Abfällen in Zementwerken. Entwurf Stand 10. März 1996, versandt mit Einladung zur Stellungnahme am 28. März 1996
- 6 **Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL):** Richtlinie Entsorgung von Abfällen in Zementwerken. April 1998
- 7 **Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e.V.:** RAL-Gütezeichen 724 für Sekundärbrennstoffe. Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e.V. schließt Anerkennungsverfahren erfolgreich ab. Pressemitteilung, Köln, 5. Juli 2001
- 8 **Directive of the European Parliament and of the Council** on the promotion of electricity from renewable energy sources in the internal electricity market. 2000/0116 (COD), LEX 300, Brüssel, 27. September 2001
- 9 **El Dawi, K.I.; Stegmann, R.; Mast, P.-G.:** Vergleich der Müllzusammensetzung von Abfallbehandlungsanlagen. Bestimmung der Schadstoffe (Schwermetalle) in Hausmüll und hausmüllähnlichen Abfällen. TU Hamburg-Harburg, Mai 1997; Werte für Frischmüll ohne Problemabfälle; Analysenwerte berücksichtigen nicht die Metallfraktion
- 10 **ESW Consulting Wross Ziviltechnikergesellschaft mbH:** Analysenbericht, Betreff: Leichtfraktionen aus Hausmüll, Wien, 27. März 2002, w/a020241.1
- 11 **Flamme, S.:** Energetische Verwertung von Sekundärbrennstoffen in industriellen Anlagen – Ableitung von Maßnahmen zur umweltverträglichen Verwertung. Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft, Bd. 5, 2002
- 12 **Flamme, S., INFA Institut für Abfall, Abwasser und Infrastruktur-Management GmbH, Ahlen:** Schwermetallenfrachtung für Sekundärbrennstoffe. VDI-Wissenforum, Seminar 431801: Quecksilber – Emissionen, Meß- und Minderungstechniken. Düsseldorf, 26.-27. September 2002
- 13 **Harant, M.:** Stoffflußanalyse bei der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung vor der Deponierung. Dissertation am Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik, Montanuniversität Leoben, Februar 1999
- 14 **Korfmaier, H. (EPBA, Duracell):** Persönliche Information 3/2001, zit. von Rentz et al., 2001
- 15 **LAGA – Länderarbeitsgemeinschaft Abfall:** Maßstäbe und Kriterien für die energetische Verwertung von Abfällen in Zementwerken. Entwurf 31. Oktober 1997
- 16 **MAPAG Materialprüfung G.m.b.H.:** Prüfbericht: Untersuchung von 4 Bodenproben der Müllbehandlungsanlage Wien. Gumpoldskirchen, 28. Oktober 2002
- 17 **Ministero dell'Ambiente:** Decreto Ministeriale 5 febbraio 1998. Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22. Supplemento ordinario alle Gazzetta Ufficiale Della Repubblica Italiana. Serie generale n. 83, 16. April 1998
- 18 **Montan-Universität Leoben, Technische Universität München, Abfallwirtschaft & Umwelttechnik, Augsburg:** Endbericht zum Pilotprojekt Möglichkeiten und Grenzen des Restmüllsplittings am Beispiel der Abfallbehandlungsanlage Kufstein, im Auftrag von THONI Industriebetriebe G.m.b.H., Telfs, unter Patronanz des Landes Tirol, Dezember 1998
- 19 **Morf, L.; Ritter, E.; Brunner, P. H., TU Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft:** Online-Messung der Stoffbilanz auf der MVA Spittelau. Phase B – Messjahr 2001, im Auftrag der MA 22 und 48 der Stadt Wien und der Fernwärme Wien GmbH
- 20 **Morf, L.; Ritter, E.; Brunner, P.H.:** Güter- und Stoffbilanz der MVA Wels, ÖWAV-Bericht, 1997, hier: Tab. 4-41; (Projekt Mappe III). TU Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, A-1040 Wien
- 21 **N.N.:** Abfallentsorgung in Zementwerken, Thesenpapier, Umweltmaterialien Nr. 70, BUWAL, Dokumentationsdienst, CH-3003 Bern, 1997.
- 22 **NUA Niederösterreichische Umweltschutzanstalt GmbH, Maria Enzersdorf:** Gesamtbeurteilung über die Restmüllschwerfraktion 0/50 nach der Abfallaufbereitungsanlage der MA 48, Percostr. 2, 1220 Wien. Auftraggeber: MA 48, Auftrag-Nr. AB-548-1/3-2002, 29. November 2002
- 23 **Raffel, G.; Sedlak, R.; Keller, H.; Struwe, W.; Tellenbach, M.; Zaher, L.; Wurst, F.; Kuhlmann, K.:** Zement und Umwelt. Beiträge zur Enquete der österreichischen Zementindustrie, Wien, August 1995, S. 39 – 80; Hrsg.: Zement + Beton Handels- und Werbeges. m. b. H., Wien, im Auftrag der österreichischen Zementindustrie, dort zitiert: BUWAL: Regelungen über die Abfallentsorgung in Zementwerken. Thesenpapier der Arbeitsgruppe zuhnden der Kantone. Teilbericht 1: Brennstoffe. Verfasser: Dr. Graf AG, Bericht 93.91.2018, März 1994
