



**Restmüllzusammensetzung, Einflussfaktoren,  
Abhängigkeit von lokalen abfallwirtschaftlichen  
Rahmenbedingungen  
(EFRE-Ziel-2-Gebiete in Bayern)**



**Endbericht zum  
Forschungsvorhaben**

Umwelt**Spezial**



**Restmüllzusammensetzung, Einflussfaktoren,  
Abhängigkeit von lokalen abfallwirtschaftlichen  
Rahmenbedingungen  
(EFRE-Ziel-2-Gebiete in Bayern)**

## Impressum

Restmüllzusammensetzung, Einflussfaktoren, Abhängigkeit von lokalen abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen  
(EFRE-Ziel-2-Gebiete in Bayern)

### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg  
Tel.: (08 21) 90 71-0  
Fax: (08 21) 90 71-55 56  
E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

### Bearbeitung/Text/Konzept:

LfU, Ref. 33, Heinz Riedel

### Redaktion:

LfU, Ref. 33, Heinz Riedel

### Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

### Druck:

Eigendruck der Druckerei Bayerisches Landesamt für Umwelt

Gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier.

### Stand:

November 2008; aktualisiert 2012 (Tab. 12 (Forts.))



Dieses Projekt wird vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit im Rahmen der EU-Strukturförderung aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.



---

Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Druckschrift auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>5</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>9</b>
<b>2 Stand des Wissens</b>	<b>11</b>
2.1 Abfallaufkommen und -zusammensetzung	11
2.2 Untersuchung der Inhaltsstoffe	14
2.3 EFRE-Ziel-2-Gebiet	15
<b>3 Vorgehensweise</b>	<b>17</b>
3.1 Planung und Durchführung der Restmüllsortierungen	17
3.1.1 Stichprobenplanung	17
3.1.2 Sortierung	18
3.1.3 Mobile Abfallsortieranlage	19
3.2 Auswertung und Hochrechnung	20
3.3 Auswahl der Gebietskörperschaften	23
3.4 Analytik	26
3.4.1 Analysestoffgruppen	26
3.4.2 Probenahme und Probenvorbereitung	28
3.4.3 Analysemethoden	29
3.4.4 Auswertung	31
<b>4 Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>33</b>
4.1 Datenbestand	33
4.1.1 Restmüllaufkommen	33
4.1.2 Restmüllzusammensetzung	34
4.1.3 Wertstoffaufkommen in Abhängigkeit des Abfallwirtschaftssystems	40
4.1.4 Behälterspezifische Daten	43
4.2 Physikalisch-chemische Eigenschaften und Inhaltsstoffe	45
4.2.1 Physikalisch-chemische Eigenschaften	45
4.2.1.1 Wassergehalt	45
4.2.1.2 Glühverlust	46
4.2.1.3 Heizwert	47

---

4.2.2	Anorganische Inhaltsstoffe	48
4.2.2.1	Kohlenstoff	48
4.2.2.2	Chlor, Phosphor, Schwefel, Stickstoff	49
4.2.2.3	Alkali- und Erdalkalimetalle	50
4.2.2.4	Schwermetalle	50
4.2.3	Organische Inhaltsstoffe	56
4.2.3.1	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	56
4.2.3.2	Polychlorierte Biphenyle (PCB)	57
4.2.3.3	Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F)	57
<b>5</b>	<b>Untersuchung der Entsorgungswege neben der Restmülltonne</b>	<b>59</b>
5.1	Vorgehensweise	59
5.2	Ergebnisse	59
5.2.1	Holsystem für Papier, Pappe, Kartonagen	59
5.2.2	Holsystem für Leichtverpackungen aus Kunststoff, Metall und Verbundstoff	60
5.2.3	Bringsystem für Behälterglas	60
5.2.4	Bringsystem für Metallverpackungen	60
5.2.5	Illegale Ablagerungen an Depotcontainer-Standorten	61
<b>6</b>	<b>Öffentlichkeitsarbeit</b>	<b>63</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>65</b>

## Zusammenfassung

Der vorliegende Abschlussbericht hat die Restmüllzusammensetzung im EFRE-Ziel-2-Gebiet Bayerns zum Inhalt. Dabei beeinflussen die lokalen abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen das Restmüllaufkommen und die -zusammensetzung in unterschiedlicher Weise. Die Vorgehensweise lehnt sich eng an die Richtlinie für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle im Land Brandenburg an. Damit ist es möglich, die erzielten Ergebnisse auch mit früheren vom Bayerischen Landesamt für Umwelt(schutz) im Auftrag des Bayerischen Umweltministeriums durchgeführten Untersuchungen zu vergleichen.

In dem auf zwei Jahre befristeten Projekt wurde der Restmüll in fünf Gebietskörperschaften (drei Landkreise, zwei kreisfreie Städte) analysiert, die ganz oder teilweise zum EFRE-Ziel-2-Gebiet Bayerns gehören. Da die Siedlungsdichte das über die Restmülltonne zu entsorgende Abfallaufkommen beeinflusst, erfolgte die Beprobung der Restmülltonnen und deren Analyse in jeder Gebietskörperschaft getrennt nach ländlichen / Stadtrand, städtischen und innerstädtischen Strukturen. Saisonale Unterschiede wurden durch die zweimalige Beprobung der repräsentativ ausgewählten Probenahmegebiete – je einmal im Sommer- und Winterhalbjahr – berücksichtigt. Insgesamt wurde der Restmüll von rd. 6.800 Bürgern mit einer Masse von 30 Mg und einem Volumen von 200 m<sup>3</sup> beprobt und analysiert. Der Einsatz einer mobilen Abfallsortieranlage {Klassieranlage zur Abtrennung der Fein- ( $d_p \leq 10$  mm) und Mittelfraktion ( $10 < d_p \leq 40$  mm)} gewährleistete dabei eine einheitliche Vorgehensweise.

Hinsichtlich des Restmüllaufkommens und der -zusammensetzung wurden folgende Ergebnisse erzielt:

- Das spezifische Restmüllaufkommen (ohne Geschäftsmüll) im EFRE-Ziel-2-Gebiet Bayerns beträgt durchschnittlich 116,1 kg/(E-a).
- Knapp zwei Drittel der Restmüllmasse bestehen aus den Sortierfraktionen Organik (25,2 Mass.-%), Hygieneprodukte (13,3 Mass.-%), Fein- (10,8 Mass.-%) und Mittelfraktion (16,3 Mass.-%).
- Der im Restmüll noch vorhandene, teilweise allerdings schwer abschöpfbare Wertstoffanteil umfasst im Mittel 49,1 Mass.-%. Bei der im Projekt angewandten Definition des Begriffs „Wertstoff“ blieb bei den Sortierungen die tatsächliche Verwertbarkeit (z. B. durch Verschmutzungsgrad und hygienische Aspekte eingeschränkt) unberücksichtigt. Die Einstufung als Wertstoff erfolgte auch unabhängig davon, ob in der jeweiligen Gebietskörperschaft hierfür eine getrennte Erfassung erfolgt. In Abhängigkeit vom Wertstoffeffassungs- und Gebührensystem wurden z. T. deutlich geringere Gehalte festgestellt. Insbesondere erwiesen sich das bequemere Holsystem für Wertstoffe wie Bioabfall, Papier, Pappe, Kartonagen und Leichtverpackungen sowie monetäre Anreize durch volumenbezogene Leistungsgebührenanteile als Faktoren zur Reduzierung des Restmüll- und Steigerung des Wertstoffaufkommens. Inwieweit dies bei einer ganzheitlichen Betrachtung sämtlicher Abfallströme aus Haushalten und deren Verwertungs- und Entsorgungswege in jeder Hinsicht nachhaltig ist, war nicht Gegenstand der Untersuchung.
- Das Restmüllaufkommen nimmt mit der Bebauungsdichte zu und liegt in innerstädtischen Gebietsstrukturen ca. 35 Mass.-% über den ländlichen / Stadtrandstrukturen, wobei die Differenzen zwischen den einzelnen Gebietskörperschaften sehr unterschiedlich sind.

Die Ergebnisse der Restmüllanalytik lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Während die physikalisch-chemischen Parameter Wassergehalt, Glühverlust und Heizwert relativ geringe Schwankungen zwischen den Einzelanalysen aufweisen, differieren die Er-

gebnisse der Schadstoffgehalte zum Teil erheblich, obwohl die Untersuchungen an ‚sortenreinen‘ Analysestoffgruppen vorgenommen wurden.

- Der Heizwert des Restmülls beträgt durchschnittlich 8,4 MJ/kg; den höchsten Beitrag liefert die Abfallfraktion Kunststoffverpackungen inkl. Folien. Sowohl eine Erhöhung des Masseanteils hochkalorischer Fraktionen (z. B. Kunststoffe/-verpackungen) als auch eine Reduzierung niederkalorischer Fraktionen (v. a. mineralische Feinfraktion sowie die wasserhaltigen Fraktionen Mittelfraktion, Organik und Hygieneprodukte) würden zu einer Steigerung des Heizwerts von Restmüll beitragen.
- Schwermetalle werden hauptsächlich durch die Fraktionen Feinfraktion, Inertes, Elektronikschrott und Sonstige Verbunde in den Restmüll eingetragen.
- Der Vergleich der Schadstofffrachten macht deutlich, dass seit den 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts eine deutliche Entfrachtung des Restmülls stattgefunden hat.

Die Ergebnisse aus der physikalisch-chemischen Analytik können auf Restmüll aus Haushalten anderer Gebietskörperschaften näherungsweise übertragen werden. Voraussetzung ist die Kenntnis der stofflichen Zusammensetzung (Sortierfraktionen) sowie des Wassergehalts.

Die Untersuchung der Entsorgungswege neben der Restmülltonne erbrachte folgende Ergebnisse:

- In der untersuchten Gebietskörperschaft (kreisfreie Stadt: Regelabfuhr, keine separate Bioabfallerfassung) ist – Grüngutabfälle werden im Bringsystem, Bioabfälle mit dem Restmüll erfasst – bedingt durch die hohen Organikanteile im Restmüll ein relativ hohes Restmüllaufkommen mit einem hohen Wertstoffanteil zu verzeichnen.

Bei den im Holsystem erfassten Abfällen zeigt sich, dass bei

- Papier, Pappe, Kartonagen die Qualität der erfassten Wertstoffe bei einem Störstoffanteil von nur 2 Mass.-% sehr hoch ist.
- Leichtverpackungen der Störstoffanteil (knapp ein Viertel) unter den untersuchten Wertstoff-erfassungssystemen am höchsten liegt. Für eine Steigerung des Wertstoffanteils bei den im Holsystem erfassten Leichtverpackungen auf Werte der ebenfalls getrennt erfassten PPK oder Glas (> 95 Mass.-%) bedarf es vielfältiger Maßnahmen. Neben einer gezielten Abfallberatung ist v. a. ein konsequentes Handeln des Bürgers beim Umsetzen der Vorgaben bzw. Vorschriften für das Trennen der im Haushalt anfallenden, meist nicht „sortenreinen“ Abfälle notwendig. D. h., der Bürger muss in dem von ihm geforderten Handeln bei einer (globalisierten) Abfallwirtschaft den Vorteil für die Umwelt und die Sinnhaftigkeit gegenüber einer thermischen Behandlung klar erkennen.

Für die im Bringsystem mit Depotcontainern erfassten Abfälle fällt auf, dass bei

- Glas der Containerinhalt zu über 99 Vol.-% aus Altglas besteht und der Anteil an systemfremden Abfällen mit 0,6 Vol.-% sehr gering ist.
- Metall der Masseanteil an systemfremden Abfällen (inkl. Metall-Nichtverpackungen) bei einem Viertel liegt; der Anteil an Störstoffen (ohne Metall-Nichtverpackungen) beträgt ein Fünftel.

Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gebietskörperschaften mit ähnlich konzipierten Abfallwirtschaftssystemen hängt sowohl von den lokalen (z. B. Gebietsstrukturklasse, Siedlungsstruktur) als auch von abfallwirtschaftlichen Gegebenheiten (Entsorgungsgebühren, Behältergrößen, Leerungs-

intervalle, Abfallberatung usw.) ab; diese Einflussfaktoren gilt es dabei im Einzelnen zu überprüfen.

Mit dem Forschungsvorhaben konnten aktuelle Daten sowohl zum Restmüllaufkommen und zur -zusammensetzung als auch zur stofflichen Zusammensetzung und dem Schadstoffpotenzial des Restmülls im EFRE-Ziel-2-Gebiet Bayerns gewonnen werden. Damit konnten den untersuchten Gebietskörperschaften wichtige Daten an die Hand gegeben werden, um ihre abfallwirtschaftlichen Konzepte weiter zu optimieren.



# 1 Einleitung

In den vergangenen 15 Jahren ist es in Bayern durch integrierte Abfallwirtschaftskonzepte und gesetzliche Vorgaben sowie das Engagement der Bürger gelungen, das spezifische Abfallaufkommen vom Wirtschaftswachstum zu entkoppeln und auf einen Wert von rd. 500 kg/(E·a) [1] zu stabilisieren. Daran machen die vom Bürger getrennt gesammelten Wertstoffe einen Anteil von über 70 Mass.-% aus. Um als Fachbehörde die abfallwirtschaftliche Entwicklung in den unterschiedlich geprägten Landesteilen erfolgreich zu begleiten, ist es notwendig, die aktuelle Situation auch in den Fördergebieten des EU EFRE-Ziel-2-Programms Bayern im Einzelnen zu kennen. Aus dieser Kenntnis lassen sich Fachkonzepte für die Zukunft zur Optimierung des betrachteten Abfallwirtschaftsraumes ableiten.

Gerade die Ermittlung der Restmüllzusammensetzung und der im Restmüll vorhandenen Wertstoffe in Abhängigkeit von den lokalen Abfallwirtschaftssystemen ermöglicht eine Einschätzung der Effizienz abfallwirtschaftlicher Maßnahmen. Die Änderungen gesetzlicher Vorgaben (z. B. neue Zielvorgaben für die Verwertung von Verpackungsabfällen [2], ElektroG [3]), des Konsumverhaltens der Bürger und der vor Ort etablierten Abfallwirtschaftskonzepte wirken sich direkt und indirekt auf das Abfall- bzw. Restmüllaufkommen aus.

Bei dem zweijährigen Vorhaben „Restmüllzusammensetzung, Einflussfaktoren, Abhängigkeiten von lokalen abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen (EFRE-Ziel-2-Gebiete in Bayern)“ wurde in fünf Gebietskörperschaften anhand von für die Gebiete repräsentativen Sortieranalysen die Restmüllzusammensetzung ermittelt. Der Auswahl lagen v. a. abfallwirtschaftliche Gesichtspunkte wie Abfallaufkommen, Bring- / Holsysteme für Wertstoffe, Abfallgebühren etc. zugrunde.

In einer Gebietskörperschaft wurde die Untersuchung durch eine Analyse der vom Bürger im Hol- und Bringsystem getrennt gesammelten Abfälle ergänzt. Diese Zusatzuntersuchung hatte das Ziel,

- (i) erste Erfahrungen zu sammeln und
- (ii) einer ganzheitlichen Betrachtung hinsichtlich der Abfallströme aus Haushaltungen näher zu kommen.

Die dem Vorhaben zugrunde liegende einheitliche Methodik und Auswertung der Abfallsortierkampagnen liefern statistisch gesicherte Ergebnisse über Restmüllaufkommen und -zusammensetzung. Gleichzeitig ermöglichen sie einen Vergleich zwischen den verschiedenen abfallwirtschaftlichen Systemen der untersuchten Gebietskörperschaften.



## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Abfallaufkommen und -zusammensetzung

#### Vorhandene Datenbasis

Das Bayerische Abfallwirtschaftsgesetz [4] verpflichtet die entsorgungspflichtigen Körperschaften jeweils zum Ende des I. Quartals über das vergangene Kalenderjahr eine Bilanz über Art, Herkunft und Menge der angefallenen Abfälle sowie deren Verwertung und sonstige Entsorgung zu erstellen. Diese Daten werden vom Bayerischen Landesamt für Umwelt vergleichend ausgewertet und in der Bayerischen Abfallbilanz [1] veröffentlicht. In dieser „overall“ Massenbilanz – sie stellt keine Bilanz im thermodynamischen Sinn dar – ist das Restmüllaufkommen aus privaten Haushalten sowie dessen Zusammensetzung summarisch in der Abfallmasse (Haus- und Geschäftsmüll) enthalten. Aufgrund der gesetzlichen Vorgaben werden vertiefte Daten über den Restmüll nicht erhoben.

Statistisch gesicherte Daten über die Restmüllzusammensetzung und das -aufkommen aus privaten Haushalten in Bayern beinhaltet die überregional und systematisch durchgeführte Bundesweite Hausmüllanalyse [5] für die Jahre 1983 bis 1985. Durch die Einführung integrierter Abfallwirtschaftskonzepte und das Schließen von Stoffkreisläufen hat sich das Verhalten des Abfallerzeugers erheblich verändert. Dies untermauern folgende Zahlen: Nach der Bayerischen Abfallbilanz betrug das spezifische Restabfallaufkommen (Haus- und Geschäftsmüll) im Jahr 1988 274,1 kg/(E·a) [6] und im Jahr 2006 148,8 kg/(E·a) [1]; d. h., die spezifische Restmüllmasse hat sich in einem Zeitraum von 18 Jahren zum Stichtag um 125 kg/(E·a) bzw. 46 Mass.-% verringert.

Für die erfolgreiche Anpassung von Abfallwirtschaftskonzepten an die jeweiligen Gegebenheiten sind für die einzelnen Gebietskörperschaften aktuelle Daten über die Zusammensetzung und das Aufkommen anfallender Abfälle unerlässlich. Die fehlenden Informationen gewinnen die Gebietskörperschaften u. a. aus Sortieranalysen. In der Regel werden die Sortierungen unter speziellen Gesichtspunkten geplant und durchgeführt; z. B. bei Umstellung des Entsorgungs- und / oder Sammelsystems, Einführung einer Bio-, Papier- und / oder Gelben Tonne / Gelben Sacks oder um das Trennverhalten der Bürger genauer kennen zu lernen. Aufgrund unterschiedlicher methodischer Ansätze sind die zahlreichen Sortierungen der einzelnen Gebietskörperschaften nur bedingt vergleichbar; detailliertere Rückschlüsse auf die strukturellen Ursachen der Restmüllzusammensetzung [7] sind kaum möglich.

#### Eigene Aktivitäten

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse von zwei Restmülluntersuchungen [8, 9] gegenübergestellt. Bei den Untersuchungen in den Jahren 1998 bis 2003 wurde in für ganz Bayern repräsentativen Gebietskörperschaften ein Restmüllvolumen von 800 m<sup>3</sup> (entsprechend 113 Mg) analysiert [8], das von rund 29.000 Bürgern stammte. In den Jahren 2006 und 2007 wurde in für das Phasing-Out-Gebiet Bayerns repräsentativen Gebietskörperschaften die Restmüllzusammensetzung ermittelt [9]. Das Probenkollektiv stammte von ca. 10.100 Bürger, die ein Abfallvolumen von 242 m<sup>3</sup> (entsprechend 40,2 Mg) erzeugten.

Diese Daten belegen, dass sich – ungeachtet der Zeitachse – die prozentuale Abfallzusammensetzung bez. der Hauptmassebildner im Unterschied zum Abfallaufkommen ( $\Delta$  –12,6 Mass.-%) im Großen und Ganzen wenig ändert. Der Unterschied bei der Obergruppe Organik rührt im Wesentlichen daher, inwieweit die beprobten Gebietskörperschaften eine Biotonne eingeführt haben.

