



Fachtagung am 05. Dezember 2002

# Restmüllanalysen – eine Grundlage eines nachhaltigen Stoffstrom- managements der Abfallwirtschaft

**Augsburg, 2002 – ISBN 3–936385–17–3**

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz  
Bürgermeister–Ulrich–Straße 160, 86179 Augsburg  
Tel.: (0821) 90 71 – 0  
Fax: (0821) 90 71 – 55 56  
E–Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: <http://www.bayern.de/lfu>

Zitiervorschlag:

Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Veranst.):

Restmüllanalysen – eine Grundlage eines nachhaltigen Stoffstrommanagements in der Abfallwirtschaft  
(Augsburg 05. Dezember 2002). Augsburg, 2002

Das Bayerische Landesamt für Umweltschutz (LfU) gehört zum Geschäftsbereich des  
Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU).

© Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg 2002

Gedruckt auf Recyclingpapier

## Inhaltsverzeichnis

<b>Einführung</b>	2
Dr.-Ing. Clemens Marb, LfU	
<b>Konzeption des FuE Vorhabens: Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen</b>	4
Ines Przybilla, LfU	
<b>Durchführung von Restmüllsortierkampagnen; Restmüllzusammensetzung in Abhängigkeit von der Abfallwirtschaftsstruktur</b>	12
Petra Hoeß, Eva Berthold, FABION GbR, Würzburg	
<b>Restmüllzusammensetzung in Abhängigkeit von der Siedlungsstruktur</b>	21
Janet Fripan, LfU	
<b>Ansätze zur verbesserten Wertstoffeffassung in Großwohnanlagen</b>	30
Dr. Siegfried Kreibe, BlfA GmbH, Augsburg	
Michael Schneider, Technische Universität München, Institut für Sozialwissenschaften	
<b>Der lange Weg zum Messwert: Probenahme und Probenvorbereitung</b>	38
Ines Przybilla, LfU	
<b>Matrixspezifische Analytik für organische Schadstoffe im Restmüll</b>	45
Dr. Wolfgang Körner, LfU	
<b>Matrixspezifische Analytik für organische und anorganische Schadstoffe im Restmüll – Anorganische Analytik mittels Röntgenfluoreszenzanalyse</b>	50
Dr. Thorsten Stahl, LfU	
<b>Stoffliche Zusammensetzung des Restmülls: Konzentrationen und Frachten</b>	54
Dr.-Ing. Clemens Marb, LfU	
<b>Nutzen der Kenntnis von Restmüllzusammensetzung und Schadstofffrachten für die abfallwirtschaftliche Praxis vor Ort</b>	68
Jochen Zellner, Landratsamt Neustadt a.d. Aisch – Bad Windsheim	
<b>Referentenverzeichnis</b>	80

## Einführung

**Dr.–Ing. Clemens Marb, LfU**

Seit Mitte der achtziger Jahre wurden in Bayern keine flächendeckenden Daten zur Zusammensetzung von Restmüll erhoben. Im vergangenen Jahrzehnt hat sich durch ein verstärktes Umweltbewusstsein [1], S. 519ff.] der Bürgerinnen und Bürger, durch gesetzliche Änderungen und Neuerungen – wie das Bayerische Abfallwirtschafts- und Altlastengesetz [2], die Verpackungsverordnung [3] oder das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [4] – ein starker Wandel von der Entsorgung zur integrierten Abfallwirtschaft vollzogen; die Abfallgesamtmasse blieb in erster Näherung konstant, wogegen in Bayern die Verwertungsquote bis auf über 70 Mass.-% [5] anstieg. Daneben liegen bislang nur bedingt detaillierte Informationen über Schad- und Inhaltsstoffe von Restmüll aufgrund der aufwändigen Gewinnung und Aufbereitung von repräsentativen Abfallproben vor.

Die Beurteilung abfallwirtschaftlicher Fragestellungen, wie z.B. die Bewertung unterschiedlicher Abfallwirtschaftskonzepte oder neuer Abfallverwertungs- und Beseitigungsverfahren, macht eine fundierte aktuelle Datengrundlage unerlässlich.

Der Titel der heutigen Fachtagung ist durchaus auch als Frage gemeint, die sicherlich Anlass zu kontroversen Standpunkten geben kann. *Restmüllanalysen, eine Grundlage eines nachhaltigen Stoffstrommanagements der Abfallwirtschaft* setzt voraus, dass

- Möglichkeiten zur repräsentativen Erfassung der Restmüllzusammensetzung bestehen,
- die hierbei erhobenen Daten von abfallwirtschaftlichem Interesse sind und
- sich aus der Kenntnis struktureller Ursachen der Abfallzusammensetzung Lenkungsinstrumente für die weitere Optimierung einer nachhaltigen Abfallwirtschaft ableiten lassen.

Ein wesentliches Ziel der Fachtagung ist zu prüfen, inwieweit diese Prämissen gültig sind.

Mit dem Ihnen vorliegenden Programm, haben wir einen Rahmen abgesteckt, der einerseits praktische Fragen der Abfallwirtschaft beleuchtet, andererseits Bezug nimmt auf ein vom LfU durchgeführtes FuE-Vorhaben mit dem Titel Schadstoffgehalt und Zusammensetzung von Siedlungsabfällen.

Dieses Vorhaben mit einer Laufzeit von fünf Jahren (April 1998 bis März 2003) wird mit 0,7 Mio € vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen gefördert und vom Josef-Vogl-Technikum des Bayerischen Landesamts für Umweltschutz in Augsburg-Lechhausen abgewickelt. Das Projekt wird mit mittelständischen Partnern durchgeführt, die entsprechend unserer Vorgaben die Abfallsortierung übernehmen. Damit kommt etwa ein Drittel der Fördergelder der mittelständischen Wirtschaft zugute.

Im Rahmen des Projekts wurde der Restmüll aus Haushaltungen in 11 bayerischen Landkreisen und 5 Städten repräsentativ beprobt. Ziel ist es, aktuelle Informationen über die Restmüllzusammensetzung in Bayern und deren zeitliche Entwicklung zu gewinnen. Neben der massenmäßigen Erfassung der Restmüllzusammensetzung ist eine umfassende physikalisch-chemische Charakterisierung des „Wertstoffs“ Restmüll ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten.

- [1] Anonym:  
Datenreport 2002. Zahlen und Fakten über die Bundesrepublik Deutschland. Hrsg.: Statistisches Bundesamt in Zusammenarbeit mit dem Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB) und dem Zentrum für Umfragen, Methoden und Analysen, Mannheim (ZUMA).  
Bundeszentrale für politische Bildung, Bonn 2002
- [2] Anonym:  
Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und sonstigen Entsorgung von Abfällen und zur Erfassung und Überwachung von Altlasten in Bayern (Bayerisches Abfallwirtschafts- und Altlastengesetz – BayAbfAIG) vom 27. Februar 1991 (BayRS 2129-2-1-U).  
Bayer. Gesetz- und Verordnungsblatt (1991) 4, S. 64
- [3] Anonym:  
Verordnung über die Vermeidung von Verpackungsabfällen (Verpackungsverordnung – VerpackV) vom 12. Juni 1991.  
BGBl. I (1991), S. 1234, zuletzt geändert durch VO vom 15. Mai 2002, S. 1572
- [4] Anonym:  
Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz – KrW-/AbfG) vom 27. September 1994.  
BGBl. I (1998), S. 2705, zuletzt geändert durch G. v. 22.6.1998, BGBl. I (1998), S. 1485
- [5] Anonym:  
Abfallwirtschaft – Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2000. Hrsg. Bayerisches Landesamt für Umweltschutz.  
Augsburg 2001

# Konzeption des FuE Vorhabens: Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen

Ines Przybilla, LfU

## 1 Ausgangssituation

Die Kenntnis der Abfallzusammensetzung ist Grundlage jeder abfallwirtschaftlichen Planung und Beurteilung; für die Konzeption von Abfallbehandlungsanlagen sind daneben der Schadstoffgehalt und die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Abfalls von großer Bedeutung [1]. Seit der letzten flächendeckenden überregional systematisch durchgeführten Sortieranalyse in Bayern im Rahmen der bundesweiten Abfallsortierkampagne in der Zeit von 1983 bis 1985 [2] hat sich die abfallwirtschaftliche Situation aufgrund von gesetzlichen und wirtschaftlichen Veränderungen erheblich gewandelt. Zahlreiche Städte und Gemeinden haben ihre Abfallsatzungen insbesondere im Bereich der Wertstoffeffassung geändert. Wesentlichen Einfluss hierauf hatten die Verpackungsverordnung von 1992 [3] sowie das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz von 1994 [4]. Zudem wird die Abfallzusammensetzung aus privaten Haushalten fortlaufend durch gesellschaftliche Faktoren (Verbraucherverhalten, Abfallberatung etc.) beeinflusst. Allein massenmäßig sind die Veränderungen in den Abfallströmen offensichtlich: Im Jahr 1988 betrug das Abfallaufkommen (Haus- und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle) in Bayern entsprechend der Abfallbilanz 274,1 kg/(E·a)[5], im Jahr 2000 nur noch 152,0 kg/(E·a) [6].

Aufgrund der ausgeführten abfallwirtschaftlichen Änderungen war für folgende beispielhaft aufgeführten Fragestellungen somit keine ausreichende Datenbasis vorhanden:

- Inwieweit werden Verwertungspotenziale ausgeschöpft?
- Welchen Einfluss hat das Wertstoffsammelsystem auf den Wertstoffanteil im Restabfall?
- Wie beeinflusst die Behältergröße das Abfallaufkommen und die Abfallzusammensetzung?
- Welchen Einfluss übt die Siedlungsstruktur auf das Verwertungspotenzial im Restabfall aus?
- Welche Schadstoffe werden mit dem Restmüll in Abfallbehandlungsanlagen eingetragen?
- Welcher Heizwert kennzeichnet den Restmüll aus Haushalten?

Informationen über den Anteil bestimmter Stoffgruppen oder die Veränderung von einzelnen Stoffströmen erhält man am besten durch Sortieranalysen. Daher führen zahlreiche Gebietskörperschaften eigene Sortieranalysen durch, um beurteilen zu können, ob eine Veränderung des eigenen Abfallwirtschaftskonzeptes aus ökonomischer und ökologischer Sicht angebracht ist. Einheitlich und vergleichbar sind diese Sortieranalysen – wie auch eine Zusammenstellung des LfU [7] zeigt – nur bedingt, so dass sich allgemeine Aussagen zu strukturellen Ursachen der Abfallzusammensetzung aus diesen Daten nur schwerlich ableiten lassen. Chemische und physikalisch-chemische Eigenschaften des Restmülls aus Haushalten bleiben i.d.R. bei den Sortierkampagnen der Gebietskörperschaften unberücksichtigt. Gerade in diesem Bereich werden aufgrund des großen Material- und Personalaufwands auf Seiten der Probenaufbereitung und Analytik nur sehr vereinzelt und eingeschränkt Untersuchungen (z.B. Wassergehalt, Glühverlust, Heizwert) durchgeführt.

Um o.g. Fragestellungen auch nur in Teilen beantworten zu können, sind nach einheitlichem Verfahren Sortieranalysen durchzuführen und von den sortierten Stofffraktionen systematisch die physikalisch-chemischen und chemischen Eigenschaften zu ermitteln.

## 2 Grundkonzeption

Bei dem FuE Vorhaben „Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen“ wurde festgelegt, dass innerhalb des Projektzeitraums von fünf Jahren in mindestens zehn bayerischen Gebietskörperschaften Restmüllsortieranalysen nach einem einheitlichen Verfahren durchgeführt, von den sortierten Stoffgruppen geeignete Proben genommen und im Labor auf physikalisch-chemische Eigenschaften und Schadstoffe untersucht werden.

Mit der Durchführung der Sortierkampagnen werden erfahrene mittelständische Unternehmen, z.B. Ingenieurbüros, beauftragt. Das Landesamt für Umweltschutz kontrolliert und begleitet die Untersuchungen, um eine einheitliche Vorgehensweise bei der Probenahme, Klassierung, Sortierung und Auswertung zu gewährleisten.

Projektstart war der 1. April 1998, die ersten Sortierungen wurden im November 1998 durchgeführt. Die letzten werden im Dezember 2002 abgeschlossen. Abschließende Ergebnisse – auch zu den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Restmülls – werden zu Projektende (April 2003) zur Verfügung stehen.

## 3 Untersuchungsumfang

Insgesamt werden im Rahmen des Projekts anstelle der vorgesehenen zehn 17 Sortieranalysen (15 Gebietskörperschaften mit zwei Wiederholungsmessung) durchgeführt. Die Auswahl der untersuchten Landkreise und Städte berücksichtigt sowohl die unterschiedlichen Gebietsstrukturen in Bayern, z.B. ländliche und ländlich dichte Gebiete, als auch die spezifischen abfallwirtschaftlichen Gegebenheiten, z.B. separate Erfassung von Bioabfällen im Bringsystem.

Entsprechend der bayerischen Abfallbilanz [6] lassen sich die Gebietskörperschaften strukturell in ländliche, ländlich dichte, städtische und großstädtische Gebiete einteilen. In Tab. 1 ist deren Verteilung sowie die der beprobten Gebietskörperschaften dargestellt. Von den knapp 12,2 Mio. Einwohnern im Freistaat wird im Rahmen des FuE-Vorhabens der Restmüll von fast 1,7 Millionen Bürgern (13,7 % der Bevölkerung) stichprobenweise beprobt. Der Anteil der bei den Sortierungen erfassten Einwohner je Strukturklasse ist nahezu identisch der Verteilung der gesamten Bevölkerung auf diese. Damit spiegelt die Stichprobenauswahl die Grundgesamtheit der Einwohner in Bayern bezogen auf die verschiedenen Einwohnerstrukturklassen repräsentativ wider.

Tab. 1: Strukturelle Aufteilung der Gebietskörperschaften in Bayern und im FuE-Vorhaben

Einwohnerstrukturklasse	Einwohner / km <sup>2</sup>	Anzahl der Gebietskörperschaften	Einwohner	Prozentualer Anteil der Einwohner [%]
ländlich	< 125	39	4.256.689	35
ländlich dicht	125 – 500	36	4.733.580	39
städtisch	500 – 1.750	18	1.250.369	10
großstädtisch	> 1.750	3	1.942.739	16
Summe		96	12.183.377	100

Struktur	Einwohner / km <sup>2</sup>	Anzahl der beprobten Gebietskörperschaften	beprobte Einwohner	Prozentuale Anteil der beprobten Einwohner [%]
ländlich	< 125	5	737.721	44
ländlich dicht	125 – 500	5	509.682	30
städtisch	500 – 1.750	4	195.500	12
großstädtisch	> 1.750	1	232.129	14
Summe		15 + 2*	1.675.032	100

\* zwei Gebietskörperschaften werden mit drei bzw. vier Jahren Abstand ein zweites Mal beprobt.

Will man die bayerischen Gebietskörperschaften bezogen auf die abfallwirtschaftlichen Gegebenheiten (insbesondere der Wertstofffassung, z.B. Bioabfall im Bring- oder Holsystem) in gleicher Weise repräsentativ erfassen, so werden schnell Grenzen deutlich: Die Gestaltung der Abfallsatzungen wird gemäß [8], [9] auf kommunaler Ebene geregelt, so dass sich im Extremfall die Satzungen sogar innerhalb einer Gebietskörperschaft von Gemeinde zu Gemeinde unterscheiden können. Hauptunterschiede zwischen den Gebietskörperschaften zeigen sich vorwiegend bei der Erfassung der Wertstofffraktionen im Hol- oder im Bringsystem. Die Tab. 2 gibt ansatzweise eine Zusammenstellung der Wertstofffassungssysteme wieder und unterstreicht, dass unter Berücksichtigung von diversen Kombinationsmöglichkeiten eine Vielzahl an unterschiedlichen Abfallwirtschaftssystemen möglich ist.

Tab. 2: Übersicht über Wertstofffassung im Holsystem in Bayern nach [6]

<b>Holsystems</b>	<b>Anzahl der Körperschaften</b>	<b>angeschlossene Einwohner</b>
Biotonne	79	79 %
Papiertonne	51	56 %
Papiersack	3	2 %
Bündelsammlung Papier	55	44 %
Straßensammlung Textilien	56	48 %
Abholung Grüngut	27	19 %
Abholung Kunststoffe (nicht DSD)	6	4 %
Tonne für gemischte Verpackungen	9	6 %
Sack für gemischte Verpackungen	52	45 %

Unter der Annahme, dass Wertstoffe, die gemäß Abfallsatzung zu zentralen Sammelstellen gebracht werden müssen (Bringsystem), aus Bequemlichkeit in geringerem Maße abgeschöpft werden als bei Holsystemen, so müsste sich dies auch auf die Zusammensetzung des Restmülls und das Abfallaufkommen auswirken. Einen bedeutenden Massenanteil der Wertstoffe stellt u.a. aufgrund des Wassergehalts die organische Fraktion dar. Die Unterschiede zwischen vergleichbaren Gebietskörperschaften sollten daher in Bezug auf das Bioabfallaufkommen im Restmüll besonders ausgeprägt sein. Um mögliche extreme Abfallaufkommen in bayerischen Gebietskörperschaften aufzeigen und beurteilen zu können, wurden daher bei der Auswahl der zu beprobenden Gebietskörperschaften die unterschiedlichen Hol- bzw. Bringsysteme für Bioabfälle berücksichtigt, auch wenn die Unterschiede zwischen Gebietskörperschaften aufgrund beispielsweise des Gebührensystems, der Bevölkerungsstruktur oder auch der Abfallberatungsaktivitäten weitaus vielschichtiger sind. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden insgesamt zehn Gebietskörperschaften mit Biotonne und fünf Gebietskörperschaften ohne Biotonne beprobt.

Mit den Gebietskörperschaften wird frühzeitig vor den geplanten Sortierungen Kontakt aufgenommen, da das Gelingen entscheidend von der Kooperation mit den Verantwortlichen in den zuständigen Behörden abhängig ist. Dies gilt insbesondere für die Auswahl der Sammelgebiete, die Suche einer geeigneten Sortierhalle und die Recherche von Daten für die Hochrechnung (z.B. Einwohnerzahl in den beprobten Gebieten und in der gesamten Gebietskörperschaft, entsorgte Abfallmasse im Untersuchungszeitraum).

## 4 Vorgehensweise bei den Sortierungen

Eine bundeseinheitliche Richtlinie zur Durchführung von Abfallsortieranalysen existiert nicht. Der Versuch, Regelungen im Rahmen des Anhang A II der Technischen Anleitung Siedlungsabfall (TASi) festzulegen, wurde auf Länderebene abgelehnt. Merkblätter zur Durchführung von Abfallsortieranalysen gibt es vom Verband Kommunaler Fuhrparks- und Stadtreinigungsbetriebe aus dem Jahr 1964. Seit dem Jahr 1993 existiert im Land Thüringen ein Merkblatt [10], wie dort Abfallsortieranalysen durchzuführen sind. Eine intensive Auswertung von Abfallsortieranalysen führte auch im Land Brandenburg zu einer Richtlinie, die vom Umweltbundesamt (UBA) empfohlen wird [11], [12] und in detaillierter Form die Vorgehensweise bei Abfallsortieranalysen beschreibt. Sie gibt Hinweise zu Vorplanung, Sammlung, Klassierung und Sortierung der Abfälle. In ähnlicher Form existieren Richtlinien des Freistaats Sachsen und Empfehlungen des Landes Nordrhein-Westfalen [13], [14]. In Tab. 3 sind die verschiedenen Abfallsortierrichtlinien und -merkblätter zusammengestellt.

Tab. 3: Übersicht über bestehende Abfallsortierrichtlinien

---

### **Merkblätter des Verbandes Kommunaler Fuhrparks- und Stadtreinigungsbetriebe und der Arbeitsgemeinschaft für kommunale Abfallwirtschaft (VKF/VKS), M 1 – 4 (1964) [15]**

- Mehrere Untersuchungen über das Jahr verteilt, jeweils 5 Tage
- Probenahme direkt vor Ort; Sortierung am gleichen Tag
- Aufteilung in Fein- (0–8 mm), Mittel- (8–40 mm) und Grobmüll (40–120 mm), Siebrest (> 120 mm) mittels Trommelsieb
- Stoffgruppen: Eisen- und NE-Metalle; Inertes einschl. Glas; Textilabfälle; Papier/Pappe/Stroh; Holz, Leder/Gummi/Horn/Knochen; Kunststoffe bei Grobfraction und Siebrest. Auslese von Eisen- und NE-Metallen aus der Fein- und Mittelfraction
- Zerkleinerung mittels Hammermühle auf unter 8 mm, daraus weitere Analyse auf Wassergehalt, Glühverlust

---

### **Vorgehensweise bei der bundesweiten Hausmüllanalyse 1983 – 1985 [2]**

- Stichprobeneinheit (SPE) 1 m<sup>3</sup>
- Sortiergruppen: Pappe, Papier, Verpackungsverbund, Fe-Metall, NE-Metall, Glas, Kunststoff, Textilien, Mineralien, Materialverbund, Windeln, Problemmüll, Vegetabilien
- Klassierung des Sortierrests nach 4 Klassen

---

### **Merkblatt des Freistaats Thüringen (1993) [10]**

- Stichprobenumfang 1 Mass.-% der Grundgesamtheit
- Berücksichtigung der jahreszeitlichen Schwankungen
- Siebanalyse für 8 mm und 40 mm
- Stoffgruppen: Pappe, Papier, Papierverbund, Kunststoffe, davon Folien, Glas, Fe-Metalle, NE-Metalle, Bioabfälle, sonstige Verbunde, Textilien, Inertes, Hygieneprodukte, Holz/Leder/Knochen/Gummi, Problemstoffe
- Physikalisch-chemische Untersuchungen

---

### **Richtlinie des Landes Brandenburg (1998) [12]**

- Stichprobeneinheit 1,1 m<sup>3</sup>
  - Stichprobenumfang mind. 20 SPE
  - Bei Unterteilung (Schichtung) mind. 6 SPE je Schichtungsmerkmal
  - Maschinelle Siebung bei 10 mm und 40 mm Lochdurchmesser
  - Sortierung nach Ober- und Untergruppen  
Obergruppen: Fe-Metalle, NE-Metalle, Papier/Pappe/Kartonagen, Glas, Kunststoffe, Organik, Holz, Textilien, Mineralstoffe, Verbunde, schadstoffbelastete Materialien
  - Berücksichtigung von jahreszeitlichen Schwankungen durch vier Wiederholungsuntersuchungen
-

Als Grundlage für die Durchführung der Sortierungen dieses Forschungsvorhabens wurde gemäß der UBA-Empfehlung die Richtlinie des Landes Brandenburg herangezogen und in einigen Aspekten modifiziert:

- Stichprobeneinheit 1,1 m<sup>3</sup>
- Stichprobenumfang mind. 20 SPE
- Schichtung nach „ländlich“, „städtisch“, „innerstädtisch“
- Maschinelle Siebung mittels Trommelsieb bei 10 mm und 40 mm Lochdurchmesser
- Sortierung des Siebüberlaufs nach Ober- und Untergruppen:  
Obergruppen: Papier/Pappe/Kartonagen, Glas, Metalle, Kunststoffe, Verbunde, Organik, Holz, Textilien, Hygieneprodukte, Inertes, Sonstige Stoffe, Problemstoffe
- Berücksichtigung von jahreszeitlichen Schwankungen durch zwei Wiederholungsmessungen

Bei dem FuE-Vorhaben werden in jeder ausgewählten Gebietskörperschaft zwei Sortieranalysen zu unterschiedlichen Jahreszeiten durchgeführt. Hierbei wird darauf geachtet, dass keine Ferienzeiten oder Feiertage im Beprobungszeitraum liegen.

In den Probenahmegebieten wird entsprechend Tab. 4 eine Unterteilung (Schichtung) in „städtisch“, „innerstädtisch“, „ländlich“ – bei kreisfreien Städten alternativ „Stadttrand“ – vorgenommen, die die Grundlage für die Hochrechnung auf die Gebietskörperschaft darstellt.

Tab. 4: Kriterien zur Auswahl der zu beprobenden Restabfalltonnen für das Schichtungsmerkmal „Gebietsstruktur“

<b>ländlich / Stadtrand</b>	<b>städtisch</b>	<b>Innerstädtisch</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Streusiedlungen und kleine Ortschaften</li> <li>▪ einzelne Häuser in ländlicher Umgebung</li> <li>▪ Grundstücke i.d.R. größer als 500 m<sup>2</sup></li> <li>▪ Nutzgartenanbau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ mehr oder weniger reine Wohngebiete</li> <li>▪ Mehrfamilienhäuser</li> <li>▪ auch mit privaten Zier- und Nutzgärten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ innerstädtische Wohnbebauung</li> <li>▪ i.d.R. mind. 7 Wohneinheiten</li> <li>▪ keine Nutzgärten</li> <li>▪ wenig oder keine Ziergärten oder Abstandsrün</li> </ul>

In jeder Sortierwoche werden mindestens 20 Stichprobeneinheiten (SPE) à 1,1 m<sup>3</sup> gesammelt und sortiert. Es werden dabei die in der Probenahmeplanung festgelegten Schichtungen nach den Siedlungsstrukturen mit jeweils mindestens sechs SPE berücksichtigt.

Die Siebung erfolgt maschinell. Hierfür wurde eine mobile Abfallsortieranlage (Abb. 1) konzipiert, die die beprobten Abfälle in die „physikalischen“ Fraktionen Fein-, Mittel- und Grobmüll klassiert. Ihr folgt die manuelle Sortierung der Grobfraction. Die Anlage besteht aus einer zweistufigen Siebtrommel (Durchmesser 1,2 m). Die Sieblänge liegt konstant bei zweimal 1,5 m; die Neigung der Trommel (0 – 3,5°) und die Umdrehungsgeschwindigkeit (Drehzahl 0 – 20 U/min) können stufenlos eingestellt werden und wurden aufgrund der Erfahrungen während der ersten Sortierung festgelegt. Im ersten Siebabschnitt wird die Fraktion  $d_p \leq 10$  mm, im zweiten Siebabschnitt wird die Fraktion  $10 \text{ mm} < d_p \leq 40$  mm abgetrennt, der Überlauf wird auf den Sortiertisch geleitet und manuell sortiert. Ausgelegt ist die Anlage auf einen Durchsatz von 300 kg/h Modellabfall. In der Praxis werden je nach Abfallzusammensetzung und Vorsortierung ca. 100 kg/h klassiert. Durch Integration der Anlage inkl. Aufgabe- und Fördereinrichtungen in einen Sattelaufleger ist ein mobiler Einsatz möglich. Ebenfalls fest verbunden mit der Anlage ist ein Zweiwellenzerkleinerer für die erste Probenvorbereitung zur physikalisch-chemischen Analytik. In dem Sattelaufleger steht zudem ein kleiner Arbeitsraum mit Werkbank für kleinere Reparaturarbeiten und Arbeitsplatte zur Probenvorbereitung zur Verfügung.

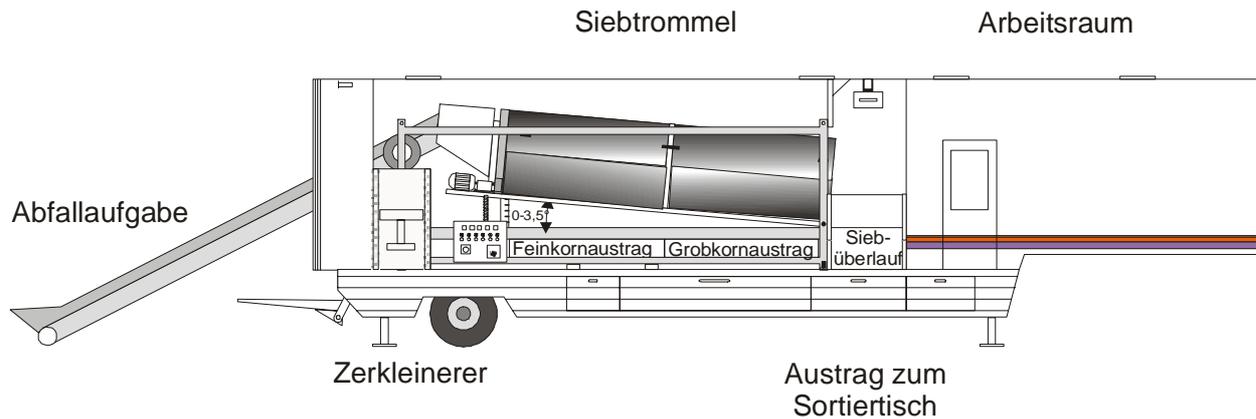


Abb. 1: Mobile Abfallsortieranlage, schematische Darstellung

Sortiert wird der Siebüberlauf ( $d_p > 40$  mm) in 47 Untergruppen (Tab. 5). Aufgrund der Erfahrungen während der ersten Sortierung wurde der Stoffgruppenkatalog gem. der Brandenburg-Richtlinie [12] in einigen Punkten modifiziert (vgl. Tab. 5). Da die Gruppe „Hygieneabfälle“ einen vergleichsweise großen Massenanteil am Restmüll einnimmt, wurde diese Stoffgruppe aus der Obergruppe „Verbunde“ herausgenommen und eine eigene Obergruppe gebildet; außerdem wurden aufgrund aktueller Fragestellungen die Verpackungen weiter in Verpackungen mit und ohne „Grünem Punkt“ aufgeteilt.

Tab. 5: Übersicht über die zu sortierenden Stoffgruppen

Obergruppe	Stoffgruppe	
Feinfraktion	Feinfraktion	
Mittelfraktion	Mittelfraktion	
Papier, Pappe, Kartonage	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ PPK-Verpackungen</li> <li>▪ PPK-Druckerzeugnisse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ PPK-Verpackungen (DSD)</li> <li>▪ Sonstige PPK</li> </ul>
Glas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Behälterglas</li> <li>▪ Sonstiges Glas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Behälterglas (DSD)</li> </ul>
Kunststoffe	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kunststoffverpackungen</li> <li>▪ Kunststofffolien (Verpackungen)</li> <li>▪ Sonstige Folien &gt; DIN A4</li> <li>▪ Sonstige Kunststoffartikel</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Kunststoffverpackungen (DSD)</li> <li>▪ Kunststofffolien (DSD)</li> <li>▪ Styropor</li> </ul>
Metalle	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fe-Metallverpackungen</li> <li>▪ NE-Metallverpackungen</li> <li>▪ Sonstige Metallteile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Fe-Metallverpackungen (DSD)</li> <li>▪ NE-Metallverpackungen (DSD)</li> </ul>
Organik	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Küchenabfälle</li> <li>▪ Tierkadaver</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gartenabfälle</li> <li>▪ Sonstige organische Stoffe</li> </ul>
Holz	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Holzverpackungen</li> <li>▪ Sonstiges Holz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Holzverpackungen (DSD)</li> </ul>
Textilien	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Bekleidungstextilien</li> <li>▪ Schuhe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sonstige Textilien</li> </ul>
Inertes	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inertes außer Glas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Inert-Verpackungen</li> </ul>
Verbunde	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbundverpackungen</li> <li>▪ Elektronikschrott</li> <li>▪ Fahrzeugteile</li> <li>▪ Sonstige Verbunde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Verbundverpackungen (DSD)</li> <li>▪ Renovierungsabfälle</li> <li>▪ Staubsaugerbeutel</li> </ul>
Hygieneprodukte	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Windeln</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hygienepapiere</li> </ul>
Sonstige Stoffe	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Leder</li> <li>▪ Sonstige Stoffe</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Gummi</li> <li>▪ Kork</li> </ul>
Problemabfall	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Problemabfall</li> <li>▪ Medikamente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Batterien</li> </ul>

Die Datenerfassung bei den Abfallsortierungen und die Hochrechnung der Ergebnisse nach unseren Vorgaben erfolgt durch beauftragte Dritte.

Bevor die Abfälle einer geordneten Entsorgung zugeführt werden, werden von den sortierten, gewogenen Abfallfraktionen Proben für die physikalisch-chemische Analytik entnommen (siehe Vortrag: Der lange Weg zum Messwert).

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen des hier vorgestellten 5-Jahres-Projekts werden nach einheitlichen Maßstäben Abfallsortieranalysen durchgeführt, ausgewertet und hochgerechnet. Damit sind die Ergebnisse der einzelnen Sortierungen untereinander vergleichbar. Entsprechend der Auswahl der Gebietskörperschaften lässt sich aus den Ergebnissen eine durchschnittliche Zusammensetzung des Restmülls aus privaten Haushalten in Bayern, sowie z.B. darin enthaltene Verpackungsmaterialien und / oder andere verwertbare Stoffen darstellen. Außerdem werden aufgrund der Schichtungskriterien in den Gebietskörperschaften Ergebnisse zu verschiedenen Siedlungsstrukturen gewonnen. Nicht zuletzt finden die Ergebnisse aus der physikalisch-chemischen Analytik Eingang in unsere vielschichtige Beratungs- und gutachterliche Tätigkeit.

## 6 Literatur

- [1] Anonym:  
Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz (TA Siedlungsabfall)  
BAnz. Nr. 99a 1993, S. 4967
- [2] Barghoorn M., Gössele P., Kaworski W.:  
Bundesweite Hausmüllanalyse 1983 – 1985, im Auftrag des Umweltbundesamts, Berlin 1986, 317 S.
- [3] Anonym:  
Verordnung über die Vermeidung von Verpackungsabfällen (Verpackungsverordnung), BGBl. I 1991, S. 1234; aktuelle Fassung BGBl. I 1994, S. 2705, , zuletzt geändert 2002, S. 3322
- [4] Anonym:  
Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschaft- und Abfallgesetz), BGBl. I 1994, S. 2705, zuletzt geändert 2002, S. 1572
- [5] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen:  
Abfallwirtschaft Hausmüll in Bayern Bilanzen 1988/90 und Ausblick, München 1991, 66 S.
- [6] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz:  
Abfallwirtschaft Hausmüll in Bayern Bilanzen 2000, Augsburg 2001, 78 S.
- [7] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz:  
Auswertung von Restmülluntersuchungen in bayerischen Gebietskörperschaften, München 1996, 56 S.
- [8] Anonym:  
Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und sonstigen Entsorgung von Abfällen in Bayern (Bayerisches Abfallwirtschaftsgesetz – BayAbfG), Fassung vom 9. August 1996, GVBl. 1996, S. 396; zuletzt geändert 2001, S. 140
- [9] Anonym:  
Gemeindeordnung für den Freistaat Bayern (Gemeindeordnung – GO), Fassung vom 22. August 1998, GVBl. 1998, S. 796, zuletzt geändert 2001, S. 140

- [10] Thüringer Ministerium für Umwelt und Landesplanung:  
Merkblatt zur Durchführung von Hausmüllanalysen, in St. Anz. Nr. 20/1993, S. 767–768, Erfurt 1993
- [11] Eisenblätter, R.:  
„Vereinheitlichung der Abfallanalytik aus Sicht des Umweltbundesamts“, Beitrag zur Tagung „Durchführung von Untersuchungen zu Mengen und Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle“, Potsdam 09.04.1997
- [12] Landesumweltamt Brandenburg:  
Richtlinie für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle im Land Brandenburg, in: Fachbeiträge des Landesumweltamts – Titelreihe Nr. 34, Potsdam 1998
- [13] Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie:  
Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen, Dresden 1998
- [14] Landesumweltamt Nordrhein–Westfalen:  
Leitfaden für die Analyse zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung von Abfällen aus Haushaltungen, in: Materialien Nr. 47, Essen 1998, 127 S.
- [15] Verband kommunaler Abfallwirtschaft und Stadtreinigung e.V. (VKS):  
Merkblatt M1–M4: Müllanalysen, 1964

# **Durchführung von Restmüllsortierkampagnen; Restmüllzusammensetzung in Abhängigkeit von der Abfallwirtschaftsstruktur**

**Petra Hoeß, Eva Berthold, FABION GbR, Würzburg**

## **Einleitung**

Im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz (LfU) führte das Büro FABION, Würzburg, im Zeitraum 1999 bis 2002 Restmüllsortierkampagnen in 12 Gebietskörperschaften (GK) durch. Die Sortierkampagnen sind Bestandteil eines mehrjährigen Projektes des LfU zur Untersuchung von Restmüll aus Haushaltungen in bayerischen Gebietskörperschaften.