- 24 **Rentz, O.; Martel, Ch.:** Analyse der Schwermetallstoffströme in Steinkohlefeuerungen unter besonderer Berücksichtigung des Betriebszustandes der Anlage. FZKA-BWPLUS-Bericht Nr. 6, 8/98
- 25 **Rotter, S.:** Potenzial und Verteilung von Schwermetallen in Haushaltsabfällen und Steuerungsmöglichkeiten durch Aufbereitung. TU Dresden, Schriftenreihe Beiträge zu Abfallwirtschaft/Altlasten, Bd. 27, 2002
- 26 **Rotter, S.; Kost, T.; Bilitewski, B.:** Verteilung und Steuerung von Stoffflüssen durch mechanische Aufbereitung von Haushaltsabfällen am Beispiel von Chlor und Schwermetallen. Müll und Abfall 9, S. 512 – 518, 2001
- 27 **Schachermayer, E.; Bauer, G.; Ritter, E.; Brunner, P.H.:** Messung der Güter- und Stoffbilanz einer Müllverbrennungsanlage. Bundesministerium für Umwelt, Wien: Monographien, Bd. 56, 1995
- 28 **Stercken:** Mündliche Mitteilung von Ergebnissen zum Einsatz von Müllschrott aus dem Abschlußbericht Recycling of Scrap for high Quality Products. Veröffentlichung in Vorbereitung, zit von Harant, 1999
- 29 **Suomen Standardisoimislitto:** Solid Recovered Fuel. Quality Control System, SFS 5875: E, Helsinki, 24. Januar 2000
- 30 **TBU:** Abfalltechnische Analysen von Leichtfraktion aus dem Restmüllsplitting, durchgeführt im Auftrag der Gemeinde Wien (Magistratsabteilung 48) und des SVZ (Sekundärrohstoffverwertungszentrum Schwarze Pumpe), Innsbruck, Juni 1999
- 31 **TBU:** Abfalltechnische Analysen von Schwerfraktion aus Restmüllsplitting, durchgeführt im Auftrag der Gemeinde Wien (Magistratsabteilung 48). Ergebnisbericht, Innsbruck, Juli 2001
- 32 **Technisches Büro Hauer Umweltwirtschaft, Korneuburg:** Feststellung des Gehaltes an Konsumbatterien in der Metallfraktion nach dem Magnetabscheider der Abfallaufbereitungsanlage. Analyseergebnisse. Korneuburg, 23. Oktober 2002
- 33 **Technisches Büro Hauer Umweltwirtschaft, Korneuburg:** Kunststoffanalyse – PVC-Anteil im Sortierrest. Korneuburg, 28. Oktober 2002
- 34 **Thomé-Kozmiensky, K. J.:** Überprüfung der technischen Parameter der Sortier- und Aufbereitungsanlage für Haus- und Sperrmüll der Stadt Wien, für den Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 48. Berlin, 12. August 2002
- 35 **Umweltministerium Niederlande:** Ministere van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieubeheer (VROM): Cadmium, kwik en lood in uit Azie geïmporteerde batterijen. Distributiecentrum VROM, Nr.: 17254/184, Juli 2000, zit von Rentz et al., 2001
- 36 **VDZ Verein Deutscher Zementwerke e.V.:** VDZ-Report '96
- 37 **Verband der Österreichischen Zementindustrie VÖZ:** Positivliste für die Verbrennung von Abfällen in Anlagen zur Zementherzeugung. 23. Juli 2001; online: <http://www.zement.at/downloads/positivliste3.pdf>
- 38 **Zeschmar-Lahl, B.:** Integration der Abfallaufbereitungsanlage der MA 48 in das Wiener Abfallwirtschaftskonzept. Leistungsteil 2: Stoffflußanalyse für die Wiener Abfallaufbereitungsanlage. Auftraggeber: Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 48. Oyten, 31. Januar 2003
- 39 **Zeschmar-Lahl, B.:** Schadstoffanreicherung im Erzeugnis aufgrund des Einsatzes von Ersatzbrennstoffen in Zementwerken und Feuerungsanlagen – erforderliche Reglementierungen aus der Sicht des technischen Umweltschutzes. Dissertation TU Berlin, Fak. III – Prozesswissenschaften, Juli 2003

Leicht überarbeiteter Nachdruck mit freundlicher Genehmigung des TK Verlags Karl Thomé-Kozmiensky. Der Originalbeitrag ist erschienen in: Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.): Ersatzbrennstoffe 3. Neurruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2003, S. 231 bis 260.

**Dr. Barbara Zeschmar-Lahl ist Geschäftsführerin der BZL Kommunikation und Projektsteuerung GmbH in Oyten, Lindenstr. 33, 28876 Oyten, Tel. 04207-91763-10, Fax. 04207-91763-12, eMail: [bzl@bzl.info](mailto:bzl@bzl.info), Internet: [www.bzl.info](http://www.bzl.info).**

Anzeige

[www.Kopytziok.de](http://www.Kopytziok.de)