Tab. 1: Ergebnisse von zwei Restmülluntersuchungen in Bayern [8, 9]

	Gesamtbayern [8]	Phasing-Out-Gebiet Bayerns [9]
Untersuchungszeitraum	1998 – 2003	2006 / 2007
Spezifisches Restmüllaufkommen	112,5 kg/(E a)	98,3 kg/(E a)
Hauptmassebildner		
Organik	23 Mass.-%	26 Mass.-%
Hygieneprodukte	15 Mass.-%	16 Mass.-%
Feinfraktion	11 Mass.-%	11 Mass.-%
Mittelfraktion	14 Mass.-%	15 Mass.-%
Max. Wertstoffpotenzial im Restmüll <sup>*)</sup>	55 kg/(E a)	46 kg/(E a)
Restmüllaufkommen in	innerstädtische G. >> ländliche Gebietsstrukturen	
Delta	30 Mass.-%	15 Mass.-%

<sup>\*)</sup> Summe der Fraktionen Organik, PPK, Verpackungen, sonstige Wertstoffe (Kunststoffe, Metalle, Textilien, ...); ohne Berücksichtigung der tatsächlichen Verwertbarkeit

Die abfallwirtschaftlichen Systeme der Gebietskörperschaften sind einem ständigen Wandel unterzogen (z. B. Einführung von verursachergerechten Gebührensystemen, Änderung der Hol- und Bringsysteme von Wertstoffen), wodurch ein Fortschreiben der vorhandenen Datenbasis zur Ermittlung eines zeitlichen Verlaufs und der aktuellen Gegebenheiten fachlich notwendig ist.

Daten über das Restabfallaufkommen und die -zusammensetzung im EFRE-Ziel-2-Gebiet [10] Bayerns liegen bisher nicht vor.

### Methodik von Hausmüllanalysen

Das Restmüllaufkommen und die -zusammensetzung werden u. a. durch folgende Bedingungen beeinflusst [11, S. 27; 12]:

- Fläche und Einwohnerzahl der Gebietskörperschaft
- örtliche und regionale Unterschiede in Wirtschaftskraft, Sozial- und Gebietsstruktur
- Jahreszeit, Heizungssystem
- Art der Wertstoffeffassung (Hol- und / oder Bringsystem)
- Standortdichte von Wertstoffinseln und -höfen
- Behältergröße, Frequenz und Organisation der Abfuhr
- Bemessung und Höhe der Gebühren
- Öffentlichkeitsarbeit der Entsorgungsträger

Das unterschiedliche Zusammenwirken o. g. Faktoren bestimmt das Restmüllaufkommen und dessen Zusammensetzung; dadurch wird die Bewertung, inwieweit einzelne Faktoren Einfluss nehmen, erschwert.

Bei der Durchführung von Abfallsortieranalysen ergeben sich hinsichtlich Behältergröße und Gebietsstruktur die signifikantesten Unterschiede [13]. Für die Stichprobenplanung von Abfallsortieranalysen werden sie daher als Schichtungskriterium herangezogen.

In Abhängigkeit der Definition der zu untersuchenden Gebietsstrukturen spielen siedlungsspezifische und sozioökonomische Größen wie Anonymität und soziale Kontrolle, Fluktuationsrate, Gebührenerhebung, Konsumverhalten, Möglichkeit der Eigenkompostierung und Sprachprobleme für die Restmüllzusammensetzung ebenso eine wesentliche Rolle [14]. Um Aussagen über die Restmüllmasse und -zusammensetzung für ein bestimmtes Gebiet, in vorliegendem Fall das EFRE-Ziel-2-Gebiet Bayerns, treffen zu können, müssen die untersuchten Gebietskörperschaften bei wichtigen Kriterien wie der Besiedlungsdichte, der Art der Wertstofffassung und des Gebührensystems das gesamte EFRE-Ziel-2-Gebiet repräsentieren.

Aufgrund der o. g. Einflussgrößen ist ein einheitliches Vorgehen bei der Durchführung von Sortieranalysen unabdingbar, um daraus allgemein gültige Aussagen über Restmüllaufkommen und -zusammensetzung sowie deren Ursachen treffen zu können.

Bis dato existiert auf bundesweiter Ebene keine einheitliche Richtlinie über die Vorgehensweise bei Abfallsortieranalysen, vgl. Übersicht in Tabelle 2 über bestehende Abfallsortierrichtlinien und Merkblätter. Der Vorschlag, Regelungen zur Durchführung von Analysen im Anhang A II der Technischen Anleitung Siedlungsabfall [15] aufzunehmen, wurde auf Länderebene abgelehnt.

Tab. 2: Übersicht über bestehende Abfallsortierrichtlinien.

Merkblätter des Verbandes Kommunaler Fuhrparks- und Stadtreinigungsbetriebe (VKF/VKS), M 1 – 4 (1964) [16]

- 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 Grobfraktion und Siebrest. Auslese von Eisen- und NE-Metallen aus der Fein- und Mittelfraktion
- Zerkleinerung mittels Hammermühle auf unter 8 mm, daraus weitere Analyse auf Wassergehalt, Glühverlust

Vorgehensweise bei der Bundesweiten Hausmüllanalyse 1983 – 1985 [5]

- 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) [17]

- Stichprobenumfang 1 Mass.-% der Grundgesamtheit
- Berücksichtigung jahreszeitlicher 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) [18]

- 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
  - Berücksichtigung von jahreszeitlichen Schwankungen durch vier Wiederholungsuntersuchungen
- 

Bereits im Jahr 1964 gab der Verband Kommunaler Fuhrparks- und Stadtreinigungsbetriebe (heute: Verband Kommunale Abfallwirtschaft und Stadtreinigung e.V.) Merkblätter über die Vorgehensweise bei der Durchführung von Abfallsortierungen heraus [16]. Weitere Ausführungen zur Durchführung von Abfallsortierungen finden sich in der Bundesweiten Hausmüllanalyse [5] und in einem 1993 vom Freistaat Thüringen herausgegebenen Merkblatt [17]. Schließlich veröffentlichte 1998 nach intensiver Auswertung von Abfallsortieranalysen das Land Brandenburg eine Richtlinie [18], die vom Umweltbundesamt (UBA) empfohlen wird. Mit der in Brandenburg existierenden Richtlinie vergleichbar sind die Richtlinie des Freistaates Sachsen [19] und die Empfehlungen des Landes Nordrhein-Westfalen [20].

## 2.2 Untersuchung der Inhaltsstoffe

Mit einer veränderten Abfallzusammensetzung gehen auch Veränderungen der physikalisch-chemischen Eigenschaften und des Schadstoffgehalts von Restmüll einher. Insbesondere gesetzliche Verpflichtungen (z. B. Produktverantwortung laut Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [21], Batterieverordnung [22], Chemikalien-Verbotsverordnung [23]) haben zum Ziel, eine langfristige Schadstoffentfrachtung des Restmülls zu erreichen. Andererseits bewirkt die fortlaufende Getrennthaltung von beispielsweise Verpackungsabfällen gemäß Verpackungsverordnung [2] masseanteilig eine Erhöhung langlebiger und damit häufig schadstoffhaltigerer Bestandteile im Restmüll. Ebenso uneinheitlich ist die Veränderung von physikalisch-chemischen Parametern wie z. B. dem Heizwert: der Entzug von heizwertreichen Fraktionen (z. B. Leichtstoffverpackungen) durch Wertstoffsammelsysteme vermindert auch den Gesamtheizwert des Restmülls [24, 25].

Untersuchungen zu Schadstoffgehalten und Inhaltsstoffen von Restabfällen werden i. d. R. nur sehr vereinzelt durchgeführt. Aktuelle Veröffentlichungen sind – von Ausnahmen abgesehen [26–29] – zum Großteil Literaturdatenvergleiche [30, 31, 32]. Hauptaugenmerk liegt dabei auf den Schwermetallen, da diese mit relativ einfachen Verfahren (z. B. Röntgenfluoreszenzanalyse; Königswasseraufschluss und Atomabsorptionsspektrometrie) auch in verhältnismäßig geringen Konzentrationen bestimmt und zudem für alle Umweltmedien in Form von Richt- und Grenzwerten beurteilt werden können – vgl. z. B. [15, 33]. Der Gehalt organischer Schadkomponenten wird dagegen routinemäßig seltener bestimmt, da die Probenaufbereitung weitaus aufwändiger ist und die zu bestimmenden Gehalte im Ultraspurenbereich liegen. Zudem sind aufgrund der Vielzahl organischer Verbindungen eine Auswahl und Vergleichbarkeit nur bei spezifischen Fragestellungen möglich. Die Auswahl der Stoffgruppen und die jeweils untersuchte Probenanzahl schränken oftmals die Vergleichbarkeit und die Signifikanz der Literaturwerte ein.

Aufgrund der Heterogenität auch von sortierten Haus- oder Restmüllfraktionen und fehlenden allgemein gültigen Definitionen von Stoffgruppen ist es schwierig, die Vorgehensweise in allgemein gültige Vorschriften zu fassen und so die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicher zu stellen. Entsprechend der TA Siedlungsabfall [15] ist für die Untersuchung von Abfällen nach der „Richtlinie zur Entnahme und

Vorbereitung von Proben aus festen, schlammigen und flüssigen Abfällen“ (PN 2/78 K [34]) vorzugehen.

In dieser Richtlinie werden Vorgehensweisen für produktionsspezifische Abfälle, Komposte, Rückstände aus der Müllverbrennung, Altlasten, Klärschlämme u. a. getroffen. Für Hausmüll wird lediglich darauf hingewiesen, dass die Probenahme nur von sortierten Abfällen erfolgen sollte; es werden jedoch weder die Art und Weise der Sortieranalysen noch weitere Beprobungsverfahren empfohlen. Die beschriebenen Vorgehensweisen sind für die Anwendung auf sortierten Haus- / Restmüll nicht immer praktikabel.

Im Jahr 2002 wurde die PN 2/78 K von der LAGA PN 98 „Grundregeln für die Entnahme von Proben aus festen und stichfesten Abfällen sowie abgelagerten Materialien“ [35] abgelöst. Aus Gründen der Praktikabilität bei der Probenahme wird dort an Stelle der Masse das Volumen zur Festlegung des Probenahmeumfangs herangezogen (vgl. Tab. 3). Wie bei der Durchführung von Sortieranalysen sind bei der Bestimmung von physikalisch-chemischen Parametern entsprechend der Fragestellung grundsätzlich diverse Aufschluss- und Analysemethoden möglich (z. B. Betrachtung des Elutionsverhaltens oder des Absolutgehalts eines Parameters). Daneben können zur eigentlichen Bestimmung unterschiedliche Analysemethoden (z. B. für anorganische Schadstoffe: Königswasseraufschluss mit anschließender Atomabsorptionsspektrometrie oder Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma, Röntgenfluoreszenzanalytik aus der Feststoffprobe) Anwendung finden, was bei einem Ergebnisvergleich zu berücksichtigen ist [36].

Tab. 3: Übersicht über Vorgehensweisen bei der Probenahme von heterogenen Abfällen.

Vorschrift	Anzahl	Mindestumfang
TASi [15]	1 Probe je angefangene 5 Mg bzw. 5 m <sup>3</sup>	1.000 g bzw. 1.000 ml
PN 2/78 K [34]	5 Proben je 50 Mg	Bei Einzelproben: näherungsweise $G \text{ [kg]} = 0,06 \text{ [kg/mm]} \cdot d_p \text{ [mm]}$ mit $d_p \leq 30 \text{ mm}$ : 1,8 kg mit $d_p \leq 120 \text{ mm}$ : 7,2 kg bei Sammelproben: mit $d_p \leq 30 \text{ mm}$ : 10 – 30 kg mit $d_p \leq 120 \text{ mm}$ : 50 – 200 kg
PN 98 [35]	bis 30 m <sup>3</sup> : 8 Einzelproben, daraus 2 Misch- / Laborproben	mit $d_p < 50 \text{ mm}$ : 2 l je Einzelprobe, 4 l je Laborprobe mit $d_p < 120 \text{ mm}$ : 5 l je Einzelprobe, 10 l je Laborprobe

### 2.3 EFRE-Ziel-2-Gebiet

Bei der Förderung des EFRE-Ziel-2-Gebiets Bayerns handelt es sich um ein EU-Programm, das die ehemalige Ziel-5b-Förderung zur Entwicklung des ländlichen Raumes 1994–1999 fortsetzt. Die Fördermittel stammen aus dem Europäischen Fond für Regionale Entwicklung (EFRE). Die Schwerpunkte des EFRE-Ziel-2-Programms sind [10]:

- Ergänzung von Infrastrukturen
- Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Unternehmen
- Entwicklungsmaßnahmen im Bereich Forschung, Technologie, Information und Kompetenzentwicklung

- Maßnahme 3.2 Bodenschutz, Altlasten und Abfallwirtschaft beinhaltet unter anderem die Vervollständigung der für die wirtschaftliche Aktivität notwendigen Infrastruktur durch leistungsfähige und kostengünstige Abfallentsorgungssysteme
- Förderung des Tourismus
- Schaffung lebenswerter Stadtstrukturen und leistungsfähiger ländlicher Räume.

Dem EFRE-Ziel-2-Gebiet Bayerns sind neun Landkreise und vier kreisfreie Städte aus fünf Regierungsbezirken (Mittel-, Ober-, Unterfranken, Niederbayern und Oberpfalz) ganz oder teilweise zugeordnet (siehe Fördergebietskarte [10, S. 10]).

### 3 Vorgehensweise

Die Durchführung der Abfallsortieranaysen beruht auf der „Richtlinie für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle im Land Brandenburg“ [18]. Abweichend von dieser Richtlinie wurden zur Erfassung jahreszeitlich bedingter Schwankungen pro untersuchter Gebietskörperschaft zwei fünftägige Restmüllsortierkampagnen anstatt der empfohlenen vier durchgeführt.

Die Sortierkampagnen während der warmen Jahreszeit mit erhöhtem Gartenabfallaufkommen fanden in den Monaten Mai bis Oktober statt, während die der kalten Jahreszeit (Heizperiode) in den Monaten November bis April durchgeführt wurden. Ferienzeiten und Feiertage wurden bei der Planung ausgespart, um repräsentative Ergebnisse zu bekommen.

Die Durchführung der Sortieranaysen wurde entsprechend der Vergaberichtlinien öffentlich ausgeschrieben; den Zuschlag erhielten mittelständische Unternehmen, die in diesem Marktsegment seit langem tätig sind. Durch die Begleitung der Sortieranaysen vor Ort durch eine LfU-Mitarbeiterin wurde eine einheitliche Vorgehensweise sichergestellt.

#### 3.1 Planung und Durchführung der Restmüllsortierungen

##### 3.1.1 Stichprobenplanung

Die Untersuchung des Restmülls aus Haushalten erfolgte anhand repräsentativer Stichproben. Der Stichprobenumfang der fünftägigen Sortierkampagnen umfasste nach [18] mindestens 20 Stichproben; dabei entsprach eine Stichprobeneinheit (SPE) jeweils dem Inhalt eines 1.100 l-Containers.

Wegen der inhomogenen Zusammensetzung des Restmülls wurde eine Schichtung vorgenommen, damit sich der Einfluss der Merkmale, wie beispielsweise die Gebietsstruktur, die Behältergröße und das Wertstofffassungssystem, in homogener zusammengesetzten SPE widerspiegelt.

Das wichtigste Schichtungsmerkmal ist die Gebietsstruktur. Die festgelegten Gebietsstrukturen „ländlich/Stadtrand“, „städtisch“, „innerstädtisch“ (siehe Tab. 4) wurden zur statistischen Absicherung der Werte mit mind. sechs SPE beprobt.

Tab. 4: Definitionskriterien der Gebietsstrukturen.

Schichtung	ländlich / Stadtrand (l / sr)	städtisch (s)	innerstädtisch (is)
	reine Wohngebiete	im Wesentlichen reine Wohngebiete	innerstädtische Wohnbebauung
Beschreibung	nur Einfamilienhäuser	Mehrfamilienhäuser	i. d. R. mind. 7 Wohneinheiten
	i. d. R. Neubausiedlungen	auch mit privaten Ziergärten	keine Nutzgärten
	private Nutzgärten		wenig/keine Ziergärten bzw. Abstandsgrün

Neben den Gebietsstrukturen wurden für die spätere Datenauswertung die unterschiedlichen Restmüllbehältergrößen, die Füllgrade und die Adressen der beprobten Haushalte (wie viele Einwohner sind an die beprobte Restmülltonne angeschlossen) protokolliert. Des Weiteren wurde darauf geachtet keinen Geschäftsmüll zu beproben.

### 3.1.2 Sortierung

Jede gesammelte Stichprobeneinheit wurde separat mit Hilfe der Mobilen Abfallsortieranlage (siehe Abschnitt 3.1.3) mechanisch klassiert. Entsprechend der Vorgaben der Brandenburg-Richtlinie [18] erfolgte die Abtrennung der Feinfraktion bei einem Siebschnitt von 10 mm ( $d_p \leq 10$  mm) und der Mittelfraktion bei 40 mm ( $10 < d_p \leq 40$  mm).

Der Siebüberlauf stellt die Grobfraktion ( $d_p > 40$  mm) dar, die händisch in 47 Sortierfraktionen separiert wurde. Entsprechend Tabelle 5 wurden die Sortierfraktionen zu 12 Obergruppen zusammengefasst. Die Fein- und Mittelfraktion gelten dabei als jeweils eigene Sortier- bzw. Obergruppe. Eine Besonderheit des Sortierkataloges ist die Unterteilung der Verpackungsabfälle in Abfälle mit und ohne Grünem Punkt. In praxi ist diese Unterscheidung beispielsweise durch zerkleinert vorliegende oder verschmutzte Verpackungen nicht immer eindeutig, wodurch es zu einer gewissen Über- bzw. Unterschätzung der durch duale Systeme zu erfassenden Wertstoffe kommen kann.

Neben der Sortierung der Grobfraktion wurde pro SPE eine Stichprobe (ca. 10 l) der Mittelfraktion händisch nach den Obergruppen des Sortierkataloges sortiert.

Tab. 5: Stoffgruppenkatalog mit Obergruppen und Beispielen.