In **Teil 1** des vorliegenden Beitrags wird die praktische Durchführung der Sortieranalysen mit Stichprobenplanung, Probenahme und Sortierung veranschaulicht.

In **Teil 2** werden die Ergebnisse aus den Untersuchungen im Hinblick auf die Abhängigkeit der Restmüllmasse und –zusammensetzung von der Abfallwirtschaftsstruktur vorgestellt.

## **Teil 1: Durchführung der Restmüllsortierkampagnen**

Es wurde der Restmüll aus Privathaushalten in acht Landkreisen, drei Städten und einem Zweckverband untersucht. Für jede Gebietskörperschaft wurden zwei fünf- bzw. zehntägige Sortieranalysen durchgeführt. Zur Ermittlung saisonaler Unterschiede fand jeweils eine Sortieranalyse in der warmen und eine in der kalten Jahreszeit statt. Der Gesamtumfang der Sortieranalysen betrug 28 Wochen.

## **Stichprobenplanung**

Im ersten Schritt wurden die für die Untersuchung erforderlichen Rahmendaten (Gebiets-, Siedlungs-, Abfallwirtschaftsstruktur) für die jeweilige Gebietskörperschaft erhoben. Die Erhebung wurde in Anlehnung an die "Richtlinie für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle im Land Brandenburg" durchgeführt [1]. Dazu wurde das Untersuchungsgebiet nach dem Schichtungsmerkmal „Gebietsstruktur“ in ländlich, städtisch und innerstädtisch unterteilt. Bei der Stichprobenplanung wurden darüber hinaus die Parameter Bioabfallfassung und Behältergröße berücksichtigt. Die Stichprobenziehung in den Gebietsstrukturen erfolgte nach Stichprobeneinheiten (SPE). Für eine statistisch abgesicherte Untersuchung sind mindestens 20 Stichprobeneinheiten zu je 1,1 m<sup>3</sup> erforderlich. Je Gebietsstruktur wurden 6 bis 8 Stichprobeneinheiten erfasst. Die Auswahl repräsentativer Beprobungsgebiete erfolgte durch Ortseinsicht sowie unter Berücksichtigung der Abfuhrpläne der Hausmüllabfuhr.

## **Probenahme**

Morgens vor der regulären Hausmüllabfuhr wurden die Stichproben gewonnen. Ein Pritschenwagen mit Hebebühne diente als Sammelfahrzeug. Die Müllproben wurden, getrennt nach Gebietsstrukturen, in Sammelbehältern (1,1 m<sup>3</sup> Container = 1 SPE) erfasst. Dazu wurde der Inhalt der ausgewählten Restmüllbehälter in den Sammelbehälter entleert, bis dieser vollständig gefüllt war [Abb. 1]. Die 1100 l Restmüllcontainer wurden ausgetauscht. Von jedem Restmüllbehälter wurden Größe, Füllgrad und Standort protokolliert. Anhand der Adresse konnte die Einwohnerzahl mit dem Einwohnermeldeamt abgeglichen werden.



Abb. 1: Probenahme

### Sortierung

Die Sortierung des Restmülls erfolgte separat für jede Stichprobeneinheit. Mit der mobilen Sortieranlage des LfU wurde der Restmüll in drei Korngrößen (Feinmüll  $\leq 10$  mm, Mittelmüll 10 – 40 mm, Grobmüll  $\geq 40$  mm) klassiert. Die Grobfraction wurde anschließend händisch in 47 Stoffgruppen sortiert [Abb. 2], das Material in Sortierbehältern (120 l Mülltonnen) erfasst. Bei der Vorgabe der Stoffgruppen durch das LfU fanden neben den Aspekten Material und Verpackung auch die Lizenzierung von Verpackungen durch die DSD AG (Unterscheidungskriterium Grüner Punkt) Berücksichtigung. Die Masse jeder Stofffraktion wurde mittels einer geeichten Bodenwaage bestimmt und protokolliert. Aus dem Mittelmüll wurden Batterien quantitativ erfasst. Eine repräsentative Stichprobe von 10 Litern wurde der Mittelfraktion entnommen, nach den Obergruppen Organik, Papier/Pappe/Kartonagen (PPK), Glas etc. händisch sortiert und deren Masse bestimmt.



Abb. 2: Sortierung der Grobfraction

## **Teil 2: Restmüllzusammensetzung in Abhängigkeit von der Abfallwirtschaftsstruktur**

Jede der 12 untersuchten Gebietskörperschaften hat ihre spezifische abfallwirtschaftliche Struktur. Die Abfallwirtschaftsstruktur umfasst die Systeme zur Restmüll- und Wertstoffeffassung (Behältersystem, Hol-/Bringsystem, Abfuhrturnus), die Art der Gebührenerhebung (Gebührenmaßstab), die Restmüllentsorgung sowie die Abfallberatung. Die spezifische abfallwirtschaftliche Struktur einer Gebietskörperschaft basiert auf dem Subsidiaritätsprinzip und resultiert aus den gesetzlichen Anforderungen sowie den regionalen Gegebenheiten. Sie ist eine gewachsene Struktur, die sich im Laufe von Jahren entwickelt hat. Deshalb findet man kaum zwei identische Abfallwirtschaftssysteme.

Der nachfolgende Beitrag untersucht den Einfluss der Abfallwirtschaftsstruktur auf die Restmüllmasse und -zusammensetzung. Im Einzelnen werden die Systeme zur Wertstoffeffassung (Hol-/Bringsystem) sowie unterschiedliche Gebührenmaßstäbe (Anreizsystem zur Abfalltrennung) betrachtet.

### **Methodik der Auswertung**

Die Ergebnisse der Sortieranalysen wurden gesondert für jede Gebietskörperschaft einer statistischen Auswertung und Hochrechnung unterzogen. Die Auswertung erfolgte zunächst je Stichprobeneinheit und je Gebietsstruktur. Die Ergebnisse wurden anschließend mittels separater Verhältnisschätzung anhand der Einwohnerzahl je Gebietsstruktur auf die jeweilige Gebietskörperschaft hochgerechnet. Zur Ermittlung der Jahresdurchschnittswerte je Gebietskörperschaft wurden die Einzelanalysen gewichtet und Mittelwerte gebildet. Die Gewichtungsfaktoren wurden anhand der Jahresganglinie des Restmüllaufkommens der jeweiligen Gebietskörperschaft ermittelt.

Der nachfolgenden Ergebnisdarstellung sind die Jahresdurchschnittswerte der untersuchten Gebietskörperschaften zugrunde gelegt. Für eine Gebietskörperschaft wurden die Ergebnisse der 1. Sortieranalyse herangezogen, da die Jahresdurchschnittswerte bisher noch nicht vorliegen. Es wurden jeweils Mittelwerte, Maximal- und Minimalwerte aus den separaten Untersuchungen in 12 Gebietskörperschaften ermittelt.

### **Ergebnisse**

In den Tabellen 1a und 1b sind die Systeme zur Wertstoffeffassung und Gebührenerhebung für die in die Untersuchung einbezogenen Gebietskörperschaften aufgeführt. Bioabfall, PPK und Leichtverpackungen (LVP) werden überwiegend im Holsystem erfasst, Dosen überwiegend und Behälterglas ausschließlich im Bringsystem. Bei der Abfallgebührenerhebung wird vorwiegend der Behältermaßstab (d.h. Gebührenbemessung nach der Behältergröße bei festgelegtem Mindestbehältervolumen pro Person) angewendet. In zwei Gebietskörperschaften kommt der Personenmaßstab (d.h. Gebührenbemessung nach der Personenzahl je Haushalt) zum Tragen.

Tab. 1a: Systeme der Wertstofffassung [2], [3]

Wertstofffraktion	System der Wertstofffassung			Gebietskörperschaften
	Holsystem	Bringsystem	keine Erfassung	
	Häufigkeit nach GK			Anzahl
Bioabfall	8 x	1 x	3 x	12
PPK	8 x	4 x	–	12
LVP	7 x	5 x	–	12
Dosen	3 x	9 x	–	12
Glas	–	12 x	–	12

Tab. 1b: Systeme der Gebührenerhebung [2],[3]

System der Gebührenerhebung		Gebietskörperschaften
Behältermaßstab	Personenmaßstab	
Häufigkeit nach GK		Anzahl
10 x <sup>(1)</sup>	2 x	12

<sup>(1)</sup> 1 Gebietskörperschaft zusätzlich Entleerungsmaßstab (Identifikationssystem)

Die Tabelle 2 gibt für die untersuchten Gebietskörperschaften die Restmüllmassen und maximalen Wertstoffpotenziale im Restmüll wieder. Im Durchschnitt liegt die Restmüllmasse bei 107,1 kg/(E·a). Sie schwankt stark zwischen 73,5 und 151,3 kg/(E·a). Das durchschnittliche Wertstoffpotenzial liegt bei 47,2 Mass.-%. Es zeigt eine maximale Schwankungsbreite von ca. 20 %. Betrachtet man die spezifischen Massen, so fallen die Unterschiede viel deutlicher aus. Die Wertstoffpotenziale differieren stark zwischen 30,9 und 75,4 kg/(E·a) [Abb. 3].

Tab. 2: Restmüllmassen und maximale Wertstoffpotenziale im Restmüll

	Restmüllmasse	maximales Wertstoffpotenzial	
	kg/(E·a)	kg/(E·a)	Mass.-%
Mittelwert (12 GK)	107,1	51,0	47,2
Schwankungsbreite (12 GK)	73,5 – 151,3	30,9 – 75,4	41,1 – 59,1

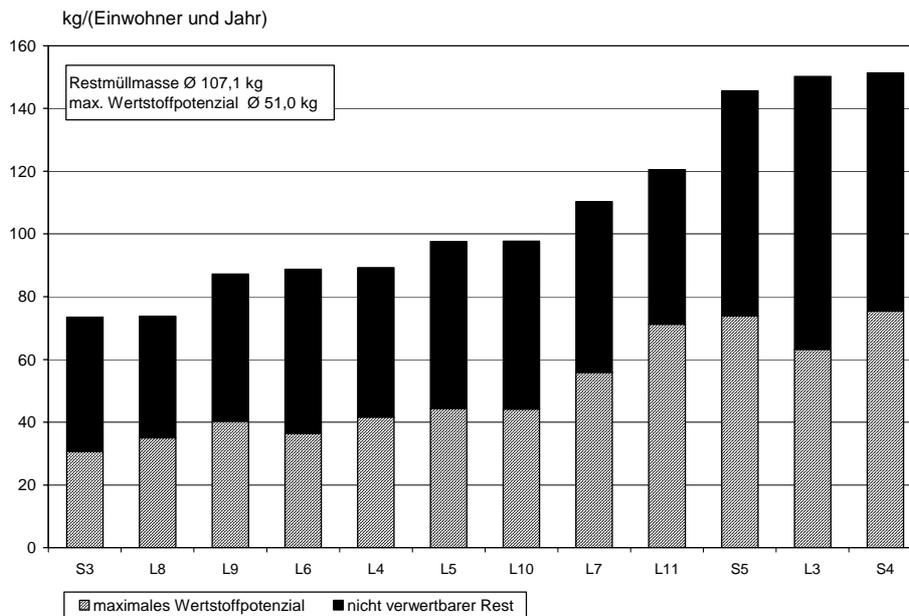


Abb. 3: Spezifische Restmüllmassen und maximale Wertstoffpotenziale im Restmüll (Bezeichnung der Gebietskörperschaften: S3 – S5 = Städte, L3 – L11 = Landkreise)

Das Wertstoffpotenzial setzt sich im Wesentlichen aus den Fraktionen Organik sowie LVP, PPK und Glas zusammen. Die einzelnen Wertstofffraktionen zeigen wie das Gesamtwertstoffpotenzial auffällige Schwankungsbreiten im Restmüll der Gebietskörperschaften [Tab. 3].

Tab. 3: Maximale Wertstoffpotenziale an Organik, PPK, LVP und Glas im Restmüll

	Organik > 40 mm	LVP	PPK	Glas
	kg/(E·a)			
Mittelwert (12 GK)	25,0	8,4	6,7	4,7
Schwankungsbreite (12 GK)	14,7 – 39,8	4,6 – 11,8	2,8 – 11,9	2,6 – 8,2

Für die einzelnen Wertstofffraktionen wurden die im Restmüll noch enthaltenen durchschnittlichen Potenziale bei verschiedenen Erfassungssystemen ermittelt [Abb. 4 – 6].

Für die **Organik** (Küchenabfälle, Gartenabfälle) wurden die Potenziale im Restmüll *mit* bzw. *ohne Bioabfallfassung im Holsystem* gegenübergestellt [Abb. 4]. Bei Bioabfallfassung im Holsystem beträgt das mittlere organische Potenzial 20,6 kg/(E·a) und liegt damit um 39 % unter dem Vergleichswert ohne Bioabfallfassung im Holsystem. Das organische Potenzial im Restmüll wird von Küchenabfällen dominiert, Gartenabfälle spielen kaum eine Rolle. Letzteres resultiert aus der Tatsache, dass in allen Gebietskörperschaften effektive und bürgerfreundliche Grünguterfassungssysteme installiert sind.

Für **LVP** (Kunststoff-, Verbund-, Metallverpackungen) wurden die Potenziale im Restmüll bei *Erfassung im Holsystem* (Gelber Sack / Gelbe Tonne) und bei *Erfassung im Bringsystem* (Wertstoffhöfe) gegenübergestellt [Abb. 5]. Für Kunststoff- und Verbundverpackungen liegen die mittleren Potenziale im Restmüll um 27 bzw. 23 % unter den Vergleichswerten bei Erfassung im Bringsystem. Dagegen scheint bei Metallverpackungen das Holsystem im Vergleich zum Bringsystem keinen signifikanten Vorteil zu bringen. Hier liegen die mittleren Potenziale im Restmüll bei beiden Erfassungssystemen auf vergleichbarem Niveau.

**Glas** wird in allen untersuchten Gebietskörperschaften *im Bringsystem* über Depotcontainer erfasst. Das mittlere Potenzial im Restmüll liegt für Behälterglas bei 4,0 kg/(E·a).

Für **PPK** (Druckerzeugnisse, Verpackungen) wurden die Potenziale im Restmüll bei *Erfassung im Holsystem* (Papiertonne) und bei *Erfassung im Bringsystem* (Depotcontainer) gegenübergestellt [Abb. 6]. Bei Erfassung im Holsystem liegt das mittlere Potenzial bei 5,0 kg/(E·a) und damit nur halb so hoch wie der Vergleichswert bei Erfassung im Bringsystem. Sowohl bei Druckerzeugnissen als auch bei PPK-Verpackungen reduziert die Erfassung im Holsystem die Potenziale im Restmüll deutlich gegenüber der Erfassung im Bringsystem.

In den folgenden Grafiken 4 bis 6 sind jeweils die Mittelwerte sowie die Maximal- und Minimalwerte ausgewiesen.

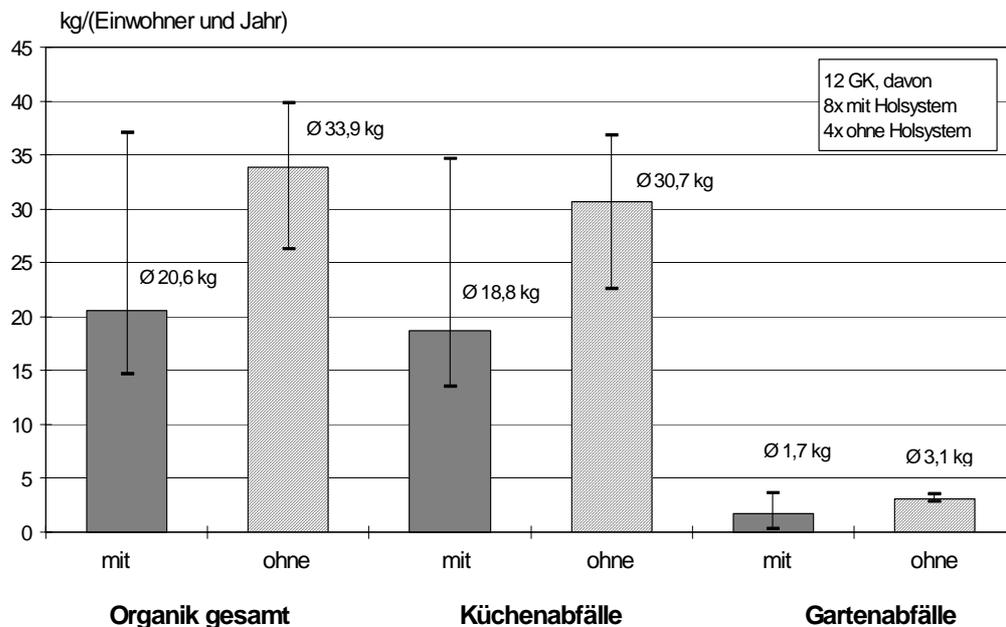


Abb. 4: Organik > 40 mm im Restmüll – Vergleich der Potenziale mit bzw. ohne Bioabfallerfassung im Holsystem

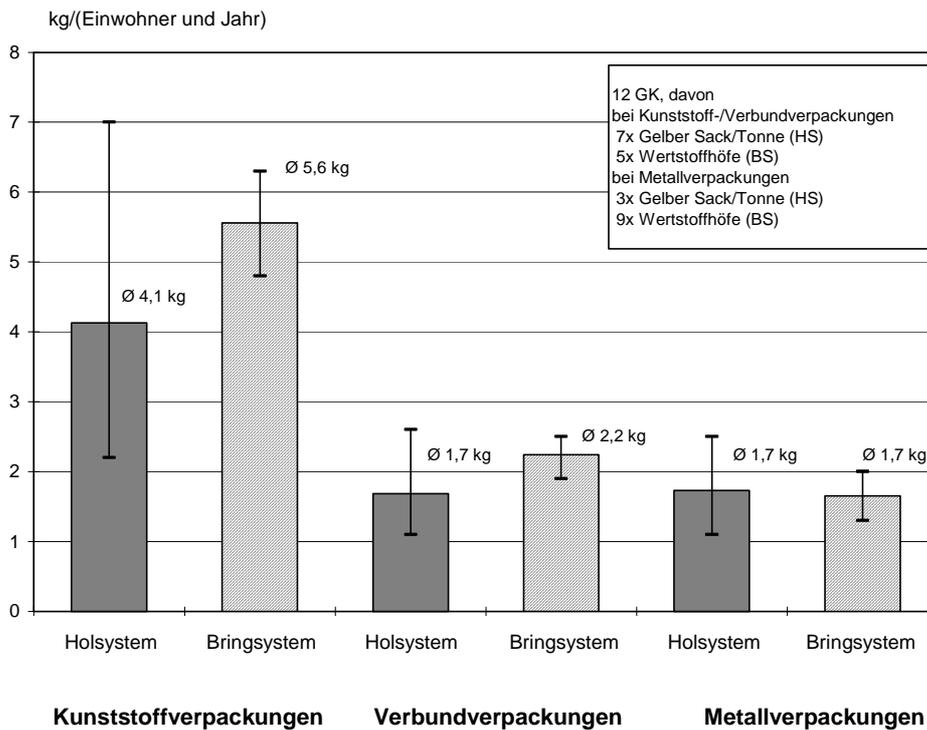


Abb. 5: Leichtverpackungen im Restmüll – Vergleich der Potenziale bei Hol- und Bringsystem

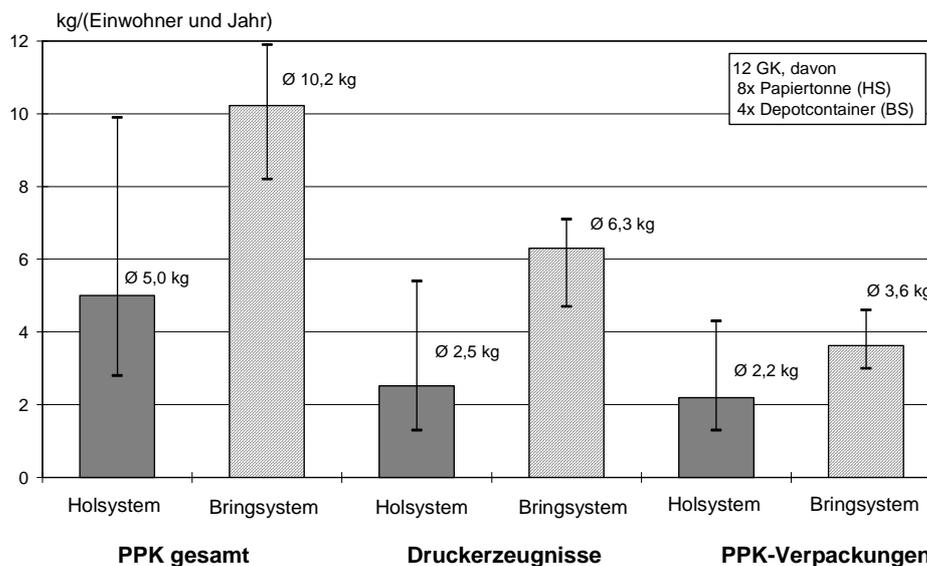


Abb. 6: Papier, Pappe, Kartonagen im Restmüll – Vergleich der Potenziale bei Hol- und Bringsystem

Bei den von uns durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass auch die Art der Abfallgebührenerhebung einen Einfluss auf die spezifische Behälterbereitstellung und –nutzung einerseits, die Restmüllmasse andererseits nimmt.

Zunächst lassen sich bei der spezifischen Behälterbereitstellung wie auch bei der Behälternutzung beträchtliche Schwankungsbreiten in den untersuchten Gebietskörperschaften feststellen [Tab. 4]. Vergleicht man die spezifischen Behältervolumina in Gebietskörperschaften mit Behälter- bzw. Personenmaßstab, so zeigen sich auffällige Unterschiede. In Gebietskörperschaften mit Behältermaßstab liegt die mittlere Behälterbereitstellung pro Einwohner um 38 %, die mittlere Behälternut-

zung um 31 % unter der in Gebietskörperschaften mit Personenmaßstab [Abb. 7]. Diese Tendenz scheint sich auch in der Restmüllmasse abzuzeichnen. Für Gebietskörperschaften mit Behältermaßstab wurde eine mittlere Restmüllmasse von 98,4 kg/(E-a), für Gebietskörperschaften mit Personenmaßstab von 150,8 kg/(E-a) ermittelt [Abb. 8].

Tab. 4: Spezifische Behälterbereitstellung und Behälternutzung

	Behältervolumen	
	bereitgestellt	genutzt
	l/(E-Wo)	
Mittelwert (12 GK)	17,9	16,0
Schwankungsbreite (12 GK)	10,7 – 26,9	9,6 – 22,1

In den folgenden Grafiken 7 und 8 sind jeweils die Mittelwerte sowie die Maximal- und Minimalwerte ausgewiesen.

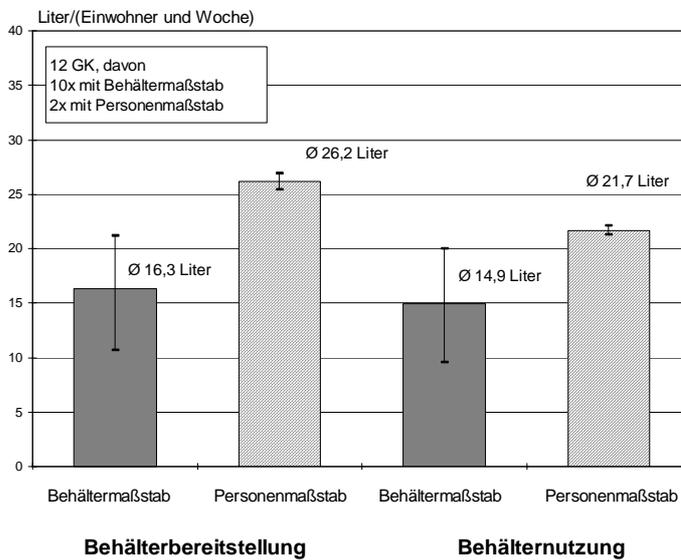


Abb. 7: Bereitgestelltes und genutztes Behältervolumen in Abhängigkeit vom Gebührenmaßstab

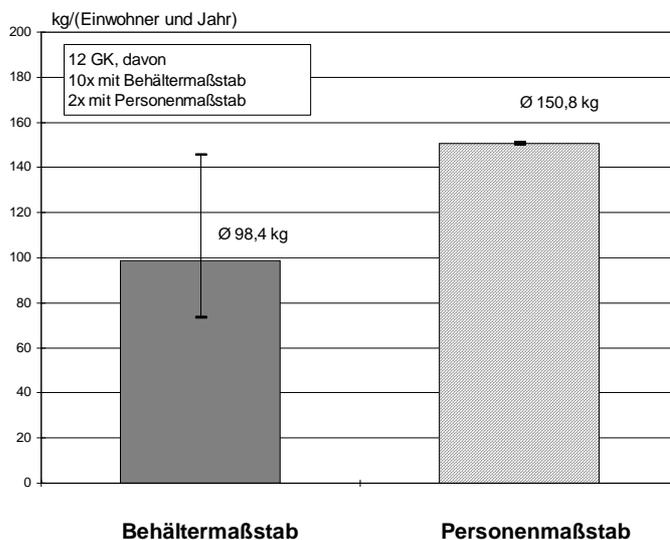


Abb. 8: Restmüllmasse in Abhängigkeit vom Gebührenmaßstab

## FAZIT

Gebietskörperschaften, die Holsysteme zur Wertstoffeffassung einsetzen, können die Restmüllmasse effektiv reduzieren. Gegenüber Bringsystemen sind Holsysteme i.d.R. effizienter.

Neben dem System der Wertstoffeffassung spielt der Modus der Gebührenerhebung eine wichtige Rolle. Eine behälterbezogene Gebühr bietet Anreize zur Abfalltrennung [4], was sich in einer geringeren Behälterbereitstellung und –nutzung widerspiegelt. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse lassen darüber hinaus, trotz der Vielzahl möglicher Einflussfaktoren, die Aussage zu, dass Gebietskörperschaften, die ihre Müllgebühren nach dem Behältermaßstab erheben, tendenziell eine geringere spezifische Restmüllmasse haben als Gebietskörperschaften, die den Personenmaßstab anwenden.

## Literatur

- [1] Landesumweltamt Brandenburg (1998): Richtlinie für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle im Land Brandenburg. – Fachbeiträge des Landesumweltamtes Nr. 34: 1–27, Potsdam.
- [2] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (2001): Abfallwirtschaft – Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2000, 80 S., (LfU) Augsburg.
- [3] Abfallwirtschafts- und Gebührensatzungen der Gebietskörperschaften.
- [4] Gallenkemper, Gellenbeck & Dornbusch (1996): Gebührensysteme und Abfuhrhythmen in der kommunalen Abfallwirtschaft, 163 S., (ESV) Berlin.

# Restmüllzusammensetzung in Abhängigkeit von der Siedlungsstruktur

Janet Fripan, LfU

## 1 Einleitung

Entsprechend den gesetzlichen Bestimmungen (Abfallwirtschaftssatzung) der einzelnen Gebietskörperschaften muss vom Bürger Restmüll (Abfall zur Beseitigung) getrennt von Wertstoffen (Abfall zur Verwertung) in dafür zugelassenen Behältnissen erfasst werden. Die Abfallentsorgung obliegt der Gebietskörperschaft (Landkreis, kreisfreie Stadt oder Zweckverband), die sich hierfür Dritter, insbesondere privater Unternehmen, bedienen kann.

Restmüllzusammensetzung und –aufkommen können in den einzelnen Gebietskörperschaften stark voneinander abweichen. Neben den vorhandenen Wertstofffassungssystemen vor Ort nehmen eine Vielzahl abfallwirtschaftlicher, soziologischer und siedlungsspezifischer Faktoren darauf Einfluss. Für eine gerichtete Bewertung der einzelnen Einflussfaktoren ist daher eine sorgfältige Probenahmeplanung erforderlich.

Nachfolgend sollen Einflussgrößen der Restmüllzusammensetzung genannt und die im Rahmen des aktuellen Projektes „Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen“ ermittelten Restmüligenschaften der Gebietsstrukturen und Bayerns dargestellt werden.

## 2 Einflussgrößen der Restmüllzusammensetzung

Im Folgenden sind Faktoren – vgl.[1], [2]– aufgelistet, die den Restmüll hinsichtlich Qualität und Quantität beeinflussen können: Fläche und Einwohnerzahl der Gebietskörperschaft; Jahreszeiten; Heizungsart; Behältergröße; Art der Wertstofffassung (Hol- und Bringsystem); Frequenz und Organisation der Abfuhr; Bemessung und Höhe der Gebühren; Öffentlichkeitsarbeit der Entsorgungsträger; örtliche und regionale Unterschiede in Wirtschaftskraft, Sozialstruktur und Gebietsstruktur (Siedlungsstruktur).

Das Zusammenwirken mehrerer Faktoren bestimmt die Zusammensetzung des Restmülls und erschwert so eine gezielte Bewertung der Einflussnahme einzelner Größen.

## 3 Siedlungsspezifische Einflussgrößen der Restmüllzusammensetzung

Die Schichtungsmerkmale Gebietsstruktur und Behältergröße zeigen bei Abfallsortieranalysen den signifikantesten Unterschied hinsichtlich der Restmüllzusammensetzung [3].

Im aktuellen Projekt wurde eine Schichtung des Untersuchungsgebietes nach Gebietsstrukturen (ländlich, städtisch, innerstädtisch) durchgeführt.

Je nach Definition der Gebietsstruktur spielen Konsumverhalten, Anonymität und soziale Kontrolle, Gebührenerhebung, Fluktuationsrate, Sprachprobleme und vorhandene Möglichkeiten zur Eigenkompostierung für die Restmüllzusammensetzung eine Rolle (in Anlehnung an [4]).

Hinsichtlich des Konsumverhaltens lassen sich folgende Aussagen treffen: Ein-Personen-Haushalte kaufen i.d.R. wesentlich mehr Fertiggerichte und haben daher ein höheres Verpackungsaufkommen als Mehr-Personen-Haushalte [3]. Bei Einwohnern von Geschosswohnanlagen steigert der höhere Konsum von Fertigprodukten und Einwegverpackungen gegenüber Einfamilienhäusern den Verpackungsanfall [5].

Die bestehende Anonymität an Grundstücken, auf denen mehrere Familien wohnen z.B. Geschosswohnanlagen, mindert den soziale Druck und somit das Verantwortungsbewusstsein zur getrennten Erfassung von Wertstoffen. Ablagerungen an Containerplätzen finden schnell Nachahmer. Eine nachgewiesene generelle Protest- und Verweigerungshaltung von Mietbewohnern bezüglich offiziellen Aufrufen der Hausverwaltungen zur Abfallvermeidung und -trennung scheint die ungenügende Wertstoffsammlung zusätzlich zu fördern [5].

Für die Gebührenerhebung ergibt sich vor allem bei Großwohnanlagen häufig der Nachteil einer nicht verursachergerechten Abrechnung. Besonders kleine Haushalte mit geringerem Müllaufkommen zahlen für die Restmüllentsorgung größerer Haushalte mit, was einer Bereitschaft zum gesteigerten Trennverhalten entgegenwirkt. Prinzipiell ist eine positive Wirkung der Gebührenberechnung auf Restmüllaufkommen und -zusammensetzung zu verzeichnen, wenn Kennungssysteme ( z.B. Identifikation der Leerungshäufigkeit, Banderolen, Wertmarken) zum Einsatz kommen [6].

Haushalte in ländlichen und städtischen Strukturen besitzen häufig einen Garten, in dem die Möglichkeit zur Eigenkompostierung gegeben ist; das verringert i.d.R. den nativ-organischen Anteil am Restmüll und folglich das Restmüllaufkommen in solchen Gebieten.

Eine hohe Fluktuationsrate, die besonders in Großwohnanlagen gegeben ist, führt zu einer unzureichenden Information neu hinzugezogener Bürger über die vorhandenen Schad- und Wertstoff- erfassungssysteme vor Ort.

#### 4 Restmüllaufkommen und -zusammensetzung der Gebietsstrukturen

Mit Stand November 2002 konnten zur Ermittlung von Restmüllaufkommen und -zusammensetzung der Gebietsstrukturen ländlich, städtisch, innerstädtisch die Restmüllsortierergebnisse von 13 untersuchten Gebietskörperschaften herangezogen werden. Es wurde eine Gesamtstichprobe von 86 Mg erfasst und sortiert, die dem Restmüll von ca. 22.000 Einwohnern entspricht.

Vier Städte, neun Landkreise und ein Zweckverband bilden hinsichtlich der Gebietskörperschaften den aktuellen Datenpool.

Das berechnete spezifische Restmüllaufkommen sowie die maximalen Wertstoffpotenziale der Gebietsstrukturen sind in Tab. 1 aufgezeigt.

Tab. 1: Spezifisches Restmüllaufkommen und maximales Wertstoffpotenzial der Gebietsstrukturen

	<b>ländlich kg/(E·a)</b>	<b>städtisch kg/(E·a)</b>	<b>innerstädtisch kg/(E·a)</b>
<b>Restmüllaufkommen</b>	109	102	131
<b>max. Wertstoffpotenzial</b>	47	50	71

Das geringste spez. Restmüllaufkommen hat im Mittel mit 102 kg/(E·a) die städtische Gebietsstruktur, während die innerstädtische mit 131 kg/(E·a) das höchste spez. Restmüllaufkommen aufweist. Für das maximale Wertstoffpotenzial zeigt sich im Gegensatz zum spezifischen Restmüllaufkommen eine klare Zunahme mit steigender Besiedlungsdichte. In ländlichen Strukturen liegt das Wertstoffpotenzial bei minimal 47 kg/(E·a) und in innerstädtischen Strukturen bei maximal 71 kg/(E·a). Folglich scheint die Bereitschaft zur getrennten Erfassung von Wertstoffen mit zunehmender Besiedlungsdichte abzunehmen. Diese Erkenntnis bestätigt o.g. genannte Wirkmechanismen siedlungsspezifischer Einflussgrößen.

#### 4.1 Restmüllzusammensetzung der Gebietstrukturen nach Obergruppen

Die Abb. 1 zeigt für ländliche, städtische und innerstädtische Struktur die Restmüllzusammensetzung nach Obergruppen. Die Hauptmasse am Restmüll der Gebietsstrukturen, d.h. ca. zwei Drittel, bilden die Stoffgruppen Feinfraktion, Hygieneprodukte, Organik und Mittelfraktion. Allein in der innerstädtischen Struktur sind zusätzlich in größeren Massen Papier, Pappe, Kartonagen enthalten. Der verbleibende Restmüll verteilt sich auf die Stoffgruppen Kunststoffe, Verbunde, Glas, Textilien, Inertes, Metalle, Holz, Sonstige Abfallarten und Problemabfall. Die Stoffgruppe Problemabfall (Batterien, Medikamente, sonstige Problemabfälle) ist am Restmüll jeder Gebietsstruktur mit geringsten Massen von 0,4 – 0,5 kg/(E-a) vertreten.

Die größten Massenanteile am Restmüll ländlicher, städtischer und innerstädtischer Strukturen trägt von allen Obergruppen mit 20,2 – 28,8 kg/(E-a) die Organik. Hierbei zeigt sich deutlich eine kontinuierliche Zunahme der Organikmasse mit der Bebauungsdichte.

Die spez. Aufkommen der Obergruppen sind bis auf Feinfraktion und Inertes für die innerstädtische Struktur am höchsten. Der wesentlich höhere Anteil der Feinfraktion in ländlichen Strukturen gegenüber innerstädtischen als auch städtischen ist hauptsächlich auf einen zunehmenden Anteil von Asche aus Ofenheizungen und Straßenkehrsicht zurückzuführen.

Für die Obergruppe Inertes ergibt sich als mögliche Ursache eine Zunahme der Aus- und Umbauaktivitäten mit abnehmender Besiedlungsdichte und der Entsorgung kleinerer Bauschutt mengen über die Restmülltonne.

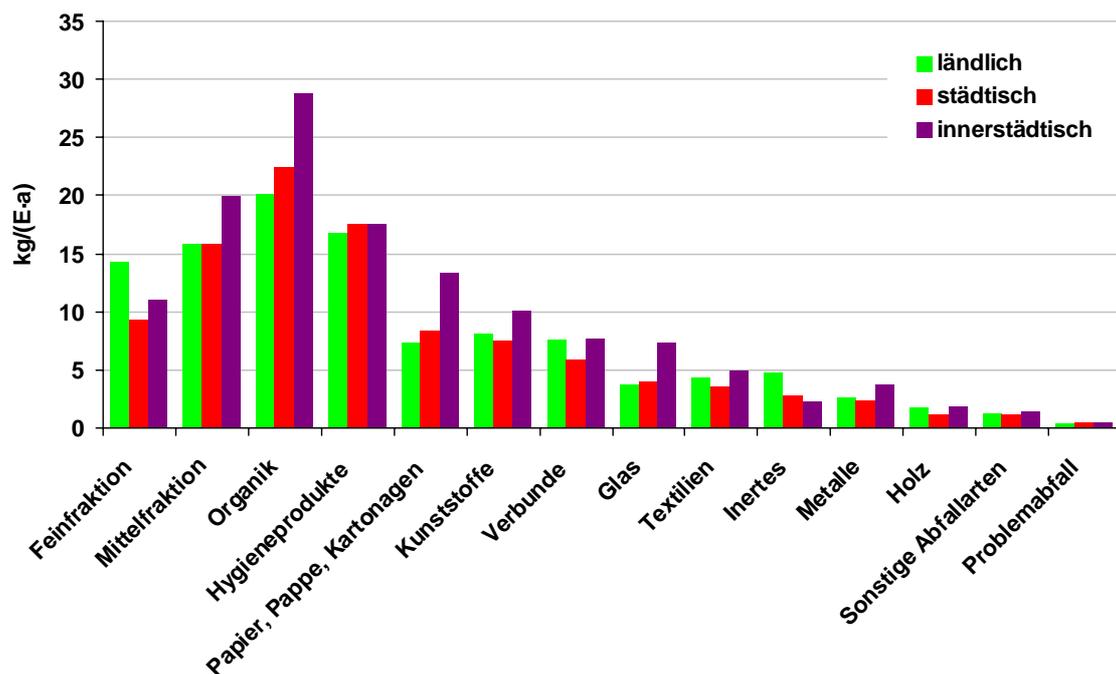


Abb. 1: Restmüllzusammensetzung ländlich, städtisch, innerstädtisch nach Obergruppen

#### 4.2 Restmüllzusammensetzung der Gebietstrukturen nach Wertstoffen

In der folgenden Abb. 2 sind die im Restmüll verbleibenden Massen von Wertstoffen aufgezeigt.

Den höchsten Anteil am Wertstoffpotenzial trägt für alle Gebietsstrukturen der Wertstoff Organik gefolgt von Papier, Pappe, Kartonagen, Kunststoffe, Glas, Textilien, Metalle, Holz, Elektronikschrott und Kork. Der Wertstoff Kork ist mit 0,2 kg/(E-a) am Wertstoffpotenzial ländlicher, städtischer und innerstädtischer Strukturen am geringsten vertreten. Für fast alle Wertstoffe liegen die spez. Aufkommen in der innerstädtischen Struktur über denen der ländlichen und städtischen.

Wertstoffe wie Organik, Papier, Pappe, Kartonagen, Kunststoffe, Glas und Verbundverpackungen zeigen eine Zunahme mit der Besiedlungsdichte. Diese Ergebnisse stützen die Annahme, dass in städtischen und vorrangig in innerstädtischen Gebieten die Bevölkerung eine getrennte Sammlung von Wertstoffen in geringerem Maße durchführt.

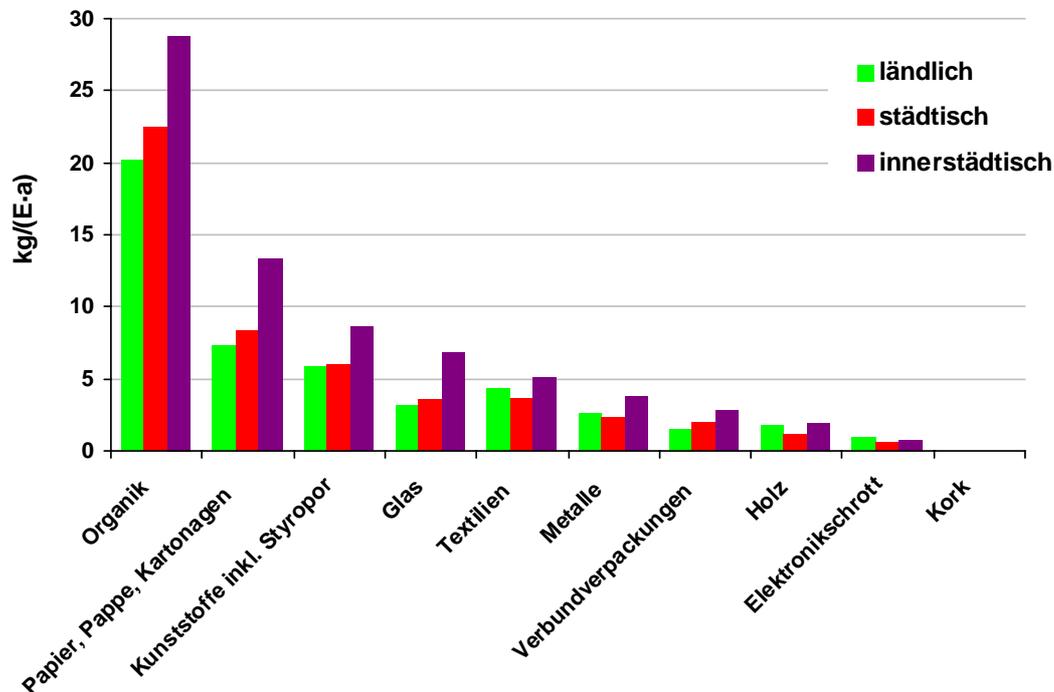


Abb. 2: Restmüllzusammensetzung ländlich, städtisch, innerstädtisch nach Wertstoffen

### 4.3 Zusammensetzung ausgewählter Wertstoffe

In den nachfolgenden Abbildungen ist die prozentuale Zusammensetzung nach Sortiergruppen für die Wertstoffe Kunststoffe, Organik sowie Papier, Pappe, Kartonagen (PPK) aufgeführt.

Der Wertstoff Organik, dargestellt in Abb. 3, setzt sich aus den Sortiergruppen Gartenabfälle, Küchenabfälle und sonstige Organik zusammen.

In jeder Gebietsstruktur dominieren die Küchenabfälle mit 88 – 91 Mass.-%, gefolgt von Gartenabfällen 8 – 11 Mass.-% und sonstiger Organik mit jeweils 1 Mass.-%.

Die Sortiergruppe sonstige Organik ist in jeder Struktur gleichermaßen vertreten und entsprechend ihrem Anteil von 1% unbedeutend. Der Anteil an Gartenabfällen nimmt im Restmüll mit zunehmender Bebauungsdichte leicht ab. In innerstädtischen Bereichen fehlen i.d.R. Nutzgärten und es gibt nur wenig Ziergärten bzw. Abstandsgrün, wodurch der Anfall an Grüngut gegenüber städtischen oder ländlichen Gebieten bereits gemindert ist. „Gartenabfälle“ innerstädtischer Bereiche sind größtenteils Zierpflanzen. Die zunehmenden Massenanteile an Gartenabfall in städtischen und ländlichen Gebieten sind folglich in dem höheren Anteil an Zier- und Nutzgärten begründet. Der im Vergleich zum gesamten Organik-Aufkommen geringe Anteil an Gartenabfall in diesen beiden Strukturen steht für die gute Getrennterfassung von Grüngut, z.B. über Gartenabfallcontainer oder Eigenkompostierung. Die Veränderung der Zusammensetzung „Organik“ in Abhängigkeit von der Siedlungsstruktur ist insgesamt als eher marginal zu werten. Das heißt das verminderte Absolutaufkommen von innerstädtisch zu ländlich verteilt sich proportional auf die Sortiergruppen.

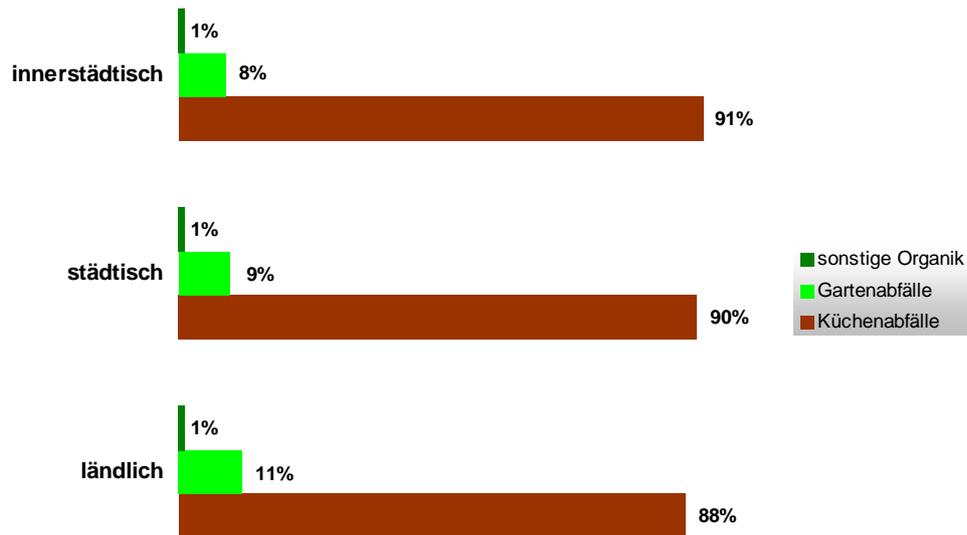


Abb. 3: Zusammensetzung Wertstoff Organik

Entsprechend Abb. 4 bestehen Papier, Pappe, Kartonagen (PPK) aus den Sortiergruppen Druckerzeugnisse, sonstige Papiere, Pappe, Kartonagen und Verpackungen.

In den untersuchten Gebietsstrukturen sind sonstige PPK mit 5 – 9 Mass.-%, Verpackungen mit 33 – 37 Mass.-% und Druckerzeugnisse mit 54 – 62 Mass.-% am gesamten Papier, Pappe, Kartonagen-Aufkommen ermittelt wurden.

Den größten Anteil am Wertstoff Papier, Pappe, Kartonagen machen mit mehr als die Hälfte in allen Strukturen die Druckerzeugnisse aus. Es zeigt sich eine deutliche Zunahme der Druckerzeugnisse im Restmüll mit der Besiedlungsdichte; die höchsten Massen an Druckerzeugnissen werden in innerstädtischen Strukturen über den Restmüll entsorgt. Der Anteil an PPK-Verpackungen nimmt mit zunehmender Besiedlungsdichte leicht ab. Unterschiedliche Konsumgewohnheiten in ländlichen, städtischen und innerstädtischen Gebieten könnten Ursache hierfür sein.

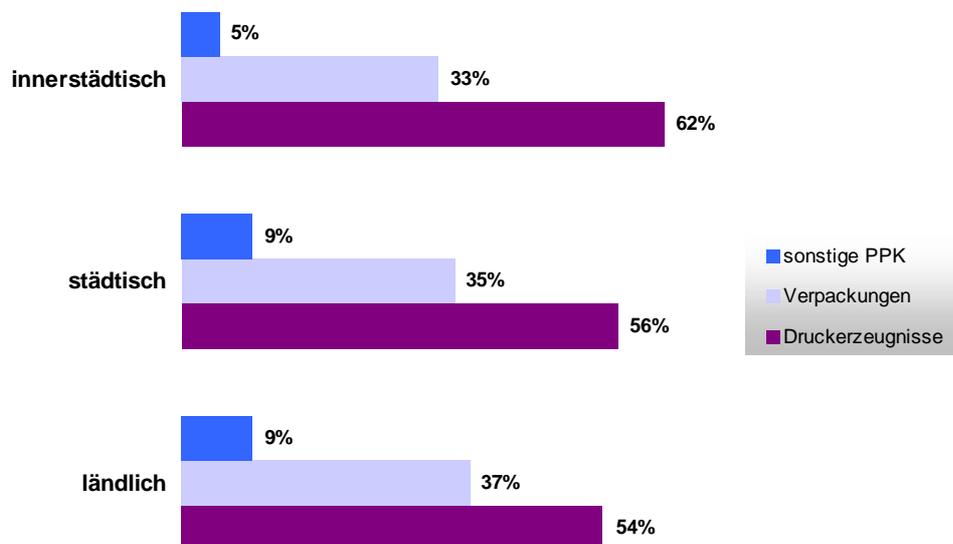


Abb. 4: Zusammensetzung Wertstoff Papier, Pappe, Kartonagen

In Abb. 5 sind die verschiedenen Sortiergruppen des Wertstoffes Kunststoffe für die Gebietsstrukturen aufgezeigt.

Die Kunststoffe wurden in Kunststofffolien, Styropor und Kunststoffverpackungen differenziert. Styropor ist in jeder Gebietsstruktur mit 2 Mass.-%, Folien mit 38 – 42 Mass.-% und Verpackungen mit 56 – 60 Mass.-% bestimmt wurden.

Den Hauptanteil an den Kunststoffen tragen in allen Strukturen Kunststoffverpackungen, wobei der prozentuale Anteil der Kunststoffverpackungen mit steigender Besiedlungsdichte zunimmt. Unterschiedliches Konsumverhalten, wie beim Wertstoff Papier, Pappe, Kartonagen bereits erwähnt, könnte Ursache hierfür sein. Im Gegensatz zu den Kunststoffverpackungen nehmen Kunststofffolien mit zunehmender Besiedlungsdichte ab. Der hohe Anteil an Folien im ländlichen Bereich kann hauptsächlich auf die Zunahme landwirtschaftlicher Folien, Säcke für Blumenerde usw. zurückgeführt werden.

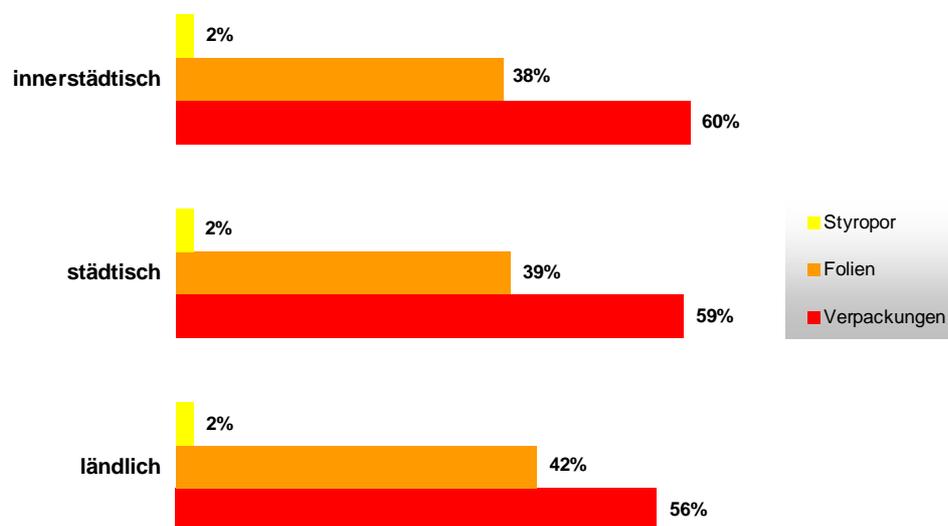


Abb. 5: Zusammensetzung Wertstoff Kunststoffe

#### 4.4 Leichtverpackungen

Die Stoffgruppen Aluminium, Kunststoffe, Verbundverpackungen und Weißblech werden als Wertstoffe zu den Leichtverpackungen (LVP) gezählt.

Aus den durchgeführten Untersuchungen ergeben sich für die definierten Gebietsstrukturen folgende Aufkommen an Leichtverpackungen im Restmüll: ländlich 7,6 kg/(E·a), städtisch 8,6 kg/(E·a) und innerstädtisch 12,8 kg/(E·a).

Der Anteil an LVP am Restmüll nimmt mit steigender Bebauungsdichte zu. So finden sich im Restmüll ländlicher Strukturen 60% weniger LVP wie vergleichsweise in innerstädtischen Bereichen. Neben dem Gesamtaufkommen an LVP im Restmüll unterscheiden sich die Gebietsstrukturen auch im Anteil lizenzierte LVP am Absolutaufkommen an LVP.

In ländlichen Strukturen sind 68 Mass.-% der LVP lizenziert, in städtischen 78 Mass.-% und in innerstädtischen 81 Mass.-%. Auch hier könnte wiederum das Kaufverhalten der Bevölkerung Ursache sein. In städtischen und innerstädtischen Gebieten konsumiert man zunehmend überregionale Waren mit lizenzierten Verpackungen aus größeren Einkaufsmärkten, während in ländlichen Gebietsstrukturen in größeren Mengen regionale Produkte ohne lizenzierte Verpackungen gekauft werden.

## 5 Restmüllaufkommen und –zusammensetzung Bayerns

### 5.1 Restmüllzusammensetzung nach Obergruppen

Das spezifische Restmüllaufkommen Bayerns liegt bei 114 kg/(E·a). Hauptmasseträger am Restmüll, siehe Abb. 6, sind Feinfraktion, Hygieneprodukte, Mittelfraktion und Organik. In größeren Mengen sind weiterhin Papier, Pappe, Kartonagen, Kunststoffe und Verbunde enthalten. Der übrige Restmüll verteilt sich mit abnehmenden Anteilen auf Glas, Textilien, Inertes, Metalle, Holz, Sonstige Abfallarten und Problemabfall. Mit 0,4 kg/(E·a) ist der Problemabfall in geringen Mengen im Restmüll zu finden.

Die größte Masse am Restmüll trägt mit 24 kg/(E·a) die Organik. Der hohe Anteil der Mittelfraktion resultiert daraus, dass ca. 80% der Mittelfraktion aus Organik und Holz bestehen. Bei hohen Organikgehalten ist i.d.R. auch der Anteil der Mittelfraktion hoch.

Die undifferenzierte Stoffgruppe Verbunde macht 7,4 kg/(E·a) am Restmüllaufkommen aus. Sie umschreibt alle Restmüllbestandteile, die eine feste Verbindung von mindestens zwei verschiedenen Materialien aufweisen. In ihrer prozentualen Zusammensetzung kann sie wie folgt charakterisiert werden: Sonstige Verbunde 36,2 Mass.-%, Verbundverpackungen 26 Mass.-%, Renovierungsabfälle 19 Mass.-%, Elektronikschrott 10,1 Mass.-%, Staubsaugerbeutel 8 Mass.-% und Fahrzeugteile 0,6 Mass.-%.

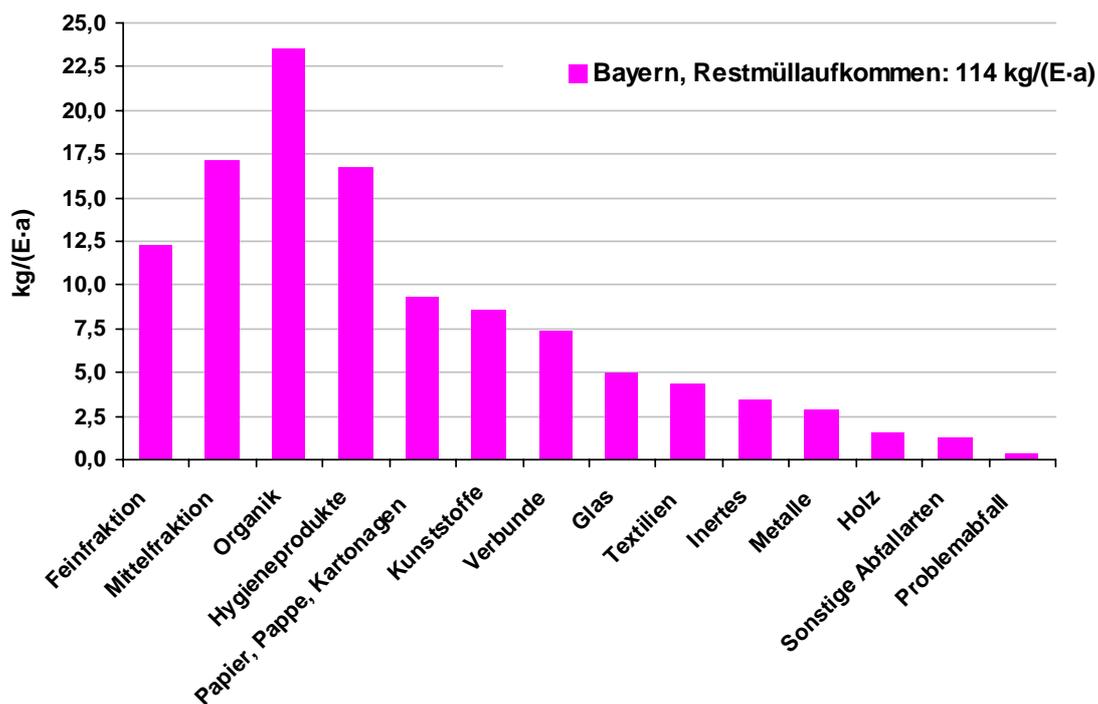


Abb. 6: Restmüllzusammensetzung Bayerns nach Obergruppen

### 5.2 Restmüllzusammensetzung nach Wertstoffen

Für Bayern ergibt sich ein maximales Wertstoffpotenzial von 55 kg/(E·a).

Den größten Wertstoffanteil am Restmüll, vgl. Abb. 7, trägt die Organik gefolgt von Papier, Pappe, Kartonagen, Kunststoffe, Glas, Textilien, Metalle, Verbundverpackungen, Holz, Elektronikschrott und Kork. Der Wertstoff Kork ist mit der geringsten Mengen von 0,02 kg/(E·a) enthalten.

Die Organik mit einem Aufkommen von 24 kg/(E-a) setzt sich aus 90,2% Küchenabfällen, 9,3% Gartenabfällen und 0,5% sonstigen organischen Stoffen zusammen. Prinzipiell liegt der Gehalt an Organik im Restmüll über dem angegebenen Wert bei ca. 38 kg/(E-a), da der organische Anteil des Mittelmülls, knapp 80% des Mittelmülls fallen auf Organik und Holz, nicht berücksichtigt wurde. Der geringere Anteil an Gartenabfällen unterstreicht die hohe Akzeptanz der Eigenkompostierung bzw. Effizienz anderer Verwertungswege.

Für Papier, Pappe, Kartonagen (PPK), deren Aufkommen bei 9,3 kg/(E-a) liegt, ergibt sich eine prozentuale Zusammensetzung von 58,3% Druckerzeugnisse, 20,5% PPK-Verpackungen (DSD), 13,7% PPK-Verpackungen und 7,5% sonstige PPK.

Mit 6,5 kg/(E-a) machen auch die Kunststoffe einen größeren Anteil am Wertstoffpotenzial des Restmülls aus. Die Zusammensetzung nach den Sortiergruppen zeigt eine Dominanz der lizenzierten Kunststoffverpackungen mit 48,6%, gefolgt von unlizenzierten Verpackungen mit 14%, sonstigen Folien 15,7%, Kunststofffolien (Verpackungen) 10,8%, lizenzierten Kunststofffolien 9,2% und Styropor 2%.

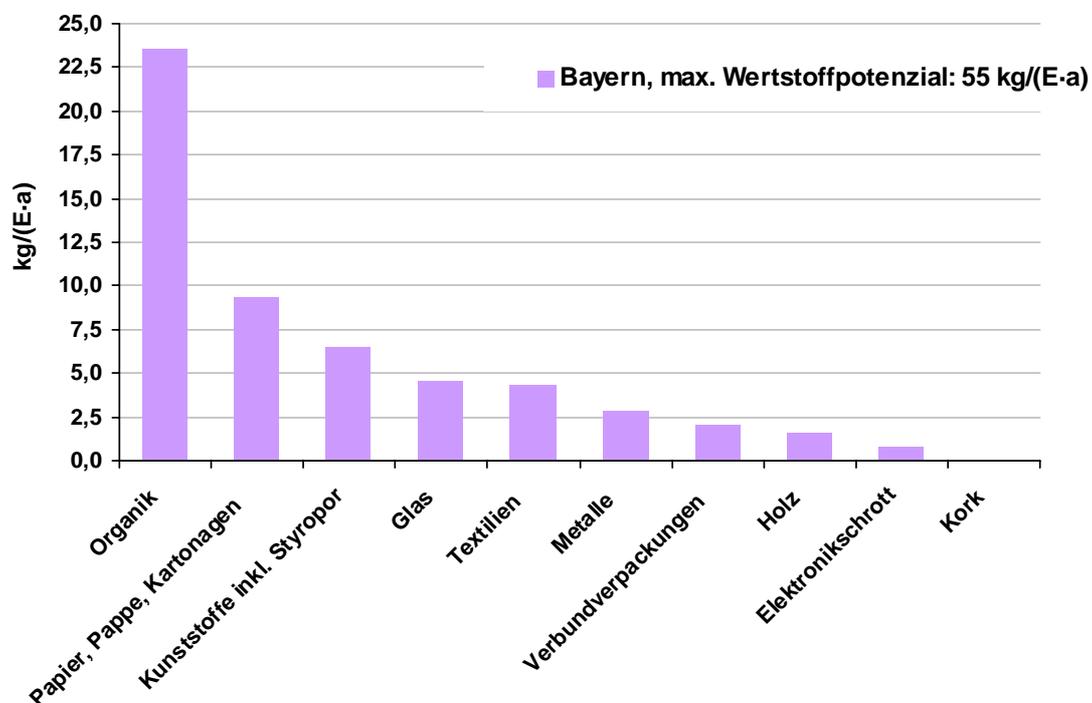


Abb. 7: Restmüllzusammensetzung Bayerns nach Wertstoffen

## 6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse des Projektes bestätigen, dass die Gebietsstruktur (ländlich, städtisch, innerstädtisch) maßgeblichen Einfluss auf das Restmüllaufkommen und die Restmüllzusammensetzung hat. Dabei beeinflussen oft andere nicht siedlungsspezifische Faktoren zusätzlich das Restmüllaufkommen und die –zusammensetzung nachhaltig.

Das spezifische Restmüllaufkommen der definierten Strukturen ist in städtischen Bereichen am geringsten und in innerstädtischen am höchsten. Hauptmasseträger sind in jeder Struktur Feinfraktion, Hygieneprodukte, Mittelfraktion und Organik. Für den Anteil an Wertstoffen im Restmüll ländlicher, städtischer und innerstädtischer Bereiche zeigt sich eine Zunahme mit steigender Besied-

lungsdichte, was auf eine abnehmende Akzeptanz einer separaten Wertstoffeffassung in städtischen und innerstädtischen Strukturen deutet. Den größten Anteil am Wertstoffpotenzial der Gebietsstrukturen hat die Organik. In größeren Massen enthalten sind außerdem Papier, Pappe, Kartonagen und Kunststoffe.

Für Bayern beläuft sich das spezifische Restmüllaufkommen auf 114 kg/(E-a) und das max. Wertstoffpotenzial auf 55 kg/(E-a). Gleichermaßen wie bei den Gebietsstrukturen tragen Feinfraktion, Hygieneprodukte, Mittelfraktion und Organik mit ca. 61% die Hauptmasse am Restmüll. Der Anteil an Problemmüll ist gering. Mit 24 kg/(E-a) ist die Organik dominierender Wertstoff im Restmüll, davon entfallen 90% auf Küchenabfälle. In der Praxis geht man davon aus, dass etwa ein bis maximal zwei Drittel des max. organischen Potenzials des Restmüll über eine Biotonne abgeschöpft werden können [7]. Zusätzlich gilt es zu beachten, dass viele Abfallsatzungen die hier im max. organischen Potenzial erfassten Stoffe (z.B. Knochen, Speisereste) für eine Verwertung aus grundsätzlichen Erwägungen [8], [9] ausschließen.

## 7 Literatur

- [1] Koller M.; Hermann T.; Plickert S.:  
Potenziale der ländlichen Restabfallentsorgung.  
Brandenburgische Umwelt Berichte (BUB) 9 (2000) S. 33–40
- [2] Bilitewski B.; Härdtle G.; Marek K.:  
Abfallwirtschaft – Eine Einführung.  
Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991
- [3] Abbe A.; Pohlmann M.; Schietinger G.; Stretz J.; Zachäus D.:  
Zusammenführung und gemeinsame Auswertung von Hausmüllanalysen.  
Abfallwirtschaftsjournal (1998) 3, S.17–21
- [4] Nolting, B. (ARGUS):  
Restmüllanalyse im Landkreis Schweinfurt.  
Berlin, 1996
- [5] Bayer. Landesamt für Umweltschutz:  
Abfallberatung bei Geschosswohnanlagen – Fachtagung am 17.07.2000.  
Augsburg, 2000
- [6] Einzmann U.; Turk T.; Fricke K.:  
Lenkungsfunction der Abfall- und Abfallgebührensatzungen.  
Müll und Abfall (2001) 8, S. 473–479
- [7] Wiemer, K.; Kern, M.:  
Bio- und Restabfallbehandlung IV, biologisch – mechanisch – thermisch.  
Potenziale zur stofflichen und energetischen Verwertung im Hausmüll.  
Witzenhausen, 2000
- [8] Marb, C.; Bittl, T.; Köhler, R.; Veit, N.:  
Kompostierung von Bioabfällen mit anderen organischen Abfällen – 2. Zwischenbericht. Teil B: Empfehlungen der bayerischen Gebietskörperschaften zur Sammlung von Bioabfällen – ein Vergleich.  
Bayer. Landesamt für Umweltschutz, Augsburg, 2002
- [9] Anonym:  
Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung – BioAbfV) vom 21.09.1998.  
Bundesgesetzblatt I (1998), Nr. 65, S.2955–2981

# Ansätze zur verbesserten Wertstoffeffassung in Großwohnanlagen

**Siegfried Kreibe, BfA GmbH**

**Michael Schneider, Technische Universität München, Institut für Sozialwissenschaften**

## 1 Ausgangssituation

Während der letzten Jahrzehnte konnten die Restmüllmengen aus Privathaushalten wesentlich reduziert werden. Die getrennte Erfassung von Wertstoffen hat hierzu einen wichtigen Beitrag geleistet. Gleichwohl gehen immer noch erhebliche Mengen an Wertstoffen über den Restmüll verloren. So berichtet der Landkreis Ostallgäu über 18,6 % organischer Reststoffe und über 23,6 % an Wertstoffen im Restmüll (EUWID 2002a).

Die Wertstoffanteile im Restmüll unterscheiden sich dabei nicht nur von einer Gebietskörperschaft zur anderen, sondern auch innerhalb der Gemeinden erheblich. Als besonders unbefriedigend erweist sich immer wieder die Trennqualität in dicht bebauten städtischen Gebieten, insbesondere in Großwohnanlagen (GWA). Das Wertstoffpotenzial im Restmüll ist in GWA oft doppelt so hoch wie in weniger dicht bebauten städtischen Bereichen. Dies zeigt, dass Versuche zur Steigerung der Wertstoffausbeute vor allem in GWA ansetzen müssen.

Maßnahmen zur Senkung der Wertstoffanteile im Restmüll wurden mit zum Teil großem Aufwand umgesetzt. Hierbei konnten zunächst durch grundlegende Maßnahmen erhebliche Fortschritte erzielt werden. Diese Maßnahmen können grob in vier Gruppen unterteilt werden.

### **Information der Bewohner**

In GWA wie auch in ganzen Gebietskörperschaften wurden Bürger durch Abfallberater und mit aufwändigen Kampagnen über Mülltrennung informiert. Über die Schulung in der richtigen Zuordnung der Abfälle hinaus erwies es sich dabei als sehr wichtig, über den Sinn der Abfalltrennung und über den Verbleib der aussortierten Wertstoffe zu informieren. Nach einer in Österreich durchgeführten Befragung in GWA vermuten mehr als 50% der Befragten, dass „alles wieder zusammengeworfen wird“ (Grassinger, D, Lebersorger, S. 2001, S. 28). Aus Deutschland wurden ähnliche Ergebnisse berichtet. Viele Bürger sehen auch hier keinen Sinn darin, sich als unbezahlte Sortierkräfte in ein „undurchschaubares“, vielfach „stinkendes“ und „unhygienisches“ System einbinden zu lassen, weil ja „letztlich doch alles verbrannt“, in „Entwicklungsländer exportiert“ oder „nur Minderwertiges damit fabriziert“ werde, so die qualitative Untersuchung von (Brand, K.-W., Eder, K., Pofnerl, A. 1997). Bei dieser Erwartungshaltung ist die Motivation zur Mülltrennung natürlich gering. Deshalb wurde durch Information über Postwurfsendungen, über Schulen, über die Lokalpresse und viele andere Pfade versucht, auch diejenigen Bürger zu informieren und zu motivieren, die bisher an der Thematik kein Interesse hatten.

Dabei konnten durchaus Fortschritte erzielt werden. Gerade in GWA blieb die Sortierqualität aber dennoch meist unbefriedigend. Es erwies sich, dass ein erheblicher Teil der Betroffenen nicht auf diese Maßnahmen ansprach. Diejenigen, die grundsätzlich erreichbar sind, reagieren zwar teilweise durch Einsicht und zum geringeren Teil auch durch Verhaltensänderung. In Befragungen wurde aber auch ein großer Teil an Personen ermittelt, die angaben, kein Interesse an weiteren Informationen zum Thema zu haben. Zur Illustration ein Zitat aus einer Umfrage zum Entsorgungsverhalten der Befragten: „Man hat ja noch anderes vor. So viel Rummel machen wir darum nicht. Kommt ja sowieso alles auf einen Haufen.“ (Priesemann, C. et al., 2001; S. 237). Diese Personen sind durch einfache Informationsmaßnahmen nicht zu erreichen.