Obergruppe	Stoffgruppe	Beispiele Sortiergruppe
Feinfraktion	Feinfraktion	$\leq 10$ mm
Mittelfraktion	Mittelfraktion	10 – 40 mm
Organik	Küchenabfälle	Essensreste, Obst- und Gemüseabfälle / -schalen, volle Verpackungen mit Lebensmitteln
	Gartenabfälle	Gras, Strauch- / Astschnitt, Pflanzen, Schnittblumen
	Tierkadaver	Kadaver ab Mausgröße
	Sonstige organische Stoffe	Hanfseile, Federn, Haare
Hygiene- produkte	Windeln	Windeln, Binden
	Hygienepapiere	Papiertaschentücher, Küchentücher, Papierservietten
PPK	PPK-Verpackungen	Papp-Joghurtbecher, Wachskarton, bedruckte Papiertüten, Tragetaschen aus Papier, Pappschachteln, Kartonagen
	PPK-Verpackungen (DSD)	Zeitungen, Zeitschriften, Bücher, Prospekte, Schreibpapier
	PPK-Druckerzeugnisse	Pappordner, Geschenkpapier, Papiermöbel, Backpapier
	Sonstige PPK	
Kunststoffe	Kunststoffverpackungen	Joghurt-, Margarinebecher, Reinigerflaschen, Körperpflegemittel,
	Kunststoffverpackungen (DSD)	PET-Flaschen (Mehrweg)
	Kunststofffolien	Kunststoff-Tüten, Kunststoff-Tragetaschen, Einschweißfolien
	Kunststofffolien (DSD)	> DIN A4
	Sonstige Folien	Müll-, Gefrierbeutel, Abdeckfolien, Landwirtschaftsfolien
	Styropor	Styropor-Formteile, geschäumte Verpackungen
Glas	Sonstige Kunststoffartikel	Plastikspielzeug, Tischdecken, CD- und Kassetten-Hüllen, Haushaltseimer, Blumentöpfe, Klarsichthüllen
	Behälterglas	Einweg-Flaschen, Konservengläser, Glasbruch, Mehrweg-
	Behälterglas (DSD)	Flaschen, Parfümflaschen
Metalle	Sonstiges Glas	Fensterglas, Spiegelglas, Trinkgläser
	Fe-Metallverpackungen	Konserven-, Getränkedosen, leere Farbdosen / -eimer, leere
	Fe-Metallverpackungen (DSD)	Spraydosen, Schraubdeckel, Kronkorken
	NE-Metallverpackungen	Konserven-, Getränkedosen, leere Spraydosen, Alu-Folie, Alu-
	NE-Metallverpackungen (DSD)	Deckel
Inertes	Sonstige Metallteile	Nägel, Werkzeuge, Drähte, Bleche
	Inertes außer Glas	Steine, Porzellan, Keramik, Eternit, Gips und Gipsplatten
Textilien	Inertes Verpackungen	Steingutflaschen u. ä.
	Bekleidungstextilien	Kleidung jeglicher Art
	Sonstige Textilien	Gardinen, Tischdecken, Teppiche, Stoffreste
	Schuhe	Schuhe jeglicher Art außer Gummistiefel

Tab. 5 (Forts.): Stoffgruppenkatalog mit Obergruppen und Beispielen

Obergruppe	Stoffgruppe	Beispiele Sortiergruppe
Verbunde	Verbundverpackungen Verbundverpackungen (DSD) Elektronikschrott Renovierungsabfälle Fahrzeugteile Staubsaugerbeutel Sonstige Verbunde	Getränkekartons, Tetra Pak, Vakuumverpackungen, Blister, Zigarettschachteln, Verbund-Einwickelpapiere / -folien Kabel, Elektrogeräte, Platinen, Computerteile etc. nur: Teppichboden, gebrauchte Tapeten, Dachpappe Felgen, Zündkerzen, Scheibenwischer  Gegenstände aus verschiedenen Materialien wie Kassetten, CDs, Glühbirnen, volle Verpackungen (außer Lebensmittel/ Problemabfälle)
Holz	Holzverpackungen Holzverpackungen (DSD) Sonstiges Holz	Holzboxen-Bruchstücke, Obstboxen, Zigarrenboxen  Bretter, Spanplatten, lackiertes und funiertes Holz
Sonstige Abfallarten	Gummi Kork Leder Sonstige Stoffe	Gummihandschuhe, Gummistiefel, Gummimatten Flaschenkorken, Bodenbelag etc. Lederreste, Ledertaschen und -gürtel Kerzen, eingetrocknete Farben/Lacke, Dispersionsfarben flüssig
Problemabfall	Sonderabfall außer Batterien/ Medikamente	Chemikalien, nicht eingetrocknete Farben u. Lacke, Lösemittel, Behälter mit Öl- oder Chemikalienresten, Leuchtstoffröhren, Energiesparlampen
	Batterien Medikamente	Haushaltsbatterien, Akkus, Autobatterien Tabletten / Tropfen ohne Schachteln etc.

### 3.1.3 Mobile Abfallsortieranlage

Durch den Einsatz der mobilen Sieb- und Sortieranlage des BayLfU wird eine gleich bleibende Methodik erzielt.

Die Anlage besteht aus einem zweistufigen Siebaggregat mit den dazugehörigen Aufgabe- und Aus-tragseinheiten (Abb. 1).

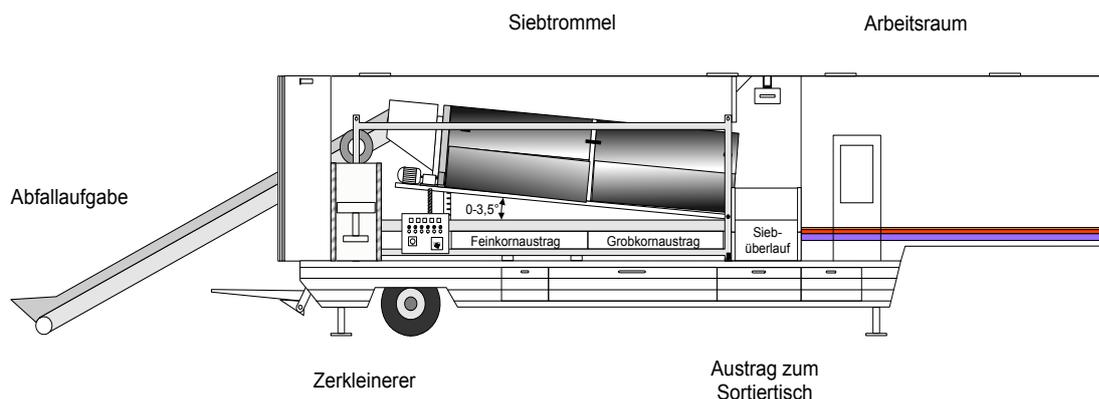


Abb. 1: Mobile Abfallsortieranlage, schematische Darstellung.

Für die mechanische Klassierung wird der Restmüll über das Aufgabeförderband der Siebtrommel, dem Kernstück der Anlage, zugeführt. In zwei Siebabschnitten werden die Fein- und Mittelfraktion abgetrennt und über Trichter und seitlich auslaufende Transportbänder in 240 l-Tonnen ausgetragen. Für die anschließende händische Sortierung gelangt der Siebüberlauf über einen Trichter und ein seitlich auslaufendes Transportband auf den Sortiertisch. Die Durchsatzleistung der Anlage beträgt bei den für die Sortierung festgelegten Geräteeinstellungen (Neigung und Umdrehungsgeschwindigkeit

der Siebtrommel, Geschwindigkeit der Förderbänder) ca. 150 kg/h.

Ein weiterer Bestandteil der Sortieranlage ist ein Zweiwellenzerkleinerer (Abb. 1), der für die Vorzerkleinerung von Proben für die physikalisch-chemische Analytik benötigt wird. Im Arbeitsraum der Anlage befindet sich eine Werkbank, die für kleinere Reparaturarbeiten und als Arbeitsplatte zur Probenvorbereitung dient.

### 3.2 Auswertung und Hochrechnung

Aus den bei der Sammlung und Sortierung erfassten Größen werden folgende behälterspezifischen Daten ermittelt:

- *Füllgrad [Vol.-%]*  
Verhältnis des gefüllten zum gesamten Behältervolumen.  
Wird vor Ort in 10 %-Schritten geschätzt.
- *Raumgewicht [kg/l]*  
Quotient aus der Masse einer SPE und dem Gesamtvolumen.
- *Schüttgewicht [kg/l]*  
Quotient aus der Masse einer SPE und dem gefüllten Behältervolumen.  
Hohe Schüttgewichte weisen auf schwere Abfallbestandteile (z. B. Organik) oder auf Verdichtung des Restmülls hin, während geringe Schüttgewichte ein Anzeichen für sperrige oder voluminöse Abfälle (meist Verpackungen) sind.
- *Spezifisches bereitgestelltes Behältervolumen [ $l/(E \cdot Wo)$ ]*  
Jedem Einwohner pro Woche zur Verfügung stehendes Abfallbehältervolumen.  
Die Gebietskörperschaften legen i. d. R. in der Abfallwirtschaftssatzung ein Mindestbehältervolumen fest.
- *Spezifisches genutztes Behältervolumen [ $l/(E \cdot Wo)$ ]*  
Produkt von Füllgrad und beprobter Behältergröße mit Bezug auf die angeschlossenen Einwohner und das Leerungsintervall.

Neben den behälterspezifischen Daten wurden auch die Restabfallmasse und -zusammensetzung erfasst.

- *Spezifisches Abfallaufkommen [ $kg/(E \cdot Wo)$ ,  $kg/(E \cdot a)$ ]*  
Angefallene Restmüllmasse je Einwohner und Zeitraum.  
Ermöglicht den direkten Vergleich zwischen den Gebietskörperschaften.

Die Auswertung der Daten und die Ermittlung des einwohnerspezifischen Restmüllaufkommens der Gebietskörperschaft (Hochrechnung) erfolgen in zwei Schritten; dabei werden die Erhebungsdaten der Winter- und Sommerkampagne zunächst getrennt ausgewertet:

- *Berechnung des einwohnerspezifischen Abfallaufkommens je Gebietsstruktur*

Im ersten Schritt wird für jede Schicht  $i$  (ländlich, städtisch, innerstädtisch) unter Einbeziehung der recherchierten Einwohnerzahlen  $E_i^{\text{bepr}}$  und Behälterstandzeiten  $t_i$  [Wochen] der beprobten Adressen das einwohnerspezifische Abfallaufkommen  $m_i^a$  anhand der Summe der  $n$  sortierten Abfallfraktionen in den Stichproben SP ermittelt.

Verfahren 1

$$m_i^a = \frac{m_{SP}}{E_i^{bepr}} \cdot \frac{52 \text{ Wochen}}{\bar{t}_i} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{E} \cdot \text{a}} \right] \quad (1)^*$$

Die Berechnung unter Verwendung der mittleren Standzeit  $\bar{t}_i$  der Einzelbehälter ist zulässig, wenn entweder alle Behälter die gleiche Standzeit aufweisen (z. B. Regelabfuhr) oder im Fall eines Identsystems die Standzeiten gleichmäßig (symmetrisch) verteilt sind. Diese Bedingungen waren bei den untersuchten Gebietskörperschaften mit Identsystem (siehe Abschnitt 3.3) nicht erfüllt; vielmehr weisen die Standzeiten eine rechtsschiefe Verteilung auf: viele Behälter mit unterdurchschnittlich kurzen, wenige Behälter mit überdurchschnittlich langen Standzeiten. Die mittlere Standzeit  $\bar{t}_i$  führt somit zur Überschätzung der Standzeit und folglich zur Unterschätzung des Restmüllaufkommens.

Um bei der Berechnung des spezifischen Abfallaufkommens die Mittelung der Standzeiten zu umgehen, wurde das nachfolgend beschriebene Verfahren 2 angewandt.

Verfahren 2

$$m_i^a = \frac{m_{SP}}{\sum V_{EB}} \cdot \frac{\sum (V_{EB} \cdot Z_L)}{E_i^{bepr}} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{E} \cdot \text{a}} \right] \quad (2)^*$$

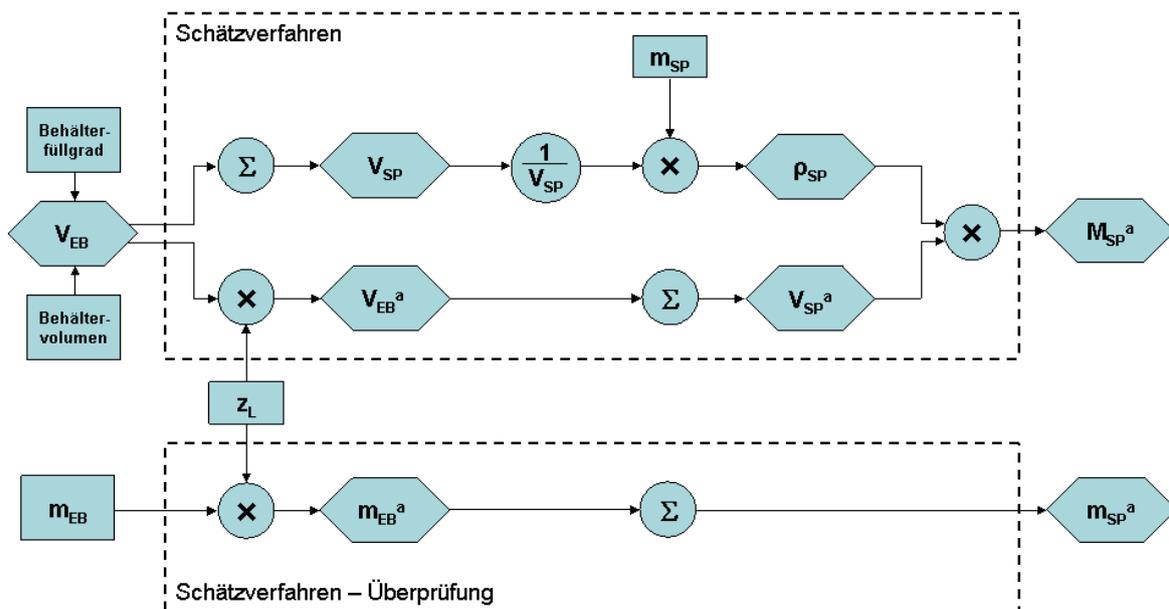
Kern des Verfahrens ist eine behälterspezifische Betrachtung, wodurch auf die Mittelung der Standzeiten verzichtet werden kann. Da bei der Probenahme i. d. R. die Abfallmasse der beprobten Behälter nicht erfasst wird, werden dazu die erfassten genutzten Behältervolumina herangezogen. Die Ermittlung der Abfallmasse erfolgt mit der Schüttdichte, die aus der Masse der gesammelten Stichprobe und dem dazugehörigen genutzten Behältergesamtvolumen erhalten werden kann (siehe Abb. 2).

<sup>\*)</sup> Symbole:

a	Jahr
E	Einwohner
m	Masse
$\bar{t}$	mittlere Standzeit
V	Volumen
z	Häufigkeit

Indizes:

a	pro Jahr
bepr	beprobte Einwohner
EB	Einzelbehälter
i	Schicht
L	Leerung
Sp	Stichprobe

**Erläuterung:****a) Schätzung des jährlichen Restmüllaufkommens anhand der Einzelbehältervolumina und der Schüttdichte der Stichprobe:**

Durch Summation der aus dem Füllgrad abgeleiteten Restmüllvolumina  $V_{EB}$  der Einzelbehälter über die Anzahl  $n$  der beprobten Behälter wird das Volumen der Stichprobe  $V_{SP}$  ermittelt. Der Quotient aus der (stets bekannten) Stichprobenmasse  $m_{SP}$  und dem Stichprobenvolumen  $V_{SP}$  liefert die Schüttdichte der Stichprobe  $\rho_{SP}$ . Das Volumen der Einzelbehälter  $V_{EB}$  wird mit der Anzahl der Leerungen  $z_L$  (aus Standzeit ermittelt) multipliziert und daraus das mit dem betrachteten Behälter zu entsorgende Jahresvolumen  $V_{EB}^a$  abgeschätzt. Die Summation über alle  $n$  erfassten Behälter liefert das Jahresvolumen der Stichprobe  $V_{SP}^a$ , das multipliziert mit der Stichprobendichte  $\rho_{SP}$  einen Schätzwert  $m_{SP}^a$  der Jahresmasse der Stichprobe ergibt.

*Annahme:* Restmüll„produktion“ der einzelnen Haushalte ist im Mittel konstant (d. h., Sortierung liefert – wie allgemein angenommen – repräsentative Momentaufnahme von  $V_{EB}$  und  $z_L$ ).

**b) Überprüfung des Schätzverfahrens:**

Sind im Einzelfall die Massen der Einzelbehälter  $m_{EB}$  bekannt, so besteht die Möglichkeit, den Sollwert der Jahresmasse der Stichprobe  $m_{SP}^a$  analog zum Jahresvolumen  $V_{SP}^a$  aus der Leerungshäufigkeit und der beprobten Behälterzahl zu bestimmen. Der Vergleich mit  $m_{SP}^a$  erlaubt die Überprüfung des Schätzverfahrens für das vorliegende Datenkollektiv.

Abb. 2: Darstellung des Verfahrens 2 zur Ermittlung des einwohnerspezifischen Restmüllaufkommens pro Jahr anhand des Volumens der Einzelbehälter und der Schüttdichte.

Zur Kontrolle der Güte der Berechnungsergebnisse gem. Verfahren 1 und 2 wurde bei einer Sortierkampagne einer untersuchten Gebietskörperschaft mit Identensystem die Nettoabfallmasse jedes beprobten Restabfallbehälters separat bestimmt. Damit wurde, wie in Abbildung 2 dargestellt, ein Sollwert der einwohnerspezifischen Restmüllmasse pro Jahr ermittelt und mit den o. g. Verfahren verglichen.

Das Verfahren 1 (massebasiert, mittlere Standzeit) ergab eine deutliche Unterschätzung des Sollwerts um 28 Mass.-%, hingegen zeigte sich bei Verfahren 2 (volumenbasiert, individuelle Standzeit) eine gute Übereinstimmung mit einer Abweichung von 3 Mass.-%. Dies belegt die grundsätzliche Eignung des volumenbasierten Berechnungsverfahrens 2.

Da bei Gebietskörperschaften mit konstanter Standzeit der Restmüllbehälter (Regelabfuhr) die Ergebnisse der über Verfahren 1 und 2 berechneten spezifischen Restmüllmassen identisch sind {siehe Formel (2): wenn  $z_L = \text{konstant}$ , kann  $V_{EB}$  herausgekürzt werden}, wurde bei allen im Rah-

men des Projekts untersuchten Gebietskörperschaften das Berechnungsverfahren 2 angewandt.

- *Hochrechnung auf die Gebietskörperschaft*

Die Hochrechnung der Ergebnisse auf die Gebietskörperschaft GK erfolgt durch eine gewichtete Mittelwertbildung anhand der Einwohnerzahl in den  $n_i$  Gebietsstrukturen  $i$ .

$$m_{GK}^a = \frac{\sum_{i=1}^{n_i} (m_i^a \cdot E_i^{bepr})}{\sum_{i=1}^{n_i} E_i} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{E} \cdot \text{a}} \right] \quad (3)^*)$$

Für die Berechnung der *Jahresdurchschnittswerte* des Restmüllaufkommens aus den Ergebnissen der Winter- und Sommerkampagne wird die Jahresganglinie herangezogen. Diese gewichtete Mittelwertbildung der beiden Kampagnen führt zu einem genaueren Hochrechnungsergebnis als die reine Mittelung, da sie Schwankungen der Restmüllmasse im Jahresverlauf berücksichtigt.

Die Ergebnisse werden einer statistischen Auswertung und Fehlerrechnung unterzogen.

*) Symbole:		Indizes:	
a	Jahr	a	pro Jahr
E	Einwohner	bepr	beprobte Einwohner
m	Masse	GK	Gebietskörperschaft
n	Anzahl	i	Schicht (Gebietsstruktur)

### 3.3 Auswahl der Gebietskörperschaften

Von den 96 entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften (71 Landkreise, 25 kreisfreie Städte) Bayerns gehören neun Landkreise und vier kreisfreie Städte ganz oder teilweise zum EFRE-Ziel-2-Gebiet der EFRE-Förderung [37]. Die Gebiete liegen in den Regierungsbezirken Mittel-, Ober-, Unterfranken, Niederbayern und Oberpfalz. Für die Durchführung der Restmüllsortieranaysen wurden fünf Gebietskörperschaften (drei Landkreise, zwei kreisfreie Städte) aus den Regierungsbezirken Ober- und Unterfranken sowie Niederbayern ausgewählt.

Die Auswahl erfolgte nach folgenden abfallwirtschaftlichen Kriterien:

- Einwohnerdichte
- Wertstofffassungssysteme (Hol-, Bringsysteme) für Bioabfall, Papier, Pappe, Kartonagen und Leichtverpackungen
- finanzielle Anreize zur Abfallvermeidung durch gewichts- oder volumenbezogene Gebührensysteme

Die ausgewählten Gebietskörperschaften sollen die abfallwirtschaftlichen Gegebenheiten im EFRE-Ziel-2-Gebiet Bayerns repräsentativ wiedergeben und aktuelle Trends bei der Gebührenerhebung beinhalten.