### **Technische Maßnahmen**

Ein weiteres Handlungsfeld sind technische Maßnahmen. Bei kritischer Prüfung der Erfassungssysteme in GWA zeigt sich meist erheblicher Verbesserungsbedarf. Art und Größe der Behälter müssen dem tatsächlichen Bedarf angepasst werden, die Kennzeichnung ist oft unklar, die Aufstellung unübersichtlich. Das ungepflegte Erscheinungsbild vieler Standplätze motiviert nicht gerade zu einem korrekten Entsorgungsverhalten. Positiv wirken Maßnahmen, die eine Zuordnung der Müllcontainer zu wenigen Einzelhaushalten ermöglichen. Die Landesentwicklungsgesellschaft Bonn berichtet etwa über Gebühreneinsparungen in Höhe von 284.000 DM, die vor allem dadurch erreicht wurden, dass die Container zweier GWA jeweils einer überschaubaren Zahl von Wohneinheiten klar zugeordnet wurden und hausfremden Personen der Zutritt zu den Containern verwehrt wurde (EUWID 2002b).

Maßnahmen zur Verbesserung der Rahmenbedingungen vor Ort können also durchaus wirksam sein. Nach wie vor muss davon ausgegangen werden, dass in vielen Wohnanlagen durch einfache technische Maßnahmen eine deutliche Verbesserung des Trennergebnisses erreicht werden kann. Leitfäden für die systematische Analyse der Situation vor Ort können etwa über das Internet abgerufen werden. Besonders übersichtlich und knapp gehalten ist (Grassinger, D, Lebersorger, S. 2001). Auch diese Maßnahmen stoßen aber in GWA schnell an ihre Grenzen. Gegen Desinteresse und Uninformiertheit kommen ausschließlich technische Verbesserungen offenbar nur begrenzt an. Zudem ist fraglich wie lange einmal erzielte Verbesserungen stabil bleiben.

### **Ökonomische Anreize**

Schließlich wurden zahlreiche Versuche unternommen, durch ökonomische Anreize ein besseres Trennverhalten zu bewirken, also auch die Unmotivierten über ihre eigenen Interessen zu erreichen. Ein erster früher Schritt in diese Richtung war die Abrechnung nach Behältergröße. Vor allem in GWA blieb dies wenig erfolgreich. Die Entsorgungsgebühren werden über die Nebenkosten der Miete abgeführt oder als einer unter vielen Kostenbestandteilen der Wohngeldabrechnung von Eigentumswohnungen. Als separater Kostenfaktor werden sie daher selten wahrgenommen. Kaum ein Bewohner von GWA dürfte tatsächlich wissen, wie viel Geld er im Jahr für die Abfallentsorgung ausgibt. Gleichwohl machen die Entsorgungskosten für die gesamte Wohnanlage einen durchaus erheblichen Betrag aus.

Sehr wesentlich ist aber auch die Tatsache, dass meist keine direkte Zuordnung der Kosten zu einzelnen Wohneinheiten erfolgt. Die auch aus Platzgründen oft kaum vermeidbare gemeinsame Nutzung großer Müllcontainer durch viele Wohneinheiten verhindert diese klare Zuordnung. Hier könnten Müllschleusen Abhilfe schaffen: Mit Hilfe von z.B. Kennkartensystemen wird die Zahl der Einwürfe von Müllsäcken je Wohneinheit durch diese Schleusen dokumentiert und auf dieser Basis eine individuelle Umlage der Entsorgungskosten vorgenommen. In einer Wohnanlage in Ratingen, wo das Modell Zwickau eingesetzt wurde, konnten die Restabfallmengen um 43% reduziert werden (NN 2001). Andere Quellen weisen auf die geringe Bereitschaft öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger hin, Abfallgebühren in GWA direkt mit den Mietern abzurechnen, was durch deutlich höheren Verwaltungsaufwand erklärt wird. Unabhängig davon würden durch Müllschleusen in GWA größere Vermeidungseffekte erzielt als durch die Einführung kleinerer Solidargemeinschaften, die über einen Container entsorgen. Man müsse aber darauf achten, dass die Schleusensysteme alltagstauglich seien (Freistaat Sachsen 1999, Schlussfolgerungen).

Zwar sind trotz gestiegener Gebühren die Entsorgungskosten im Verhältnis zu den Gesamtausgaben eines Privathaushaltes immer noch kein zentraler Kostenblock. Das schiere Bewusstsein, mit jedem entsorgten Abfallbeutel auch direkt den eigenen Geldbeutel zu belasten, macht diese Kosten

aber erlebbar und dürfte so auch unabhängig von deren Höhe positive Wirkungen haben. Wenn allerdings die Entsorgungskosten von Bewohnern über die Sozialhilfe abgedeckt werden, ist ein unmittelbarer wirtschaftlicher Vorteil für diesen Personenkreis nicht gegeben. Ferner muss berücksichtigt werden, dass mit einer klaren verursachergerechten Zuordnung von Entsorgungskosten auch die Suche nach Alternativen mobilisiert wird. Es kann also nach Einführung solcher Lösungen zu vermehrter Entsorgung von Restmüll über andere Sammelsysteme wie Biotonne oder Gelber Sack kommen.

Ist eine verursachergerechte Zuordnung von Entsorgungskosten nicht realisiert, wie dies in GWA die Regel ist, so steht einem Verhalten, das die Entsorgungskosten für die gesamte GWA und damit auch für den Einzelnen senkt, ein klassisches Gefangenendilemma entgegen: warum soll ich als Einzelner Aufwand in Mülltrennung investieren, wenn meine Nachbarn sich nicht daran beteiligen?

### ***Kontrolle und Strafe versus Einbinden und Motivieren***

Schließlich bleibt noch der Weg der Kontrolle und Strafe: Der Einsatz von Müllkontrolleuren, die Möglichkeit, Abfallbehälter nicht zu entleeren, wenn die Sortierqualität schlecht ist, oder gar die Verhängung von Bußgeldern. Solche Maßnahmen können ebenfalls durchaus Wirkung zeigen. Aber auch hier gilt: In GWA ist der Effekt gering. Wer etwa unbeobachtet im Keller seine Abfälle entsorgt, geht nur ein geringes Risiko ein, erappt zu werden. Eine Kontrolle des Verhaltens von Einzelpersonen ist hier kaum möglich. Zudem wirken Drohungen grundsätzlich nicht motivierend, allenfalls Sanktionen meidend. Dies gilt vor allem dann, wenn angedrohte Maßnahmen wegen mangelnder Zurechenbarkeit der Verantwortung nicht realisiert werden können.

Maßnahmen, durch die Bewohner von GWA in Bemühungen zur besseren Mülltrennung eingebunden werden, motivierende Aktivitäten, die Rückmeldung von Erfolgen und ähnliche Ansätze sind grundsätzlich wirksamer, sofern es gelingt, die Bewohner einer GWA auch tatsächlich zu erreichen. Dies ist zunächst relativ aufwändig und verlangt in jedem Falle eine den örtlichen Gegebenheiten angemessene Vorgehensweise. In welchem Umfang die erreichten Verhaltensänderungen nach Abschluss solcher Maßnahmen stabil bleiben, muss jedoch im Einzelfall geprüft werden.

## **2 Problemfeld Großwohnanlage**

Alles in allem zeigt sich, dass GWA für die Realisierung einer guten Mülltrennung ein durchaus schwieriges Umfeld darstellen. In diesen Wohnanlagen kommen verschiedene Faktoren zusammen, zum Beispiel:

- In GWA ist eine direkte Verantwortung für die Befüllung eines bestimmten Abfallbehälters nicht gegeben. Viele Personen beschicken gemeinsam den gleichen Container. Die Auswirkung des Verhaltens Einzelner auf die Sortierqualität ist kaum wahrnehmbar.
- In GWA besteht kein direkter Zusammenhang zwischen dem eigenen Entsorgungsverhalten und der Höhe der Abfallgebühren. Eine verursachergerechte Gebührenzurechnung ist in der Regel nicht realisiert.
- Eine soziale Kontrolle des Entsorgungsverhaltens ist kaum gegeben. Zum einen sind GWA meist durch ein hohes Maß an Anonymität gekennzeichnet. Zum anderen erfolgt das Beschriften der Müllcontainer oft an für andere nicht einsehbaren Stellplätzen.
- Der Faktor „Gemeinschaft“ spielt in großen sozialen Einheiten bekanntermaßen eine geringere Rolle. Die Abstimmung von Verhaltensweisen untereinander, ein koordiniertes Vorgehen zur

Erreichung eines gemeinsamen Zieles ist schwer zu realisieren. Wir haben es zudem in GWA nicht mit einem stabilen Geflecht von Beziehungen zu tun, sondern mit einer Vielzahl kleinerer „sozialer Kreise“ sowie mehr oder weniger isoliert lebender „Wohngemeinschaften“.

- Die Sozialstruktur in GWA bietet häufig zusätzliche Probleme: Viele dieser Wohnanlagen sind durch einen hohen Anteil an Ausländern gekennzeichnet, was zum einen zu sprachlichen Schwierigkeiten führen kann und zum anderen – zumindest bei relativ neu hinzugezogenen Ausländern – geringe Vertrautheit mit den durchaus komplexen Entsorgungsgewohnheiten in Deutschland bedingt. Weiterhin ist die Bewohnerschaft häufig einer starken Fluktuation unterworfen.

In dieser Situation wirkt es sich besonders fatal aus wenn das Problem Mülltrennung als ein rein technisches oder ein rein ökonomisches betrachtet wird. Die GWA wird dann als bloßer Gegenstand von außen wirkender steuernder Maßnahmen begriffen (Informationen verteilen, Strafen einführen, Behälterstellplätze umgestalten, etc.), durch die der gewünschte Effekt erzielt werden soll. Entsprechend mechanistisch sind oft die Vorgehensweisen. Es gibt das isolierte, drohende Rundschreiben der Hausverwaltung, das in einem Stil gehalten ist, der jeden Menschen mit Rückgrat förmlich dazu zwingt, seinen Restmüll in die Biotonne zu werfen. Es gibt technische Veränderungen, die ohne hinreichende Information und bei mangelnder Kenntnis der Situation vor Ort umgesetzt werden und dann nicht akzeptiert werden oder sich als nicht wirklich problemangemessen erweisen.

Es gibt aber auch Fälle, in denen mit Geschick und Einfühlungsvermögen durch geeignete Maßnahmebündel an mehreren Stellen zugleich angesetzt und dann auch wirklich etwas erreicht wird. Solche koordinierten Maßnahmen verknüpfen dann etwa Informationskampagnen mit Verbesserungen der Erfassungssysteme oder Befragungsaktionen. Meist geschieht dies aber eher aus dem Gespür heraus. Selten unter gezielter und systematischer Berücksichtigung der Eigenarten der Sozialstruktur der jeweiligen GWA. Die Art der Maßnahmen, die miteinander kombiniert werden und die Art und Weise ihrer Ausgestaltung werden eher intuitiv ausgewählt.

Wer nicht nur zufällig zu einem wirksamen Mix gelangen will, muss davon ausgehen, dass es sich bei der Mülltrennung (nicht nur) in GWA um ein höchst komplexes sozio-technisches Problem handelt. Die Bewohner der Anlage bilden eine soziale Struktur, oder besser ein Bündel mehr oder weniger unvermittelt nebeneinander bestehender sozialer Strukturen oder Netzwerke (wie etwa die drei seit Jahren befreundeten benachbarten Familien, das weitgehend isoliert lebende Rentner-ehepaar, einige Familien mit kleinen Kindern, die über den Kindergarten häufig miteinander zu tun haben, zwei Gruppen von Jugendlichen, die einen ständig schwelenden Revierkonflikt austragen, drei alleinstehende Trinker, die ihre Abende grundsätzlich miteinander verbringen, der eine Eingang des Wohnblocks, hinter dem sich eine nahezu dorftartig organisierte Teil-Hausgemeinschaft verbirgt, etc.). Diese sozialen Netzwerke sind großenteils nur über eine Tatsache lose miteinander verknüpft, nämlich die, dass sie in der selben Wohnanlage leben. Die Netzwerke verlieren Mitglieder, sie gewinnen neue, manche Netzwerke lösen sich auf, andere entstehen neu, sie führen Auseinandersetzungen, sie beobachten einander, usw. Jeder einzelne Bewohner hat dabei eine Vielzahl an Interessen, Sorgen und Pflichten, unter denen die Mülltrennung nicht die wichtigste sein dürfte.

Dieses Bündel sozialer Netzwerke ist nun in die Gebäude- und damit auch Abfallsammelstruktur eingewoben. Ihre Mitglieder nutzen diese Infrastruktur, sie fühlen sich durch sie behindert, sie pflegen sie, sie beschädigen sie, etc. Von außen gesetzte Maßnahmen werden von jeder Person, von jedem Netzwerk anders wahrgenommen, es wird unterschiedlich auf sie reagiert. Dabei gibt es in der Regel keinen zentralen Ort der Abstimmung, der wirklich als solcher funktioniert. Nur dann

aber, wenn man diese Menschen und ihre Beziehungen ebenso als Teile ein und desselben Systems versteht wie die Müllcontainer, die Treppen, die Aushänge der Hausverwaltung und die Gebührenabrechnung, kann man innerhalb des Systems dauerhaft wirksam agieren.

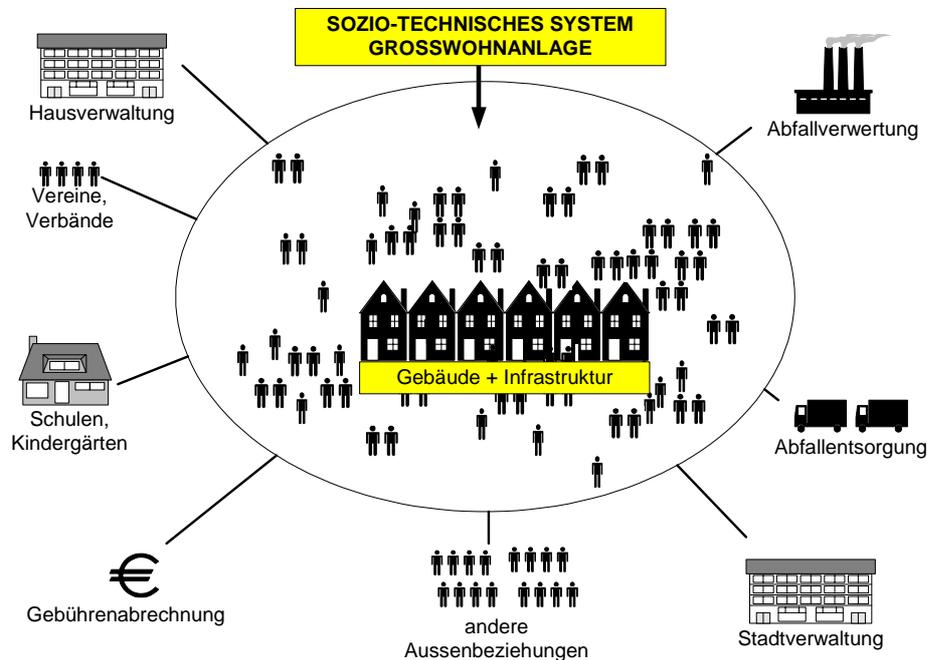


Abb. 1: Das sozio-technische System Großwohnanlage

Nach Erzielen erster Fortschritte sind viele Ansätze zur weiteren Verbesserung der Mülltrennung in GWA vermutlich deshalb gescheitert, weil diese Zusammenhänge nicht berücksichtigt wurden. Maßnahmen wurden von außenstehenden Personen konzipiert und realisiert. Die Bewohner der Siedlungen wurden als Gegenstand von Steuerungsmaßnahmen betrachtet, nicht aber als selbstständig handelnde Akteure. Die Aussichten, Verhaltensänderungen zu erzielen, sind aber – unabhängig vom Thema Mülltrennung – immer dann recht gut, wenn es gelingt, Aktivitäten zu initiieren, die von den Betroffenen selbst mit entwickelt und getragen werden. Dies ist gerade in GWA eine erhebliche Herausforderung. Daher haben wir uns entschlossen, ein Projekt zu initiieren, das zum Ziel hat, ausgehend von dem Verständnis der GWA als einem sozio-technischen System, das Mülltrennverhalten in GWA zu verbessern.

### 3 Das Projektkonzept

Der Projektkonzeption liegt also die Erkenntnis zugrunde, dass die Verbesserung der Trennqualität ein sozio-technisches Problem darstellt. Technische Faktoren wie Behältertyp, –aufstellung und –kennzeichnung oder Abholrhythmus, aber auch ökonomische Faktoren wie Gebührenhöhe, Art der Gebührenermittlung oder Bußgelder können immer nur im Kontext des örtlichen Sozialgefüges zur Wirkung kommen.

Die Arbeiten werden grob in vier Phasen gegliedert:

**Konzeptionsphase (heraus bekommen was der Fall ist):** Ehe die eigentliche Arbeit beginnt, müssen wir herausfinden, wie das sozio-technische System GWA konkret beschaffen ist. Wir müssen die Verhältnisse vor Ort kennen lernen. Wir wollen wissen, wie die Infrastruktur vor Ort beschaffen ist, welchen Stellenwert Mülltrennung im Moment hat, wie wichtig sie den Menschen ist, warum sie nicht befriedigend funktioniert. Wir wollen wissen, welche formellen und informellen Gruppen in der GWA von Bedeutung sind und vieles andere mehr.

Wie geht man an solche Fragen heran? Vor ähnlichen Fragestellungen steht auch die produzierende Industrie. Hier ist es etwa die Frage, warum Qualitätsmängel auftreten und wie sie behoben werden können. Man weiß dort inzwischen, dass wesentliche Ursachen für Qualitätsmängel nicht erkannt und behoben werden können, wenn die Mitarbeiter in der Fertigung nicht in die Analyse und in die Qualitätssicherungsprozesse eingebunden sind. Die handelnden Personen haben das detaillierteste Wissen über die Situation vor Ort.

Im übertragenen Sinne heißt das: Niemand kennt die Verhältnisse, kennt die Motivationslagen, kennt die spezifischen Probleme und Schwierigkeiten, die eine Abfalltrennung in GWA behindern, so gut wie die Bewohner der Wohnanlage selbst. Wir betrachten die Bewohner daher als Experten für ihre eigene Situation. Wir wollen ihr Wissen nutzen. Natürlich liegen diese Kenntnisse nicht wohlstrukturiert und abrufbar vor. Die methodische Herausforderung liegt darin, das zunächst unstrukturierte und nur teilweise bewusste Wissen zu aktivieren. Es muss durch geeignete Frage- und Beobachtungstechniken sowie Auswertungsmethoden strukturiert werden. Die Nutzung von Gruppenprozessen und ihres auch kreativen Potenzials, und zwar unter Einbeziehung der Betroffenen ist hierzu eine zielführende Vorgehensweise. Wenn es zudem gelingt, vor Ort ein lokales Netzwerk von Betroffenen zu etablieren und in die Umsetzung von Maßnahmen einzubinden, bestehen gute Aussichten, auch dauerhafte Verbesserungen zu erzielen.

**Erhebungsphase (festlegen, was zu tun ist):** Mülltrennung ist für viele Personen in GWA kein wesentliches Thema. Eine Änderung von Verhaltensweisen ist aber erst dann erreichbar, wenn Interesse an der Thematik geweckt werden kann. Wie ist das möglich? Wie gehen Andere an solche Aufgaben heran?

Wenn eine Firma ein neues Produkt auf den Markt bringen will, findet dieses zunächst auch keine besondere Aufmerksamkeit. Wer interessiert sich schon für die neuen Turnschuhe der Firma Schmitzhuber? Der Bereich, aus dem wir hierzu vieles lernen können, ist der des kommerziellen Marketing.

Dabei ist nicht gemeint, dass Fernsehspots über Mülltrennung gesendet werden sollen. Viel interessanter für unsere Fragestellung ist ein früherer Schritt der Entwicklung von Marketingkonzepten: die Erforschung der Motivationslagen der Betroffenen. Was bedeutet ihnen Mülltrennung, was interessiert sie daran, was nicht, was belustigt sie, was ärgert sie, was sind drängendere Probleme in der GWA, was ist ihnen sonst noch wichtig, was bereitet ihnen Vergnügen, was spricht sie an? Über die so gewonnene Kenntnis der Motivationslagen können wir einen Zugang zu den Betroffenen finden. Jugendlichen kann man Turnschuhe zur Zeit offenbar am besten über ein Markenimage verkaufen. Kaum ein Jugendlicher gibt 100 € für Turnschuhe aus, nur weil sie von hoher Qualität sind. Turnschuhe müssen „cool“ sein. Wir wollen herausbekommen, was dem Thema Mülltrennung „Charme“ und „Coolness“ verleihen könnte, wie wir die Interessen und Vorlieben der Bewohner mit diesem Thema verknüpfen können. Kurz: Mülltrennung in GWA braucht ein zielgruppenspezifisch wirksames Image (siehe den aktuellen Slogan von Mediamarkt: „Geiz ist cool“).

**Interventionsphase (Maßnahmen umsetzen):** Das Einbinden von Menschen in Auswahl und Gestaltung von Maßnahmen ist der wirksamste Weg, sie zu aktivieren. Aus diesem Grunde sollen die Bewohner der GWA an den Projektarbeiten, aber auch an den Entscheidungen von Anfang an beteiligt werden. Zunächst soll hierzu in jeder GWA eine Gruppe aufgebaut werden, die alle Aktivitäten gemeinsam mit den Projektarbeitern trägt. Die Gruppe soll durch die Zusammenarbeit zunächst stabilisiert werden und dann durch den Aufbau eines Kreises weiterer Beziehungen und Einbeziehungen innerhalb der GWA ein Netzwerk bilden. Dies kann nur erreicht werden, wenn die Arbeit an dem Projekt so angelegt ist, dass die Betroffenen mit Vergnügen dabei sind.

Im Idealfall bleibt das Netzwerk auch nach Abschluss der Arbeiten bestehen. Dies ist aber kaum zu erwarten und auch nicht unbedingt erforderlich. Auch wenn das gesamte Netzwerk als stabile Struktur nicht bestehen bleiben muss, gehen wir davon aus, dass ein Teil der Beziehungen stabil bleibt und dass durch die Erinnerung an die Vorgänge das „Gedächtnis“ des Netzwerkes erhalten bleibt. Wir erwarten, dass durch die langfristige Auseinandersetzung mit dem Thema in einem damit verknüpften sozialen Netzwerk dem Gedächtnis des sozio-technischen Systems GWA ein Problembewusstsein und ein Problemlösungsinteresse „eingepägt“ bleiben wird.

**Evaluationsphase (Erfolg der Arbeiten messen):** Während der Evaluationsphase werden durch die Projektleitung keine weiteren Maßnahmen mehr initiiert. Es werden die Verhältnisse in der GWA noch einmal im Detail untersucht, um die Resultate der getroffenen Maßnahmen einschätzen zu können, und es erfolgt die Rückmeldung der Erfolge an die Bewohner. Zu Beginn der Arbeiten und während ihres Verlaufs werden als ein Teil der Erfolgskontrolle regelmäßige Sortieranalysen des Restmülls und der Wertstofffraktionen durchgeführt. Die Ergebnisse haben einen doppelten Zweck: sie sollen zum einen den Projektarbeitern zur Kontrolle der Zielerreichung dienen. Und sie sollen zum anderen den Bewohnern der GWA bekannt gemacht werden, damit die Resultate ihres Handelns für sie sichtbar werden. Über diese regelmäßige Rückmeldung erhält das Projekt eine gewisse Spannung. Die Beteiligten werden so über die Interventionsphase hinaus immer wieder an das Thema des Projektes zurückgebunden und es werden Erfolgserlebnisse möglich, die zum Weitermachen motivieren.

**Feedbackphase (Stabilität des Erfolgs überprüfen):** Erfahrungsgemäß kommt es nach Beendigung von Projekten, die auf Verhaltensänderungen abzielen und die intensiv von außen unterstützt werden, zu gewissen Rückschritten, das heißt, ein Teil der erzielten Verbesserungen im Trennverhalten wird wieder verloren gehen. Ein halbes Jahr nach Abschluss der Evaluationsphase werden daher weitere Sortieranalysen durchgeführt, um zu ermitteln, wie stabil die erreichten Verhaltensänderungen sind bzw. in welchem Umfang ein nicht gänzlich zu vermeidendes Zurückfallen hinter das einmal Erreichte erfolgt.

#### **4 Fazit und angestrebtes Resultat**

In diesem Projekt sollen Methoden der Strategischen Planung mit solchen der Organisationsentwicklung in einem Aufgabenbereich verknüpft werden, in dem dies in dieser strukturierten Form unseres Wissens bisher noch nicht versucht wurde. Ziel des Projektes ist es:

1. In ausgewählten GWA unter Nutzung der Expertise der Betroffenen die Situation und die Motivationslagen vor Ort zu ermitteln.

2. Gemeinsam mit den Betroffenen Lösungsansätze für eine Senkung der Wertstoffgehalte im Restmüll zu erarbeiten.
3. Die Lösungsansätze gemeinsam mit den Betroffenen umzusetzen.
4. Den Erfolg der Maßnahmen zu überprüfen und die Ergebnisse an die Betroffenen zurückzumelden.
5. Handlungshilfen zur Nutzung der Projektergebnisse in anderen GWA zu erstellen.

Über die spezifische Problematik der Abfalltrennung hinaus bietet dieses Projekt die Möglichkeit, auch für andere Bereiche interessante Einblicke in ökologisch relevante Verhaltensmuster von Menschen zu gewinnen. Die sehr nah an der Alltagswelt angesiedelte inhaltliche Thematik sowie die direkte Verknüpfung von Bewertungen und Einschätzungen der Bewohner selbst mit deren konkretem Tun bieten Gewähr für eine realitätsnahe Sicht auf Verhaltensweisen und deren Beweggründe. Durch die detaillierte Analyse von Motivationslagen anhand einer realen Alltagssituation sind zudem wichtige Aufschlüsse darüber zu erwarten, auf welche Weise stärker ökologisch ausgerichtetes Verhalten im Alltag gefördert und wie dessen Notwendigkeit wirksamer vermittelt werden kann.

## **5 Literatur**

Brand, K.-W., Eder, K., Poferl, A. 1997: ökologische Kommunikation in Deutschland, Opladen: Westdeutscher Verlag.

EUWID 2002a: Ausgabe Recycling und Entsorgung Nr. 3 vom 15.1.2002, Weiterhin hoher Anteil von Organik und Wertstoffen im Restmüll.

EUWID 2002b: Ausgabe Recycling und Entsorgung Nr. 3 vom 15.1.2002, Weniger Abfallgebühren in Großwohnanlagen.

Grassinger, D, Lebersorger, S. 2001: Abfallsammelstellen in Wohnhausanlagen. Leitfaden zur Planung und Gestaltung, NÖ Abfallwirtschaftsverein, St. Pölten, Österreich; Im Internet unter:

<http://www.abfallverband.at/leitfaden-abfallsammelstellen>

NN 2001: Modellversuch Ratingen – Müllschleusen lohnen sich. Der Mieter hat es in der Hand, Entsorgungsmagazin 11–12/2001, S. 42–46.

Priesemann, C., Vogel, U., Hahn, M., Wenzl, G., Priesemann, T., 2001: Lokale Abfallwirtschaft und Entsorgungsverhalten von Frauen und Männern. Forschungsberichte aus dem Institut für Sozialwissenschaften (ISW), Nr. 43, Technische Universität Braunschweig.

Freistaat Sachsen 1999: Pilotprojekte zur verursachergerechten Abfallgebührenabrechnung in Großwohnanlagen, CD-ROM, Hrsg.: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.

# Der lange Weg zum Messwert: Probenahme und Probenvorbereitung

Ines Przybilla, LfU

## 1 Einleitung

Neben der prozentualen Zusammensetzung des Restmülls aus privaten Haushalten nach Fraktionen stellen die physikalisch-chemischen Eigenschaften und die chemische Zusammensetzung einzelner Stoffgruppen sowie des gesamten Restmülls den zweiten Forschungsschwerpunkt des FuE-Vorhabens „Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen“ dar. Ziel ist es, möglichst belastbare Daten über Inhaltsstoffe und Eigenschaften von Abfällen, beispielsweise zur Beurteilung des Inputs von Abfallbehandlungsanlagen, zu erhalten. Abgekoppelt von den Sortier- und Hochrechnungskriterien werden während der Sortierungen von den sortierten Stoffgruppen Proben für die Labor-Analytik genommen. Sie werden nach Zerkleinerung und Trocknung auf verschiedene Parameter wie Heizwert und Glühverlust untersucht. Zudem werden diverse Inhaltsstoffe wie Schwermetalle, Massenbildner, Chlor, Schwefel und einige organische Schadkomponenten (z.B. PCB, PAK, PCDD/PCDF) bestimmt.

## 2 Probenahme

Der angelieferte Restabfall wird getrennt nach den eingesammelten Stichprobeneinheiten (SPE) à 1,1 m<sup>3</sup> zunächst mit der LfU-Sortieranlage in die Fraktionen Feinmüll ( $d_p \leq 10$  mm), Mittelmüll ( $10 \text{ mm} < d_p \leq 40$  mm) und Grobmüll ( $d_p > 40$  mm) klassiert. Die Fein- und die Mittelfraktion werden in 240-Liter-Tonnen aufgefangen; die Grobfraktion wird direkt auf den Sortiertisch befördert, wo die manuelle Sortierung in 47 Stoffgruppen stattfindet. Eine Analyse der gesamten 47 Stoffgruppen ist aus finanzieller und personeller Sicht nicht machbar. Daher wurden die Stoffgruppen unter Berücksichtigung von stofflichen Ähnlichkeiten zu 18 Analysenstoffgruppen – Fein- und Mittelfraktion eingeschlossen – wie in Tab. 1 dargestellt zusammengefasst. Entsprechend der Anteile der Analysenstoffgruppen am Restmüll werden insgesamt circa 96 Mass.-% des Restmülls beprobt. Die verbleibenden 4 Mass.-% beinhalten die Stoffgruppen Metalle, Styropor, Sonderabfall und Sonstige Stoffe. Ausschlusskriterium waren zum einen ein zu geringer Massenanteil für eine repräsentative Stichprobe (z.B. Stoffgruppe Styropor) und zum anderen das Fehlen einer erprobten Aufschlusstechnik für die chemischen Analytik, z.B. Stoffgruppe Metalle.

Tab. 1: Zusammenfassung der Sortierfraktionen zu Analysenstoffgruppen und Probenahme

<b>Analysenstoffgruppe</b>	<b>Abfallsortierfraktionen</b>	<b>Anzahl der Proben</b>	<b>Massenanteil am Restmüll (nass)* [Mass.-%]</b>
Feinfraktion	Feinfraktion	25	11,0
Mittelfraktion	Mittelfraktion	25	14,3
Organik	Küchenabfälle Gartenabfälle Tierkadaver Sonstige organische Stoffe	16	20,1
Hygieneprodukte	Windeln Hygienepapiere	16	15,9

<b>Analystenstoffgruppe</b>	<b>Abfallsortierfraktionen</b>	<b>Anzahl der Proben</b>	<b>Massenanteil am Restmüll (nass)* [Mass.-%]</b>
Papier, Pappe, Kartona- gen	PPK-Verpackungen PPK-Druckerzeugnisse Sonstige PPK	16	7,6
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	Kunststoffverpackungen Folien-Verpackungen Folien (keine Verpackungen)	16	5,8
Glas	Behälterglas Sonstiges Glas	16	3,8
Inertes	Inertes Inertverpackungen	16	3,2
Textilien	Bekleidungstextilien Sonstige Textilien	16	3,0
Sonstige Verbunde	Sonstige Verbunde	16	2,5
Verbundverpackungen	Verbundverpackungen	16	1,8
Sonstige Kunststoffe	Sonstige Kunststoffe	16	1,6
Renovierungsabfälle	Renovierungsabfälle	15	1,5
Holz	Holzverpackungen Sonstiges Holz	16	1,4
Schuhe	Schuhe	16	0,9
Staubsaugerbeutel	Staubsaugerbeutel	16	0,6
Elektronikschrott	Elektronikschrott	16	0,7
Leder, Gummi, Kork	Leder, Gummi, Kork	16	0,3
		305	96,0

\* Stand 10/2002

Unter der Annahme, dass zwischen der physikalisch-chemischen Zusammensetzung einer Analysenstoffgruppe und dem beprobten Gebiet kein funktionaler Zusammenhang besteht, werden nicht alle 18 Obergruppen gleichzeitig beprobt. Im Schnitt beinhaltet das Probenahmeprogramm bei den einzelnen Sortierkampagnen sechs bis acht Stoffgruppen. Für die Endauswertung stehen dann mindestens 15 Einzelproben je Stoffgruppe zur Mittelwertbildung zur Verfügung (Tab. 1).

Einschränkungen bei der Probenahme ergeben sich bei den Stoffgruppen, die nur mit geringen Massenanteilen im Restmüll vertreten sind oder nur phasenweise mit dem Restmüll entsorgt werden. Über eine Sortierwoche verteilt treten zwar nur geringe Mengen auf, aber in einzelnen SPE werden verschiedentlich vergleichsweise große Massen gefunden (z.B. Ledertasche in der Stoffgruppe „Leder, Gummi, Kork“), d.h. die Stoffgruppe wird dann „einseitig“ beprobt, was die Schwankungsbreite der Untersuchungsergebnisse ggf. vergrößert. Der Probenehmer muss also entscheiden, ob mit der Probenahme evtl. eine Gewichtung gewisser Stoffe bewusst in Kauf genommen oder ob auf die Probenahme und die damit verbundene Information vollständig verzichtet werden sollte.

### 3 Probenahme und Vorzerkleinerung während der Sortierkampagne

Während der Abfallsortierkampagnen wird von den sortierten Proben ( $d_p > 40$  mm) jeder Stichprobeneinheit entsprechend der festgelegten Analysenstoffgruppen – soweit vorhanden – jeweils bis zu ca. 7 Liter entnommen und in 120-Liter Containern gesammelt. Es folgt die Vorzerkleinerung der Stoffproben mittels eines Zweiwellenzerkleinerers (MOCO AZ7, 5,5 kW, 33 und 64 U/min). Nach zwei bis drei Durchläufen wird je nach Stoffgruppe eine Korngröße von ca. 40 mm erreicht.

Weitere Zerkleinerungsschritte erfolgen aufgrund der z.T. hohen Wassergehalte der Stoffe erst im getrockneten Zustand. Die Proben werden daher direkt nach der Vorzerkleinerung und Probenteilung in Gefriertrocknungsgefäße (1.200 ml Nennvolumen) abgewogen und gekühlt aufbewahrt. Von der Mittel- und Feinfraktion werden von jeder SPE 500 ml entnommen, gekühlt aufbewahrt und am Ende der Sortierwoche je eine Mischprobe erstellt, die ebenfalls in Gefriertrocknungsgefäße eingewogen wird (Abb. 1).

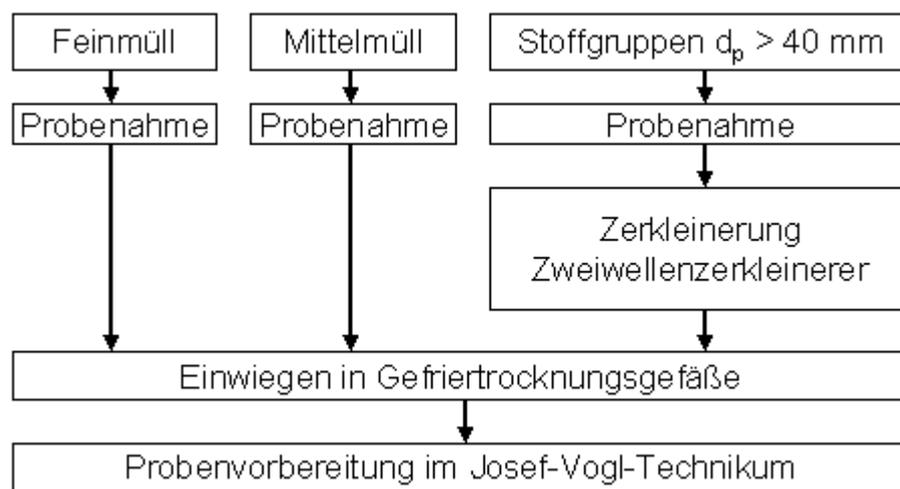


Abb. 1: Probenahme und Vorzerkleinerung

In den Laboratorien des Josef-Vogl-Technikums erfolgt dann die weitere Probenvorbereitung für die physikalisch-chemische Analytik.

### 4 Probenvorbereitung am Josef-Vogl-Technikum

Zunächst werden die Proben schonend gefriergetrocknet und anschließend in mehreren Schritten auf Analysengröße zerkleinert. Als Trocknungsverfahren wurde die Gefriertrocknung gewählt, um gezielt Massenverluste von zu bestimmenden thermisch instabilen oder flüchtigen organischen und anorganischen Bestandteilen zu minimieren. Vor der weiteren Zerkleinerung erfolgt, falls erforderlich, eine Aussortierung von eisenhaltigen Metallen (mittels Magnet), um Verschleiß und Abrieb an den Mahlwerkzeugen zu reduzieren.

Von jeder Stoffgruppe werden ca. 300 g getrocknete Probensubstanz zerkleinert. Das Verhalten bei der Zerkleinerung der einzelnen Stoffgruppen ist sehr unterschiedlich. Es müssen sowohl sehr spröde Stoffe (z.B. Inertes, Glas) als auch relativ zähe (z.B. Kunststoffverpackungen) sowie fettige (z.B. Teile der Stoffgruppe Organik) Stoffe zerkleinert werden. Zum Einsatz kommen aufgrund von umfangreichen Vorversuchen vorwiegend die in Tab. 2 und Abb. 2 aufgeführten Zerkleinerungsaggregate.

Tab. 2: Verwendete Zerkleinerungsaggregate

Aggregat	Firma / Typenbezeichnung	Analysenstoffgruppen
Schneidmühle, langsamlaufend	Retsch / SM 2000	fast alle Stoffproben
Schneidmühle, schnelllaufend	Fritsch / „Pulverisette-15“	z.B. Holz, Papier, Organik, Mittelmüll
Kugelmühle	Retsch / PM 4000	z.B. Glas, Inertes, Feinmüll
Kryomühle	Spex / 6800 Freezer Mill	soweit Bedarf bei fast allen Stoffen, insbesondere Stoffgruppen mit Kunststoffbestandteilen

Am vielseitigsten für die genannten Proben einsetzbar ist eine langsamlaufende Schneidmühle (SM 2000, Fa. Retsch GmbH & Co. KG, Motor-Leistung 1,5 kW). Die Schneidmühle besteht einerseits aus einem relativ langsamlaufenden Schneidscheibenrotor (750 U/min), der mit 18 spiralförmig auf dem Rotorumfang verteilten Schneidplatten bestückt ist, und andererseits aus vier festen Schneidleisten an der Innenwand des Mahlgehäuses. Die untere Begrenzung stellen variabel wählbare Bodensiebe (Lochdurchmesser von 1 bis 10 mm) dar, die eine definierte maximale Korngröße garantieren. In mehreren Zerkleinerungsvorgängen werden die Proben je nach Konsistenz mindestens bis auf  $d_p \leq 2$  mm, teilweise bis auf  $d_p \leq 1$  mm zerkleinert.

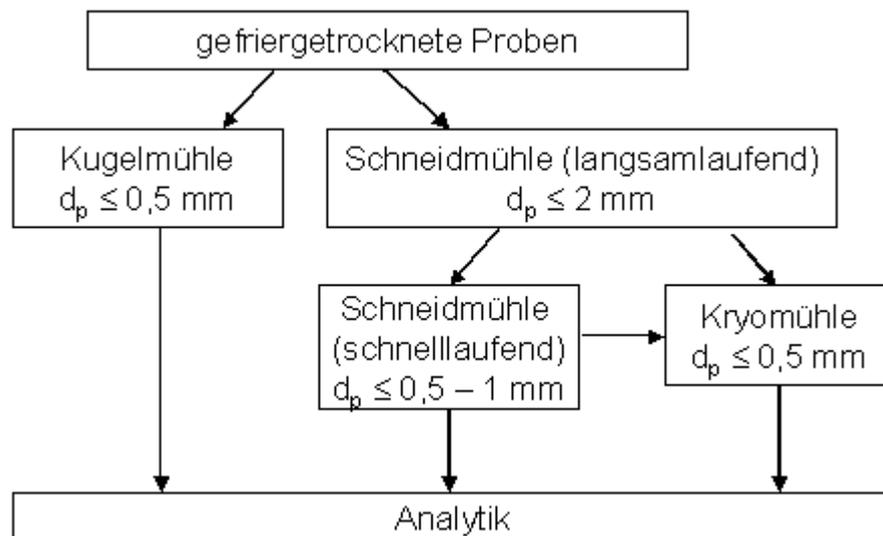


Abb. 2: Probenvorbereitung im Josef-Vogl-Technikum

Aufgrund des hohen Energieeintrags kommt es bei diesem Zerkleinerungsvorgang relativ leicht zu Erwärmungen des Mahlguts, weshalb nur eine schrittweise Zerkleinerung der Proben möglich ist. Außerdem verkleben bei kleinen Sieblochungen, z.B. organische Abfälle, leicht das Siebblech, wodurch der Durchsatz begrenzt wird. Der Zeitbedarf für die Zerkleinerung ist stark stoffabhängig und beträgt im Mittel 1 h für jede Probe.

Soweit es das rheologische Verhalten der Stoffe zulässt, werden die Stoffe weiter mit einer schnelllaufenden Schneidmühle (Labor-Schneidmühle „Pulverisette-15“, Fritsch GmbH, Idar-Oberstein, 1,5 kW, 2.730 U/min) auf eine Korngröße  $d_p \leq 0,5$  mm zerkleinert. Der Zeitbedarf hierfür beträgt im Durchschnitt 0,5 h für jede Probe.

Sehr spröde Materialien, wie Inertes und Glas, werden in einer Planeten-Schnellmühle (Kugelmühle) (PM 4000, Fa. Retsch GmbH & Co. KG, 1,1 kW, 30–300 U/min) gemahlen. Diese besteht aus vier zylindrischen Gefäßen, die mit jeweils acht Mahlkugeln bestückt sind (Obermaterial der Zylinder und Kugeln Zirkonoxid). Der Mahlvorgang erfolgt durch Rotation der Zylinder um die eigene Achse und gegenläufig um die gemeinsame Hauptdrehachse. Die Mahldauer beträgt circa 60 Minuten.

Stoffe, die mit Hilfe der Schneidmühlen nicht ausreichend zerkleinert werden können, werden mit einer Tiefkühl-Schlagbolzen-Mühle (Kryomühle) (6800 Freezer Mill, Fa. Spex Industries GmbH) weiter zerkleinert. Die Kryomühle besteht aus einem Mahlbehälter aus Polycarbonat, der von beiden Seiten mit einem Stahldeckel verschlossen wird. Darin befindet sich die Probe und das magnetisch angetriebene Mahlwerkzeug. Die Zerkleinerung erfolgt durch die Bewegung dieses Impaktors durch die wechselnde Umpolung einer Spule, die den Mahlbehälter umgibt. Mahlbehälter und Spule befinden sich zur Versprödung des Probenmaterials und um die freigesetzte Energie zu kompensieren, während des Mahlvorgangs in flüssigem Stickstoff. Es können je nach Probenmaterial zwischen 10 und 50 g auf einmal zerkleinert werden. Jeder Zerkleinerungsvorgang dauert einschließlich der Vorkühlung und Versprödung der zu zerkleinernden Probe circa 20 Minuten. Zum Zerkleinern der Mindestprobenmasse von 200 g sind abhängig von der Stoffprobe ca. 1,5 h einzuplanen.

Eine Siebung der Proben zwischen den Zerkleinerungsschritten erfolgt nur teilweise, da bei der Mehrzahl der zerkleinerten Proben eine Aggregation des Siebguts festgestellt wurde. Ähnliches gilt für den Einsatz eines Probenteilers, da dieser nur für rieselfähiges Material verwendbar ist. Probleme beim Zerkleinern ergeben sich neben der Erwärmung der eingesetzten Mahl-Aggregate und damit der Analysenproben aus der Tatsache, dass die Abfallproben trotz des Sortierens teilweise in punkto Zerkleinerung inhomogen sind. Insbesondere Metallteilchen und harte Kunststoffe, die in vielen Proben (z.B. Mittelmüll, Sonstige Kunststoffe, Elektronikschrott, Sonstige Verbunde) vorhanden sind und nicht bei der Vorsortierung (Magnetabscheidung) ausgelesen werden, tragen entscheidend zum Verschleiß der Mahlwerkzeuge bei. Der Abrieb der Mahlwerkzeuge und deren Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens allerdings nicht quantifiziert werden. Die Tatsache, dass an den Mahlwerkzeugen ein gewisser Abrieb sichtbar ist, ist bei der Dateninterpretation zu berücksichtigen.

Die Analysenproben werden auf  $d_p \leq 0,5$  mm zerkleinert. Eine weitere Zerkleinerung wäre aus Sicht der Analytik wünschenswert, wird aufgrund der angesprochenen kritischen Zerkleinerungseigenschaften und der mit weiteren Zerkleinerungsschritten verbundenen möglichen Veränderungen der Analysenproben (durch Abrieb, Erwärmung etc.) aber nicht unternommen.

## 5 Untersuchungsumfang

Nach der Zerkleinerung der Proben auf  $d_p \leq 0,5$  mm erfolgt die eigentliche Analytik. Sie lässt sich in physikalisch-chemische, anorganische und organische Analytik gemäß Abb. 3 aufteilen.

Die 305 Einzelproben (vgl. Tab. 1) werden demnach jeweils auf 23 (Inertes, Glas) bis 28 Untersuchungsparameter untersucht.

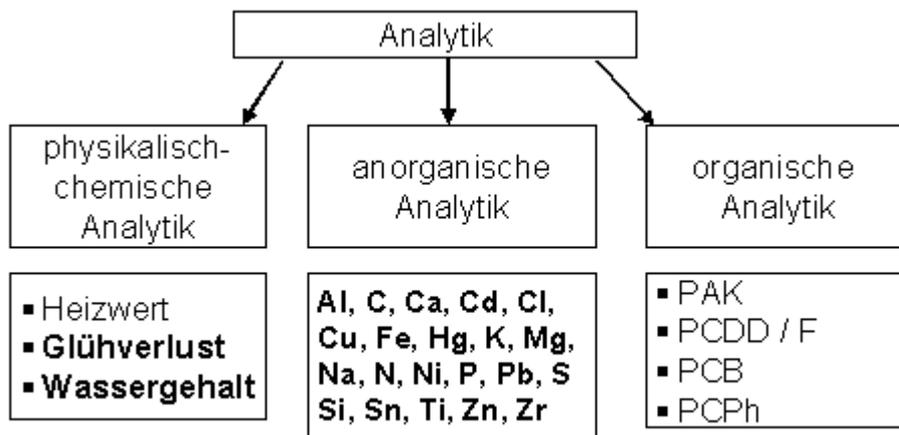


Abb. 3: Übersicht über die Laboranalytik (fett gekennzeichnete Parameter werden bei allen Stoffgruppen untersucht)

Die zerkleinerten Proben werden in der Regel entweder in den Laboratorien des Josef-Vogl-Technikums oder im LfU-Zentrallabor analysiert.

Die Bestimmung des Wassergehalts erfolgt über Massenerfassung bei der Gefriertrocknung bis zur Gewichtskonstanz. Die Glühverlustbestimmung erfolgt nach DIN 38 414 Teil 3. Für die Bestimmung der Heizwerte gem. DIN 51 900 wird das Kalorimeter C5000 control der Fa. Jahnke & Kunkel GmbH & Co. KG (IKA) eingesetzt.

Die Elemente Stickstoff und Wasserstoff werden mittels des CHN-Analysator vario MAX der Fa. elemental Analysensysteme GmbH durch Verbrennung der Feststoffprobe sequenziell über eine Wärmeleitfähigkeitsmesszelle bestimmt. Die Bestimmung des Gesamt- und anorganisch gebundenen Kohlenstoffs (TC, TIC) sowie des Schwefelgehalts erfolgt mit dem Carbon Sulfur Determinator CS 500 der Fa. Eltra GmbH über Infrarotzellen; der organisch gebundene Kohlenstoff (TOC) wird aus der Differenz von Gesamt- und anorganisch gebundenem Kohlenstoff berechnet. Da der Quecksilbergehalt nicht direkt aus der Feststoffprobe mit einer ausreichenden Nachweisgrenze bestimmt werden kann, werden stattdessen Nassaufschlüsse mittels Königswasser vorgenommen und Quecksilber mit dem Hg-Analysator 254N der Fa. Seefelder Messtechnik GmbH & Co, Vertriebs KG, durch Kaltdampf-Atomabsorptionsspektrometrie analysiert. Die restlichen zu bestimmenden Elemente werden in der Regel vom LfU-Zentrallabor aus den Feststoffproben mittels Röntgen-Fluoreszenz-Analyse (RFA) quantitativ bestimmt. Zur Absicherung der erzielten Ergebnisse werden von einzelnen Analysenproben zusätzlich aus den Königswasseraufschlüssen einige Elemente (z.B. Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn) über Atom-Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES) quantifiziert.

Im Bereich der organischen Schadstoffe werden – abgesehen von den Inertmaterialien „Glas“ und „Inertes“ – alle Stoffproben auf polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/PCDF), polychlorierte Biphenyle (PCB) und polychlorierte Phenole (PCPh) hin untersucht.

Die Vorgehensweise bei der organischen Analytik sowie der Feststoffanalytik mittels RFA werden im Vortrag „Matrixspezifische Analytik für organische und anorganische Schadstoffe im Restmüll“ vorgestellt.

## 6 Zusammenfassung

Von der Sammlung des Restmülls über die Sortierung, Probenahme und Zerkleinerung ist ein langer Weg bis fundierte Analysenergebnisse zu physikalisch-chemischen Eigenschaften von einzelnen Abfallfraktionen und des gesamten Restmülls vorliegen. Die Aufbereitung der Analysenstoffgruppen für eine physikalisch-chemische Analytik erfordert trotz Beprobung von sortierten Einzelfraktionen eine aufwendige Vorgehensweise. Die Zerkleinerung mit diversen Schneidmühlen hat sich hierbei – auch unter dem Gesichtspunkt der schonenden Vorgehensweise – als sinnvoll herausgestellt. Für die Zerkleinerung einer Stoffprobe (200 – 300 g) von  $d_p \leq 40$  mm auf  $d_p \leq 0,5$  mm ist ein Zeitaufwand von mindestens 2 Stunden einzuplanen. In welchem Umfang insbesondere bei der Probenzerkleinerung eine Verunreinigung der Proben durch Abrieb der Mahlwerkzeuge besteht, konnte im Rahmen des Projekts nicht ermittelt werden.

Die Datenfülle, die man mit dem vorgestellten Analysenprogramm erhält, kann erst nach und nach gesichtet und gewertet werden. Letztendlich sollte es bei Projektabschluss möglich sein, anhand der durchgeführten Analysen eine annähernde Bestimmung der Frachten bzw. der physikalisch-chemischen Eigenschaften von Restmüll darzustellen, um damit Fachfragen fundiert zu beantworten.

# Matrixspezifische Analytik für organische Schadstoffe im Restmüll

Wolfgang Körner, LfU

## 1 Einleitung

Derzeit werden in der EU ca. 90.000 chemische Stoffe für kommerzielle Zwecke hergestellt und eingesetzt. Ein großer Teil dieser überwiegend organischen Substanzen findet auf vielfältige Weise in Materialien und Endprodukten Verwendung und kann während des Gebrauchs in die Umwelt freigesetzt werden bzw. spätestens bei der Entsorgung in den Müll gelangen. Organische Substanzen sind als potenziell problematisch anzusehen wenn sie in der Umwelt oder Teilen davon persistent, d.h. gegenüber einem abiotischen und biotischen Abbau stabil sind. Persistente organische (Schad)stoffe (engl. Persistent Organic Pollutants – POPs) zeigen u.a. aufgrund ihrer hohen Fettlöslichkeit oft eine ausgeprägte Neigung zur Bioakkumulation, d.h. zur Anreicherung in Lebewesen. Im Zentrallabor des Bayer. LfU wurden sortierte Restmüllfraktionen auf folgende Substanzgruppen analysiert:

- Polychlorierte Dibenzodioxine (PCDD) und Dibenzofurane (PCDF)
- Polychlorierte Biphenyle (PCB)
- Chlorierte Benzole (ClBz)
- Chlorierte Phenole (ClPh)
- Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Diese Stoffgruppen bestehen jeweils aus einer größeren Zahl von Einzelverbindungen (Kongeneren). Bei den PCB gibt es 209 Kongenere, bei den PCDD und PCDF 75 bzw. 135 Kongenere; die allgemeinen Strukturformeln sind in den Abb. 1 und 2 dargestellt. Die Analytik dieser Substanzklassen ist also eine Multikomponentenanalytik.

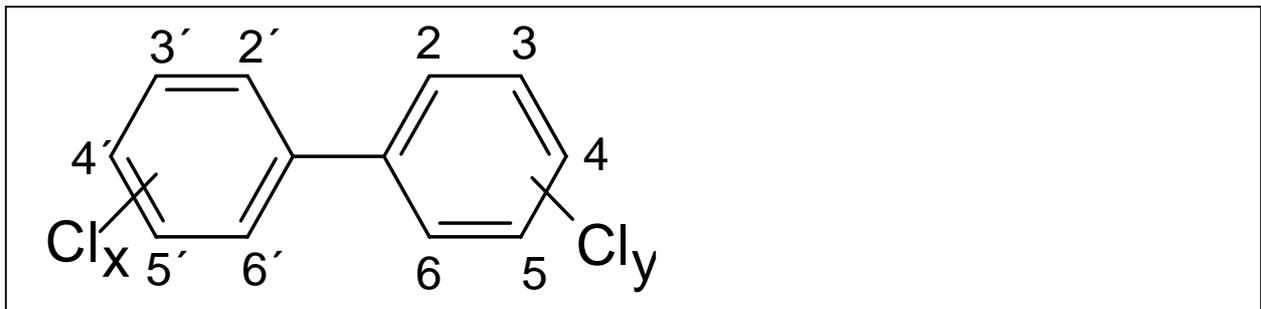


Abb. 1: Allgemeine Strukturformel der polychlorierten Biphenyle (PCB)

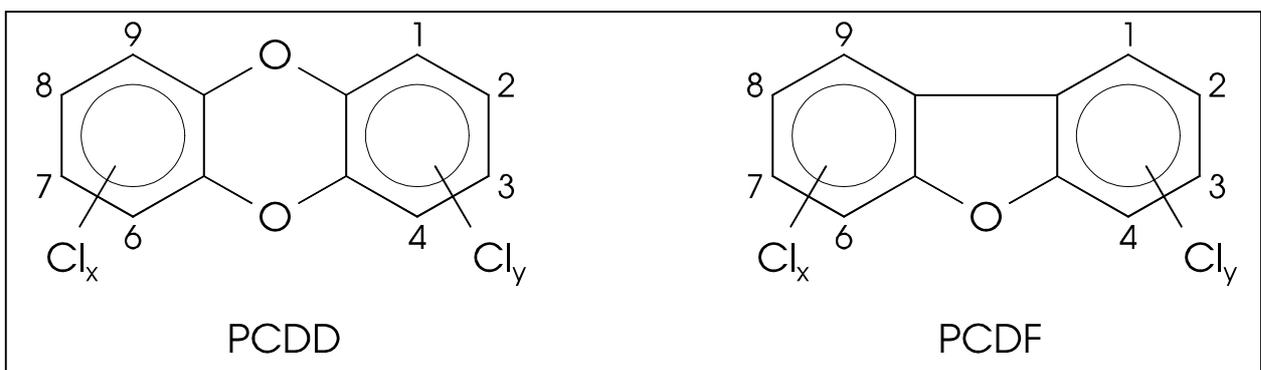


Abb. 2: Allgemeine Strukturformel der polychlorierten Dibenzodioxine (PCDD) und Dibenzofurane (PCDF)

Jedes quantitative Analysenverfahren in der organischen Spurenanalytik beinhaltet folgende Teilschritte:

- Probenahme
- Probenvorbereitung (Trocknen, Sieben, Mahlen)
- Anreicherung aus der Probenmatrix (Extraktion)
- Isolierung der zu untersuchenden Substanzen (Clean-up)
- Identifizierung und Quantifizierung

Die einzelnen Schritte der Analytik von Umweltproben werden am Beispiel der Bestimmung von PCDD und PCDF im folgenden skizziert. Danach werden die speziellen Probleme und Erfordernisse der Untersuchung von Restmüll dargestellt.

## **2 Analytik von Umweltproben auf PCDD und PCDF**

### **2.1 Probenahme und Probenvorbereitung**

Bei der Probenahme sind grobe Fehler möglich, die bisweilen Größenordnungen betragen und die im nachhinein durch die beste Analytik nicht mehr kompensiert werden können. Auswahl, Entnahme, Transport und Lagerung des zu untersuchenden Materials muss repräsentativ und der Fragestellung angepasst durchgeführt werden. Generell wird bei Umwelt- und Produktproben mehr Probenmaterial entnommen als für die Analyse erforderlich ist, um durch Homogenisieren einer größeren Probenmenge Inhomogenitäten ausgleichen zu können.

Zur Bestimmung lipophiler Substanzen ist es notwendig, vor der Extraktion das Wasser aus der Probe weitgehend zu entfernen. Bei schwer flüchtigen Substanzen wie den PCDD/PCDF oder PCB wird dies durch Gefriertrocknung erreicht.

### **2.2 Anreicherung aus der Probenmatrix (Extraktion)**

Zur Bestimmung lipophiler Substanzen ist es notwendig, vor der Extraktion das Wasser aus der Probe weitgehend zu entfernen. Bei schwer flüchtigen Substanzen wie den PCDD/PCDF oder PCB wird dies durch Gefriertrocknung erreicht. Bei der Extraktion sollen die zu untersuchenden Substanzen möglichst quantitativ aus der Probenmatrix herausgelöst und im Extrakt angereichert werden. Bei allen Feststoffproben ist dieser Schritt mit einer Unsicherheit verbunden, die auch nicht durch Zugabe entsprechender interner Standards überwunden werden kann. Die absolute Extraktionsausbeute lässt sich grundsätzlich nicht bestimmen; es können lediglich verschiedene Methoden miteinander verglichen und das als optimal erkannte Verfahren angewandt werden. Bei Feststoffen hat sich in der PCDD/PCDF-Analytik die Soxhletextraktion mit Toluol bewährt.

### **2.3 Reinigung der Extrakte (Clean-up)**

Ziel des Clean-up ist die Abtrennung aller mitextrahierten organischen Verbindungen vom Analyten, die bei der GC/MS-Analyse stören können. Um genügend niedrige Nachweisgrenzen zu erzielen, muss die Probelösung stark konzentriert werden. Dies stellt hohe Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des clean-up, da Substanzen, die in bis zu  $10^{12}$ -fach höherer Konzentration vorliegen, praktisch vollständig abgetrennt werden müssen. Der Clean-up ist der bei weitem aufwändigste und zeitintensivste Schritt in der PCDD/PCDF-Analytik. Vorwiegend werden Kombinationen mehrerer, meist flüssigkeitschromatographischer Schritte verwendet. In der Regel werden Strategien angewandt, bei denen alle 210 PCDD/PCDF-Kongenere in einer Fraktion anfallen.

In Abb. 3 ist das Clean-up-Verfahren, wie es im Dioxinlabor des Bayer. LfU praktiziert wird, schematisch dargestellt. In einem ersten Reinigungsschritt an Kieselgel (versetzt mit 44% konzentrierter Schwefelsäure) werden die meisten organischen Substanzen oxidiert und verbleiben auf der Säule. PCDD/PCDF, PCB und Chlorbenzole und einige andere Klassen halogener Aromaten sind unter diesen Bedingungen dagegen stabil.

Aufgrund der teilweise nahezu identischen Massen ist für die Bestimmung der PCDD/PCDF die vorherige quantitative Abtrennung der PCB, die in Größenordnungen höheren Konzentrationen vorkommen, notwendig. Dies geschieht im zweiten Aufreinigungsschritt durch Adsorptionschromatographie an 25 g Alumina B mit der Aktivität Super I. Aufgrund der hohen Aktivität des wasserfreien basischen Aluminiumoxids und durch eine gezielte Wahl der Polarität des Eluenten gelingt es, die unpolaren PCB sowie verwandte chlororganische Verbindungen (z.B. Chlorbenzole, Chlornaphthaline, Chlorparaffine, polychlorierte Diphenylether) von den etwas polareren PCDD/PCDF quantitativ abzutrennen. Die Vorelution mit Benzol dient dazu, Schwefel und seine Verbindungen sowie Paraffine von den PCDD/PCDF abzutrennen. Schwach polare Verunreinigungen (z.B. Fette) verbleiben auf der Säule.

<b>1) Saure Kieselgel-Säule mit 20 g Kieselgel/44% konz. Schwefelsäure</b>	
Elution mit 300 ml n-Hexan oder n-Heptan	
<b>2) Makro Alumina B-Säule (25 g)</b>	Adsorptionschromatographie
1a) Elution mit 60 ml Benzol	→ <b>PCB</b> , Chlorbenzole u.a.
1b) 200 ml n-Hexan/Dichlormethan-(98:2)	
2) 150 ml n-Hexan/Dichlormethan-(1:1)	→ <b>PCDD/PCDF</b>
<b>3) Mini Alumina B-Säule (2,5 g)</b>	Feinreinigung

Abb. 3: Schematische Darstellung des Clean-up für die Bestimmung der PCDD/PCDF.

Die PCB-haltige Fraktion wird über ein oder zwei Mehrschichten-Kieselgelsäulen und einer kleinen Alumina-B-Säule weiter gereinigt.

## 2.4 Identifizierung und quantitative Analyse

Die analytische Bestimmung der PCDD/PCDF in den gereinigten Probenextrakten wird durch eine Trennung mittels hochauflösender Gaschromatographie (HRGC) und anschließender massenspektrometrischer Detektion durchgeführt. Bei den PCDD/PCDF gelten die 17 Kongenere, die in den Positionen 2, 3, 7 und 8 chlosubstituiert sind, als toxikologisch relevant und müssen deshalb als Einzelkonzentrationen quantitativ bestimmt werden. Da in den meisten Umweltproben praktisch alle 210 Kongenere vorkommen, ist deshalb gaschromatographisch eine weitgehend vollständige isomerenspezifische Auftrennung erforderlich.

Zur Erhöhung der Nachweisempfindlichkeit wird die massenspektrometrische Detektion in Form der Massenfragmentographie (Selected oder Single Ion Monitoring, SIM) vorgenommen; d.h. es wird nur die Intensität einzelner im Massenspektrometer erzeugter Ionen definierter Masse kontinuierlich registriert. Vor oder nach der Extraktion werden der Probe alle 2,3,7,8-substituierten  $^{13}\text{C}_{12}$ -markierten PCDD/PCDF-Kongenere in definierter Menge zugesetzt. Die ursprünglich in der Probe vorhandenen Kongenere lassen sich dann aus den Massenfragmentogrammen direkt durch Flä-

chen- oder Höhenvergleich der Ionenintensitäten quantitativ bestimmen (Isotopenverdünnungs-Massenspektrometrie). Die Ergebnisunsicherheit liegt dadurch trotz des z.T. extremen Spurenbereiches niedrig und beträgt bei Umweltproben normalerweise weniger als 25 %.

### 3 Analytik von Restmüllproben auf PCDD und PCDF

Die Analytik von Restmüll auf organische (Schad)stoffe ist im Vergleich zu fast allen anderen Umweltmatrices aus mehreren Gründen wesentlich schwieriger und aufwändiger.

Zum einen sind die jeweiligen Müllfraktionen außerordentlich heterogen in ihrer Zusammensetzung. Da eine Zerkleinerung bzw. Mahlen einer größeren Probenmenge technisch schwierig und aufwändig ist, sind der für die Entnahme einer repräsentativen Teilprobe notwendigen Homogenisierung des Probenmaterials Grenzen gesetzt. Deshalb ist die Reproduzierbarkeit der Analyseergebnisse schlechter als bei anderen Feststoffproben.

Das zweite große Problem liegt in der Abtrennung der großen Menge und Vielfalt an mitextrahierten organischen Verbindungen. Das übliche Extraktionsmittel Toluol löst die in Restmüll vorhandenen Kunststoffe weitgehend auf. Diese große Menge an Polymermatrix ist anschließend nur unter sehr großen Schwierigkeiten wieder abtrennbar. Deshalb wurde hier die Extraktion mit n-Hexan durchgeführt, das nur ein geringes Lösungsvermögen für Kunststoffe besitzt. An zwei Proben wurde die Vergleichbarkeit der Ergebnisse beider Extraktionsmethoden überprüft. Der mögliche Minderbefund beträgt demnach weniger als 50% was angesichts der Heterogenität des Probenmaterials akzeptabel ist.

Trotz des Wechsels des Extraktionsmittel reichte das in Abb. 3 skizzierte Clean-up-Verfahren bei weitem nicht aus und musste erheblich erweitert werden. Nach zeitaufwändigen Versuchen hat sich das folgende fünfstufige Aufreinigungsverfahren als praktikabler Kompromiss erwiesen:

<b>1) Saure Kieselgel-Säule mit 100 g Kieselgel/44% konz. Schwefelsäure</b>	
Elution mit 1000 ml n-Hexan oder n-Heptan	
<b>2) Doppelte Makro Alumina B-Säule (50 g)</b>	
Abtrennung der PCDD/PCDF von den PCB (s. Abb. 3)	
<b>3) Gelpermeationschromatographie (HPLC)</b>	Trennung nach Molekülgröße
Elution mit 300 ml Toluol	
<b>4) Kleine gemischte Kieselgel-Säule</b>	Feinreinigung
<b>5) Mini Alumina B-Säule (2,5 g)</b>	Feinreinigung

Abb. 4: Erweitertes Clean-up-Verfahren für die Bestimmung der PCDD/PCDF in Restmüllproben.

Die Dimension der beiden ersten Reinigungssäulen wurde gegenüber dem Standardverfahren erheblich erweitert was den Verbrauch an Lösungsmitteln und den Zeitaufwand wesentlich erhöht. Zusätzlich mussten zwei weitere säulenchromatographische Reinigungsschritte durchgeführt werden. Trotzdem waren zahlreiche Müllfraktionen für die anschließende GC/MS-Analyse unter Verwendung eines hochauflösenden Massenspektrometers (HRMS) nicht optimal gereinigt. Um die Verschmutzung des GC/HRMS-Systems in noch akzeptablen Grenzen zu halten, wurden geringere Aliquote als sonst üblich injiziert. Die dadurch bedingte Erhöhung der Bestimmungsgrenzen war aber vertretbar. Trotzdem trat im Vergleich zu anderen Feststoffproben eine deutlich schnellere Verschmutzung des Verdampfungsrohres des GC-Injektors auf, sodass durch das häufigere Wechseln dieses Verdampfungsrohres und der anschließend notwendigen 5-Punkt-Kalibration des GC/HRMS-Systems ein erheblicher zeitlicher Mehraufwand auch der instrumentellen Analyse nicht zu vermeiden ist.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei der Untersuchung von Restmüll auf organische Schadstoffe hinsichtlich der Genauigkeit der Ergebnisse und der Bestimmungsgrenzen Kompromisse notwendig sind. Insbesondere für die Bestimmung der PCDD/PCDF muss die ohnehin aufwändige Reinigung der Extrakte erheblich erweitert werden, so dass der Zeitaufwand im Vergleich zu anderen Umweltmatrices wie Boden oder Kompost mindestens um 60 – 70% höher liegt.

# Matrixspezifische Analytik für organische und anorganische Schadstoffe im Restmüll – Anorganische Analytik mittels Röntgenfluoreszenzanalyse

Dr. Thorsten Stahl, LfU

## Einleitung

Die gefriergetrockneten und zerkleinerten Restmüllproben werden im Zentrallabor zu einem Pressling („Tablette“) verdichtet und mittels Röntgenfluoreszenzanalyse hinsichtlich verschiedenster Elemente untersucht.

## Probenvorbereitung

Der wichtigste Schritt bei der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) ist die Probenvorbereitung. Die herzustellende Tablette sollte Idealerweise aus möglichst kleinen Partikeln ( $< 100 \mu\text{m}$ ) bestehen. Diese Partikel, die je nach Herkunft (z.B. besteht eine Restmüllfraktion aus den Kompartimenten Leder, Gummi, Kork) auch eine unterschiedliche Zusammensetzung aufweisen, sollten eine möglichst homogene Gesamtprobe bilden. Bei einigen Restmüllfraktionen gelangen die derzeit bekannten Zerkleinerungstechniken an ihre Grenzen, da manche Materialien wie beispielsweise Leder, Gummi oder Kork selbst nach Abkühlen mit flüssigem Stickstoff beim Einfüllen in die Zerkleinerungsmaschinen sich wieder so schnell erwärmen, dass der Versuch eines weiteren Zerkleinerns zu Verbrennungs- bzw. Verklebungsvorgängen führt.

Zur Tablettierung werden 4 g Restmüllprobe sehr intensiv in einem Erlenmeyerkolben zusammen mit einer Gummimischkugel und 0.9 g Reinstwachs vermischt und anschließend in Abhängigkeit von der Restmüllmatrix mit einem Druck zwischen 15 und 40 Tonnen gepresst. Die Zugabe des Reinstwachses ist notwendig, damit die gepresste Tablette die entsprechende Form behält. Bei den Restmüllfraktionen Kunststoffverpackungen, sonstige Kunststoffe, Verbundverpackungen, sonstige Verbunde, Mittelmüll, Textilien, Schuhen und Leder-Gummi-Kork, behalten die Tabletten ihre Form trotz eines Pressdruckes von 40 Tonnen jedoch nicht bei, sondern dehnen aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften wieder aus.

Restmüllfraktionen bestehend aus Feinmüll, Holz, Organik, Elektronikschrott und Glas lassen sich sehr gut in der beschriebenen Form tablettieren.

Hergestellte Presslinge aus verschiedenen Restmüllfraktionen zeigt Abbildung 1.



Abb. 1: Tablettrierte Restmüllfraktionen

## Die Röntgenfluoreszenzanalyse

Als Röntgenstrahlung wird elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich von 0.02 nm bis 2 nm (0.6 bis 60 keV) bezeichnet. Röntgenstrahlen durchdringen Materie (ein Anwendungsbeispiel ist beispielsweise das Aufnehmen von Röntgenbildern des menschlichen Skeletts). Die Abschwächung der Röntgenstrahlung beim Durchdringen von Materie erfolgt mit zunehmender Dicke exponentiell.