Als Nebeneffekt konnte mit den fünf Restmüllsortieranaylisen die vorhandene Datenbasis erweitert werden: in den Jahren 1998 – 2003 [8], 2004/05 [38, 39] und 2006/07 [9] wurden 26 Sortieranaylisen in 22 Gebietskörperschaften (16 Landkreise, 6 kreisfreie Städte) – ein Landkreis davon lag in dem EFRE-Ziel-2-Gebiet – mit unterschiedlichen Zielsetzungen durchgeführt und daraus für die jeweiligen Untersuchungsgebiete Handlungsempfehlungen abgeleitet.

### Einwohnerdichte

Zur Beschreibung der abfallwirtschaftlichen Situation in Bayern unterteilt die Bayerische Abfallbilanz [1] die entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften nach der Einwohnerdichte in vier Strukturklassen: (i) Landkreise in die beiden Kategorien „ländlich“ („l“, bis zu 125 Einwohner/km<sup>2</sup>) und „ländlich dicht“ („ld“, mehr als 125 Einwohner/km<sup>2</sup>), (ii) kreisfreie Städte in die beiden Klassen „städtisch“ („s“, bis zu 1.750 Einwohner/km<sup>2</sup>) und „großstädtisch“ („gs“, mehr als 1.750 Einwohner/km<sup>2</sup>).

In Tabelle 6 sind für Bayern, das gesamte EFRE-Ziel-2-Gebiet sowie die fünf untersuchten Gebietskörperschaften die Aufteilung der Gebietskörperschaften und deren Einwohner auf die vier Strukturklassen dargestellt.

Tab. 6: Aufteilung der Gebietskörperschaften (GK) auf die Strukturklassen nach der Bayerischen Abfallbilanz [1] für Bayern, für das gesamte EFRE-Ziel-2-Gebiet und die für das Projekt ausgewählten fünf Gebietskörperschaften.

Strukturklasse	Bayern [1]			EFRE-Ziel-2-Gebiet [37]					
	Anzahl GK	Einwohnerzahl	Anteil [%]	Anzahl GK	Einwohnerzahl	Anteil [%]	ausgewählte GK		
							Anzahl GK	Einwohnerzahl	Anteil [%]
l	39	4.301.149	35	7	446.200	53	2	134.800	38
ld	36	4.853.228	39	2	198.700	24	1	110.300	31
s	17	1.168.344	9	2	107.200	13	2	107.200	31
gs	4	2.155.747	17	2	81.800	10	–	–	–
gesamt	96	12.478.468	100	13	833.900	100	5	352.300	100

In den fünf, repräsentativ für das EFRE-Ziel-2-Gebiet Bayerns untersuchten Gebietskörperschaften leben ca. 0,35 Mio. Einwohner, was nahezu der Hälfte (42 %) der Bevölkerung des gesamten EFRE-Ziel-2-Gebiets entspricht. Mit der Auswahl von jeweils zwei ländlichen und städtischen sowie einer ländlich dichten Gebietskörperschaft wird die reale Strukturklassenverteilung des EFRE-Ziel-2-Gebiets näherungsweise abgebildet.

### Wertstofffassungssysteme für Bioabfall, Papier, Pappe, Kartonagen und Leichtverpackungen

Eine Übersicht über die Verbreitung der Holsysteme für Bioabfall, Papier, Pappe, Kartonagen und Leichtverpackungen in Bayern, im gesamten EFRE-Ziel-2-Gebiet und in den ausgewählten Gebietskörperschaften gibt Tabelle 7. Im Vergleich zum bayernweiten Durchschnitt (Anschlussgrad: ca.  $\frac{2}{3}$  der Bevölkerung) fällt für das EFRE-Ziel-2-Gebiet die nahezu flächendeckende Bereitstellung der Papier- tonne auf; dieses Holsystem war in allen untersuchten Gebietskörperschaften etabliert. Demgegenüber liegt der Anschlussgrad an die Gelbe Tonne / den Gelben Sack im EFRE-Ziel-2-Gebiet mit ca.  $\frac{1}{3}$  der Bevölkerung deutlich unter dem bayernweiten Durchschnitt (über  $\frac{1}{2}$  der Bevölkerung).

Tab. 7: Übersicht über die Wertstofffassung im Holsystem für Bayern, das gesamte EFRE-Ziel-2-Gebiet und die für das Projekt ausgewählten fünf Gebietskörperschaften.

Holsystem	Bayern [1]		EFRE-Ziel-2-Gebiet [37]			
	Anzahl GK	Anteil Einwohner [%]	gesamt		ausgewählte GK	
			Anzahl GK	Anteil Einwohner [%]	Anzahl GK	Anteil Einwohner [%]
Biotonne	78	79	8	73	3	69
Papiertonne	60	64	12	95	5	100
Gelbe Tonne / Gelber Sack	64	55	7	36	2	31
Gesamt	96	100	13	100	5	100

Insgesamt repräsentieren die ausgewählten Gebietskörperschaften weitestgehend die abfallwirtschaftlichen Verhältnisse im gesamten EFRE-Ziel-2-Gebiet Bayerns hinsichtlich deren struktureller Aufteilung und etablierter Wertstofffassungssysteme.

Die Tabellen 8 und 9 geben einen Überblick über die Hol- und Bringsysteme in den ausgewählten Gebietskörperschaften; die alphanumerische Bezeichnung der Landkreise (L) und Städte (S) erfolgte in Weiterführung der Systematik vorangegangener LfU-Sortieranalysen (chronologische Nummerierung der Restmüllsortierungen in den Gebietskörperschaften) [8, 9, 39].

Tab. 8: Untersuchte Gebietskörperschaften und jeweilige Wertstofffassung im Holsystem.

Untersuchungsgebiete	Biotonne	Papiertonne	Gelber Sack / Gelbe Tonne	1. Kampagne	2. Kampagne
L21	–	X	X	2/07 (Winter)	6/07 (Sommer)
L22	X <sup>*)</sup>	X	–	1–2/08 (Winter)	6/08 (Sommer)
L23	X <sup>**)</sup>	X	–	3/08 (Winter)	7/08 (Sommer)
S7	–	X	X	3/07 (Winter)	7/07 (Sommer)
S8	X <sup>***)</sup>	X	–	3/08 (Winter)	7/08 (Sommer)

<sup>\*)</sup> Anschlussgrad 76 % der Haushalte

<sup>\*\*)</sup> Anschlussgrad ca. 70 % der Haushalte

<sup>\*\*\*)</sup> Anschlussgrad > 90 % der Haushalte

Die in Tabelle 9 dargestellten Dichten (pro Fläche, pro Einwohner) der Standorte zur Wertstoffabgabe (Bringsystem) variieren zwischen den einzelnen Gebietskörperschaften z. T. erheblich. Die sich in den Daten widerspiegelnden Gegebenheiten beeinflussen unmittelbar die Akzeptanz des Bringsystems durch den Bürger: mit einem sinkenden Systemkomfort korreliert eine sinkende Erfassungsmenge. D. h., sowohl die Wertstofffassung im bequemeren Holsystem als auch die Entfernung zum nächstgelegenen Standort der Wertstofffassung im Bringsystem wirken sich im Abfallaufkommen und in der Restmüllzusammensetzung aus.

Tab. 9: Untersuchte Gebietskörperschaften und jeweilige Wertstofffassung im Bringsystem.

Untersuchungsgebiete	Bezug	Wertstoffhöfe	Behälterglas	Container-Standorte		
				Altpapier, Kartonagen	DSD – Gemischte Verpackungen	Altmetall / Grobschrott
L21 <sup>*)</sup>	pro 100 km <sup>2</sup>	2,3	21,2	0,8	–	2,3
	pro 10.000 E	2,0	18,8	0,7	–	2,0
L22	pro 100 km <sup>2</sup>	2,0	17,0	2,0	2,0	2,0
	pro 10.000 E	2,5	20,6	2,5	2,5	2,5
L23	pro 100 km <sup>2</sup>	1,0	25,0	1,0	26,0	1,0
	pro 10.000 E	0,9	21,7	0,9	22,2	0,9
S7	pro 100 km <sup>2</sup>	2,8	102,9	2,8	2,8	2,8
	pro 10.000 E	0,2	6,9	0,2	0,2	0,2
S8	pro 100 km <sup>2</sup>	3,4	155,2	3,4	155,2	3,4
	pro 10.000 E	0,4	18,9	0,4	18,9	0,4

<sup>\*)</sup> nur EFRE-Ziel-2-Gebiet

### Finanzielle Anreize zur Abfallvermeidung durch gewichts- oder volumenbezogene Gebührensysteme

Neben der Art der Wertstofffassung beeinflussen durch den finanziellen Anreiz auch gewichts- oder volumenbezogene Gebührensysteme das Bürgerverhalten bei der Entsorgung des im Haushalt anfallenden Abfalls. Wie Tabelle 10 zeigt, hängt bei allen fünf untersuchten Gebietskörperschaften die Gebühr für die Hausmüllabfuhr von der Anzahl und Größe der bereitgestellten Restmüllbehälter ab; bei der einzigen Gebietskörperschaft mit Identsystem (Landkreis L23) richtet sich die Gebühr zusätzlich nach der Anzahl der Behälterleerungen.

Tab. 10: Gebührensystem der untersuchten Gebietskörperschaften.

Untersuchungsgebiete	Sammelsystem	Grundgebühr abhängig von	Leistungsgebühr abhängig von
L21	Regelabfuhr	Behältergröße plus Anzahl Grundstücksbewohner	–
L22	Regelabfuhr	Behältergröße	–
L23	Identsystem	Behältergröße	Anzahl Leerungen
S7	Regelabfuhr	Behältergröße	–
S8	Regelabfuhr	Behältergröße	–

## 3.4 Analytik

### 3.4.1 Analysestoffgruppen

Neben den Aussagen zu Restmüllaufkommen und -zusammensetzung war die Charakterisierung des Restmülls aus Haushalten hinsichtlich der physikalisch-chemischen Eigenschaften und des Schadstoffinventars ein weiterer Schwerpunkt des Vorhabens.

Um die vorhandene Datenbasis aus früheren Untersuchungen [8, 9, 38] zu erweitern, wurde bei den aktuellen Untersuchungen die bisherige Methodik beibehalten: 37 der 49 Sortierfraktionen wurden unter Berücksichtigung stofflicher Ähnlichkeiten zu 18 Analysestoffgruppen zusammengefasst (siehe Tab. 11), 12 Sortierfraktionen {Batterien, Fahrzeugteile, Fe-Metallverpackungen mit / ohne Grünem Punkt (GP), Medikamente, NE-Metallverpackungen mit / ohne GP, Sonderabfall (außer Batterien und Medikamenten), Sonstige Metallteile, Sonstige Stoffe, Sonstiges Glas, Styropor} blieben aufgrund zu geringer Masseanteile für eine repräsentative Stichprobe oder eingeschränkter Aufbereitungstechniken für die physikalisch-chemische Analyse unberücksichtigt. Entsprechend den Anteilen der Analysestoffgruppen wurden somit 92,7 Mass.-% des Restmülls erfasst.

Tab. 11: Zusammenfassung der Sortierfraktionen zu Analysestoffgruppen (Auflistung in alphabetischer Reihenfolge) und Stichprobenanzahl; GP: Grüner Punkt.

Analysestoffgruppe	Sortierfraktion	Anzahl Proben
Elektronikschrott	Elektronikschrott	3
Feinfraktion	Feinfraktion	6
Glas	Behälterglas mit / ohne GP	3
Holz	Holzverpackungen mit / ohne GP	3
	Sonstiges Holz	
Hygieneprodukte	Hygienepapiere	3
	Windeln	
Inertes	Inertes	3
	Inert-Verpackungen	
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	Kunststoffverpackungen mit / ohne GP	3
	Kunststofffolien (Verpackungen) mit / ohne GP	
	Folien (keine Verpackungen)	
Leder, Gummi, Kork	Leder	3
	Gummi	
	Kork	
Mittelfraktion	Mittelfraktion	6
Organik	Gartenabfälle	3
	Küchenabfälle	
	Tierkadaver	
	Sonstige organische Stoffe	
Papier, Pappe, Kartonagen (PPK)	PPK-Druckerzeugnisse	3
	PPK-Verpackungen mit / ohne GP	
	Sonstige PPK	
Renovierungsabfälle	Renovierungsabfälle	3
Schuhe	Schuhe	3
Sonstige Kunststoffe	Sonstige Kunststoffe	3
Sonstige Verbunde	Sonstige Verbunde	3
Staubsaugerbeutel	Staubsaugerbeutel(inhalt)	3
Textilien	Bekleidungstextilien	3
	Sonstige Textilien	
Verbundverpackungen	Verbundverpackungen mit / ohne GP	3
gesamt		60

Je Sortierkampagne wurden sechs Analysestoffgruppen beprobt. Die hieraus resultierenden 60 Einzelstichproben verteilten sich gleichmäßig auf die 18 Analysestoffgruppen, so dass je Analysestoffgruppe drei Einzelwerte (Fein- und Mittelfraktion: je sechs Einzelwerte) zur Verfügung standen.

### 3.4.2 Probenahme und Probenvorbereitung

Aufgrund der einheitlichen Methodik bei der Durchführung der Restmüllsortieranaysen ist eine gleich bleibende Vorgehensweise bei der Probenahme für die physikalisch-chemische Analytik möglich.

Für die Stichprobenziehung bei den Sortierkampagnen wurden 1.100 l-Container als definierte Stichprobeneinheit (SPE) verwendet. Die Probenahme für die Analytik erfolgte nach der mechanischen Klassierung und manuellen Sortierung einer SPE sowie der Verwiegung aller separierten Sortierfraktionen. Während einer Sortierwoche wurden sechs Proben für die Analytik gezogen.

Die mechanisch klassierte Fein- und Mittelfraktion jeder SPE wurde in 240 l Tonnen gesammelt; der Inhalt der Tonne wurde auf eine ausgelegte Folien entleert. Pro SPE wurden nach intensivem Durchmischen von jeder Fraktion etwa 500 ml als Probe gezogen und zu einer wöchentlichen 10 l-Mischprobe zusammengeführt.

Im Unterschied zur Fein- und Mittelfraktion wurden die 47 Sortierfraktionen des Grobmülls in kleinere Restmülltonnen manuell sortiert. Nach der Sortierung einer SPE wurde für jede Analysestoffgruppe eine Teilprobe von bis zu 7 l gezogen und in verschließbaren Kunststoffsäcken aufbewahrt. Die wöchentliche Mischprobe einer Analysestoffgruppe umfasste ein Volumen von maximal 120 l. Bei Stoffgruppen, die im Mittel mit nur geringen Anteilen im Restmüll zu finden sind, in der einzelnen SPE jedoch in vergleichsweise großen Massen vorhanden waren, wurde die Stoffgruppe i. d. R. nicht oder nur anteilig beprobt, um eine zu hohe Gewichtung zu vermeiden.

Am Ende einer Sortierwoche wurden die wöchentlichen Mischproben von Fein-, Mittel- und Grobfraktion zu Laborproben reduziert und vor Ort in ausgewogene Gefriertrocknungsgefäße (Nennvolumen: 1.200 ml) gefüllt. Während die Fein- und Mittelfraktion aufgrund ihrer Korngröße  $d_p < 40$  mm direkt umgefüllt werden konnten, wurden die Analysestoffgruppen der Grobfraktion vorzerkleinert. Diese Zerkleinerung erfolgte mit einem in die Abfallsortieranlage integrierten Zweiwellenzerkleinerer. Um Verunreinigungen zu minimieren bzw. Schadstoffe nicht zu verschleppen, wurde bei der Reihenfolge der Vorzerkleinerung die voraussichtliche Schadstoffbelastung der Analysestoffgruppe berücksichtigt (z. B. Organik und/oder Hygieneprodukte zu Beginn, Verbunde und Elektronikschrott am Ende).

Im Labor schlossen sich an die Wassergehaltsbestimmung mittels Gefriertrocknung weitere Zerkleinerungsschritte an. Je nach Analysestoffgruppe können die beprobten Materialien spröde (z. B. Glas, Inertes), relativ zäh (z. B. Kunststoffverpackungen) oder fettig (z. B. Organik) sein. In umfangreichen Vorversuchen hatten sich Kryo-, Kugel- und Schneidmühle als Zerkleinerungsaggregate für die verschiedenen Materialien bewährt. Die eisenhaltigen Metalle wurden vor Beginn der Zerkleinerung aussortiert, um Verschleiß und Abrieb an den Mahlwerkzeugen zu minimieren.

Die Abbildung 3 zeigt die Vorgehensweise bei der Zerkleinerung der beprobten Stoffgruppen. Erfahrungsgemäß erfordert ein Großteil der Analysestoffgruppen mehrere Zerkleinerungsschritte mit unterschiedlichen Aggregaten, um die geforderte Analysenkorngröße von maximal 0,5 mm zu erreichen. Lediglich die Analysestoffgruppen Feinfraktion, Glas und Inertes wurden ausschließlich mit der Kugelmühle auf eine Korngröße  $d_p < 0,5$  mm gemahlen. Mit Ausnahme der genannten drei Analysestoffgruppen wurden die Proben zunächst mit einer langsam laufenden Schneidmühle in mehreren Zerkleinerungsvorgängen auf  $d_p < 2$  mm, seltener  $d_p < 1$  mm gebracht.

Hauptsächlich die Erwärmung des Mahlgutes erfordert eine schrittweise Zerkleinerung der Proben.

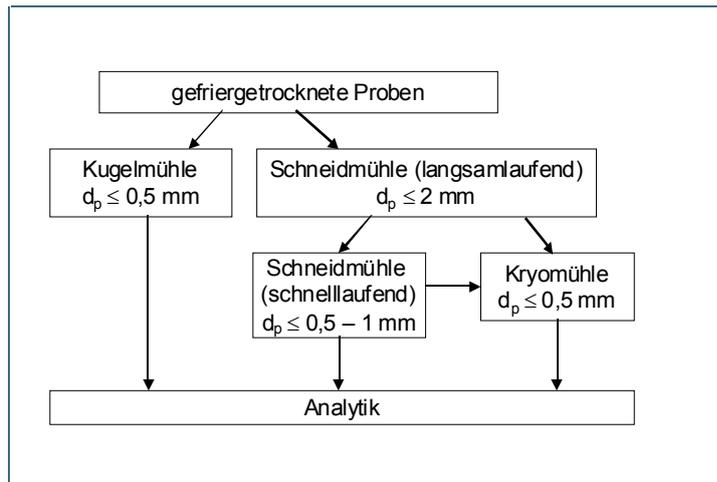


Abb. 3: Vorgehensweise bei der Probenzerkleinerung.

Soweit das rheologische Verhalten der Stoffe es zuließ, konnten die Proben anschließend mit einer schnellaufenden Schneidmühle auf  $d_p < 0,5$  mm gemahlen werden. War das nicht der Fall, wurden die Stoffe mit einer Tiefkühl-Schlagbolzen-Mühle (Kryomühle) unter Versprödung des Materials mit Stickstoff zerkleinert. Von jeder Analysestoffgruppe wurden etwa 300 g getrocknete Probensubstanz auf Analysekorngroße  $d_p < 0,5$  mm gebracht.

Problematisch bei der Zerkleinerung ist neben der Erwärmung des Mahlgutes der Verschleiß der Mahlwerkzeuge [40–42]. Der Abrieb an den Mahlwerkzeugen sowie die dadurch eventuelle Beeinflussung der Untersuchungsergebnisse wurde im Rahmen des Vorhabens nicht untersucht. Bei der Interpretation der Analysedaten sind diese Aspekte jedoch zu berücksichtigen.

### 3.4.3 Analysemethoden

Um möglichst detailliert die physikalisch-chemischen Eigenschaften und Schadstoffe des Restmülls zu erfassen, wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm erstellt.

Grundsätzlich wurden von jeder Analysestoffgruppe die physikalisch-chemischen Parameter Wassergehalt, Glühverlust und Heizwert bestimmt.