Die Röntgenfluoreszenzanalyse basiert auf der Anregung von Atomen durch energiereiche, primäre Röntgenstrahlung. Die angeregten Atome emittieren ihrerseits eine Fluoreszenzstrahlung im Röntgenbereich, deren Wellenlänge für jedes Element charakteristisch ist. Mit Ausnahme von Wasserstoff und Helium sind alle Elemente des Periodensystems (zumindest theoretisch) nachweisbar. Wird durch die Energie primärer Röntgenstrahlen ein inneres Elektron aus einem Atom herausgeschlagen, so befindet sich das entstehende Ion in einem angeregten Zustand. Nach etwa  $10^{-8}$  Sekunden geht selbiges unter Energieabstrahlung wieder in den Grundzustand über.

Als Strahlungsquellen für die Aussendung primärer Röntgenstrahlen fungieren Röntgenröhren. Eine Röntgenröhre enthält in einem evakuierten Glaskörper eine Metallkathode und eine Anode aus einem schweren Element wie z.B. Cr, Rh, W, Mo, Ag, Sc, Pt oder Au. Aus der Metallkathode werden durch Glühemission Elektronen freigesetzt. Durch eine angelegte Hochspannung werden diese beschleunigt und prallen mit hoher Geschwindigkeit auf die Anode. Dadurch entsteht das elementcharakteristische primäre Röntgenspektrum des Anodenmaterials.

Durch Zählen der elementspezifischen Fluoreszenzstrahlung (Photonen) ist eine Aussage über die Konzentration eines Elementes in der Probe möglich. In Abbildung 2 ist schematisch das Funktionsprinzip der Entstehung von Fluoreszenzstrahlung dargestellt:

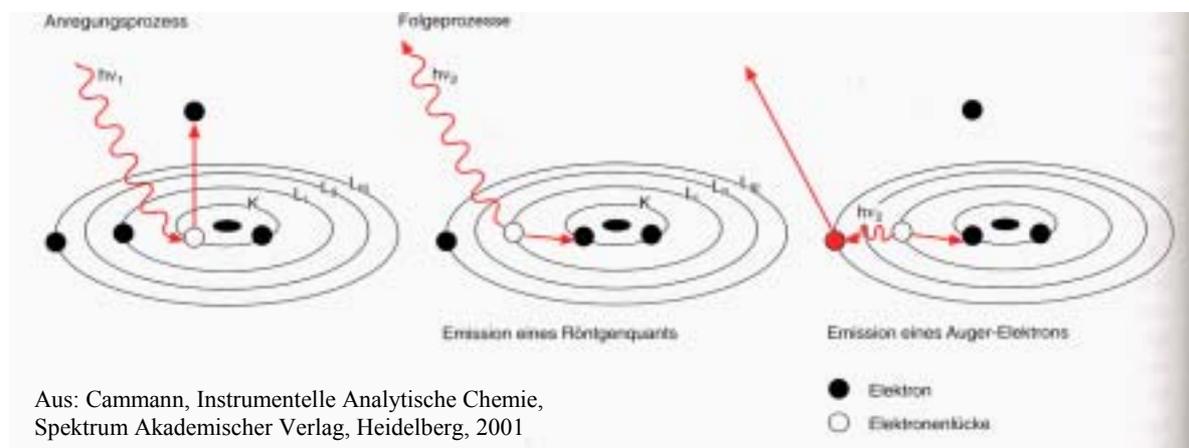


Abb. 2: Entstehung von Fluoreszenzstrahlung

## Das Analysengerät, die Messung und die Auswertung

Zur Untersuchung der Restmüllproben wurde eine energiedispersive Röntgenfluoreszenzanalytik (ed-RFA) mit Polarisationsanregung eingesetzt. Durch die Anregung mit polarisierter Röntgenstrahlung wird die Nachweisempfindlichkeit der ed-RFA verbessert und insbesondere für leichte Elemente hohe Empfindlichkeit erreicht. Innerhalb von ca. 15 Minuten können pro Probe mit der zur Verfügung stehenden Kalibrationssoftware 60 Elemente simultan gemessen werden.

Abbildung 3 zeigt das eingesetzte Spektrometer (X-LAB 2000, Firma Spectro).



Abb. 3: Analysengerät mit Probenteller

Zur quantitativen Analyse muss bei der RFA wie bei allen spektrometrischen Verfahren eine Kalibration durchgeführt werden. Die quantitative Auswertung von RFA-Spektren ist jedoch nicht trivial, da ein einfacher linearer Zusammenhang zwischen der Linienintensität und der Elementkonzentration in der Probe aufgrund von Matrixeffekten nicht gegeben ist. Matrixeffekte kommen durch Begleitelemente in der Probe zustande, die mit der Anregungsstrahlung und auch mit der Fluoreszenzstrahlung in Wechselwirkung treten. Dabei absorbieren und reflektieren die Matrixelemente sowohl die Anregungsstrahlung als auch die Fluoreszenzstrahlung und es kommt zur Abschwächung der Fluoreszenzintensitäten.

Durch die Verwendung polarisierter Röntgenstrahlung bei dem im Zentrallabor eingesetzten Gerät ist jedoch eine äußerst leistungsfähige Matrixkorrektur möglich, die über einen speziellen Auswertalgorithmus eine Kalibration für völlig unterschiedliche Matrices ermöglicht. Da die Müllmatrix mit Referenzstandards fast nie exakt nachgebildet werden kann, ist dies eine der wesentlichen Voraussetzungen für den Einsatz der ed-RFA in der Abfallanalytik.

Ebenso kann es sehr hilfreich sein Restmüll-Presslinge (aus älteren Probenserien) mit den neuen Probenserien zu analysieren, deren Gehalt in definierten oder willkürlichen Zeitintervallen immer wieder mitgemessen wird (laborinternes Referenzmaterial). So können Analysenfehler oft schnell erkannt werden. Die Bestimmungsgrenzen der verschiedenen Elemente können aufgrund der unterschiedlichen Elektronenstruktur des Atomaufbaus und in Abhängigkeit von der Konzentration der Störelemente in einem mehr oder weniger breiten Rahmen variieren.

Je nach Zusammensetzung der einzelnen Restmüllfraktionen und auch in Abhängigkeit von deren Herkunft, kann es zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Beispielsweise wurden im Feinmüll der Augsburger Sortierung 23960 mg/kg Aluminium gefunden, während es in Traunstein mit 14620 mg/kg in etwa die halbe Konzentration war. Umgekehrt liegen die Verhältnisse bei Aluminium in der Mittelmüllfraktion. Hier fanden sich in Traunstein 3846 mg/kg, während es in Augsburg 1842 mg/kg waren. Diese Liste kann man nahezu für jedes Element beliebig (Standort der Restmüllsammlung, Zusammensetzung) fortsetzen, was wiederum einen äußerst hohen Anspruch an die Analytik und die damit verbundene Qualitätssicherung erhebt. Bei Restmüllfraktionen ist nahezu jede Probe ein Unikat, weil es sich niemals (auch wenn die Restmüllfraktion definiert ist) um eine identische Matrix (im analytischen Sinne) handelt.

Die abschließende Abbildung 4 zeigt ein Röntgenspektrum einer Mittelmüllfraktion aus Augsburg (Sortierung 2001) für zwei ausgewählte Elementbereiche:

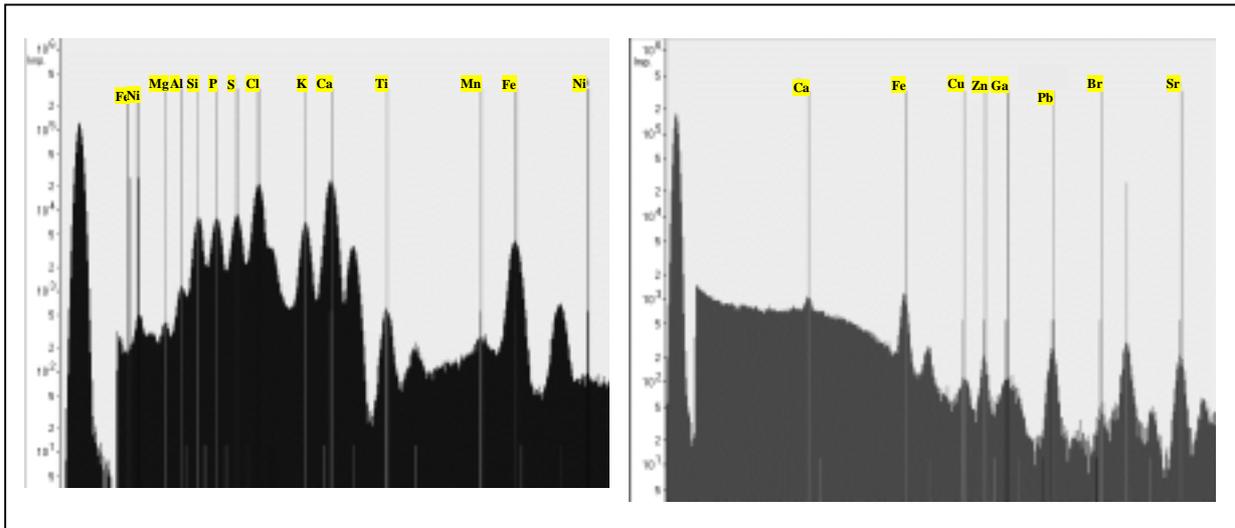


Abb. 4: Fluoreszenzspektren einer Mittelmüllfraktion

## Fazit

Mit der energiedispersiven Röntgenfluoreszenzanalyse steht im Bereich der Restmülluntersuchung ein sehr leistungsstarkes Messverfahren zur Verfügung, mit welchem 60 Elemente simultan quantitativ innerhalb von 15 Minuten je Probe analysiert werden können.

Weitere Einsatzgebiete der RFA sind Mineralöle, Boden, Klärschlamm, Pflanzen, Stäube, Aschen, Schlacken, Polymere, Abfälle (Schlämme, Öle, auch heterogen zusammengesetzte Matrices), Glas, Additive, Lacke oder Sedimente.

## Literatur

Karl Cammann (Herausgeber), Instrumentelle Analytische Chemie, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg · Berlin, 2001.

Vortrag Dr. W. Reifenhäuser und R. Heek, Einsatz der Röntgenfluoreszenzspektrometrie in der Umweltanalytik, Essen, 2000.

R. Heek, mündlichen Mitteilungen.

# Stoffliche Zusammensetzung des Restmülls: Konzentrationen und Frachten

Dr.-Ing. Clemens Marb, LfU

## 1 Vorgehensweise

Die Kenntnis der physikalisch-chemischen Eigenschaften des Restmülls und der damit verbundenen Schadstofffrachten ist eine wesentliche Voraussetzung für (i) die Auslegung von Abfallbehandlungsanlagen (z.B. Feuerungs-/Leistungsdiagramm, Anforderungen an die Abgasreinigung etc.), für die Schließung der Stoffbilanz entlang des Behandlungswegs und erlaubt (iii) die nachhaltige Erfolge eines umweltverträglichen Produktdesigns im Restmüll abzulesen. Im Rahmen dieses FuE-Vorhabens erfolgte neben der Erfassung der Abfallzusammensetzung nach Sortierklassen eine umfassende chemische Analytik auf organische und anorganische Inhaltsstoffe sowie charakterisierender Summenparameter.

Um den Aufwand bei der physikalisch-chemischen Analytik überschaubar zu halten, wurden die 49 Sortierklassen je Untersuchungskampagne zu 16 Analysenstoffgruppen (vgl. Tab.1) zusammengefasst; in die Analytik nicht einbezogen wurden die im Restmüll enthaltenen Metallteile, Problemstoffe (Batterien, Medikamente u.ä.) und Sonstige Stoffe.

Tab. 1: Untersuchte Stoffgruppen und Analysenumfang (Stand: November 2002)

Stoffgruppe	Anorganik	Organik		
	phys-chem. Parameter, Elemente	PAK's	PCDD/F's	PCB's
Feinfraktion	23	23	13	14
Mittelfraktion	23	23	13	14
Organik	14	12	7	8
Hygieneprodukte	13	11	5	5
Papier, Pappe, Kartonagen	12	12	5	7
Kunststoffverpackungen/Folien	14	12	0	1
Textilien	13	12	5	6
Sonstige Verbunde	14	11	5	6
Verbundverpackungen	13	12	5	6
Sonstige Kunststoffe	14	13	7	8
Renovierungsabfälle	11	10	5	6
Holz	14	13	6	7
Schuhe	13	13	5	6
Elektronikschrott	14	13	4	6
Staubsaugerbeutelinhalt	14	13	5	6
Leder, Gummi, Kork	14	9	4	5
<b>Summe</b>	<b>253</b>	<b>212</b>	<b>94</b>	<b>111</b>

Ausgangspunkt für die Darstellung der gemessenen Konzentrationen in den einzelnen Analysenstoffgruppen ist die aus den Sortieranalysen berechnete Restmüllzusammensetzung – vgl. Beitrag „Restmüllzusammensetzung in Abhängigkeit von der Siedlungsstruktur“. In sämtlichen Darstellungen wird die gleiche Reihenfolge verwendet: zunächst werden die durch Klassierung des Abfalls erhaltene Fein- und Mittelfraktion, danach in absteigender Reihenfolge (Massenbild) die weiteren Fraktionen Organik, Hygieneprodukte, ... dargestellt.

Für die Betrachtung der nach physikalisch-chemischen Parametern, Elementgehalten und Schadstoffen aufgeschlüsselten Frachten je kg Restmüll wird gem. Gl. (1) eine analysenstoffgruppenspezifische, auf Originalsubstanz bezogene Fracht berechnet.

$$\Phi_i = C_i \cdot (1 - \theta_i) \quad (1)$$

mit

$\Phi_i$  : Fracht der Substanz i in Analysenstoffgruppe [M/MOS]

$C_i$  : Konzentration der Substanz i in Analysenstoffgruppe [M/MTS]

$\theta_i$  : Wassergehalt der Analysenstoffgruppe [MWasser/MOS]

Die Gesamtfracht ergibt sich unter Berücksichtigung der Massenanteile der Analysenstoffgruppen am Restmüll gem. Gl. (2) zu

$$\Phi_i^{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n \Phi_i \cdot f_i \quad (2)$$

mit

$\Phi_i^{\text{tot}}$  : Gesamtfracht der Substanz i im Restmüll [ $M/M_{\text{Restmüll}}^{\text{OS}}$ ]

n : Anzahl der Analysenstoffgruppen [—]

$f_i$  : Massenanteil der Analysenstoffgruppe am Restmüll [ $M_{\text{Stoffgruppe}}/M_{\text{Restmüll}}^{\text{OS}}$ ].

## 2 Ergebnisse

### 2.1 Makroelementgehalte der Hauptmassebildner im Restmüll

Die Analysenstoffgruppen Fein-, Mittelfraktion, Organik und Hygieneprodukte bilden mit ca. 2/3 der Gesamtrestmüllmasse deren Hauptanteil. Ihre Zusammensetzung nach Makroelementen ist in Abb. 1 wiedergegeben.

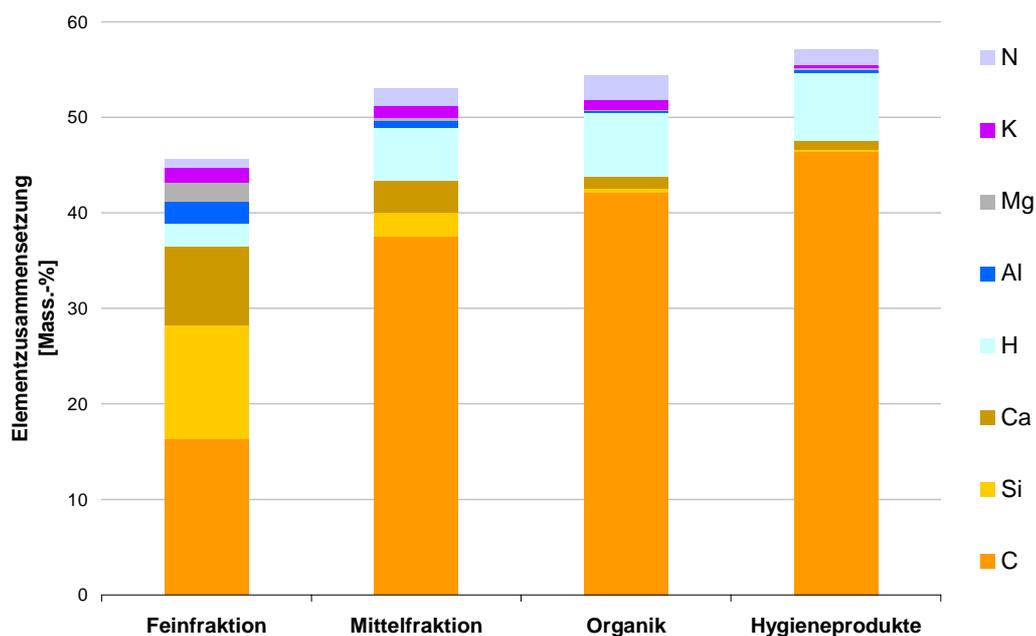


Abb. 1: Verteilung der Makroelemente innerhalb der Hauptmassebildner im Restmüll

Der (organisch gebundene) Kohlenstoff stellt innerhalb der Hauptmassebildner im Restmüll das dominante Element dar. Sein Anteil nimmt von der Feinfraktion zu den Hygieneprodukten zu. Der hohe mineralische Anteil in der Feinfraktion wird vorrangig durch Silizium und Calcium gestellt. Dies ist konsistent mit dem makroskopisch identifizierbaren Gehalten an Straßenkehricht und Kleintierstreu in der Feinfraktion. Die Mittelfraktion wird von Kohlenstoff dominiert, was den hohen Gehalt an ‚Organik‘ (vgl. Beitrag „Restmüllzusammensetzung in Abhängigkeit von der Siedlungsstruktur“) widerspiegelt. Die Zusammensetzung der Stoffgruppe Organik steht hinsichtlich des Kohlenstoff:Stickstoff-Verhältnisses von 16:1 in annähernder Übereinstimmung mit der Zusammensetzung von Bioabfällen [1]. Die Elementzusammensetzung der Stoffgruppe Hygieneprodukte entspricht dem darin enthaltenen hohen Zellstoffanteil (Babywindeln [2], Taschentücher etc.).

## 2.2 Physikalisch-chemische Parameter

- Wassergehalt

Die Analysenstoffgruppen des Restmülls sind durch einen Wassergehalt von 19 Mass.-% (arithmetisches Mittel) gekennzeichnet. In Korrelation zum Abholrhythmus der Restmülltonne (wöchentlich, vierzehntägig oder länger) infiltrieren stark wasserhaltige Fraktionen (v.a. Organik, Hygieneprodukte) teilweise die anderen Inhaltsstoffe. Die Mittelfraktion – zu drei Vierteln aus organischem Material – weist einen Wassergehalt von 50 Mass.-%, die Feinfraktion von knapp 30 Mass.-% auf. Die Wassergehalte der anderen Analysenstoffgruppen liegen unterhalb von 22 Mass.-% und tragen aufgrund ihres niedrigen Restmüllmassenanteils nur untergeordnet zur Wasserfracht des Restmülls bei. Aus dem gewichteten Mittel der Wassergehalte resultiert eine Wasserfracht von 360 g pro kg Restmüll.

Diese Daten zeigen, dass der mit dem Restmüll eingetragenen Feuchte bei der Abfallbehandlung eine hohe Bedeutung zukommt. Z.B. rührt die bei einer Müllverbrennung freisetzbare Enthalpie aus maximal 65 Mass.-% des Restmülls her; ein beträchtlicher Teil des Energieinhalts wird zur Verdampfung des Wassers benötigt. D.h. durch eine Reduzierung der Restmüllfeuchte könnte der thermische Wirkungsgrad in Bezug auf den Brennstoff Restmüll signifikant erhöht werden (s.u.).

- Heizwert

Die Heizwerte der Einzelfraktionen differieren stark und reichen von ca. 3 MJ/(kg Feinfraktion) bis hin zu 30 MJ/(kg Kunststoff) – siehe Abb. 2. Die höchsten Werte unterschreiten die Heizwerte hochkalorischer Flüssig-Brennstoffe um mehr als 10 MJ/kg. Heizwerte zwischen 15 und 25 MJ/(kg Fraktion) besitzen die Analysenstoffgruppen Leder, Gummi, Kork, Elektronikschrott, Schuhe, Sonstige Verbunde, Verbundverpackungen, Renovierungsabfälle und Holz.

- Fracht

Multipliziert man die spezifischen Heizwerte mit den Masseanteilen der Einzelfraktionen am Restmüllgemisch, so erkennt man, dass zum Gesamtheizwert von 8,6 MJ/(kg Restmüll) sowohl stark als auch weniger stark wasserhaltige Stoffgruppen Kunststoffverpackungen inklusive Folien (~20 %), Organik, Hygieneprodukte (jeweils ~12 %), Papier/Pappe/Kartonagen und Mittelmüll (jeweils ~9,5 %) beitragen. D.h. eine Wertstoffentnahme aus den gen. Fraktionen beeinflusst das „Brenn“verhalten und damit den Wirkungsgrad einer thermischen Restmüllbehandlung.

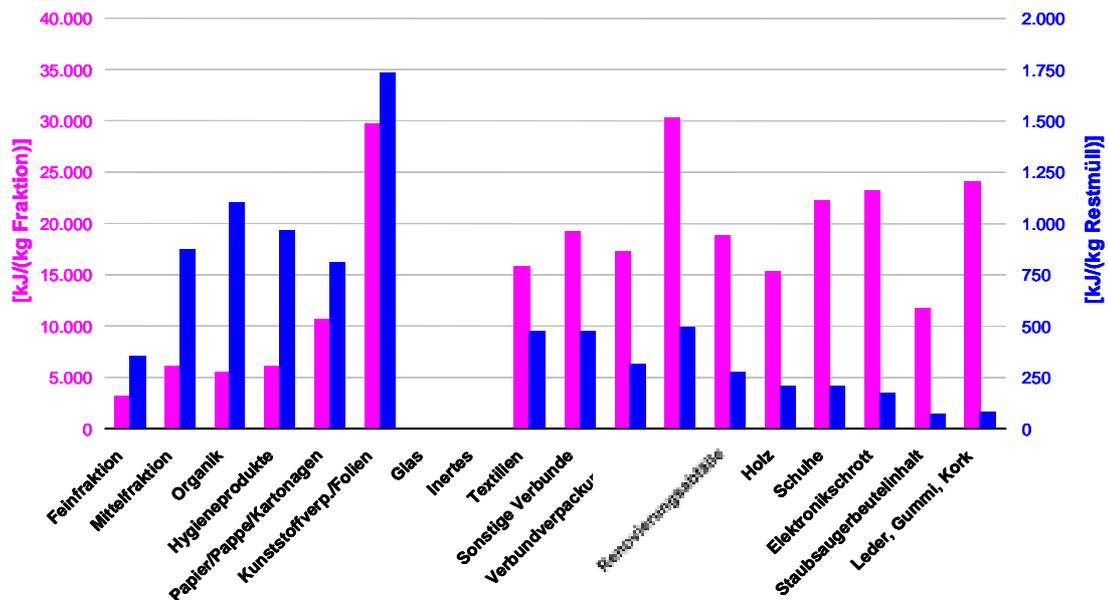


Abb. 2: Heizwert und Heizwertfracht der Analysenstoffgruppen des Restmülls

Der Heizwert des „Wertstoffs“ Restmüll liegt in der Größenordnung von (Roh)Braunkohle [3] und deckt sich mit Daten aus früheren Restmülluntersuchungen [4]; [5] Restmüll ist daher als ein nieder-kalorischer Brennstoff einzustufen. Demgegenüber liegt der Heizwert des trockenen Restmülls bei ca. 16 MJ/kg und damit im Bereich des Heizwerts von luftgetrocknetem Holz [3].

## 2.3 Salzbildner

- Chlor

Chlor gehört zu den häufigsten Elementen der obersten Erdkruste. Aufgrund der außerordentlichen Reaktionsfähigkeit (nach Fluor das reaktionsfähigste nichtmetallische Element) kommt Chlor fast ausschließlich in gebundener Form (Salze) vor.

Chlor und seine Verbindungen sind wichtige Grundstoffe der chemischen Industrie [6], [7] um sowohl chlorhaltige (z.B. (Poly)Vinylchlorid, Düngemittel) als auch chlorfreie Produkte (z.B. Silikone, Reinstsilizium, Polycarbonate für CDs, DVDs) herzustellen. Daneben wird Chlor (als Hypochlorit) als Bleich- und Desinfektionsmittel eingesetzt. Ebenso bildet Chlor den Grundstoff zur Herstellung von Lösungsmitteln (chlorierte Kohlenwasserstoffe) und anorganischen Chemikalien. Aufgrund dieser Produktvielfalt ist Chlor in einer Vielzahl von Analysenstoffgruppen anzutreffen.

Die höchsten Konzentrationen (bis zu 35 g/kg) sind in den Analysenstoffgruppen Elektronikschrott, Kunststoffe, Schuhe und Leder, Gummi, Kork anzutreffen. Deutlich geringere Konzentrationen (kleiner 15 g/kg) liegen in den anderen Stoffgruppen vor.

Im Vergleich zu Daten aus den Neunzigerjahren [5] ist die Konzentration insbesondere in der Analysenstoffgruppe Kunststoffe geringer. Dies könnte auf den geminderten Einsatz von PVC bei der Produktion von Kunststoffartikeln des täglichen Gebrauchs zurückzuführen sein.

- Fracht

Die Hauptmasse zur Chlorfracht von 4,1 g/(kg Restmüll) steuern die Analysenstoffgruppen Organik, Mittel- und Feinfraktion sowie Kunststoffe mit bis zu insgesamt 60 % bei.

- Schwefel

Schwefel gehört wie Chlor zu den häufigsten chemischen Elementen der obersten Erdkruste und ist in gebundener Form für alle höheren Organismen lebensnotwendig (Bestandteil vieler Eiweißstoffe). Schwefel und seine Verbindungen haben ein breites Anwendungsspektrum: sie werden in der Düngemittelproduktion, bei der Vulkanisation von Kautschuk, zur Herstellung von Kunststoffen, in Akkumulatoren u.ä. eingesetzt [8]. Bedeutende Mengen an Schwefel sind in den Brennstoffen Erdgas, Erdöl und Kohle enthalten.

Hohe Schwefelkonzentrationen liegen in den Analysenstoffgruppen Inertes (ca. 20 g/kg), Staubsaugerbeutelinhalt (ca. 13 g/kg), Leder, Gummi, Kork (ca. 11 g/kg) und der Feinfraktion (ca. 9 g/kg) vor. Diese Konzentrationen liegen im Rahmen der Schwankungsbreite früherer Untersuchungen[5].

- Fracht

Pro kg Restmüll ist ein Schwefelgehalt von 2,7 g vorzufinden. Die Hauptbeiträge liefern die Analysenstoffgruppen Feinfraktion (über 25 %; Hausbrandaschen), Inertes (über 23 %) und Mittelfraktion (knapp 15 %). Weitere nicht vernachlässigbare Massenbildner sind die Stoffgruppen Organik (über 6 %) und Sonstige Verbunde (über 5 %).

## 2.4 Schadstoffe

### 2.4.1 Schwermetalle

Im Folgenden werden die Verteilungen der sechs Schwermetalle Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Quecksilber und Zink auf die einzelnen Analysenstoffgruppen dargestellt. I.d.R. sind Schwermetalle als Spurenelemente für Mensch und Tier lebensnotwendig, besitzen aber – je nach Oxidationsstufe (v.a. Chrom) und Konzentration – eine unterschiedliche spezifische Toxizität. Die Mehrzahl der genannten Schwermetalle werden in der Grundstoffindustrie benötigt und sind daher in vielfältigen Produkten anzutreffen.

- Blei

Blei ist in einer breiten Produktpalette zu finden; Blei und seine Verbindungen werden/wurden zur Herstellung von Akkumulatoren, Batterien, Farben, technischen Folien, Kabelummantelungen, Loten und Flussmitteln, Rohren etc. sowie im Strahlenschutz eingesetzt [9].

Im Restmüll ist Blei in den Analysenstoffgruppen Organik, Hygieneprodukte sowie Papier, Pappe und Kartonagen in Spuren enthalten. Im Promillebereich ist Blei im Elektronikschrott (Leiterplatten, Lote) und in den Fraktionen Inertes (z.B. bleihaltige Glasuren von Tonwaren), Sonstige Verbunde (z.B. Glühbirnen) zu finden. In deutlich geringeren Anteilen liegt Blei in Kunststoffen, Renovierungsabfällen (Farben: Tapeten, Teppichböden) etc. vor.

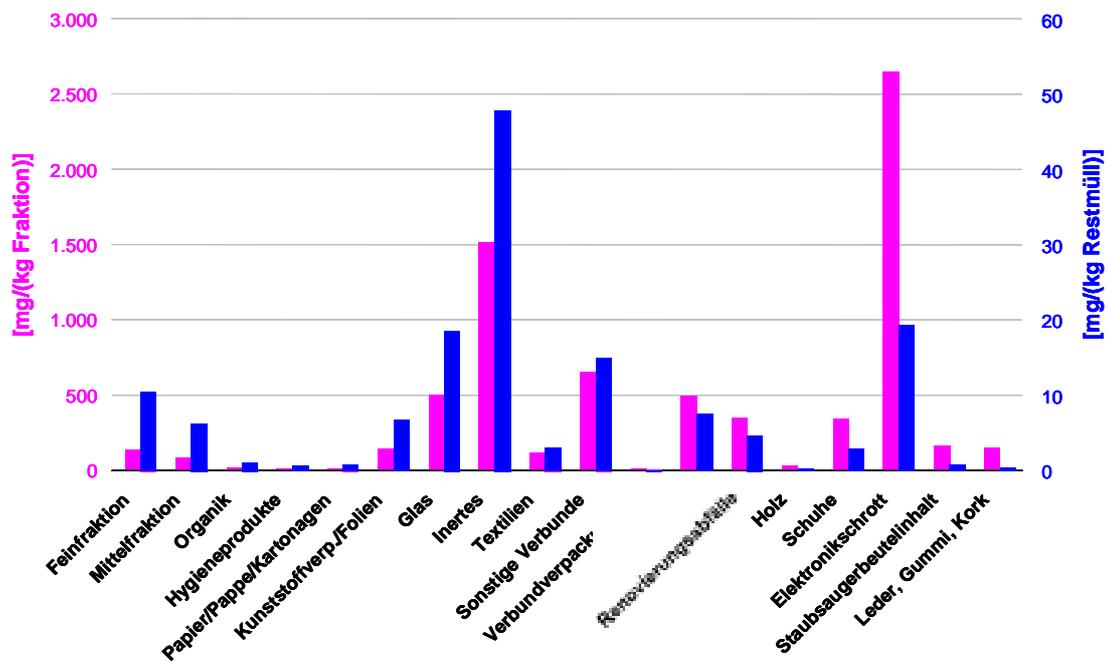


Abb. 3: Bleikonzentrationen und –frachten der Analysenstoffgruppen des Restmülls

Die Ergebnisse liegen im unteren Schwankungsbereich früherer Untersuchungen[5]. Eine Ausnahme bildet die Stoffgruppe Textilien; hier wurden um den Faktor 3 höhere Konzentrationen ermittelt. Im Vergleich zu [10] weist zudem die Stoffgruppe Schuhe um den Faktor 2 höhere Werte auf.

#### o Fracht

Die Bleifracht von 150 mg/(kg Restmüll) wird zu zwei Dritteln von den Analysenstoffgruppen Inertes, Elektronikschrott und Sonstige Verbunde gebildet; die Stoffgruppe Inertes trägt mit über 35 %, die Sonstigen Verbunde mit knapp 15 % und Elektronikschrott mit über 10 % dazu bei. Die Fein- und Mittelfraktion, Kunststoffverpackungen, Kunststoffe und Renovierungsabfälle bilden jeweils etwa 5 % der Bleibelastung des Restmülls. Im Vergleich zu [4] haben die Bleifrachten im Restmüll zugenommen, was in dem höheren Elektronikschrottanteil begründet sein kann.

#### • Cadmium

Cadmium ist ein Nebenprodukt der Zinkverhüttung; Cadmium und seine Verbindungen werden/wurden als Korrosionsschutz, als Bestandteil von Batterien, Akkumulatoren und Solarzellen, als Halbleiter, als Leuchtstoffe, als Farben sowie als Stabilisatoren in Kunststoffen (PVC) und Reifen eingesetzt [11].

Im Restmüll findet man mit 250 mg/kg die höchste Cadmiumkonzentration in den Analysenstoffgruppen Elektronikschrott (bestehend u.a. aus Batterien, Halbleitern, Kunststoffen). Der Cadmiumgehalt in der Stoffgruppe Kunststoffe beträgt ca. 75 mg/kg, in den Stoffgruppen Inertes, Renovierungsabfälle, Sonstige Verbunde sowie Leder, Gummi, Kork liegt er unter 25 mg/kg. Bis auf die Stoffgruppe Elektronikschrott sind die Cadmiumkonzentrationen in den Analysenstoffgruppen in etwa gleich geblieben [5].

- Fracht

Die Cadmiumfracht von 7 mg/(kg Restmüll) wird dominiert von den Analysenstoffgruppen Elektronikschrott (knapp 30 %), Kunststoffe (je 17 %) und Inertes. Weitere nennenswerte Beiträge (bis zu 10 %) liefern die Stoffgruppen Sonstige Verbunde und Renovierungsabfälle.

- Chrom

Chrom kommt als drei- und sechswertiges Element vor. Es wird zur Herstellung korrosionsbeständiger, hoch beanspruchbarer Stähle sowie in der Galvanikindustrie zum Veredeln von Metalloberflächen verwendet; ebenso findet man Chrom und seine Verbindungen in Metalllegierungen, in Farbpigmenten, in Katalysatoren sowie als Ätz-, Beiz-, Oxidations- und Färbemittel [12]. In der lederverarbeitenden Industrie ist Chrom der wichtigste mineralische Gerbstoff – vgl. [13].

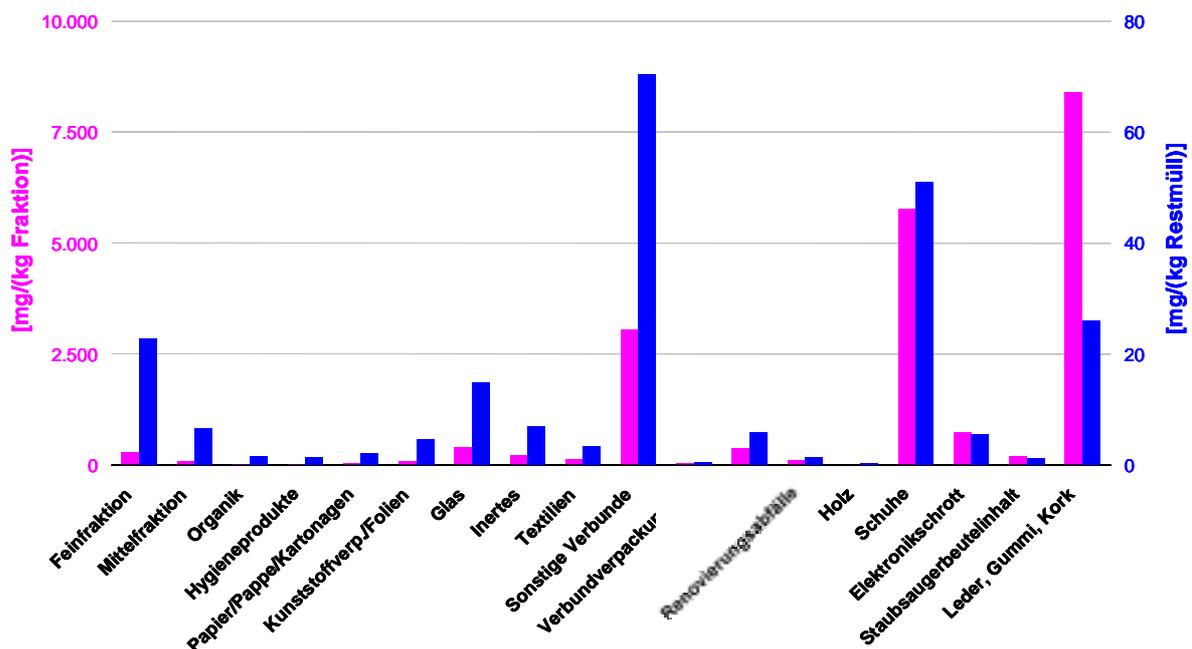


Abb. 4: Chromkonzentrationen und –frachten der Analysenstoffgruppen des Restmülls

Aufgrund dieses Einsatzspektrums ist Chrom im Restmüll im Promillebereich in den „lederhaltigen“ Analysenstoffgruppen Leder/Gummi/Kork und Schuhe sowie in Sonstige Verbunde (Gegenstände unterschiedlicher Materialzusammensetzung, z.B. verchromte Verschlüsse/Beschläge bei Taschen, Gürteln) zu finden. In den anderen Analysenstoffgruppen ist Chrom in einer um mindestens eine Größenordnung geringeren Konzentration anzutreffen.