Aus dem Bereich der anorganischen Chemie wurden zahlreiche Hauptbestandteile (z. B. Kohlenstoff, Silizium, Schwefel, Chlor, Calcium, Kalium) und Spurenelemente (z. B. Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber, Zink, Zinn) untersucht.

Aus der Vielzahl der im Restmüll enthaltenen organischen Schadstoffe wurden die polycyclischen Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierten Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PCDD/PCDF) und polychlorierten Biphenyle (PCB) ausgewählt.

Die bei dem Projekt eingesetzten Analysemethoden werden im Folgenden kurz dargestellt. Falls möglich, wurde bei der Methodenauswahl auf einschlägige Vorschriften zurückgegriffen. In der Regel erfolgte die Ermittlung der Analysedaten durch Dreifachbestimmungen.

### Physikalisch-chemische Summenparameter

Der Wassergehalt der Analyseproben wurde vor der Zerkleinerung auf Analysekorngroße nach DIN 38 414 – 22 mittels Gefrier Trocknung ermittelt [43]. Besonders flüchtige Substanzen (organische Schadstoffe, Quecksilber) weisen bei dieser Trocknungsmethode gegenüber der konventionellen Trocknung bei 105 °C nach DIN 38 414 – 2 deutlich geringere Verluste auf.

Die Bestimmung des Glühverlustes erfolgte gemäß DIN 38 414-3 durch Glühen der zerkleinerten Probe bei 550 °C im Muffelofen [44]. Der Glühverlust bezeichnet dabei den beim Glühen als Gas entweichenden Massenanteil einer Stoffprobe.

Entsprechend DIN 51 900 wurde der Heizwert der gezogenen Proben ermittelt [45]. Mit Hilfe eines Kalorimeters wird zunächst der Brennwert der Probe bestimmt. Der Heizwert errechnet sich aus dem Brennwert, der berechneten Kondensationswärme (aus dem Elementgehalt von Wasserstoff) und den berechneten Lösungswärmen der gebildeten Schwefel- und Salpetersäure (aus den Elementgehalten von Schwefel und Stickstoff).

### **Anorganische Parameter**

Die Analyse der Proben auf Stickstoff und Wasserstoff erfolgte mit einem Elementaranalysator. Das Prinzip dieser Analyseverfahren beruht auf der Verbrennung der Proben unter Sauerstoffzufuhr bei Temperaturen von 850 – 950 °C. Die Verbrennungsgase werden von Fremdstoffen gereinigt und die Verbrennungsprodukte Stickstoff und Wasserstoff durch eine spezifische Adsorptionssäule voneinander getrennt. Anschließend erfolgt die Quantifizierung beider Elemente mit einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor.

Kohlenstoff und Schwefel wurden mittels eines Kohlenstoff- / Schwefel-Analysators bestimmt. Das eingesetzte Analysesystem ermöglicht die Simultanbestimmung von Schwefel und Gesamtkohlenstoff (TC); es beruht auf der Verbrennung der Proben bei 1.450 °C und der Analyse der Verbrennungsgase durch Infrarotabsorption. Für die Bestimmung des anorganischen Kohlenstoffgehaltes (TIC) wird unter Säurezugabe die Probe erhitzt. Der anorganisch gebundene Kohlenstoff wird als Kohlenstoffdioxid ausgetrieben und ebenfalls mittels Infrarotabsorption quantifiziert. Die Differenz zwischen Gesamt- und anorganisch gebundenem Kohlenstoff ergibt den organisch gebundenen Kohlenstoff (TOC).

Zur Ermittlung der Elementgehalte von Aluminium, Arsen, Blei, Cadmium, Calcium, Chlor, Chrom, Eisen, Kalium, Kupfer, Magnesium, Mangan, Natrium, Nickel, Phosphor, Silizium, Titan, Zink und Zinn diente die Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA). Die zu Tabletten gepressten Abfallproben wurden bei dieser Methode mit einem Sequenz-Röntgenspektrometer untersucht.

Für die Quecksilberbestimmung gemäß DIN 38 406 [46] wurde die Kaltdampf-Atomabsorptionsspektroskopie herangezogen. Nach Aufschluss der Proben mit Königswasser entsprechend DIN 38 414-7 [47] erfolgte die Quantifizierung mit einem Quecksilber-Analysator.

### **Organische Parameter**

Aus der Substanzklasse der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) wurden die 16 Einzelverbindungen nach EPA [48] bestimmt. In einem ersten Schritt wurden die Proben mit Cyclohexan in einer Soxhlet-Apparatur extrahiert und das Extrakt schrittweise aufgereinigt. Anschließend erfolgte die Bestimmung mit einem Gaschromatograph mit massenspektrometrischem Detektor.

Die Analyse der Proben auf polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PCDD/PCDF) erforderte eine Soxhlet-Extraktion der getrockneten Proben mit n-Hexan und eine fünfstufige säulenchromatografische Aufreinigung der Extrakte. Für die Quantifizierung der PCDD/PCDF wurde ein Gaschromatograph mit hochauflösendem Massenspektrometer eingesetzt. Als Einzelkonzentrationen wurden von den PCDD/PCDF die 17 toxikologisch relevanten 2,3,7,8-Isomere ermittelt [33, 49].

Aus der Gruppe der polychlorierten Biphenyle (PCB) wurden die Kongenere Nr. 28, 51, 101, 138, 153 und 180 quantifiziert. Der Extraktionsschritt zur Analyse der Proben auf PCB entspricht der Aufbereitung für die PCDD/PCDF-Bestimmung; Unterschiede ergeben sich bei der säulenchromatografischen Aufreinigung. Die Quantifizierung der PCB erfolgte mittels Gaschromatograph mit massenspektrometrischem Detektor.

### 3.4.4 Auswertung

Ziel des Vorhabens ist die Beschreibung des heterogenen Abfallgemisches Restmüll hinsichtlich seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften und Schadstoffgehalte. Für die Erarbeitung eines umfangreichen Datenmaterials wurden die in unterschiedlichen Gebietskörperschaften gezogenen Abfallproben stets auf dieselben Parameter untersucht. Als Datenbasis liegen für jede Stoffgruppe und jeden analysierten Parameter i. d. R. mindestens 4 Einzelwerte vor.

Die Auswertung der vorliegenden Daten zu physikalisch-chemischen Parametern, Elementgehalten und Schadstoffgehalten umfasst Mittel-, Minimal-, Maximalwert, Standardabweichung und Anteil (Fracht) je kg Original-Restmüll. Bei der Mittelwertbildung für einen Parameter einer Analysestoffgruppe wurden Einzelwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze stets mit dem Wert der Bestimmungsgrenze in die Berechnung einbezogen. Im Unterschied dazu wurden bei der Summenbildung der organischen Substanzklassen Einzelwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze nicht berücksichtigt.

Die Konzentrationsangabe bezieht sich auf die Trockenmasse der jeweiligen Analysestoffgruppe, während Frachten auf Originalsubstanz bezogen sind. Gleichung 4 zeigt die Berechnung der analysestoffgruppenspezifischen Fracht.

$$\Phi_i = C_i \cdot (1 - \theta_i) \quad (4)$$

mit

- $\Phi_i$  : Fracht der Substanz i in Analysestoffgruppe [M/M<sup>OS</sup>]
- $C_i$  : Konzentration der Substanz i in Analysestoffgruppe [M/M<sup>TS</sup>]
- $\theta_i$  : Wassergehalt der Analysestoffgruppe [M<sup>Wasser</sup>/M<sup>OS</sup>]

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

$$\Phi_i^{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n \Phi_i \cdot f_i \quad (5)$$

mit

- $\Phi_i^{\text{tot}}$  : Gesamtfracht der Substanz i im Restmüll [M/M<sup>OS</sup><sub>Restmüll</sub>]
- $n$  : Anzahl der Analysestoffgruppen[---]
- $f_i$  : Masseanteil der Analysestoffgruppe am Restmüll [M<sub>Stoffgruppe</sub>/M<sup>OS</sup><sub>Restmüll</sub>]



## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Datenbestand

Bei dem Vorhaben wurden in drei Landkreisen (L21 bis L23) und zwei kreisfreien Städten (S7 und S8) im EFRE-Ziel-2-Gebiet der Regierungsbezirke Ober- und Unterfranken sowie Niederbayern jeweils zwei Wochen lang Sortierungen von Restmüll aus Haushalten durchgeführt. Dabei wurde der Restmüll von insgesamt 6.798 Einwohnern unmittelbar vor der Abholung durch das Entsorgungsunternehmen beprobt. Der gesammelte Restmüll beläuft sich auf 29,9 Mg bzw. 199,9 m<sup>3</sup> (Summe der aus dem Füllgrad abgeleiteten Restmüllvolumina der Einzelbehälter  $V_{EB}$ , vgl. Abschnitt 3.2).

In den folgenden Abschnitten werden für eine vergleichende Beurteilungsbasis die Ergebnisse der aktuellen Untersuchungen den Ergebnissen früherer Restmüllsortierungen [8, 9, 39], in den Landkreisen L1 bis L20 und kreisfreien Städten S1 bis S5 gegenübergestellt; im Landkreis L14 und in der Stadt S6 [38] wurde jeweils eine Sortierkampagne durchgeführt, wodurch die Datenbasis nicht vergleichbar ist und auf eine Ergebnisdarstellung verzichtet wird.

#### 4.1.1 Restmüllaufkommen

Die Abbildung 4 zeigt das ermittelte spezifische Restmüllaufkommen in den untersuchten Gebietskörperschaften und spiegelt die Untersuchungsergebnisse von zehn Jahren wider (chronologische Nummerierung der Restmüllsortierungen in den Gebietskörperschaften). In diesem Zeitraum hat sich nach [1] in Bayern das spezifische Gesamtabfallaufkommen kaum verändert und das Wertstoffaufkommen rd. 66 Mass.-% stabilisiert, so dass die zeitlichen Trends der dargestellten Größen von untergeordneter Bedeutung sind.

In Abbildung 4 wird das ermittelte spezifische Restmüllaufkommen in nicht verwertbaren Rest, (maximales) restliches verwertbares und (maximales) organisches Potenzial unterteilt. Das restliche verwertbare Potenzial besteht aus Verpackungen und sonstigen Wertstoffen wie Kunststoffen, Metall, Holz, Textilien und Kork; das organische Potenzial setzt sich aus den beiden Stoffgruppen Garten- und Küchenabfälle zusammen, wobei die Stoffgruppe Küchenabfälle sowohl Abfälle pflanzlichen als auch tierischen Ursprungs umfasst. Die dargestellten Wertstoffmassen stellen eine Obergrenze des tatsächlich verwertbaren Materials dar, da eine exakte Unterscheidung zwischen verwertbarem (stofflich, energetisch) und nicht verwertbarem Wertstoff kaum möglich ist.

Das spezifische Restmüllaufkommen betrug im untersuchten EFRE-Ziel-2-Gebiet zwischen 68,8 kg/(E·a) und 169,2 kg/(E·a). Damit reihen sich die Ergebnisse in den Bereich bisheriger Untersuchungen ein, wobei vier von fünf Gebietskörperschaften ein spezifisches Restmüllaufkommen von über 100 kg/(E·a) aufweisen. Das mittlere spezifische Restmüllaufkommen liegt mit 116,1 kg/(E·a) über den bislang ermittelten Durchschnittswerten von 112,5 kg/(E·a) [8] bzw. 98,3 kg/(E·a) [9]. Der deutlich niedrigere Wert des Phasing-Out-Gebietes [9] beruhte u. a. auf der Tatsache, dass bei dieser Untersuchungsreihe vier von sechs Gebietskörperschaften über Abfallwirtschaftssysteme mit Bedarfsabfuhr (Identsysteme) verfügten; deren gewichts- oder volumenbezogene Gebührensysteme führten zu einem verringerten über die Restmülltonne entsorgten Abfallaufkommen. Bei den Untersuchungen zwischen 1998 und 2003 wurden ausschließlich Gebietskörperschaften mit Regelabfuhr untersucht, bei den aktuellen Untersuchungen verfügte eine (Landkreis L23) von fünf Gebietskörperschaften über ein Identsystem.

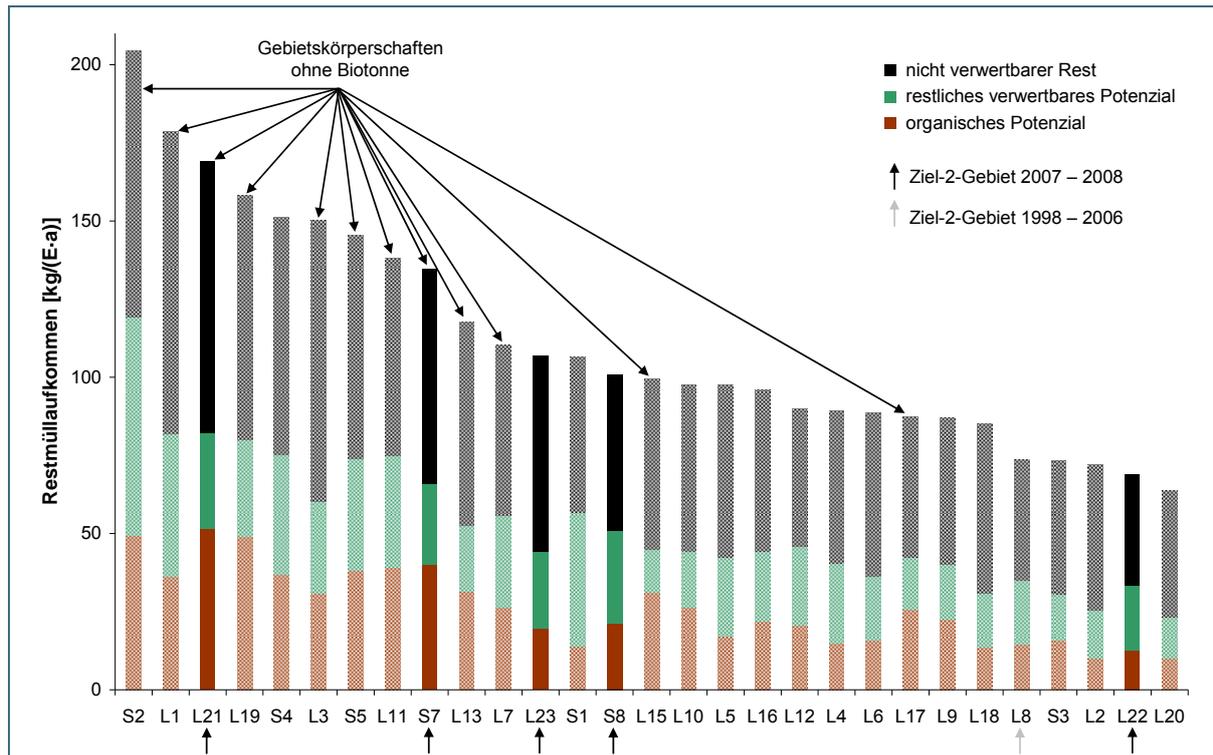


Abb. 4: Restmüllaufkommen in den untersuchten Gebietskörperschaften – unterteilt in nicht verwertbaren Rest, (maximales) restliches verwertbares und (maximales) organisches Potenzial – im Vergleich zu den in den Jahren 1998 – 2003 [8], 2004/05 [39] und 2006/07 [9] untersuchten Gebietskörperschaften.

Die aktuellen Ergebnisse (wie auch die bisherigen Daten) belegen insbesondere den signifikanten Einfluss des Erfassungssystems für Bioabfälle auf das spezifische Restmüllaufkommen: die drei Gebietskörperschaften mit einem Holsystem für Bioabfälle (L22, L23 und S8) weisen mit Restmüllaufkommen unter 110 kg/(E-a) deutlich niedrigere Werte auf als die beiden Gebietskörperschaften ohne Biotonne {L21 und S7; > 130 kg/(E-a)}.

#### 4.1.2 Restmüllzusammensetzung

Die aus den Ergebnissen der untersuchten fünf Gebietskörperschaften ermittelte durchschnittliche Restmüllzusammensetzung nach den 14 Obergruppen zeigt Abbildung 5. Wie bei den vorangegangenen Untersuchungen [8, 9] bilden die vier Obergruppen Fein-, Mittelfraktion, Organik und Hygieneprodukte mit einem Anteil von insgesamt 66 Mass.-% die Hauptmasse des Restmülls. Diese prozentuale Aufteilung, dass rund  $\frac{2}{3}$  des Restmülls auf die o. g. Obergruppen entfallen, ist unabhängig von Abfallwirtschaftssystem und damit vom Restmüllaufkommen [50].

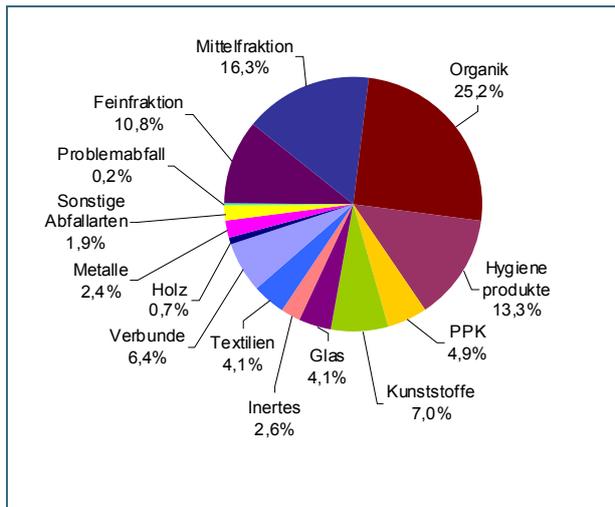


Abb. 5: Restmüllzusammensetzung nach Obergruppen [Mass.-%].

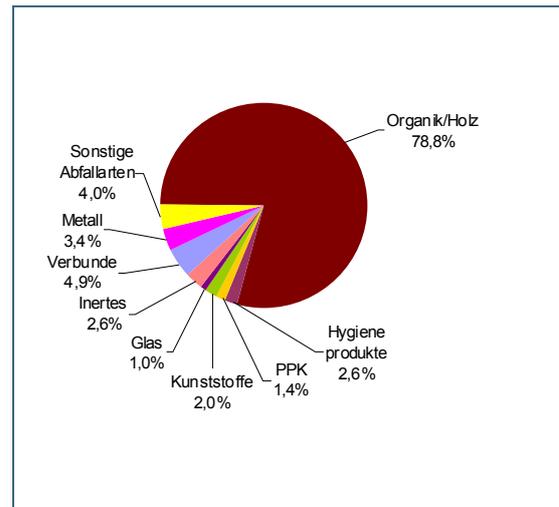


Abb. 6: Zusammensetzung der Mittelfraktion [Mass.-%].

Die in Abbildung 6 dargestellte Zusammensetzung der Mittelfraktion, mit durchschnittlich 16,3 Mass.-% nach der Organik die zweitgrößte Obergruppe im Restmüll, wurde durch Sortierung von Stichproben nach Obergruppen ermittelt. Sie besteht, vor allem in Gebietskörperschaften ohne Biotonne, zum Großteil aus organischen Materialien (60 – 89 Mass.-%). Eine Sortierung der Feinfraktion (Partikelgröße meist < 10 mm) ist nicht zielführend; sie besteht vor allem aus Straßenkehrschutt, Erde, Katzen- und Kleintierstreu.

In Tabelle 12 sind die einzelnen Stoffgruppen detailliert aufgelistet. Die mit einem Viertel der Restmüllmasse größte Obergruppe Organik wird von der stark wasserhaltigen Stoffgruppe Küchenabfälle (88 Mass.-%) dominiert, die drittgrößte Obergruppe Hygieneprodukte besteht zu über der Hälfte (55 Mass.-%) aus der Stoffgruppe Windeln. Die Hauptmasse der Kunststoffe wird vorwiegend von Kunststoffverpackungen (insgesamt 52 Mass.-%), die der Verbunde von Verbundverpackungen (insgesamt 43 Mass.-%) und Sonstigen Verbunden (28 Mass.-%) gebildet.

Tab. 12: Spezifisches Restmüllaufkommen nach sortierten Stoffgruppen [kg/(E-a)]

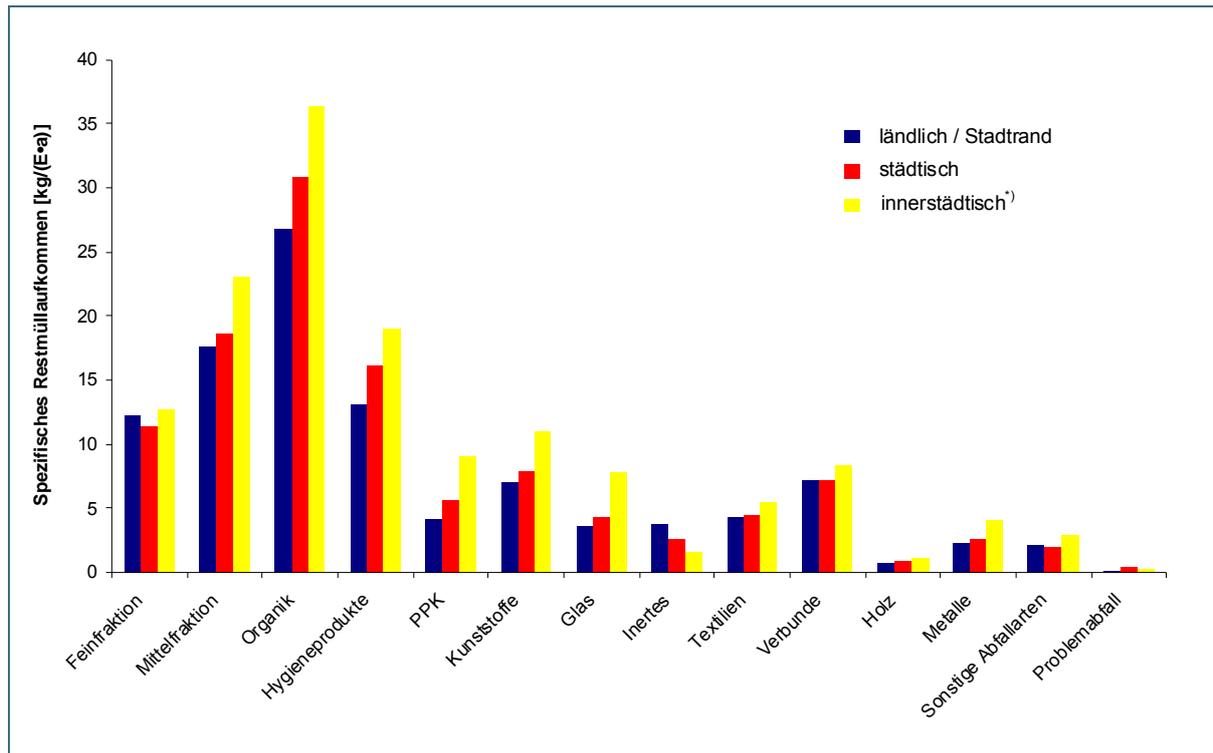
Obergruppe	Stoffgruppe	Kategorie <sup>1)</sup>	spezifische Restmüllmasse
Feinfraktion	Feinfraktion	R	12,6
Mittelfraktion	Mittelfraktion	R	18,9
Organik	Küchenabfälle	W	25,7
	Gartenabfälle	W	3,4
	Tierkadaver	R	< 0,1
	Sonstige organische Stoffe	R	0,1
Hygieneprodukte	Windeln	R	8,5
	Hygienepapiere	R	6,9
Papier, Pappe, Kartonagen (PPK)	PPK-Verpackungen	V	1,6
	PPK-Verpackungen (DSD)	V	1,0
	PPK-Druckerzeugnisse	W	2,9
	Sonstige PPK	R	0,2

Tab. 12 (Forts.): Spezifisches Restmüllaufkommen nach sortierten Stoffgruppen [kg/(E·a)]

Obergruppe	Stoffgruppe	Kategorie <sup>1)</sup>	spezifische Restmüllmasse
Kunststoffe	Kunststoffverpackungen	V	0,9
	Kunststoffverpackungen (DSD)	V	3,4
	Kunststofffolien	V	0,4
	Kunststofffolien (DSD)	V	0,4
	Sonstige Folien	W	1,7
	Styropor	W	0,2
	Sonstige Kunststoffartikel	W	1,3
Glas	Behälterglas	V	1,0
	Behälterglas (DSD)	V	3,0
	Sonstiges Glas	R	0,7
Metalle	Fe-Metallverpackungen	V	0,1
	Fe-Metallverpackungen (DSD)	V	0,9
	NE-Metallverpackungen	V	0,4
	NE-Metallverpackungen (DSD)	V	0,4
	Sonstige Metallteile	W	0,8
Inertes	Inertes außer Glas	R	3,1
	Inertes Verpackungen	R	« 0,1
Textilien	Bekleidungstextilien	W	1,7
	Sonstige Textilien	R	2,1
	Schuhe	W	1,0
Verbunde	Verbundverpackungen	V	0,6
	Verbundverpackungen (DSD)	V	1,8
	Elektronikschrott	W	0,9
	Renovierungsabfälle	R	1,2
	Fahrzeugteile	R	0,1
	Staubsaugerbeutel	R	0,4
	Sonstige Verbunde	R	2,5
	Holz	Holzverpackungen	V
	Holzverpackungen (DSD)	V	« 0,1
Sonstige Abfallarten	Sonstiges Holz	R	0,9
	Leder	R	0,1
	Gummi	R	0,3
	Kork	W	« 0,1
Problemabfall	Sonstige Stoffe	R	1,9
	Sonderabfall außer Batterien/Medikamenten	P	0,1
	Batterien	P	« 0,1
	Medikamente	R	0,1
gesamt			116,1

<sup>1)</sup> Kategorien der Stoffgruppen: R Restmüll, W Wertstoff, V Verpackung (Wertstoff), P Problemabfall

Wie im Abschnitt 3.3.1 erläutert, wurde bei den durchgeführten Restmüllsortierungen eine Schichtung des Untersuchungsgebiets nach dem Schichtungsmerkmal Gebietsstruktur, das die Wohnbebauungsdichte widerspiegelt, vorgenommen (Definition der drei Gebietsstrukturklassen „ländlich / Stadtrand“, „städtisch“ und „innerstädtisch“: siehe Tab. 4). Dadurch lässt sich der Datenbestand auch in Abhängigkeit der drei Gebietsstrukturklassen auswerten; in Abbildung 7 ist das mittlere spezifische Restmüllaufkommen der Obergruppen in Abhängigkeit von den Gebietsstrukturen dargestellt.



<sup>1)</sup> Mittelwert aus vier Gebietskörperschaften, da Landkreis L22 keine innerstädtische Gebietsstruktur entsprechend Definition in Tabelle 4 aufweist

Abb. 7: Spezifisches Restmüllaufkommen nach Obergruppen in Abhängigkeit der verschiedenen Gebietsstrukturen [kg/(E-a)].

Insgesamt ergibt sich in Übereinstimmung mit den Ergebnissen früherer Untersuchungen [8, 9] ein deutlicher Anstieg des spezifischen Restmüllaufkommens mit zunehmender Siedlungsdichte: für das ländliche Gebiet / Stadtrand errechnet sich ein durchschnittlicher Wert von 105,1 kg/(E-a), für das städtische von 115,0 kg/(E-a) und für das innerstädtische von 142,7 kg/(E-a). Da der Landkreis L22 keine innerstädtische Gebietsstruktur entsprechend der Definition in Tabelle 4 aufweist, wurde der Mittelwert für diese Strukturklasse mit den Ergebnissen der anderen vier Gebietskörperschaften gebildet. Der Anstieg des Restmüllaufkommens mit der Siedlungsdichte spiegelt sich in den meisten Obergruppen wider und ist bei den Obergruppen Papier, Pappe, Kartonagen und Glas (relativ) am stärksten ausgeprägt. Nur bei den Obergruppen Feinfraktion, Inertes und Sonstige Abfallarten weist die städtische Struktur ein niedrigeres Aufkommen als die ländliche / der Stadtrand, bei den Obergruppen Inertes und Problemabfall die innerstädtische Struktur ein niedrigeres Aufkommen als die städtische auf; dementsprechend ist das spezifische Abfallaufkommen an Inertem im ländlichen Bereich / Stadtrand, an Problemabfall im städtischen Bereich am höchsten.

## Maximales Wertstoffpotenzial

Das maximal nutzbare Wertstoffpotenzial {Obergrenze des tatsächlich verwertbaren (stofflich, energetisch) Materials} im Restmüll der untersuchten Gebietskörperschaften des EFRE-Ziel-2-Gebiets in Bayern beträgt durchschnittlich 57,1 kg/(E·a) bzw. 49,1 Mass.-% (vgl. Tab. 13). Hierzu trägt die Organik mit 29,1 kg/(E·a) rund die Hälfte bei.

Tab. 13: Maximales spezifisches Wertstoffaufkommen im Restmüll einschließlich Schwankungsbreiten sowie Sammelmengen in Bayern [1] [kg/(E·a)]; k. A.: keine Angabe.

Wertstofffraktion im Restmüll	Mittelwert	Schwankungsbreite		Wertstoffsammel- mengen [50]
Organik	29,1	12,8	51,6	60,6
Leichtverpackungen (Kunststoff, Verbund, Metall)	11,8	7,4	15,6	18,3
Papier, Pappe, Kartonagen	5,5	2,1	7,6	83,5
Metalle	4,9	1,8	7,4	8,4
Behälterglas	4,0	2,7	5,2	25,4
Kunststoff-Nichtverpackungen	3,0	2,6	3,5	2,4
Textilien inkl. Schuhe	2,0	1,1	2,9	3,0
Holz inkl. Holzverpackungen	0,5	« 0,1	0,9	18,4
Elektronikschrott	0,4	« 0,1	0,9	k. A.
Kork	« 0,1	« 0,1	« 0,1	k. A.
gesamt	57,1	30,0	87,4	k. A.

Vergleicht man die im Restmüll vorhandene Wertstoffmasse mit der in Bayern erfassten [50], belegen die Daten bei den Wertstofffraktionen wie Behälterglas, Holz oder Papier, Pappe, Kartonagen einen hohen Abschöpfungsgrad durch die etablierten Erfassungssysteme. Bei anderen Wertstoffen wie Kunststoff-Nichtverpackungen, Leichtverpackungen, Metallen und Organik verbleiben vergleichsweise große Wertstoffpotenziale im Restmüll. Bei „saugfähigen“ Fraktionen wie Papier, Pappe, Kartonagen, Textilien und Verbundverpackungen ist der z. T. hohe Wassergehalt zu berücksichtigen, der in den einzelnen Gebietskörperschaften je nach Organikanteil des Restmülls (Biotonne ja / nein) sehr unterschiedlich ausfallen kann. Insbesondere bei den als Wertstoff eingestuften Stoffgruppen Bekleidungstextilien und Schuhe ist eine exakte Unterscheidung zwischen stofflich verwert- und nicht verwertbarem Wertstoff (verschmutzt, abgetragen) bei einer Restmüllsortierung kaum möglich. Die Einstufung erfolgte auch unabhängig davon, ob in der jeweiligen Gebietskörperschaft eine getrennte Erfassung für diese „Wertstoffe“ angeboten wird.

Bei sämtlichen Sortierungen wurde der Masseanteil an Batterien ermittelt, indem die Mittelfraktion (10 – 40 mm) vollständig danach durchsucht wurde. Die Batterien wurden separat verwogen und ein Wert von 0,15 kg/(E·a) ermittelt.

## Verpackungen

Bei den Restmüllsortierungen wurden die Verpackungen in mit und ohne Grünen Punkt unterteilt. Insgesamt liegt mit einem Aufkommen von 18,7 kg/(E·a) bzw. einem Anteil von 16,1 Mass.-% (vgl. Tab. 14) eine vergleichsweise hohe Verpackungsmasse im Restmüll vor.

Zum Vergleich: Bayern 1998 – 2003: 16,8 kg/(E·a) bzw. 15,0 Mass.-% [8]; Phasing-Out-Gebiet Bayern 2006/07: 10,7 kg/(E·a) bzw. 10,8 Mass.-% [9].

Tab. 14: Aufkommen und Anteil von Verpackungen mit und ohne Grünen Punkt (GP) im Restmüll.

Verpackungsart	mit GP	ohne GP	Summe	Anteil mit GP
Kunststoffverpackungen	3,4 kg/(E·a)	0,9 kg/(E·a)	4,3 kg/(E·a)	78,7 Mass.-%
Behälterglas	3,0 kg/(E·a)	1,0 kg/(E·a)	4,0 kg/(E·a)	75,9 Mass.-%
PPK-Verpackungen	1,0 kg/(E·a)	1,6 kg/(E·a)	2,6 kg/(E·a)	37,9 Mass.-%
Verbundverpackungen	2,1 kg/(E·a)	0,5 kg/(E·a)	2,6 kg/(E·a)	82,4 Mass.-%
NE-Metallverpackungen	1,1 kg/(E·a)	1,0 kg/(E·a)	2,1 kg/(E·a)	53,8 Mass.-%
Fe-Metallverpackungen	0,5 kg/(E·a)	1,4 kg/(E·a)	1,9 kg/(E·a)	26,8 Mass.-%
Kunststofffolien (Verpackungen)	0,4 kg/(E·a)	0,4 kg/(E·a)	0,8 kg/(E·a)	50,8 Mass.-%
Holzverpackungen	0,2 kg/(E·a)	0,2 kg/(E·a)	0,5 kg/(E·a)	50,4 Mass.-%
Inertverpackungen	« 0,1 kg/(E·a)	« 0,1 kg/(E·a)	« 0,1 kg/(E·a)	–
gesamt	11,8 kg/(E·a)	6,9 kg/(E·a)	18,7 kg/(E·a)	62,9 Mass.-%
Anteil am Restmüll	10,1 Mass.-%	6,0 Mass.-%	16,1 Mass.-%	–

Trotz des niedrigen spezifischen Gewichts macht die Verpackungsart Kunststoffverpackungen mit 4,3 kg/(E·a) den größten Anteil (23 Mass.-%) der Verpackungen aus und dominiert optisch den Restmüll. Mit den Kunststofffolienverpackungen erhöht sich der Wert auf 27 Mass.-%. Weiterhin haben Behälterglas mit 21 Mass.-%, PPK- und Verbundverpackungen mit jeweils 14 Mass.-% einen signifikanten Anteil an den Verpackungen im Restmüll. Bei knapp  $\frac{2}{3}$  der Verpackungsmasse handelt es sich um Verpackungen mit Grünem Punkt, wobei die höchsten Anteile für Verbund-, Kunststoffverpackungen und Behälterglas (Reihenfolge nach absteigendem Anteil GP) ermittelt wurden.

In Abbildung 8 sind die Schwankungsbreiten des Verpackungsaufkommens im Restmüll der Untersuchungsgebiete dargestellt. Die teilweise großen Abweichungen vom Mittelwert (z. B. bei PPK-Verpackungen, Nichteisen-Metallverpackungen) zeigen eine starke Abhängigkeit der Verpackungsanteile von den lokalen abfallwirtschaftlichen Gegebenheiten v. a. in Bezug auf die getrennte Wertstoff-erfassung.

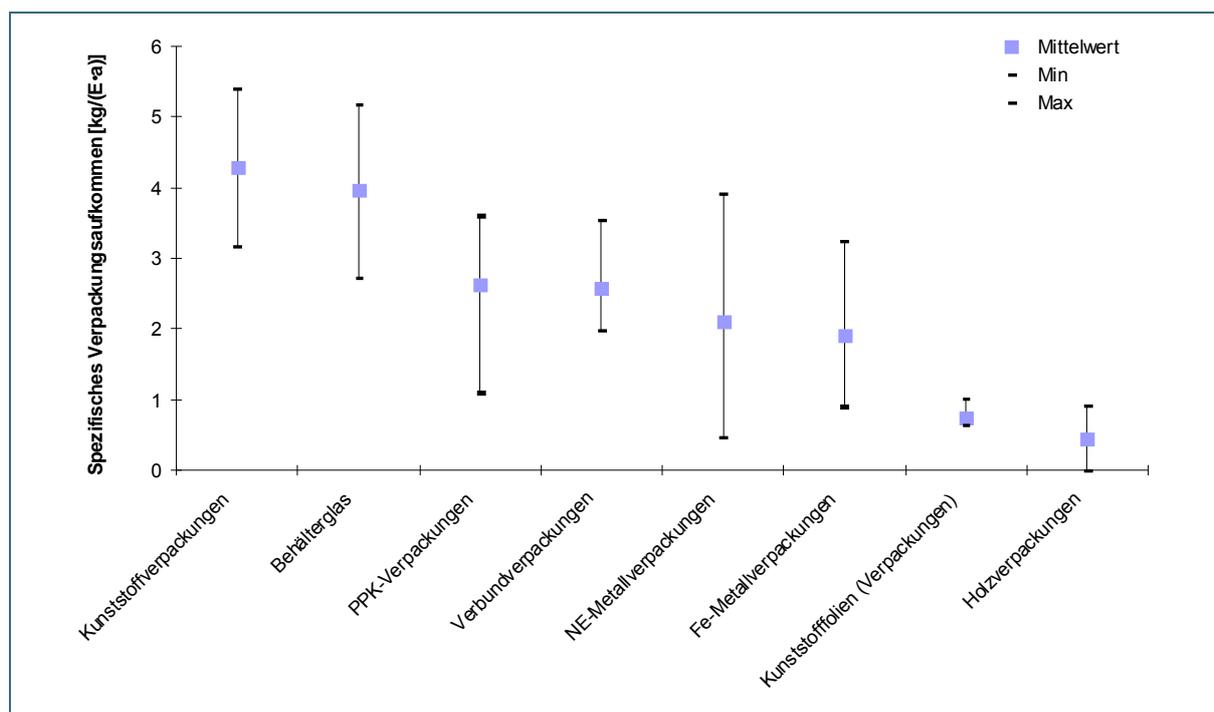


Abb. 8: Spezifisches Verpackungsaufkommen im Restmüll einschließlich Angabe der Schwankungsbreite.

In Tabelle 15 ist der Einfluss der Gebietsstrukturen – ein Maß für die Siedlungsdichte – der Untersuchungsgebiete auf das spezifische Verpackungsaufkommen und den Anteil mit Grünem Punkt aufgeführt.

Generell verbleiben in ländlichen / Stadtrandgebieten weniger Verpackungen im Restmüll als in städtischen und innerstädtischen. D. h., die Bereitschaft zur Mülltrennung ist auch im EFRE-Ziel-2-Gebiet im ländlichen Bereich am größten; u. a. kommt es in innerstädtischen Bereichen durch vorwiegend kleinere Haushalte und das damit verbundene Konsumverhalten zu höheren Verpackungsanteilen. Auch der Masseanteil an Verpackungen mit Grünem Punkt ist in innerstädtischen Gebieten am höchsten. Weitere mögliche Ursachen für schlechtere Mülltrennung sind die Anonymität im Geschosswohnungsbau und Gemeinschaftsabfallbehälter.

Tab. 15: Spezifisches Verpackungsaufkommen in den verschiedenen Gebietsstrukturen.