Bei Glas, Inertes und den lederhaltigen Stoffgruppen wurden im Vergleich zu [5], [10] deutlich höhere Konzentrationen bestimmt.

- Fracht

Entsprechend der höheren Chromkonzentrationen in den o.g. Stoffgruppen hat sich auch die Fracht pro kg Restmüll (Trockensubstanz) von etwa 100 mg [4] auf rd. 350 mg Chrom erhöht. Die Hauptbeiträge liefern die Stoffgruppen Sonstige Verbunde (über 30 %), Schuhe (23 %), Leder, Gummi, Kork (12 %) sowie die Feinfraktion (10 %).

- Kupfer

Kupfer wird v.a. in der Elektroindustrie (Drähte, Stangen), im Apparate- und Maschinenbau (Bleche, Rohre) wegen seiner guten Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit v.a. für Heiz- und Kühlschlangen benötigt. Große Kupfermengen werden für Legierungen (Bronze, Messing, Rotguss, Neusilber, Konstantan usw.) eingesetzt. Daneben finden Kupfer und seine Verbindungen v.a. Anwendung als Legierungsbestandteil rostfreier Stähle, in Akkumulatoren, Katalysatoren sowie als Farbpigmente für Glasuren und Email und beim Vernickeln von Glas, Porzellan, Keramik. Aufgrund dieses breiten Einsatzspektrums [14] ist Kupfer in einer Vielzahl von langlebigen Gegenständen des täglichen Gebrauchs (Münzen, Beschläge, Elektrogeräte) anzutreffen.

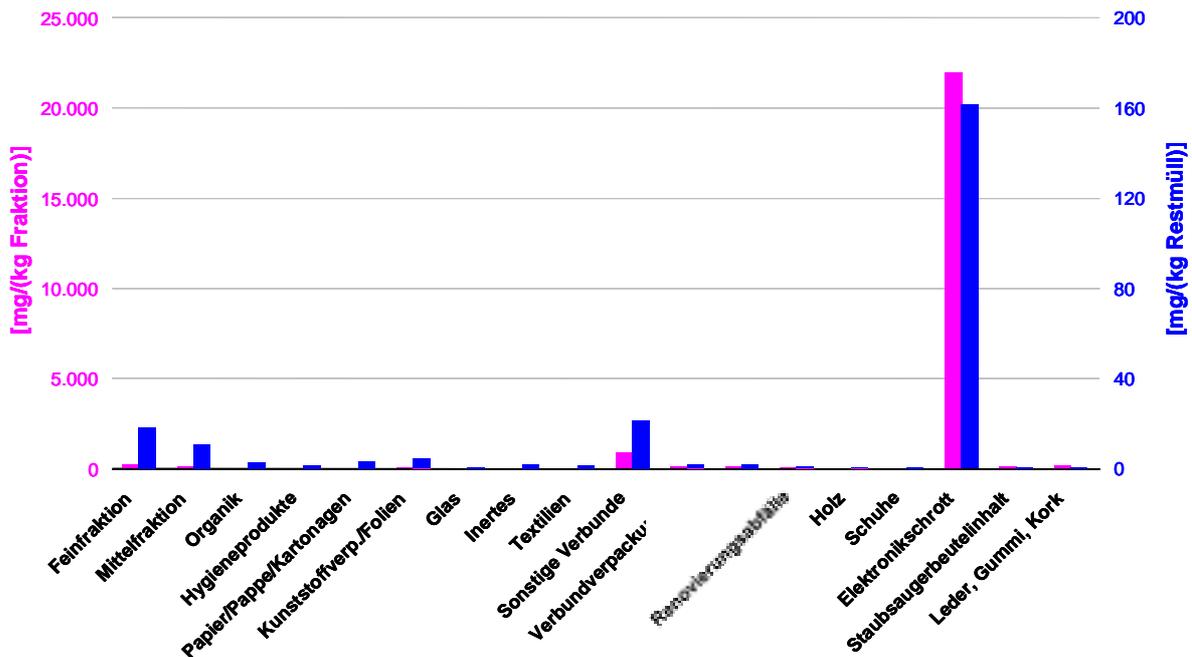


Abb. 5: Kupferkonzentrationen und -frachten der Analysestoffgruppen des Restmülls

Das Verteilungsmuster des Kupfers im Restmüll zeigt eine deutliche Dominanz der Analysestoffgruppe Elektronikschrott mit Konzentrationen im einstelligen Prozentbereich. Erneut kann ein zeitlicher Trend hin zu steigenden Konzentrationen in den lederhaltigen Analysestoffgruppen verzeichnet werden, vgl. [5], [10].

- Fracht

Entsprechend des Einzugs elektronischer Geräte in den Bereich der Gegenstände des täglichen Bedarfs besteht gegenüber früheren Untersuchungen ein nicht zu vernachlässigender Anteil des Restmülls aus Elektronikschrott. Dies schlägt sich aufgrund der hohen Kupferkonzentrationen in dieser Analysestoffgruppe in einer Zunahme der Kupferfracht pro kg Restmüll (Trockensubstanz) von etwa 100 mg [4] auf 370 mg nieder. Die Analysestoffgruppe Elektronikschrott trägt mit fast 70 % zur Kupferfracht von 235 mg/(kg Restmüll) bei. Weitere Massebildner stellen die Stoffgruppen Sonstige Verbunde (bis zu 10 %) und Feinfraktion (bis zu 8 %) dar.

- Quecksilber

Das Schwermetall Quecksilber ist v.a. in Batterien, als Schalter in Elektrogeräten [15] sowie in Thermometern, Manometern und als Elektrodenmaterial zu finden. Anorganische und organische Quecksilberverbindungen werden u.a. in der Porzellanmalerei, als Desinfektionsmittel, als Fungizide und Insektizide, als Saat-, Holz- und Tierhaarbeizen eingesetzt. Schließlich wird/wurde Quecksilber in Amalgamen zur Zahnfüllung verwendet. Ein Überblick über die Einsatzgebiete und Toxizität von Quecksilber/-verbindungen gibt [16].

Im Restmüll kommen Quecksilberkonzentrationen im ppm-Bereich im Elektronikschrott (Batterien, Schaltelemente etc.; 1,8 mg/kg), in Textilien (Färbemittel), Sonstigen Verbunde und Staubsaugerbeutelinhalt bis zu je 0,8 mg/kg vor. Mit Ausnahme der Analysenstoffgruppe Textilien zeigt sich ein deutlicher zeitlicher Trend hin zu abnehmenden Konzentration (vgl. [5], [10]).

- Fracht

Die wesentlichen Massebildner für Quecksilber sind im Restmüll die Analysenstoffgruppen Feinfraktion, Textilien, Sonstige Verbunde, und Elektronikschrott. Zu dem Gesamtgehalt von 0,4 mg/(kg Restmüll) trägt jeweils der Feinmüll zu etwa einem Viertel, die Textilien zu einem Fünftel, Sonstige Verbunde zu einem Siebtel und der Elektronikschrott zu einem Achtel bei.

- Zink

Zink wird vor allem als Korrosionsschutz (Verzinken, Galvanisieren) im Metallbau eingesetzt und ist in Messing und anderen Legierungen (Druckguss), die in Haushaltsgegenständen, Armaturen u.ä. zu finden sind, enthalten [17]. Daneben ist Zink auch in Medikamenten, Kosmetika etc. zu finden.

Im Restmüll ist Zink im Promillebereich in den Analysenstoffgruppen Leder/Gummi/Kork (5,3 g/kg), Elektronikschrott (4,7 mg/kg), Sonstige Verbunde (2,4 mg/kg), Renovierungsabfälle (1,8 mg/kg) und Schuhe (1,7 mg/kg) anzutreffen. In den nicht genannten Stoffgruppen ist Zink im zwei- bis dreistelligen ppm-Bereich enthalten. Im Wesentlichen wird hiermit die Schwankungsbreite früherer Angaben abgebildet, vgl.[5].

- Fracht

Die Zinkfracht je kg Restmüll beträgt 335 mg und stimmt mit [4] überein. Von den einzelnen Analysenstoffgruppen tragen die Hauptmasse die Stoffgruppen Sonstige Verbunde (über 16 %), Kunststoffverpackungen/Folien (über 14 %), Elektronikschrott (über 10%), Fein- und Mittelfraktion (jeweils knapp 9 %). Die Beiträge der restlichen Analysenstoffgruppen liegt jeweils unter 5 %.

## 2.4.2 Organische Schadstoffe

- Polychlorierte Dioxine/Furane

Bei der Verbrennung von Kohlenstoff- und Chlor- und/oder anderen Halogenverbindungen entstehen bei Temperaturen zwischen 300 °C und 600 °C Dioxine/Furane; ohne entsprechende technische Maßnahmen – z.B. gefordert durch den Grenzwert in der 17. BImSchV [18] oder der TA Luft [19] – gelangen sie über den Abgaspfad und über Prozessabfälle in die Umwelt. Dioxine/Furane sind wie viele Chlorkohlenwasserstoffe chemisch und thermisch äußerst stabil und werden auch biochemisch kaum abgebaut; sie sind ubiquitär vorhanden.

In den einzelnen Analysenstoffgruppen sind pro kg Trockenmasse an Dioxinen/Furanen in den Stoffklassen Leder, Gummi, Kork bis zu 70 ng I-TE, in den anderen Stoffgruppen Konzentrationen bis zu 15 ng I-TE anzutreffen. Zu den Konzentrationen in der Feinfraktion dürften u.a. die hierin erfassten Aschen aus der häuslichen Holz- und Kohlefeuerung sowie die Kehrichtanteile beitragen.

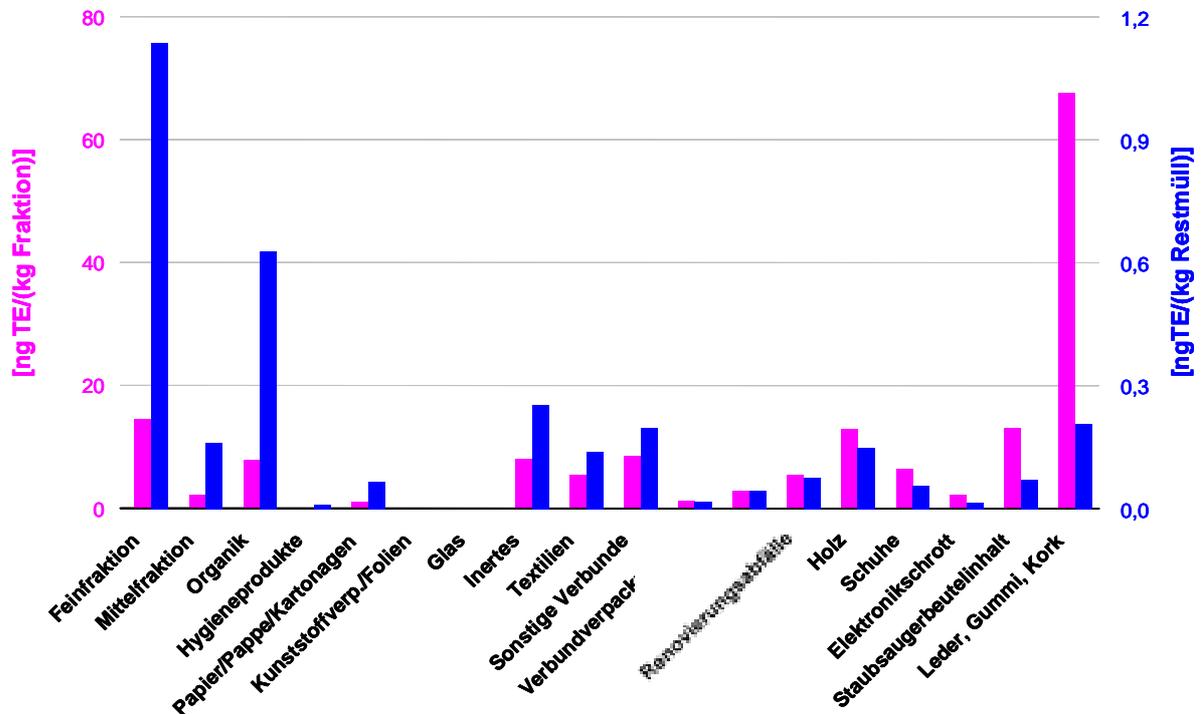


Abb. 6: Konzentrationen und -frachten von polychlorierten Dioxinen und Furanen der Analysenstoffgruppen des Restmülls

#### ○ Fracht

Die höchste Dioxin/Furanfracht kommt aus der Feinfraktion (ein Hauptmassebildner des Restmülls), die mit über 35 % zur Gesamtfracht von 3,2 ng I-TE/(kg Restmüll) beiträgt. Weitere nicht vernachlässigbare Beiträge liefern die Stoffgruppen Organik (über 19 %), Inertes (über 8 %), Leder, Gummi, Kork und Sonstige Verbunde (jeweils über 6 %), Mittelfraktion und Holz (jeweils knapp 5 %).

#### • Polychlorierte Biphenyle

Polychlorierte Biphenyle (PCBs), die durch Chlorierung von Biphenyl in Gegenwart von Eisenchloridkatalysatoren hergestellt werden, werden/wurden aufgrund ihrer hohen thermischen und chemischen Stabilität sowie ihres hohen elektrischen Widerstandes besonders als Isolier-, Hydraulik- und Kühlflüssigkeiten verwendet. PCBs sind kanzerogen. Wegen ihrer hohen Beständigkeit und Fettlöslichkeit reichern sie sich über die Nahrungskette an. Die Anwendung von PCBs ist deshalb heute auf geschlossene Systeme beschränkt. In Deutschland sind Herstellung, In-Verkehr-Bringen und Verwendung von PCBs verboten [20].

Im Restmüll weisen die nach [21] bestimmten PCBs in den Analysenstoffgruppen Kunststoffe (430 µg/kg), Holz (290 µg/kg), Sonstige Verbunde (120 µg/kg) und Leder, Gummi, Kork (110 µg/kg) die höchsten Konzentrationen auf. Neben produktionsbedingten Ursachen spiegelt diese Verteilung evtl. die aufgrund der hohen Lipophilie (Kow-Werte ~106) zu erwartende Anreicherung in Materialien organischer Herkunft wider.

- Fracht

Die PCB–Fracht je kg Restmüll beträgt 31 µg. Hierzu tragen mit ca. 25 % die Stoffgruppe Kunststoffe, mit bis zu 15 % die Fein- und Mittelfraktion sowie mit 11 % die Holzfraktion und zu 9 % die Sonstigen Verbunde bei.

- Polyzyklisch aromatische Kohlenwasserstoffe

Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAKs) bestehen aus mehreren kondensierten Benzolringen und entstehen bei der unvollständigen organischer Substanzen; sie sind sowohl in Teer, Pech, Bitumen, Ruß, Räucherrauch u.ä. als auch in „Abgasen“ (Kfz, Zigarettenrauch etc.) zu finden. PAKs mit vier bis sechs Benzolringen gehören zu den Krebs erzeugenden Stoffen; prominentester Vertreter dieser Stoffklasse ist das Benzo(a)pyren.

Die höchsten Konzentrationen an PAKs (Summe 16 EPA) sind in den Analysenstoffgruppen Feinfraktion (über 20 mg/kg), Leder, Gummi, Kork (über 10 mg/kg) sowie in der Stoffgruppe Sonstige Verbunde (über 9 mg/kg) zu finden. Die hohen Konzentrationen in der Feinfraktion sind konsistent mit dem Vorliegen bedeutender Anteile an Aschen und Zigarettenkippen, in denen Produkte unvollständiger Verbrennungsprozesse angereichert sein können. Die Konzentrationen in der Analysenstoffgruppe Leder, Gummi, Kork dürften vorwiegend aus Gummiprodukten stammen (Vulkanisierungsprozess).

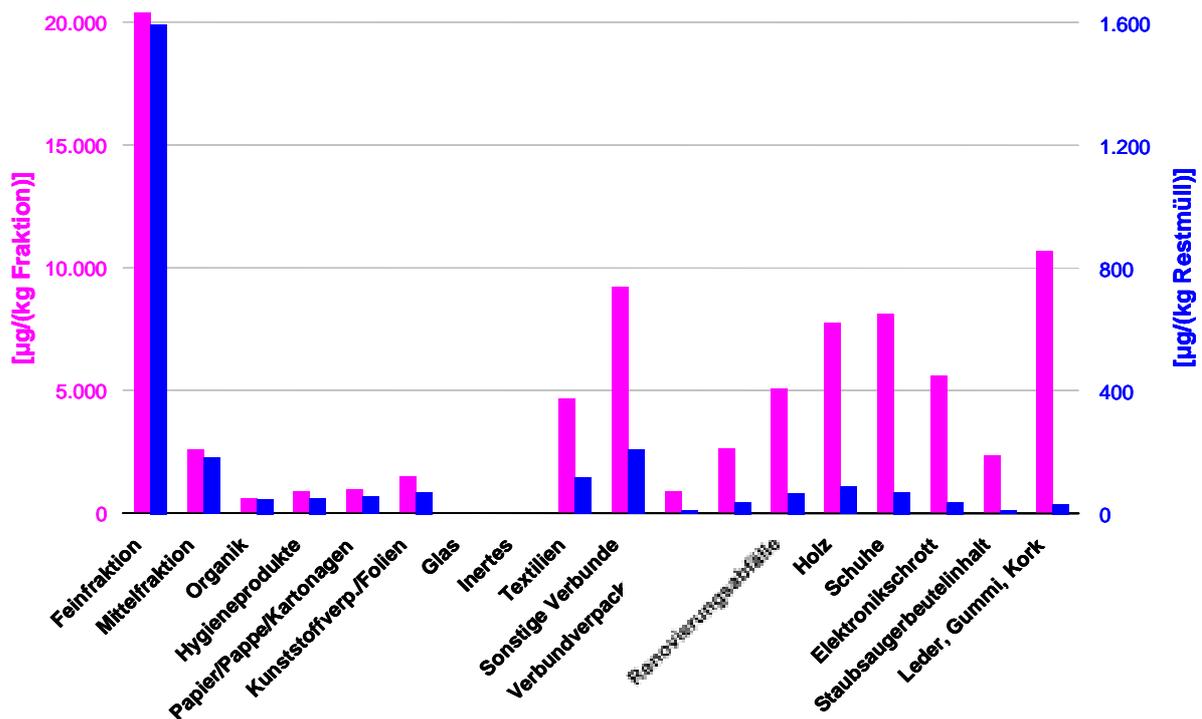


Abb. 7: Konzentrationen und –frachten polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe der Analysenstoffgruppen des Restmülls

- Fracht

Die PAK–Fracht von 2,7 mg/(kg Restmüll) setzt sich im Wesentlichen aus den Beiträgen folgender Analysenstoffgruppen zusammen: Feinfraktion (59 %), Sonstige Verbunde (knapp 8 %), Mittelfraktion (knapp 7 %); die Beiträge der restlichen Analysenstoffgruppen liegen jeweils unter 4 %.

### 3 Zusammenfassung

Die in den Analysenstoffgruppen ermittelten physikalisch–chemischen Parameter zeigen, dass der Restmüll stark vom hohen Wassergehalt einzelner Stoffgruppen (Organik, Hygieneprodukte, Mittelfraktion) geprägt ist und dadurch sowohl der Heizwert als auch die Schadstoffgehalte reduziert werden.

Die Untersuchungsergebnisse der einzelnen den Restmüll charakterisierenden Analysenstoffgruppen belegen, dass

- der Heizwert des Restmülls vor allem von den Stoffgruppen Kunststoffverpackungen/Folien, Organik, Hygieneprodukte sowie der Mittelfraktion gebildet wird,
- die Stoffgruppen Elektronikschrott, Sonstige Verbunde, Feinfraktion und Inertes die Hauptbeiträge zum Schwermetallgehalt des Restmülls liefern,
- die organische Schadstoffe im Restmüll v.a. von der Feinfraktion und in weit geringerem Umfang von den Stoffgruppen Organik, Sonstige Verbunde, Mittelfraktion usw. herrühren.

Die bislang vorliegenden Daten (Stand November 2002) deuten darauf hin, dass Konsumgüter den Restmüll schadstoffmäßig mit einem entsprechenden Zeitverzug prägen. Trotz des feststellbaren „Gedächtnis des Restmülls“ lassen sich in einzelnen Analysenstoffgruppen rückläufige Schadstoffkonzentrationen verzeichnen, die evtl. auf Erfolge einer integrierten Produktpolitik weisen. Auf der anderen Seite zeigen ‚neuartige‘ Restmüllkomponenten wie Elektronikschrott beträchtliche Konzentrationen an fast allen Schwermetallen. Impulse für eine weitergehende Schadstoffentfrachtung wird mit der geplanten Elektro– und Elektronik–Altgeräte–Verordnung (EEAV) einhergehen.

### 4 Literatur

- [1] Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.):  
Kompostierung von Bioabfällen mit anderen organischen Abfällen – 2. Zwischenbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben. Augsburg, 2002
- [2] Anonym:  
Ökobilanzielle Betrachtung der Entsorgung von Inkontinenz– und Babywindelabfällen.  
Witzenhausen–Institut für Abfall, Umwelt und Energie [Hrsg.], Umweltgutachten im Auftrag Verein zur Förderung der Abfallwirtschaft Region Rhein–Wupper, Witzenhausen 2000
- [3] Stephan, K.; Mayinger, F.:  
Thermodynamik – Grundlagen und technische Anwendungen. Band 2: Mehrstoffsysteme und chemische Reaktion.  
Springer–Verlag, Berlin 1992, S. 289
- [4] Spuziak–Salzenberg, D.; Riemer, S.; Bayley–Blackwedel, B.; Bär, G.:  
Probenaufbereitungssystem zur Qualitätssicherung für Abfälle zur energetische (stofflichen) Verwertung.  
Entsorgungspraxis (1998) 10, S. 36–40
- [5] Mast, P.–G.; Süßkraut, G., van den Elsen, H.; Stekete, J.; Duzijn, R.:  
Einfluß der Abfallzusammensetzung auf Schadstoffgehalt und -menge der Verbrennungsrückstände – Phase I –. Teilstudie C: Zusammensetzung von Rest–Siedlungsabfällen in der Bundesrepublik Deutschland. Im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt von der Tauw Umwelt GmbH, NL Berlin. UBA–Forschungskennzeichen 103 10 903.  
Berlin, 1996, S. 151–186

- [6] Schmittinger, P.:  
Chlorine. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Fifth, completely revised Edition. Vol. A 6: Ceramics to Chlorohydrins. Executive Editor: Gerhartz, W.; Senior Editor, Yamamoto, Y.S.; Editors: Campbell, F.T.; Pfefferkorn, R.; Rounsaville, J.F.  
VCH, Weinheim 1986, S. 399ff
- [7] GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH:  
Chlorchemie – Wege und Perspektiven eines Grundstoffes in Bayern. Fachinformation Umwelt & Entwicklung Bayern. Hrsg.: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen.  
München 2000
- [8] Nehb, W.; Vydra, K.:  
Sulfur. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Fifth, completely revised Edition. Vol. A 25: Starch and Other Polysaccharides to Surfactants. Editors: Elvers, B.; Hawkins, S.; Russey, W.  
VCH, Weinheim 1994, S. 507ff
- [9] Sutherland, C.A.; Milner, E.F.; Kerby, R.C.; Teindl, H.; Mehn, A.:  
Lead. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Fifth, completely revised Edition. Vol. A 15: Isotopes, Natural to Magnesium Compounds. Editors: Elvers, B.; Hawkins, S.; Schulz, G.  
VCH, Weinheim 1990, S. 193ff
- [10] Heilmann, A.; Wagner, S.:  
Kann man aus Restabfällen einen qualitativ hochwertigen Ersatzbrennstoff herstellen?  
In: Beiträge zur Abfallwirtschaft, Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten, TU Dresden, Bd. 9: 4. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung Co-Verbrennung. Hrsg: Bilitewski, B.; Faulstich, M.; Urban, A.  
Dresden, 1999, S. 89–99
- [11] Schulte-Schrepping, K.-H.; Piscator, M.:  
Cadmium and Cadmium Compounds. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Fifth, completely revised Edition. Vol. A 4: Benzyl Alcohol to Calcium Sulfate. Executive Editor: Gerhartz, W.; Senior Editor, Yamamoto, Y.S.; Editors: Campbell, F.T.; Pfefferkorn, R.; Rounsaville, J.F.  
VCH, Weinheim 1985, S. 499ff
- [12] Downing, J.H.; Deeley, P.D., Fichte, R.M.:  
Chromium and Chromium Alloys. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Fifth, completely revised Edition. Vol. A 7: Chlorophenols to Copper Compounds. Executive Editor: Gerhartz, W.; Senior Editor, Yamamoto, Y.S.; Editors: Campbell, F.T.; Pfefferkorn, R.; Rounsaville, J.F.  
VCH, Weinheim 1986, S. 43ff
- [13] Heidemann, E.:  
Leather. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Fifth, completely revised Edition. Vol. A 15: Isotopes, Natural to Magnesium Compounds. Editors: Elvers, B.; Hawkins, S.; Schulz, G.  
VCH, Weinheim 1990, S. 259ff
- [14] Fabian, H.:  
Copper. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Fifth, completely revised Edition. Vol. A 7: Chlorophenols to Copper Compounds. Executive Editor: Gerhartz, W.; Senior Editor, Yamamoto, Y.S.; Editors: Campbell, F.T.; Pfefferkorn, R.; Rounsaville, J.F.  
VCH, Weinheim 1986, S. 471ff
- [15] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Veranst.):  
Umweltrelevante Inhaltsstoffe elektrischer und elektronischer Altgeräte (EAG) bzw. Bauteile und Hinweise zu deren fachgerechten Entsorgung. Fachtagung am 25. September 2001  
Augsburg 2001, 103 S.
- [16] Simon, M.; Jönk, P.; Wühl-Couturier, G.; Dauderer, M.:  
Mercury, Mercury Alloys, and Mercury Compounds. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Fifth, completely revised Edition. Vol. A 16: Magnetic Materials to Mutagenic Agents. Editors: Elvers, B.; Hawkins, S.; Schulz, G.  
VCH, Weinheim 1991, S. 269ff

- [17] Graf, G.G.:  
Zinc. In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Fifth, completely revised Edition. Vol. A 28: Water to Zirconium and Zirconium Compounds. Editors: Elvers, B.; Hawkins, S. VCH, Weinheim 1996, S. 509ff
- [18] Anonym:  
Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – 17. BImSchV – Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe vom 23. November 1990 BGBl. I(1990), S. 2545, ber. S. 2832; (1999), S. 186; (2000), S. 632; (2001), S. 1950
- [19] Anonym:  
Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, TA Luft – Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft vom 24. Juli 2002 GMBI. (2002) 25 – 29, S. 511
- [20] Anonym:  
Verordnung über Verbote und Beschränkungen des Inverkehrbringens gefährlicher Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse nach dem Chemikaliengesetz – ChemVerbotsV – Chemikalien-Verbotsverordnung in der Fassung vom 19. Juli 1996.BGBl. I (1996), S. 1151, 1498; (1998), S. 3956; (1999), S. 2056; (2000), S. 747, 933; (2002), S. 3082, 3185, 3302 und 4123
- [21] Anonym:  
Klärschlammverordnung (AbfKlärV) vom 15. April 1992. BGBl. I (1992), S. 912; (1997), S. 446; (2002), S. 1193 und S. 1488

# **Nutzen der Kenntnis von Restmüllzusammensetzung und Schadstofffrachten für die abfallwirtschaftliche Praxis vor Ort**

**Jochen Zellner, Landratsamt Neustadt a.d. Aisch – Bad Windsheim**

## **1 Einleitung**

Der Landkreis Neustadt a. d. Aisch – Bad Windsheim wurde im Rahmen eines mehrjährigen Projektes des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz zur Untersuchung des Restabfalls aus Privathaushalten in bayerische Gebietskörperschaften für eine Restabfallsortierkampagne ausgewählt. Diese wurde im Juni 2001 (Frühjahrs-Analyse) und im November 2001 (Winter-Analyse) durch das Büro Fabion durchgeführt.

Die folgenden Ausführungen beschäftigen sich mit den Ergebnissen und deren mögliche Bedeutung für die Abfallwirtschaft vor Ort.

Grundsätzlich haben Restmüllanalysen immer Konsequenzen für das abfallwirtschaftliche Handeln gehabt, wie ein Rückblick auf die Vielzahl an Gewerbemüllkataster Anfang der neunziger Jahre unschwer erkennen lässt. Auf deren Grundlage wurden branchenspezifische Leitfäden und Beratungsangebote erstellt. Diese Kenntnisse begründeten außerdem eine Trendwende von der Abfallbeseitigung zur Abfallverwertung durch das Erschließen neuer Wertstoffpotenziale.

Ein weiteres Beispiel für die Bedeutung von Restmüllanalysen ist die 1990 im Rahmen einer Diplomarbeit durchgeführten eigenen Untersuchungen im Landkreis Neustadt a. d. Aisch – Bad Windsheim. Diese zeigten das große Potenzial an organischen Abfällen im Restmüll, welches durch die Einführung der Biotonne oder die Verpflichtung zur Eigenkompostierung minimiert werden sollte.

## **2 Rahmendaten für den Landkreis Neustadt/Aisch – Bad Windsheim**

### **2.1 Strukturdaten**

Im Jahr 2001 lebten im Landkreis Neustadt/Aisch – Bad Windsheim 99.003 Einwohner (Stand 30.6.2001, LfStaD). Verwaltungsrechtlich gehört der Landkreis zum Regierungsbezirk Mittelfranken. Der Landkreis grenzt im Osten an den Ballungsraum Erlangen/Nürnberg/Fürth, was in einem starken Wachstumsanstieg von Neubaugebieten in den Gemeinden des östlichen Landkreises zum Ausdruck kommt.

Der Landkreis hat eine Fläche von 1.268 km<sup>2</sup>, die Bevölkerungsdichte liegt bei 78 E/km<sup>2</sup>. Nach der bayerischen Abfallbilanz 2000 wird sie damit als "ländlich" eingestuft (bis 125 E/km<sup>2</sup>).

Im Landkreis Neustadt/Aisch gibt es 38 eigenständige Städte und Gemeinden. Die Stadt Neustadt a.d. Aisch ist Verwaltungssitz. Neustadt und Bad Windsheim sind mit jeweils ca. 12.000 Einwohnern die größten Städte im Landkreis.

## **2.2 Daten zur Abfallwirtschaft**

Der Landkreis Neustadt/Aisch – Bad Windsheim betreibt die Hausmülldeponie Dettendorf, und beseitigt dort insbesondere Hausmüll, Sperrmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle sowie in geringem Umfang auch Sortierreste aus der Kompostierung, Bauschutt, Bodenaushub, verunreinigtes Erdreich und sonstige, nicht hausmüllähnliche Abfälle wie Altschlämme, Sandfang- und Rechengut.

### **2.2.1 Sammlung des Restabfalls**

Im Jahr 2001 wurden insgesamt 11.300 Mg Restabfall aus Haushalten und Geschäftsmüll über die öffentliche Müllabfuhr eingesammelt. Das entspricht einem durchschnittlichen Pro-Kopf-Aufkommen von 114,14 kg/(E\*a).

Die Restmüllabfuhr erfolgt 14-tägig durch die als Dritte beauftragte Firmen Friedrich Hofmann GmbH & Co. und die Städtereinigung Rudolf Ernst GmbH & Co.KG. Für die Restabfallentsorgung stehen den Bürgern 80 l, 120 l, 240 l MGB und 1100 l Container zur Verfügung. Fallen vorübergehend größere Müllmengen an, können zusätzlich vom Landkreis zugelassene 50 l Müllsäcke verwendet werden.

Für jeden Bewohner eines anschlusspflichtigen Grundstückes muss mindestens eine Kapazität von 15 l je 14-tägige Leerung bereitstehen.

Die Gebühr für die Abfallentsorgung wird behälterbezogen erhoben (Behältermaßstab). Müllgemeinschaften zwischen benachbarten Grundstücken sind zulässig. Der Gebühreneinzug erfolgt nicht zentral, sondern über die Gemeinden im Landkreis.

### **2.2.2 Getrenntsammlung von Wertstoffen, Problemmüll und Sperrmüll**

Nach der Abfallwirtschaftssatzung sind die Bürger des Landkreises Neustadt/Aisch zur Getrennthaltung von verwertbaren Abfällen und Problemmüll verpflichtet.

Die Hauptkomponente der Wertstoffeffassung im Landkreis Neustadt/Aisch ist ein 2-Tonnen-System, bestehend aus Biotonne (braune Tonne) und Papiertonne (grüne Tonne) sowie die Erfassung von Leichtstoffverpackungen über ein flächendeckendes Netz von Wertstoffhöfen und Wertstoffsammelstellen.

Nach § 15 (1) Abfallwirtschaftssatzung muss auf jedem anschlusspflichtigen Grundstück neben der Restmülltonne ein Behältnis für Papier, Pappe und Kartonagen und ein Behältnis für Biomüll, sofern nicht eigenkompostiert wird, vorhanden sein.

#### **2.2.2.1 Bioabfall**

Im Landkreis Neustadt/Aisch – Bad Windsheim muss jeder Haushalt seine Bioabfälle getrennt erfassen. Dabei hat der Bürger die Wahl, Bioabfälle entweder zu kompostieren oder sie über eine Biotonne zu entsorgen. Über die Biotonne werden nativ-organische Stoffe (Biomüll) erfasst. Die Nutzung der Biotonne ist gebührenpflichtig. Rund 40 % der Haushalte sind an die getrennte Bioabfallsammlung angeschlossen.

Eigenkompostierer finden sich vorwiegend im ländlichen Bereich bzw. dörflichen Strukturen, wo große Gärten vorhanden sind oder Landwirtschaft betrieben wird. Biotonnen stehen in erster Linie im städtischen Bereich bei Mehrfamilienhäusern oder Einfamilienhäusern mit kleinen Gärten.

Die Biomüllabfuhr erfolgt 14-tägig im Wechsel mit der Restmüllabfuhr durch die beauftragten Entsorgerfirmen. In den Sommermonaten (15. Mai bis 15. September) wird die Biotonne wöchentlich geleert. Die getrennt erfassten Bioabfälle werden in 2 von insgesamt 6 Kompostieranlagen im Landkreis Neustadt/Aisch – Bad Windsheim aufbereitet.