Verpackungsart	ländlich / Stadtrand		städtisch		innerstädtisch <sup>*)</sup>	
	davon GP		davon GP		davon GP	
	[kg/(E·a)]	[Mass.-%]	[kg/(E·a)]	[Mass.-%]	[kg/(E·a)]	[Mass.-%]
Kunststoffverpackungen	3,5	78,5	4,4	79,3	5,8	80,6
Verbundverpackungen	2,6	80,6	2,3	82,1	2,8	85,8
NE-Metallverpackungen	1,9	55,4	2,1	50,9	2,3	54,4
Fe-Metallverpackungen	2,0	19,1	1,6	28,2	1,7	48,6
Kunststofffolien (Verpackungen)	0,6	50,4	0,8	53,0	1,0	55,6
Summe Leichtverpackungen	10,7	61,9	11,2	65,2	13,7	71,4
Behälterglas	2,7	73,0	3,7	73,3	7,2	81,2
PPK-Verpackungen	2,0	35,8	2,4	37,5	4,2	40,3
Holzverpackungen	0,4	41,7	0,4	47,1	0,9	73,1
Inertverpackungen	« 0,1	–	« 0,1	–	« 0,1	–
gesamt	15,8	60,0	17,7	62,7	26,0	69,1

<sup>\*)</sup> Mittelwert aus vier Gebietskörperschaften, da Landkreis L22 keine innerstädtische Gebietsstruktur entsprechend Definition in Tabelle 4 aufweist

#### 4.1.3 Wertstoffaufkommen in Abhängigkeit des Abfallwirtschaftssystems

In den untersuchten Gebietskörperschaften existieren unterschiedliche Abfallwirtschafts- und damit Wertstofffassungssysteme (vgl. Tab. 8 und 9). Die Stoffgruppen Organik, Papier, Pappe, Kartonaugen und Leichtverpackungen (Kunststoff-, Verbund- und Metallverpackungen) stellen die im Restmüll masserelevanten Wertstoffe dar und wurden einer differenzierteren Betrachtung unterzogen.

#### Erfassung von Bioabfällen

In drei der fünf untersuchten Gebietskörperschaften (zwei Landkreise, eine kreisfreie Stadt) werden Bioabfälle im Holsystem erfasst. Das mittlere spezifische Organikaufkommen im Restmüll beträgt für diese drei Gebietskörperschaften (Holsystem) 17,9 kg/(E·a), für die beiden ohne Biotonne 45,9 kg/(E·a) und für alle fünf untersuchten Gebietskörperschaften 29,1 kg/(E·a). Es liegt in den kreisfreien Städten über 21 kg/(E·a), in den Landkreisen unter 20 kg/(E·a) (Ausnahme: L21).

Die Abbildung 9 zeigt das Organikaufkommen im Restmüll der vom LfU seit 1998 untersuchten Gebietskörperschaften [8, 9, 39] in Abhängigkeit vom Erfassungssystem. In den Gebietskörperschaften mit Biotonne (Holsystem) liegt die im Restmüll verbleibende Organikmasse unter der in Gebietskörperschaften ohne Biotonne. Die hohe Schwankungsbreite des Organikaufkommens von Gebietskörperschaften mit gleichem Erfassungssystem für Bioabfälle belegt, dass neben dem Erfassungssystem eine Vielzahl weiterer Faktoren das Abfallaufkommen beeinflusst. Für eine Absenkung des spezi-

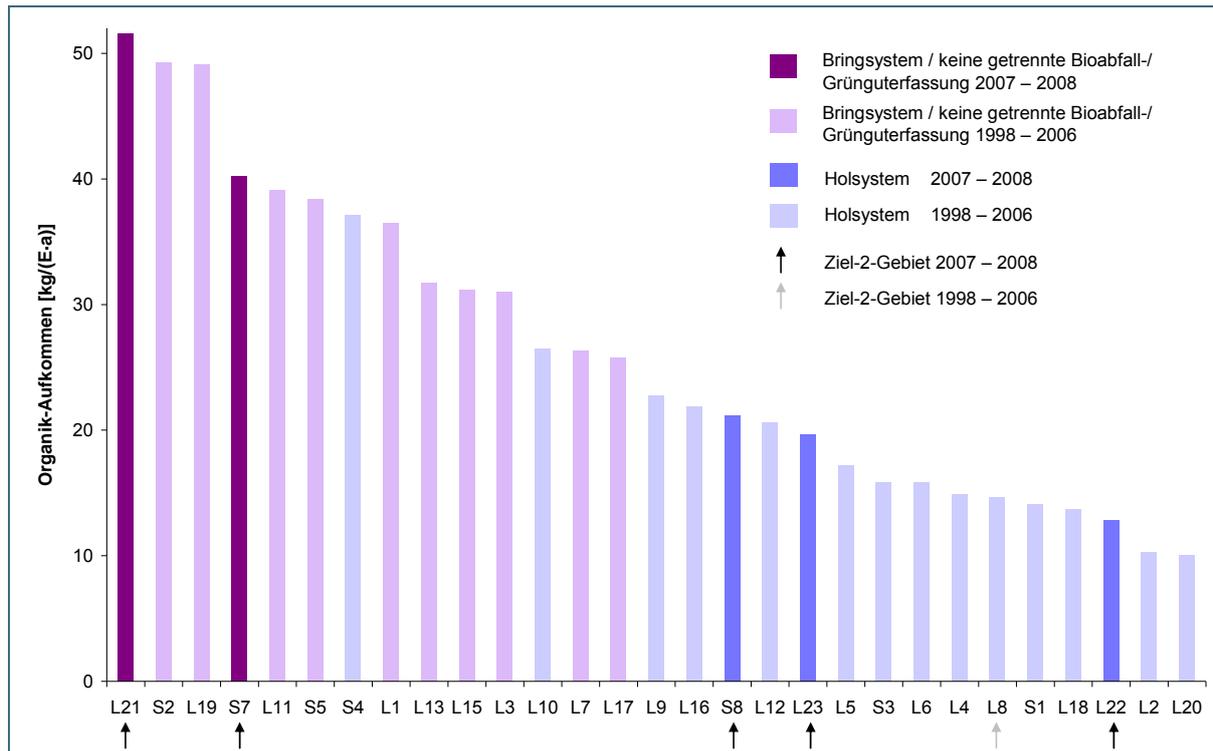


Abb. 9: Vergleich des spezifischen Organikaufkommens im Restmüll in Abhängigkeit des Erfassungssystems mit den in [8, 9, 39] untersuchten Gebietskörperschaften.

fischen Organikaufkommens im Restmüll sind daher neben der Einführung der Biotonne weitere flankierende Maßnahmen {z. B. Gebührenmodell (personen-, volumen-, leerungs-, masseabhängig) oder der Grad bzw. die Förderung der Eigenkompostierung} zu prüfen.

### Erfassung von Papier, Pappe, Kartonagen

Alle fünf beprobten Gebietskörperschaften verfügen über Holsysteme für Papier, Pappe, Kartonagen (PPK). Das mittlere spezifische PPK-Aufkommen im Restmüll beträgt für die fünf untersuchten Gebietskörperschaften (Papiertonne) 5,7 kg/(E-a); es liegt in den kreisfreien Städten über 6 kg/(E-a), in den Landkreisen unter 5 kg/(E-a) (Ausnahme: L21).

Die Abbildung 10 zeigt die ermittelte Masse an PPK im Restmüll der aktuell untersuchten Gebietskörperschaften im Vergleich zu früheren LfU-Untersuchungen [8, 9, 39]. Das Aufkommen an Papier, Pappe, Kartonagen im Restmüll liegt in Gebietskörperschaften mit Holsystem in der Regel unter dem der Gebietskörperschaften mit Bringsystem. Insgesamt fällt bei der Betrachtung des Säulendiagramms auf, dass das PPK-Aufkommen im Restmüll bei einer beträchtlichen Anzahl von Gebietskörperschaften unterhalb von 5 kg/(E-a) liegt. Im Umkehrschluss belegt dies die hohe Akzeptanz der PPK-Getrennterfassung durch den Bürger.

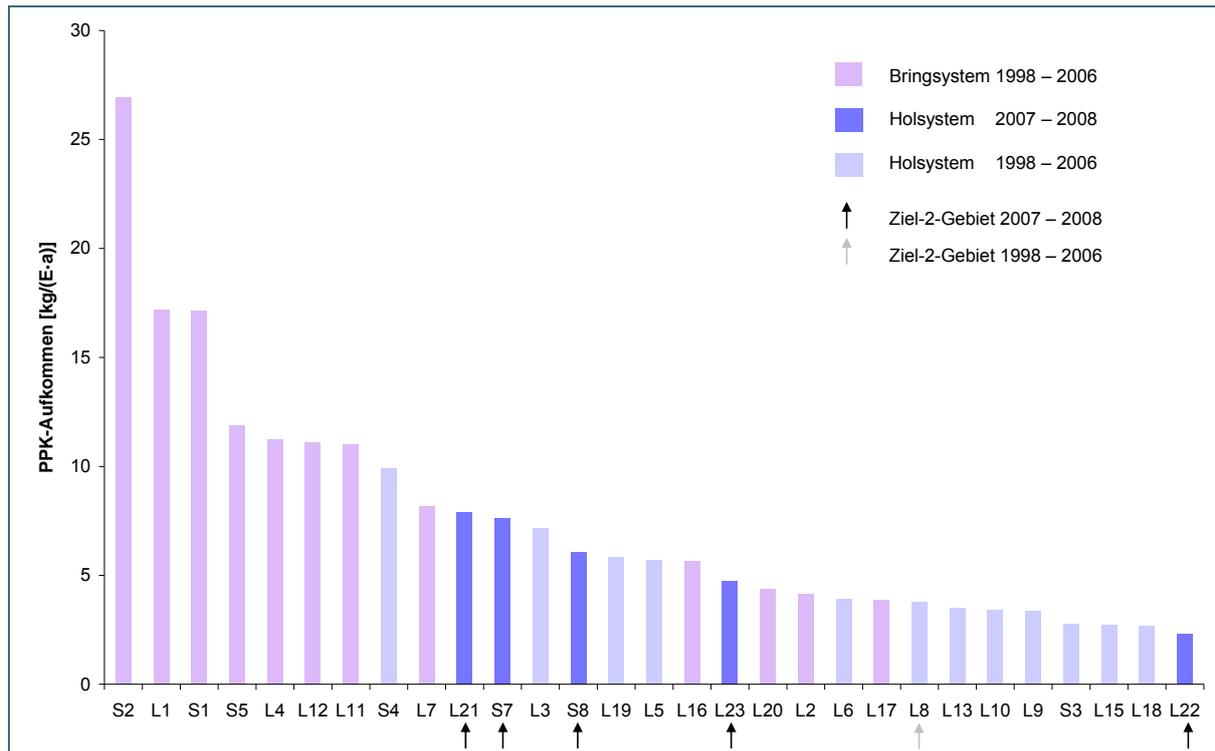


Abb. 10: Vergleich des spezifischen Aufkommens an Papier, Pappe, Kartonagen (PPK) im Restmüll in Abhängigkeit des Erfassungssystems mit den in [8, 9, 39] untersuchten Gebietskörperschaften.

### Erfassung von Leichtverpackungen

Die Kunststoff-, Verbund- und Metallverpackungen werden unter dem Begriff Leichtverpackungen (LVP) zusammengefasst. Von den fünf beprobten Gebietskörperschaften verfügen zwei (ein Landkreis, eine kreisfreie Stadt) über ein Holsystem (Gelbe Tonne / Gelber Sack). Das mittlere LVP-Aufkommen beträgt für die drei Gebietskörperschaften ohne Holsystem 9,8 kg/(E-a), für die zwei mit Holsystem 8,6 kg/(E-a) und für alle fünf untersuchten Gebietskörperschaften 9,3 kg/(E-a).

In Abbildung 11 wird das LVP-Aufkommen im Restmüll der aktuell untersuchten Gebietskörperschaften dem früherer Untersuchungen [8, 9, 39] gegenübergestellt. In den meisten Fällen liegt es in Gebietskörperschaften mit Holsystem unter dem in Gebietskörperschaften mit Bringsystem.

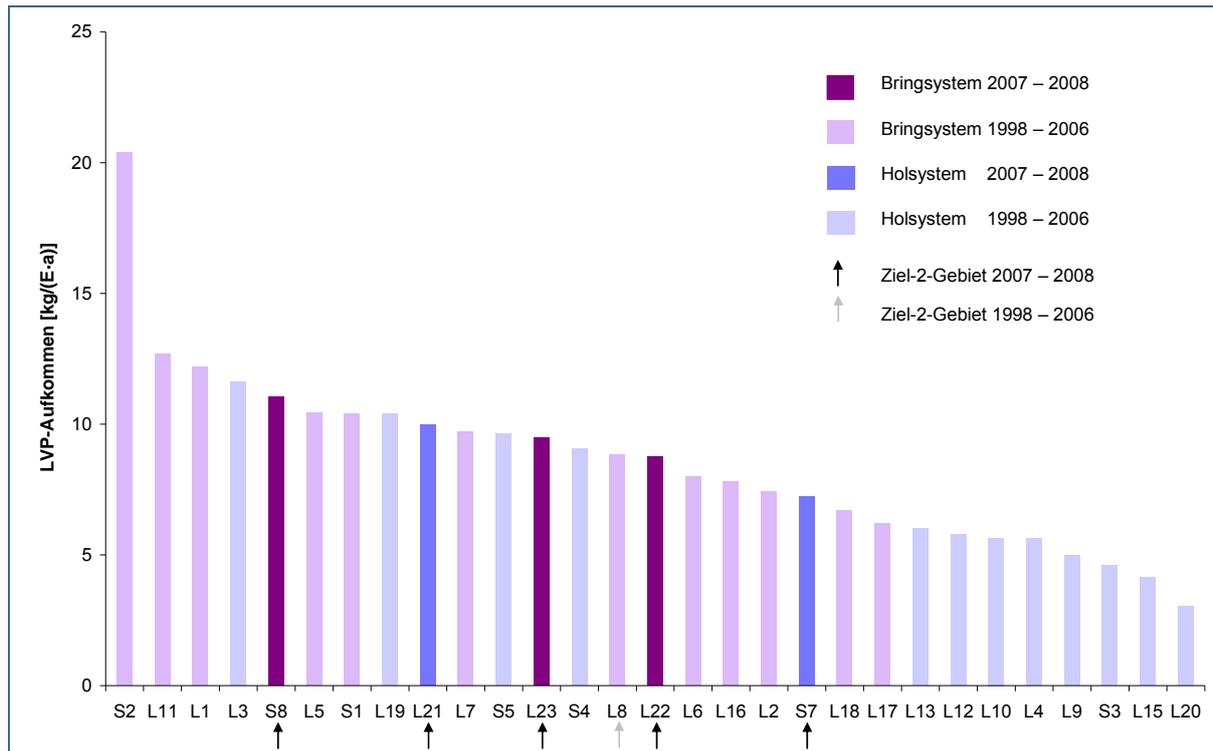


Abb. 11: Vergleich des spezifischen Aufkommens an Leichtverpackungen (LVP) im Restmüll in Abhängigkeit des Erfassungssystems mit den in [8, 9, 39] untersuchten Gebietskörperschaften.

#### 4.1.4 Behälterspezifische Daten

Die behälterspezifischen Daten wie bereitgestelltes, genutztes Behältervolumen und Schüttgewicht werden durch das Abfallwirtschaftssystem (entsprechend der Abfallwirtschaftssatzung) vorgegeben bzw. durch das individuelle Verbraucherverhalten bestimmt. Bei der Probenahme werden das bereitgestellte und genutzte spezifische Behältervolumen durch die Protokollierung von Restmüllbehältervolumen und Füllgrad ermittelt. Durch Verrechnung mit der Restmüllmasse ergeben sich Raum- und Schüttgewicht des Restmülls.

In Tabelle 16 sind die behälterspezifischen Daten in Abhängigkeit der Gebietsstrukturen dargestellt.

Tab. 16: Behälterspezifische Daten in den verschiedenen Gebietsstrukturen.

Gebietsstruktur	bereitgestelltes Behältervolumen [l/(E·Wo)]	genutztes Behältervolumen [l/(E·Wo)]	Schüttgewicht [kg/l]
ländlich / Stadtrand	14,0	11,8	0,165
städtisch	16,0	13,3	0,158
innerstädtisch <sup>*)</sup>	21,8	20,3	0,139
gesamt	16,1	13,9	0,157

<sup>\*)</sup> Mittelwert aus vier Gebietskörperschaften, da Landkreis L22 keine innerstädtische Gebietsstruktur entsprechend Definition in Tabelle 4 aufweist

Das bereitgestellte Behältervolumen beträgt in den untersuchten Gebietskörperschaften im Mittel 16,1 l/(E·Wo). Das genutzte Behältervolumen beträgt im Mittel 13,9 l/(E·Wo), woraus sich ein durchschnittliches Behälterüberangebot von 2,2 l/(E·Wo) ergibt. Das niedrigste genutzte Behältervolumen liegt im ländlichen / Stadtrandbereich vor, das geringste Behälterüberangebot im innerstädtischen Bereich.

Das Schüttgewicht erlaubt eine Aussage über die Dichte und Verdichtung des Abfalls in dem Restmüllgefäß. Die geringsten Schüttgewichte findet man im innerstädtischen Bereich; dies deckt sich mit einem erhöhten Aufkommen an Leichtverpackungen. Zudem sind größere Abfallbehälter (i. d. R. 1.100 l-Container) ein Kennzeichen dieser Gebietsstruktur. Dort können u. a. sperrige Abfälle unzerkleinert / unverdichtet eingefüllt und entsorgt werden. Innerhalb der Gebietskörperschaften liegen die Schüttgewichte zwischen 0,131 kg/l (kreisfreie Stadt S8) und 0,190 kg/l (Landkreis L21).

Bereitgestelltes und genutztes Behältervolumen der untersuchten Gebietskörperschaften im Vergleich zum satzungsgemäßen Mindestbehältervolumen sind in Abbildung 12 dargestellt. In der Gebietskörperschaft L22 ist kein personenbezogenes Mindestbehältervolumen vorgeschrieben; das Mindestbehältervolumen pro Haushalt beträgt hier 60 l.

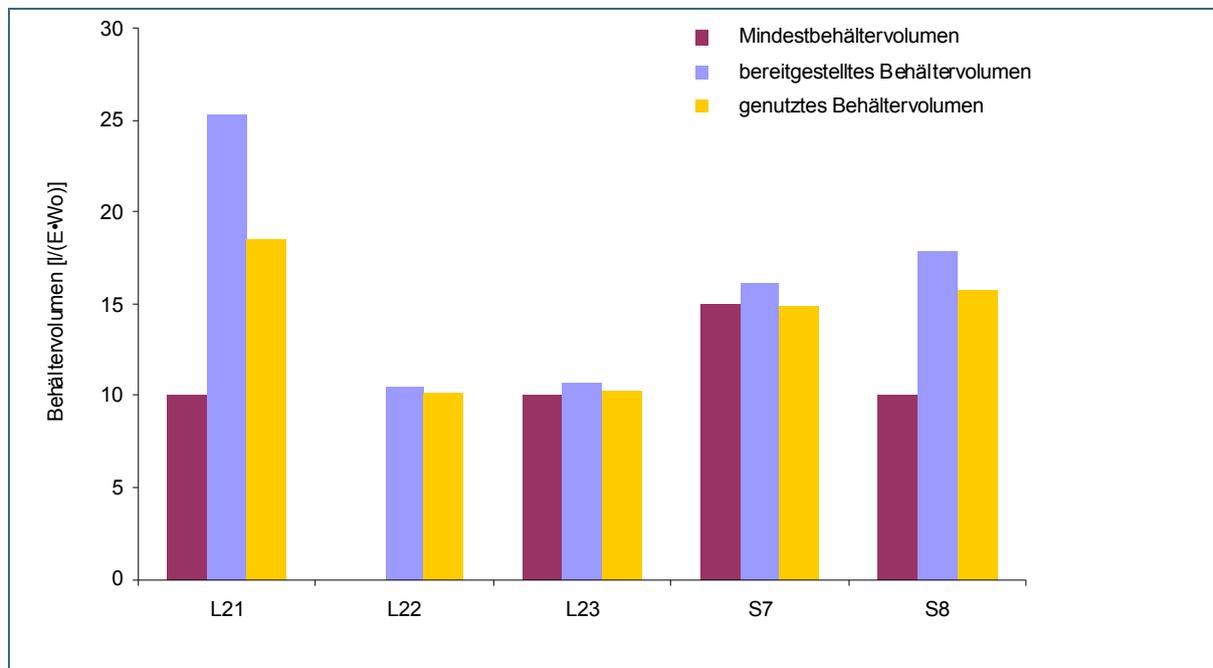


Abb. 12: Vergleich von Mindestbehältervolumen, bereitgestelltem und genutztem Behältervolumen in den untersuchten Gebietskörperschaften.