### 2.2.2.2 Papier und Leichtverpackungen

Neben Bioabfällen werden auch Papier/Pappe/Kartonagen im Holsystem über Tonnen gesammelt. Alle Haushalte im Landkreis sind an die Papiertonne angeschlossen. Die Leerung erfolgt monatlich. Leichtverpackungen werden über ein flächendeckendes Netz von 39 Wertstoffhöfen und Wertstoffsammelstellen erfasst.

### 2.2.2.3 Getrennterfassungssysteme im Landkreis Neustadt/Aisch

Die nachstehende Tabelle gibt einen Überblick über die Erfassungssysteme für Wertstoffe und Sperrmüll sowie für Elektronikschrott und Problem Müll im Landkreis Neustadt/Aisch – Bad Windsheim.

Tab. 1: Erfassungssysteme für Wertstoffe, Sperrmüll, Elektronikschrott und Problem Müll

Fraktion	System	Art der Erfassung
Bioabfall	Holsystem	Biotonne (für Nichtkompostierer)
Gartenabfall (sperrig)	Bringsystem	106 Grüngutcontainer und Anlieferung an den 6 Kompostieranlagen
Papier/Pappe/Kartonagen	Holsystem	Papiertonne und zusätzlich 14 Wertstoffhöfe
Leichtverpackungen, inkl. Alu-Verpackungen	Bringsystem	39 Wertstoffhöfe und Wertstoffsammelstellen
Glas, farbsortiert	Bringsystem	400 Depotcontainer-Standorte
Metалldosen	Bringsystem	400 Depotcontainer-Standorte
Metallschrott	Bringsystem	14 Wertstoffhöfe
Textilien/Altschuhe	Holsystem Bringsystem	Sammlung durch karitative Einrichtungen 39 Wertstoffhöfe und Wertstoffsammelstellen
Sperrmüll	Holsystem Bringsystem	1x pro Jahr flächendeckende Sammlung Hausmülldeponie Dettendorf
Elektronikschrott (weiße und braune Ware, Bürogeräte)	Holsystem Bringsystem	Sperrmüllsammlung z.T. Wertstoffhöfe
Problemabfälle	Bringsystem	2x pro Jahr mobile Problem Müllsammlung
Altholz	Holsystem Bringsystem	Sperrmüllsammlung 10 Wertstoffhöfe

### 3 Ergebnisse der Sortierkampagnen

Im folgenden Kapitel werden wichtige Ergebnisse der Untersuchung dargestellt und der mögliche Nutzen dieser Erkenntnisse für die Abfallwirtschaft im Landkreis Neustadt a. d. Aisch – Bad Windsheim diskutiert.

#### 3.1 Behälterspezifische Kenngrößen

Die Kenngrößen Behälterfüllgrad, Raumgewicht und Schüttgewicht des Abfalls in den Behältern sind wichtige Indikatoren zur Beurteilung des Erfassungssystems. Der Füllgrad ist das Verhältnis von gefüllten Behältervolumen zum Gesamtbehältervolumen, also ein Maß für die Behälternutzung. Der Füllgrad liegt im Mittel bei 85%.

Tab. 2: Nutzungsgrad der Restmüllbehälter [Volumenprozent]

Gebietsstruktur	Beprobte Behälter Größe [Liter]	Behälterfüllgrad		
		Frühjahrs- Analyse *	Winter- Analyse	Mittlerer Füllgrad
<b>ländlich</b>	80, 120	85 %	89 %	87 %
<b>städtisch</b>	80, 120	81 %	92 %	87 %
<b>innerstädtisch</b>	120, 240, 1100	83 %	81 %	82 %
<b>Landkreis Neustadt/Aisch</b>		<b>83 %</b>	<b>88 %</b>	<b>85 %</b>

\* Prozentualer Anteil des insgesamt genutzten Behältervolumens am insgesamt bereitgestellten Behältervolumen, je Gebietsstruktur bzw. Gesamtstichprobe

Die Schwankungsbreite der Füllgrade bewegt sich von einem Minimalwert bei 81 % im innerstädtischen und städtischen Bereich bis zu 92 % als Maximalwert im städtischen Bereich in der Winteranalyse.

Diese Werte zeigen, dass die oft geforderte Reduzierung des Behältervolumens nicht den tatsächlichen Verhältnissen vor Ort entspricht. Unter Berücksichtigung der Kenngröße einwohnerspezifisches Restabfall-Behältervolumen, also dem Parameter bereitgestelltes zu genutzten Behältervolumen, lassen sich noch andere weitergehende Forderungen aufstellen.

Es hat sich herausgestellt, dass das im Jahresmittel bereitgestellte Behältervolumen mit 20,2 I/E\*Woche fast 3 mal so hoch liegt wie das in der Abfallwirtschaftsatzung vorgegebene Mindestvolumen von 7,5 I/E\*Woche. Die Differenz zwischen bereitgestellten und genutzten Behältervolumen stellt das Behälterüberangebot von durchschnittlich 3,1 I/E\*Woche dar.

Parallel dazu zeigen die hohen Füllgrade bei Überangebot an bereitgestellten Behältervolumen, dass die Mindestvolumenregelung in der Satzung eigentlich angehoben werden müsste.

Die Möglichkeiten des Zusammenschlusses zu so genannten Müllgemeinschaften werden nicht im vollen Umfang genutzt. Dies hätte höhere Füllgrade bei geringeren bereitgestellten Behältervolumen zur Folge.

Des Weiteren gibt es natürlich auch Interaktionen zu Trenndisziplin und der Bereitstellung größerer Mengen an Wertstoffen, die sich im Restmüll befinden, wie die nachfolgenden Ausführungen zeigen werden. Eine Beziehung ist das höchste genutzte Behältervolumen von 18,9 l/E\*Woche (Winteranalyse) in ländlichen Gebieten, welches mit einem höheren Anteil an Fein-/Mittelmüll und Organik korreliert.

**Fazit:** Eine hohe Trenndisziplin ist nur bei geringen Behältervolumen erreichbar. Gebührengerechtigkeit wird nicht über die Bereitstellung von Behältervolumen erreicht, da daran die Nutzung des bereitgestellten Volumens, sprich der Füllgrad gekoppelt ist. Diese Erkenntnis erfordert andere differenziertere Modelle. Als Beispiel wäre ein Grundgebührenmodell anzudenken, weil sonst die Gebührensicherheit für die Grundkosten nicht zu bewerkstelligen ist.

## 3.2 Wertstoffpotenziale im Restmüll

### 3.2.1 Überblick und Einordnung

Das einwohnerspezifische Restabfallaufkommen der Privathaushalte betrug im Jahresmittel 88,7 kg/(E\*a). Dies entspricht einer wöchentlichen Menge von 1,7 kg/E.

Die einwohnerspezifische Restabfallmenge ist im Vergleich mit anderen Gebietskörperschaften als leicht unterdurchschnittlich einzustufen. Die Ursache hierfür findet sich primär in der flächendeckend eingeführten Biotonne. Andere Landkreise mit getrennter Bioabfallerfassung weisen ähnliche Resultate auf: Landkreis Kitzingen mit 89 kg/(E\*a) (HMA 1999/2000, LfU/FABION), Landkreis Pfaffenhofen mit 98 kg/(E\*a) (HMA 1999/2000, LfU/FABION), Landkreis Cham – dort sind 55% der Haushalte an die Biotonne angeschlossen – 73 kg/(E\*a). Eine Auswertung von bayernweit durchgeführten Hausmüllanalysen in den Jahren 1995/96 ergab eine durchschnittliche Restabfallmenge von  $108,5 \pm 7,9$  kg/(E\*a) für Gebietskörperschaften mit getrennter Biomüllfassung (Dr. Glöckl, Müll und Abfall 10/1998).

Zur genaueren Einordnung der ermittelten Analysenwerte wurden diese in der folgenden Tabelle mit den tatsächlich erfassten Wertstoffmengen aus der Abfallbilanz 2001 verglichen. Dieser Gegenüberstellung ermöglicht eine erste Wertung bzgl. der Größenordnungen, die durch wie auch immer geartete Maßnahmen erschlossen werden könnten.

Tab. 3: Vergleich Analyse – Abfallbilanz 2001

Obergruppen	Landkreis Neustadt/Aisch	
	spezifische Abfallmenge je Einwohner [kg/(E*a)]	Abfallbilanz 2001 [kg/(E*a)]
<b>Feinmüll &lt; 10 mm</b>	<b>12,3</b>	<b>k.A.</b>
<b>Mittelmüll 10 - 40 mm</b>	<b>10,4</b>	<b>k.A.</b>
PPK	3,9	98,4
Glas	3,2	28,8
Kunststoffe	7,9	9,6
Metalle	2,1	13,3
Organik	15,8	176,8
Holz	0,8	30,5
Textilien	3,4	k.A.
Inertes	3,5	k.A.
Verbunde	9,7	1,9
Hygieneprodukte	14,2	k.A.
Sonstige Abfallarten	1,3	16,2
Problemabfall	0,3	k.A.
<b>Summe Grobmüll &gt; 40 mm</b>	<b>66,0</b>	<b>k.A.</b>
<b>Summe Restabfall</b>	<b>88,7</b>	<b>114,14</b>
<b>Summe Wertstoffe</b>	<b>37,1</b>	<b>380,3</b>

### 3.2.2 Organik

Die organischen Abfälle summieren sich auf 17,9 Prozent bzw. 15,8 kg/E\*a. Rechnet man den kompostierbaren Anteil am Mittelmüll dazu, dann beträgt das organische Potenzial im Restabfall 25,4 % bzw. 22,4 kg/E\*a. Darüber hinaus enthält auch der Feinmüll einen gewissen organischen Anteil.

Die Masse der organischen Abfälle besteht aus 16 % Küchenabfälle. Der Anteil an Grünabfällen mit 1,6 % ist unabhängig von der Jahreszeit sehr gering und bestätigt die hohe Menge an erfassten Grünabfällen (siehe Tabelle 5) über die Gartenabfallcontainer.

Der hohe Anteil an Küchenabfällen ist größtenteils auf die nicht vollständige Getrennthaltung der Organik bei den Haushalten mit Eigenkompostierung zurückzuführen. Dies bestätigt die Vermutung, dass v.a. Speisereste tierischen Ursprungs (Fleisch und Knochen) aufgrund von Ungeziefergefahr (Ratten,...) nicht im eigenen Garten kompostiert werden. Würde man diese Annahme in zusätzliche Abfallbeseitigungskosten umrechnen, dann würde dies bedeuten, dass diese 1.394 Mg Küchenabfälle die Gesamtgebühren um ca. 180.000 € Beseitigungskosten zusätzlich belasten. Stellt man die kalkulierten Kosten für die Kompostierung im Jahr 2001 von ca. 40 €/Mg in Rechnung bleibt trotzdem ein Defizit von ca. 120.000 €/a.

Aus diesen zusätzlichen Kosten müsste gefolgert werden, dass ist die bessere Erfassung der Organik auf der Verwertungsseite zwingend zu fordern ist, was in der Praxis die Umstellung auf eine Pflicht-Biotonne bedeuten würde.

### 3.2.3 DSD-Fraktion

Das zusätzliche Wertstoffpotenzial für die an den Wertstoffhöfen abzugebenden Leichtverpackungen (Kunststoff-, Verbund- u. Metallverpackungen) beträgt maximal 799 Mg/a (= 8,1 kg/E\*a).

Die Masse an Verpackungen mit Grünen Punkt beträgt bei den „Verpackungen gesamt“ 7,63 kg(E\*a), das entspricht 61 %, bei den „Leichtverpackungen“ 5,32 kg/(E\*a), das entspricht 71 %. Der geringere Anteil bei den „Verpackungen gesamt“ ist im Wesentlichen auf die hier mit einbezogenen Papierverpackungen mit niedrigen DSD-Anteilen zurückzuführen.

Der Vergleich der tatsächlich erfassten Mengen an Leichtverpackungen (Kunststoffe = 9,7 kg/E\*a) des Jahres 2001 (siehe Tabelle 3) mit den hochgerechneten Mengen der Hausmüllanalyse von 5,32 g/E\*a zeigt das große Potenzial noch unerfasster Wertstoffe.

Aus diesen eindrucksvollen Zahlen lässt sich unschwer die Schwächen eines Bringsystems im Bereich der Erfassungsmenge von Verpackungswertstoffen erkennen. D.h. ein nicht unerheblicher Teil der Bürger ist nicht bereit den Weg zu den Wertstoffhöfen und Wertstoffsammelstellen „zu finden“. Quantitativ sind Holsysteme wie Gelber Sack und Gelbe Tonne diesen aufwändigeren System überlegen und für die Abfallwirtschaft im Landkreis Neustadt a. d. Aisch – Bad Windsheim stellt sich natürlich die Frage, wie dieses Potenzial aktiviert werden kann, oder auch wo die Grenzen liegen. Allgemein zeigen ja auch die anderen Wertstoffe eine so genannte Systemgrenze, die trotz der Faktoren bürgernahe Erfassung, lange Einführungszeit, einfache Handhabbarkeit und hoher Informationsstand, wie z.B. bei der grünen Wertstofftonne für PPK, einen Restanteil in der Hausmüllanalyse finden lassen.

Zur Erläuterung folgende Vergleichszahlen:

Nordschwäbischer Abfallwirtschaftsverband 6,6 kg/E\*a mit Holsystem Gelber Sack  
Landkreis Neustadt a. d. Aisch– Bad Windsheim 8,2 kg/E\*a Verpackungen mit Grünen Punkt.

Der Stadt–Land–Vergleich zeigt einen deutlich höheren Anteil an DSD–Verpackungen im städtischen (72% = 10,06 kg/E\*a) und innerstädtischen Restmüll (75% = 9,4 kg/E\*a), was einmal auf ein unterschiedliches Konsumverhalten schließen lässt und zweitens die Vermutung nahe legt, dass die Benutzung von Bringsystemen wie die Wertstoffhöfe und Wertstoffsammelstellen bei der ländlichen Bevölkerung (59% = 7,15 kg/E\*a) stärker akzeptiert wird. Das bedeutet, dass die Modifizierung des Erfassungssystems bei den Verpackungen sich schwerpunktmäßig an den Verhaltensweisen der Bevölkerung in den städtischen und innerstädtischen Gebieten orientieren sollte. Außerdem lässt sich hier trotz hoher absoluter Erfassungsmengen das größere Potenzial an Wertstoffen aktivieren.

Schwieriger interpretieren lässt sich das Verhältnis von lizenzierter Verpackungsmenge zu Verpackungen ohne Grünen Punkt. Dies ist vor allem für die Leistungsvertragsnehmer der DSD AG von Bedeutung, da nicht lizenzierte Verpackungen bei der Übergabe an die Garantiegeber des Dualen Systems grundsätzlich Schwierigkeiten machen würden. Diese Anteile von 445 Mg/a = 25% fallen grundsätzlich ja auch unter die Bestimmungen der Verpackungs–Verordnung und müssten außerhalb der kommunalen Entsorgungshoheit verwertet oder entsorgt werden. In Entsorgungskosten ausgedrückt bedeutet dies eine Belastung der Gebührenhaushalte von 56.230 €/a oder 1,9 € pro Haushalt und Jahr.

### 3.2.4 Rest

Die oben nicht näher interpretierten Wertstoffarten zeigen ein eher niedriges Potenzial für dringende abfallwirtschaftliche Aktivitäten. Soll heißen, dass davon ausgegangen werden kann, dass diese Restgehalte im Hausmüll wahrscheinlich jeweils sehr nahe an der Systemgrenze liegen. Betrachtet

man die Zahlen bei Papier, Holz und Glas näher, so sind zwar noch Restgehalte in der Analyse zu finden, diese bewegen sich aber im Vergleich zu den erfassten Wertstoffmengen in der Nähe der 10 Prozentmarke oder darunter.

PPK 3,9 kg/E\*a zu 98,4 kg/E\*a

Holz 0,8 kg/E\*a zu 30,5 kg/E\*a

Glas 3,2 kg/E\*a zu 28,8 kg/E\*a

Das maximale Potenzial an Gesamtwertstoffen von 31,7 – 39,6 kg/E\*a in der Restmüllanalyse im Vergleich zu der bereits erfasster Wertstoffmenge von 380,3 kg/E\*a in 2001 zeigt trotz der oben genannten Schwächen zufriedenstellend hohe Erfassungsquoten.

### 3.3 Land – Stadt – Gegensatz

In Tabelle 4 sind die einwohnerspezifischen Werte der mengenrelevanten Wertstofffraktionen in den Gebietsstrukturen ausgewiesen.

Es wird hier nochmals deutlich, dass im ländlichen Bereich das Wertstoffpotenzial im Restabfall höher liegt als im städtischen und innerstädtischen Bereich. Die größere Wertstoffmenge resultiert dabei ausschließlich aus dem höheren Organikpotenzial im Restabfall. Dagegen lassen sich bei Leichtverpackungen, Gesamt-Verpackungen und Druckerzeugnissen keine relevanten Unterschiede zwischen den Gebietsstrukturen feststellen.

Tab. 4: Stadt-Land-Mengen

Mengenrelevante verwertbare Fraktionen	ländlich	städtisch	innerstädtisch	Landkreis Neustadt/Aisch gesamt
	[kg/(E*a)]			
Küchenabfälle	15,50	13,86	12,28	14,53
Gartenabfälle	2,33	0,63	0,87	1,70
Sonstige Organik	0,28	0,15	0,04	0,21
<b>Summe Organik*</b>	<b>18,11</b>	<b>14,64</b>	<b>13,18</b>	<b>16,43</b>
PPK-Druckerzeugnisse	1,84	1,05	1,90	1,70
Sonstige PPK	0,07	0,05	0,11	0,08
<b>Summe PPK (ohne Verpackung)</b>	<b>1,91</b>	<b>1,10</b>	<b>2,01</b>	<b>1,77</b>
Verpackungen				
davon Papier	1,91	1,70	2,01	1,89
davon Glas	3,66	2,37	2,47	3,16
davon Kunststoffe	4,46	5,33	4,63	4,67
davon Eisen-Metalle	0,84	0,67	0,61	0,76
davon Nicht-Eisen-Metalle	0,43	0,70	0,48	0,49
davon Verbunde	1,33	2,22	2,09	1,66
davon Inertes	0,03	0,07	0,05	0,04
davon Holz	0,00	0,00	0,01	0,00
<b>Summe Leichtverpackungen**</b>	<b>7,06</b>	<b>8,93</b>	<b>7,82</b>	<b>7,59</b>
davon mit Grünem Punkt	4,62	6,68	6,07	5,32
davon ohne Grünen Punkt	2,44	2,25	1,76	2,27
<b>Summe Verpackungen</b>	<b>12,67</b>	<b>13,06</b>	<b>12,36</b>	<b>12,68</b>
davon mit Grünem Punkt	6,76	9,00	8,87	7,63
davon ohne Grünen Punkt	5,91	4,05	3,49	5,05
<b>Summe Wertstoffe</b>	<b>32,69</b>	<b>28,80</b>	<b>27,55</b>	<b>30,88</b>

Zusammenfassend lassen sich die Unterschiede wie folgt charakterisieren:

- Die durchschnittliche Restabfallmenge in den Gebietsstrukturen liegt zwischen 72,0 und 99,3 kg/E\*a, im ländlichen Bereich ist sie am größten.
- Das maximale Gesamtwertstoffpotenzial im Restabfall der Gebietsstrukturen bewegt sich zwischen 31,7 und 39,6 kg/E\*a.
- Der Gehalt an Organik ist im innerstädtischen Bereich geringer als im ländlichen und städtischen Bereich (12,4 – 16,9 kg/E\*a).
- Kaum Unterschiede in den Gebietsstrukturen zeigen sich dagegen bei Verpackungen und sonstigen, grundsätzlich als verwertbar einzustufenden Abfällen.
- Asche aus Ofenheizung verursacht im Winter einen höheren Feinmüllanteil im ländlichen Raum.

### 3.4 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

- Als jahreszeitlich bedingter Unterschied ließ sich eine im Vergleich zum Frühjahr leicht erhöhte Gesamtrestabfallmenge im Winter feststellen, verursacht durch die gestiegene Feinfüllmenge (Asche aus Hausbrand).
- Der mittlere Behälterfüllgrad beträgt 82 bis 87 %, im Winter wurde ein etwas höherer Füllgrad festgestellt. Im Vergleich als durchschnittlich einzustufen.
- Die großen Restmüllbehälter bei innerstädtischen Wohnanlagen sind geringer befüllt als die kleinen Restmüllbehälter bei 1–2 Familienhäusern in ländlichen und städtischen Strukturen.
- Die mittleren Schüttgewichte bewegen sich zwischen 0,107 und 0,138 kg/l und sind somit im vgl. als niedrig einzustufen.
- Der Restabfall aus ländlichen und städtischen Strukturen ist dabei deutlich schwerer als der innerstädtische Abfall. Zudem haben in den großen Behältern auch sperrige Abfälle Platz, was zu der geringeren Dichte führt.
- Das mittlere bereitgestellte Restabfall–Behältervolumen je Einwohner und Woche liegt zwischen 17,2 und 21,4 Liter und ist damit vergleichsweise hoch.
- Das mittlere genutzte Behältervolumen liegt zwischen 14,6 und 18,4 Liter je Einwohner und Woche. Die größte Behälterbereitstellung und –nutzung pro Einwohner wurde im ländlichen Bereich festgestellt, die geringste im städtischen Bereich.
- Durchschnittlich fallen 88,7 kg/E\*a Restabfall an, das entspricht einer Jahresmenge von 8.729 Mg aus Haushalten.
- Das organische Potenzial beträgt 15,8 kg/E\*a, davon 14,2 kg/E\*a Küchenabfälle, 1,4 kg/E\*a Gartenabfälle.
- Darüber hinaus findet sich ein organischer Anteil im Mittelmüll von durchschnittlich 63,4%. Der geringe Gehalt an Gartenabfälle spricht für eine gute Getrennterfassung bzw. auch Eigenkompostierung. Der organische Gehalt im Restabfall ist insgesamt als gering einzustufen, zumal nur ca. 40% der Haushalte an die Biotonne angeschlossen sind.
- Die Verpackungen betragen 12,7 kg/E\*a.
- Sonstige, grundsätzlich als verwertbar einzustufende Abfälle liegen bei 7,9 kg/E\*a.

- ➔ Das maximal verwertbare Potenzial (Organik, Verpackungen, sonstige Wertstoffe) summiert sich auf 36,5 kg/E\*a, das sind rund 41% der Gesamtabfallrestmenge.
- ➔ Einen hohen Anteil an der Restabfallmenge nehmen Hygieneprodukte (überwiegend Babywindeln) mit 10,4 kg/E\*a ein.
- ➔ Die einwohnerspezifische Restabfallmenge ist im Vergleich mit Gebietskörperschaften ähnlicher abfallwirtschaftlicher Struktur in Bayern als leicht unterdurchschnittlich einzustufen.
- (➔ Saisonale Unterschiede in der Restabfallzusammensetzung lassen sich primär beim Feinmüll sowie bei Renovierungsabfällen und Inertstoffen feststellen.)
- ➔ Dagegen finden Renovierungen im Winter weniger statt, ein Rückgang der Renovierungs- und Inertabfälle ist die Folge.

#### 4 Heizwertbestimmung

Die Verhandlungen mit verschiedenen Anlagenbetreibern von Müllheizkraftwerken haben gezeigt, dass es auch Entgeltmodelle in Abhängigkeit vom Heizwert gibt. Somit bildet das Wissen um den Heizwert des Hausmülls und die unterschiedlichen Heizwerte einzelner Fraktionen, sowohl der heizwertreichen Fraktionen und ihrer Anteile wie z.B. Kunststoffe mit über 25.000 kJ/kg wie auch des Feinmülls und Mittelmülls aufgrund seiner hohen mineralischen und organischen Anteilen mit geringen Heizwerten, die Grundlage in den Überlegungen bzgl. eines entsprechenden Vertragsabschlusses.

Daraus formuliert sich ein weiterer Handlungsansatz, in Zukunft in Kombination von Heizwert und Schadstoffgehalt eine bestimmte Stofffraktion aus dem Abfallbeseitigungsweg auszuschleusen und einer Verwertung zuzuführen. Voraussetzung ist natürlich die sortenreine getrennte Erfassung dieser Fraktion, die Mengenrelevanz und das geringe Schadstoffpotenzial.

Eine mögliche geeignete Fraktion wäre die so genannte „Windelfraktion“ (Hygieneprodukte). Diese hat einen Mengenanteil von 10,4 kg/E\*a (= 16,1%), könnte oder wird z. T. schon extra gesammelt und bereitgestellt (Windelsack, Windeltonne), hat einen geringen Heizwert (17.438 kJ i. d. TS) und zählt zu der Analysenstoffgruppe mit den geringsten Schwermetallgehalten.

Mit solchen Maßnahmen ließe sich der Heizwert des anzuliefernden Restabfalls entsprechend des geforderten optimalen Heizwertes, und somit des günstigsten Verbrennungspreises „einstellen“. Das gleiche gilt grundsätzlich natürlich auch für die Ausschleusen von heizwertreichen Fraktionen.

#### 5 Schadstoffpotenziale

Stoffgruppen mit relativ hohen Schadstoffkonzentrationen sind die Fraktionen Holz und Elektronikschrott. Bei Holz spielen die organischen Parameter PCDD/PCDF, PCB und PCPh eine bedeutende Rolle. Dies bedeutet für den Landkreis eine Bestätigung seiner schon frühzeitig eingeführten Holzsammlung im Rahmen der Sperrmüllabfuhr und das Angebot der Abgabe auf den Wertstoffhöfen. Die geringe Menge an Holz im Restmüll (75 Mg/a = 0,8 kg/E\*a) bestätigt das formulierte Ziel der Schadstoffentfrachtung des Hausmülls.

Etwas anders stellt sich die Situation bei der zweiten Stoffgruppe Elektronikschrott dar. Hier wurde bis jetzt nur auf freiwilliger Basis an ausgesuchten Wertstoffhöfen als eine Art Versuch gesammelt. Vergleicht man das ermittelte Potenzial von 57 Mg/a im Restmüll mit der im gleichem Jahr gesammelten Menge von 47 Mg, lässt sich unschwer erkennen, dass hier im Sinne einer Schadstoffentfrachtung, aber natürlich auch im Vorgriff auf die Maßnahmen im Rahmen des Vollzugs der Elektronikschrott-Verordnung noch Handlungsbedarf besteht.

Als Betreiber einer Hausmülldeponie als Beseitigungsanlage noch bis 31.05.2005 besteht natürlich auch ein gewisses Interesse den dort abzulagernden Abfall so gering schadstoffbefrachtet zu halten wie möglich. Deshalb sind hier Maßnahmen zur flächendeckenden Erfassung des Elektronikschrotts in naher Zukunft wünschenswert.

Rückblickend bekommt man als Deponiebetreiber vor Augen geführt, wie sich das tatsächliche Inputpotenzial an anorganischen, organischen Schadstoffen und Schwermetallen in den letzten 25 Jahren zusammengesetzt hat. Die Sickerwasserfrachten geben ja einen Hinweis auf diesen bunten Cocktail an chemischen Stoffen. Eventuell sind vor diesen Hintergrund weitere Anstrengungen zur Fixierung von Schadstoffen im Sinne einer tatsächlichen Schadstoffsenke „Deponiekörper“ zu fordern.

## 6 Schlussbetrachtungen

### 6.1 Ranking

Das Rennen um höchste Recyclingquote in Bayern könnte durch die bayernweite Restabfallsortierkampagne mit der Kenntnis der tatsächlichen Restmülldaten etwas relativiert und in eine andere Richtung gelenkt werden. Tatsächlich ist die Effektivität von Wertstoffsammelsystemen an den noch im Restmüll befindlichen Stoffen bzw. Wertstoffen besser messbar, als an der Höhe der erfassten Wertstoffe, die oft durch Massentstoffe auch aus den Gewerbebetrieben in der Abfallbilanz „geschönt“ werden. Ein Beispiel für einen extrem großen Anteil an einer hohen Recyclingquote ist die immer weiter steigende Menge an Grünabfällen im Landkreis Neustadt a. d. Aisch – Bad Windsheim. Allerdings zeigt gerade dieses Beispiel die Parallelität zu auch geringen Restanteilen in der Hausmüllanalyse.

Tab. 5: Entwicklung der Grünabfälle und ihre Auswirkung auf die Recyclingquote

Jahr	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
<b>EW-Zahlen</b>	<b>89.186</b>	<b>90.591</b>	<b>92.266</b>	<b>92.968</b>	<b>94.453</b>	<b>95.602</b>	<b>96.532</b>	<b>97.226</b>	<b>97.854</b>	<b>98.391</b>	<b>99.003</b>
<b>Hausmüll +</b>											
<b>Geschäftsmüll</b>	<b>12.131</b>	<b>10.648</b>	<b>10.729</b>	<b>9.375</b>	<b>9.361</b>	<b>9.797</b>	<b>10.102</b>	<b>10.347</b>	<b>10.740</b>	<b>10.864</b>	<b>11.300</b>
<b>(kg/Ew)</b>	136,02	117,54	116,28	100,84	99,11	102,48	104,65	106,42	109,76	110,42	114,14
<b>Gesamtrestmüll-</b>											
<b>aufkommen</b>	<b>23.809</b>	<b>21.211</b>	<b>20.288</b>	<b>21.198</b>	<b>18.704</b>	<b>18.307</b>	<b>18.683</b>	<b>17.033</b>	<b>17.419</b>	<b>17.185</b>	<b>17.406</b>
<b>(kg/Ew)</b>	266,96	234,14	219,89	228,01	198,02	191,49	193,54	175,19	178,01	174,66	175,81
<b>Wertstoffe</b>	<b>9.676</b>	<b>12.186</b>	<b>12.309</b>	<b>13.004</b>	<b>13.317</b>	<b>14.692</b>	<b>15.124</b>	<b>16.199</b>	<b>16.530</b>	<b>17.814</b>	<b>17.179</b>
<b>(kg/Ew)</b>	108,49	134,52	133,41	139,88	140,99	153,68	156,67	166,61	168,93	181,05	173,52
<b>Biomüll</b>	<b>250</b>	<b>2.834</b>	<b>3.635</b>	<b>3.754</b>	<b>4.023</b>	<b>4.432</b>	<b>4.756</b>	<b>4.995</b>	<b>5.289</b>	<b>5.717</b>	<b>5.348</b>
<b>(kg/Ew)</b>	2,80	31,28	39,40	40,38	42,59	46,36	49,27	51,38	54,05	58,10	54,02
<b>Grünabfälle</b>	<b>3.317</b>	<b>4.950</b>	<b>5.558</b>	<b>6.215</b>	<b>8.058</b>	<b>8.467</b>	<b>8.464</b>	<b>8.965</b>	<b>9.617</b>	<b>11.658</b>	<b>12.103</b>
<b>(kg/Ew)</b>	37,19	54,64	60,24	66,85	85,31	88,57	87,68	92,21	98,28	118,49	122,25
<b>Gesamtwertstoffe</b>	<b>13.243</b>	<b>19.970</b>	<b>21.558</b>	<b>23.201</b>	<b>27.136</b>	<b>29.459</b>	<b>30.551</b>	<b>32.474</b>	<b>34.102</b>	<b>38.329</b>	<b>37.651</b>
<b>(kg/Ew)</b>	148,49	220,44	233,65	249,56	287,30	308,14	316,49	334,01	348,50	389,56	380,30
<b>% Grünabfälle an Gesamtwertstoffen</b>	25,0	24,8	25,8	26,8	29,7	28,7	27,7	27,6	28,2	30,4	32,1

## 6.2 Schlussfazit

Die Daten aus der Restabfallsortierkampagne zur Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen sind als Grundlage für ein Abfallwirtschaftskonzept hervorragend geeignet. Sie ermöglichen einen kritischen Rückblick auf die in der Vergangenheit initiierten Aktivitäten im Sinne eines Controllings und schaffen die Daten- und Argumentationsgrundlage für zukünftige abfallwirtschaftliche Aktivitäten.

## Literatur

- [1] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz: Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen, 4. Zwischenbericht, August 2002.
- [2] Braungart, M., Soth, J., Sinn, C., Horn, S., Schäfer, T.: **Mittel zum Zweck – Die produktbezogene Restmüllanalyse** liefert Kommunen zuverlässige Plandaten für die gezielte Restmüllverminderung, In: Müllmagazin 2/1996, S. 42 – 45.
- [3] Hoeß, P. & Berthold, E.: Untersuchungen des Restabfalls aus Haushalten im Landkreis Neustadt a. d. Aisch – Bad Windsheim, Endbericht Februar 2002.
- [4] Sendner, P.: Sammlung und Kompostierung organischer Abfälle im Landkreis Neustadt a. d. Aisch – Bad Windsheim, Dipl.–Arbeit, 1990.

## Referenten

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz  
Josef-Vogl-Technikum  
Am Mittleren Moos 46  
86167 Augsburg

Dr.-Ing. Clemens Marb  
Tel.: (0821) 70 00 – 280  
Fax: (0821) 70 00 – 299  
eMail: [clemens.marb@lfu.bayern.de](mailto:clemens.marb@lfu.bayern.de)

Dr. Harald Weigand  
Tel.: (0821) 70 00 – 283  
Fax: (0821) 70 00 – 299  
eMail: [harald.weigand@lfu.bayern.de](mailto:harald.weigand@lfu.bayern.de)

Ines Przybilla  
Tel.: (0821) 70 00 – 286  
Fax: (0821) 70 00 – 299  
eMail: [ines.przybilla@lfu.bayern.de](mailto:ines.przybilla@lfu.bayern.de)

Janet Fripan  
Tel.: (0821) 70 00 – 286  
Fax: (0821) 70 00 – 299  
eMail: [janet.fripan@lfu.bayern.de](mailto:janet.fripan@lfu.bayern.de)

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz  
86179 Augsburg

Dr. Wolfgang Körner  
Tel.: (0821) 90 71 – 52 87  
Fax: (0821) 90 71 – 50 09  
eMail: [wolfgang.koerner@lfu.bayern.de](mailto:wolfgang.koerner@lfu.bayern.de)

Dr. Thorsten Stahl  
Tel.: (0821) 90 71 – 52 86  
Fax: (0821) 90 71 – 50 09  
eMail: [thorsten.stahl@lfu.bayern.de](mailto:thorsten.stahl@lfu.bayern.de)

FABION Naturschutz – Landschaft –  
Entsorgung GbR  
Winterhäuserstr. 93  
97084 Würzburg

Eva Berthold, Petra Hoeß  
Tel.: (0931) 214 01  
Fax: (0931) 28 73 01  
eMail: [umweltbuero@fabion.de](mailto:umweltbuero@fabion.de)

Bayerisches Institut für Angewandte  
Umweltforschung und -technik  
Am Mittleren Moos 46  
86167 Augsburg

Dr. Siegfried Kreibe  
Tel.: (0821) 70 00 – 178  
Fax: (0821) 70 00 – 100  
eMail: [skreibe@bifa.de](mailto:skreibe@bifa.de)

Landratsamt Neustadt a.d. Aisch –  
Bad Windsheim  
Konrad-Adenauer-Str. 1  
91413 Neustadt a.d. Aisch

Jochen Zellner  
Tel.: (09161) 92 – 471  
Fax: (09161) 92 – 464  
eMail: [jochen.zellner@landkreis-nea.de](mailto:jochen.zellner@landkreis-nea.de)