Das Behälterüberangebot variiert stark von 0,3 l/(E·Wo) (Landkreis L22) bis 6,8 l/(E·Wo) (Landkreis L21). Das bereitgestellte Behältervolumen liegt teilweise deutlich über dem satzungsgemäßen Mindestbehältervolumen.

## 4.2 Physikalisch-chemische Eigenschaften und Inhaltsstoffe

Während der zehn durchgeführten Sortierkampagnen wurden von den 18 Analysestoffgruppen mindestens jeweils drei, insgesamt 60 Einzelproben gezogen und auf diverse physikalisch-chemische Parameter und Inhaltsstoffe untersucht (vgl. Abschnitt 3.4). In den folgenden Abschnitten werden die Analyseergebnisse für die jeweiligen Stoffgruppen (Durchschnittswerte aus Einzelbestimmungen) sowie die damit im Restmüll enthaltene Fracht dargestellt.

Für die Berechnung der Frachten von Schad- und sonstigen Inhaltsstoffen, die die einzelnen Analysestoffgruppen zum Restmüll beitragen, wurden die in den Sortierkampagnen ermittelten und in Tabelle 17 aufgelisteten Masseanteile herangezogen (siehe Abschnitt 3.4.4). Nach der Fein- und Mittelfraktion (Klassierung) sind in den folgenden Tabellen und Abbildungen die Analysestoffgruppen der sortierten Grobfraction in der Reihenfolge abnehmender Masseanteile (feucht) aufgelistet. Der nicht analysierte, verbleibende Rest von 7,3 Mass.-% beinhaltet die Stoffgruppen Fahrzeugteile, Flachglas, Metalle, Problemstoffe, Styropor und Sonstige Stoffe.

Tab. 17: Masseanteile der Analysestoffgruppen am Restmüll [Mass.-%]

Analysestoffgruppe	Masseanteil am Restmüll (feucht)
Feinfraktion	10,8
Mittelfraktion	16,3
Organik	25,2
Hygieneprodukte	13,2
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	5,8
Papier, Pappe, Kartonagen (PPK)	4,9
Glas	3,4
Textilien	2,7
Inertes	2,5
Verbundverpackungen	2,2
Sonstige Verbunde	1,5
Holz	1,2
Sonstige Kunststoffe	1,1
Renovierungsabfälle	0,6
Schuhe	0,5
Elektronikschrott	0,4
Leder, Gummi, Kork	0,3
Staubsaugerbeutel	0,2
gesamt	92,7

### 4.2.1 Physikalisch-chemische Eigenschaften

#### 4.2.1.1 Wassergehalt

Der Gesamtwassergehalt des untersuchten Restmülls beträgt 37,3 Mass.-%. Vier Fünftel des Wassergehalts tragen die Analysestoffgruppen Organik, Mittelfraktion, die zu hohen Anteilen aus Organik besteht, und Hygieneprodukte (vgl. Abb. 13) bei. In Abhängigkeit von der Verweilzeit in der Restmülltonne (Regel-, Bedarfsabfuhr) werden ursprünglich trockene Bestandteile des Restmülls (z. B. Papier, Pappe, Kartonagen) von stark wasserhaltigen Fraktionen (v. a. Organik, nicht vollständig entleerte Gebinde) mehr oder weniger infiltriert.

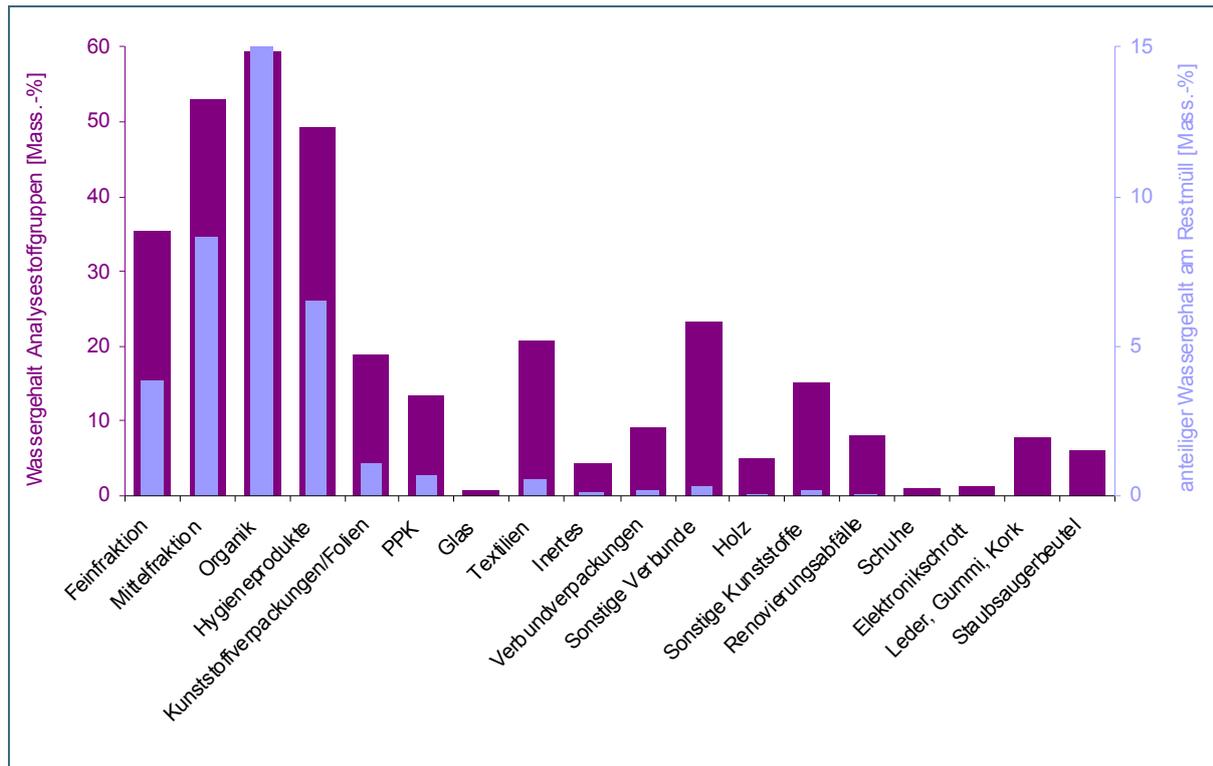


Abb. 13: Wassergehalte der einzelnen Analysestoffgruppen (linke Ordinate) und deren Beitrag zum Gesamtwassergehalt des Restmülls (rechte Ordinate).

Die Wassergehalte (bzw. Trockenrückstände) bilden mit der prozentualen Masseverteilung der Analysestoffgruppen im Originalzustand (vgl. Tab. 17) die Basis für die Berechnung sämtlicher analytischer Parameter für das Konglomerat Restmüll (Frachten).

#### 4.2.1.2 Glühverlust

Der Glühverlust der Analysestoffgruppen liegt – abgesehen von Feinfraktion, Glas und Inertem – jeweils über 58 Mass.-% (siehe Abb. 14). Im gesamten Restmüll beträgt er 70,1 Mass.-%; die Analysestoffgruppen Organik, Mittelfraktion und Hygieneprodukte tragen allein 47,2 Mass.-% zum (Gesamt-)Glühverlust bei.

D. h., bei der Verbrennung von 1 kg Restmüll (trocken) bleiben noch ca. 0,3 kg als nichtbrennbarer Rückstand zurück. Dieser Wert liegt in der Größenordnung von Rohschlackeanteilen (bezogen auf den Abfallinput) bei der thermischen Abfallbehandlung [51]. Ohne weitere Behandlung hält keine der untersuchten Analysestoffgruppen (mit Ausnahme von Glas und Inertem) das Zuordnungskriterium der AbfAbIV [52] für den Glühverlust von maximal 5 Mass.-% ein.

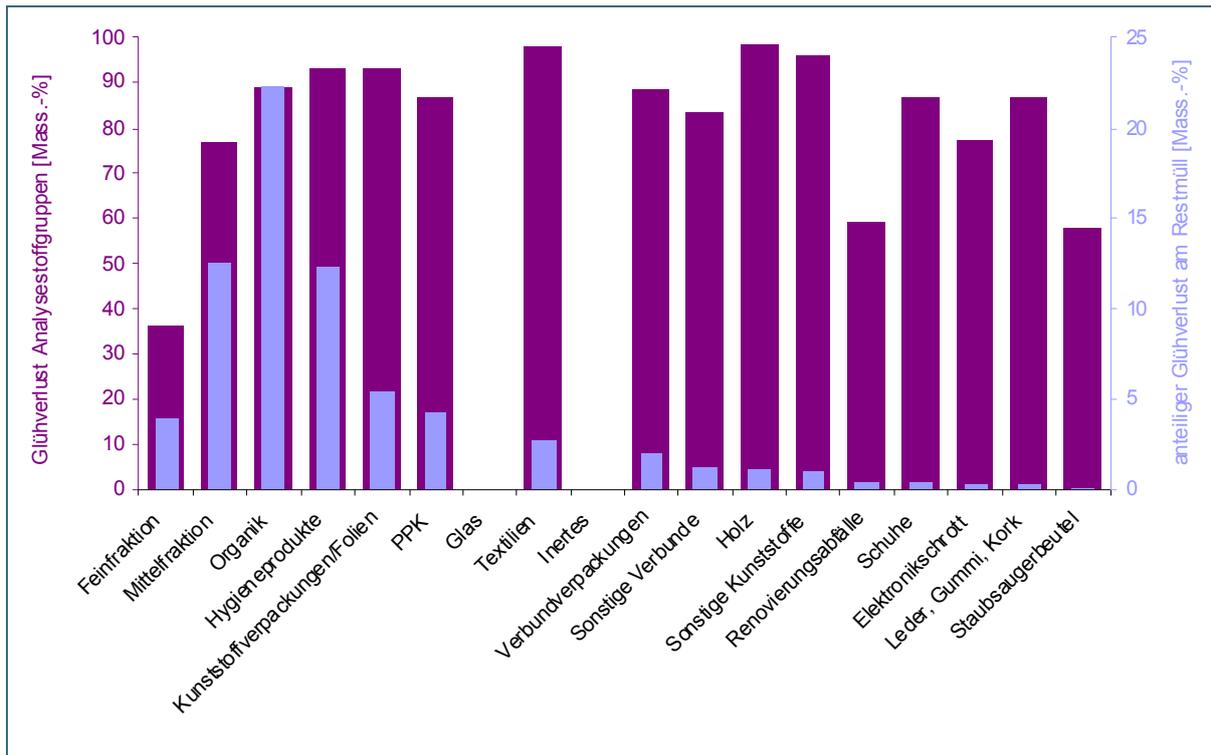


Abb. 14: Glühverluste der einzelnen Analysestoffgruppen (linke Ordinate) und deren Beitrag zum Gesamtglühverlust des Restmülls (rechte Ordinate).

#### 4.2.1.3 Heizwert

Bei den in Abbildung 15 dargestellten Heizwerten der Analysestoffgruppen ist der jeweilige Wassergehalt berücksichtigt.

Der Restmüll aus Haushalten weist im Mittel einen Heizwert von 8,4 MJ/kg auf, was dem Heizwert von Rohbraunkohle [53], einem niederkalorischen Brennstoff, entspricht. Nur Analysestoffgruppen, deren Masseanteil am Restmüll unter 6 Mass.-% liegt, besitzen Heizwerte von über 10 MJ/kg. Die höchsten Heizwerte wurden mit über 30 MJ/kg für Sonstige Kunststoffe und Kunststoffverpackungen inkl. Folien ermittelt. Neben diesen bestimmen jedoch aufgrund ihrer hohen Masseanteile auch die niederkalorischen Analysestoffgruppen wie Organik, Mittelfraktion und Hygieneprodukte maßgeblich den Energiegehalt des Restmülls.

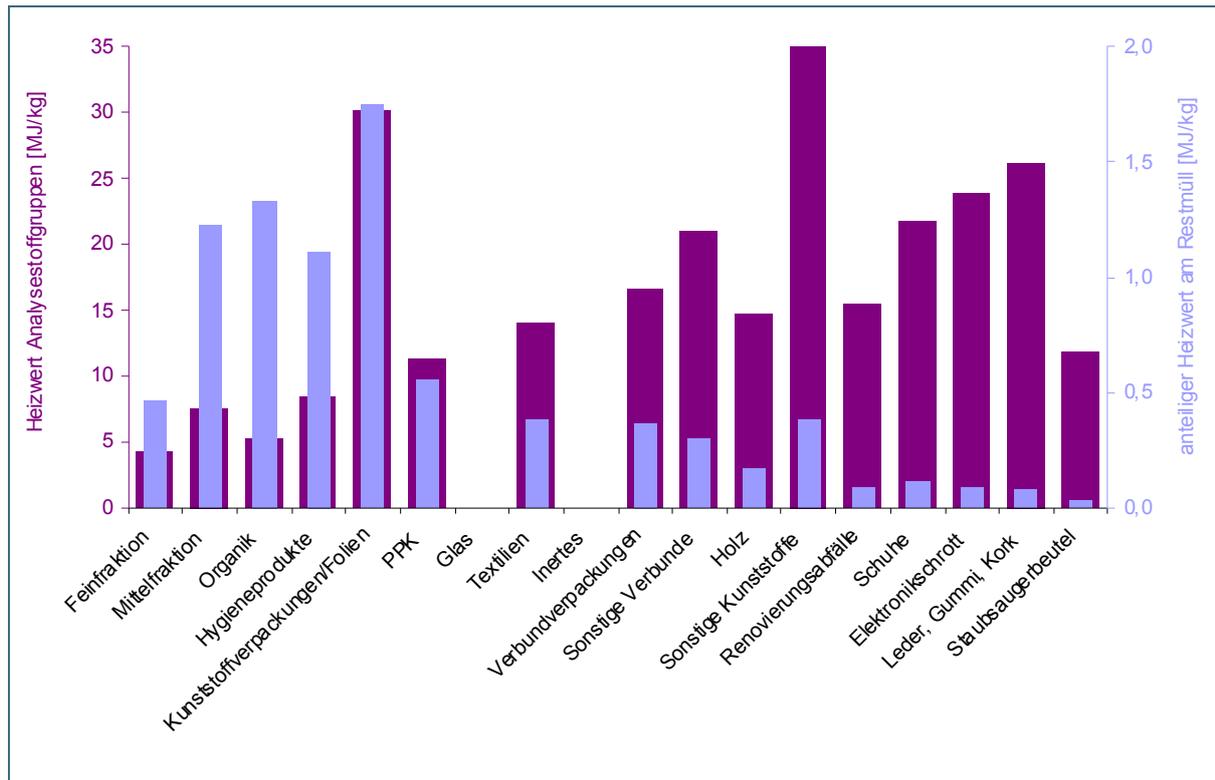


Abb. 15: Heizwerte der einzelnen Analysestoffgruppen (linke Ordinate) und deren Beitrag zum Gesamtheizwert des Restmülls (rechte Ordinate).

## 4.2.2 Anorganische Inhaltsstoffe

### 4.2.2.1 Kohlenstoff

Jedes Kilogramm Restmüll enthält 207 g Kohlenstoff, der nahezu ausschließlich organisch gebunden ist. Die höchsten Kohlenstoffkonzentrationen weisen die Analysestoffgruppen Sonstige Kunststoffe und Kunststoffverpackungen inkl. Folien auf; bedeutende Anteile im Restmüll liefern die Stoffgruppen Organik, Kunststoffverpackungen inkl. Folien, Mittelfraktion und Hygieneprodukte (siehe Tab. 18).

Das Ablagerungskriterium der AbfAbIV [51] von maximal 3 Mass.-% organisch gebundenem Kohlenstoffgehalt (TOC) halten ohne weitere Behandlung lediglich die Analysestoffgruppen Glas und Inertes ein.

Tab. 18: Kohlenstoffgehalte (anorganisch und organisch gebunden, gesamt) der Analysestoffgruppen (bezogen auf Trockenmasse) und von Restmüll (feucht) [Mass.-%].

Analysestoffgruppe	Trockenmasse			Restmüll (feucht)
	C <sub>anorganisch</sub>	C <sub>organisch</sub>	C <sub>gesamt</sub>	C <sub>gesamt</sub>
Feinfraktion	< 0,1	16,4	16,4	1,1
Mittelfraktion	< 0,1	39,2	39,3	3,0
Organik	< 0,1	41,9	41,9	4,3
Hygieneprodukte	< 0,1	41,3	41,3	2,8
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	< 0,1	68,5	68,6	3,4
Papier, Pappe, Kartonagen (PPK)	0,1	38,4	38,5	1,5
Glas	< 0,1	0,3	0,3	< 0,1
Textilien	< 0,1	46,8	46,8	1,0
Inertes	0,1	1,5	1,6	< 0,1
Verbundverpackungen	< 0,1	46,4	46,4	0,8
Sonstige Verbunde	< 0,1	49,9	50,0	0,7
Holz	< 0,1	45,3	45,3	0,4
Sonstige Kunststoffe	< 0,1	70,7	70,7	0,8
Renovierungsabfälle	0,1	38,0	38,1	0,2
Schuhe	< 0,1	52,5	52,6	0,2
Elektronikschrott	< 0,1	56,4	56,4	0,2
Leder, Gummi, Kork	< 0,1	56,8	56,8	0,1
Staubsaugerbeutel	< 0,1	31,3	31,3	< 0,1
Restmüll (feucht)				20,7

#### 4.2.2.2 Chlor, Phosphor, Schwefel, Stickstoff

In jedem Kilogramm Restmüll sind im Mittel 3,1 g Chlor, 0,8 g Phosphor, 2,1 g Schwefel und 6,7 g Stickstoff zu finden (vgl. Tab. 19).

Tab. 19: Chlor-, Phosphor-, Schwefel- und Stickstoffgehalte der Analysestoffgruppen (bezogen auf Trockenmasse) und von Restmüll (feucht) [mg/kg].

Analysestoffgruppe	Chlor	Phosphor	Schwefel	Stickstoff
Feinfraktion	6.012	2.262	3.478	9.043
Mittelfraktion	6.995	2.950	5.325	17.755
Organik	6.867	2.737	3.513	28.150
Hygieneprodukte	4.040	878	1.373	7.517
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	4.880	508	1.237	4.263
Papier, Pappe, Kartonagen (PPK)	1.208	331	853	3.753
Glas	592	300	501	55
Textilien	1.124	329	1.094	7.238
Inertes	730	453	27.077	628
Verbundverpackungen	2.880	397	920	4.432
Sonstige Verbunde	5.703	309	1.300	7.610
Holz	538	300	500	17.428
Sonstige Kunststoffe	33.153	340	1.563	8.610
Renovierungsabfälle	16.920	452	11.310	10.780
Schuhe	14.993	534	4.940	26.025
Elektronikschrott	9.437	300	771	19.312
Leder, Gummi, Kork	53.067	449	5.927	9.860
Staubsaugerbeutel	8.173	1.603	15.343	28.630
Restmüll (feucht)	3.114	816	2.069	6.668

In Hinblick auf die Abfallbehandlung ist besonders der Chlorgehalt als Ursache für Korrosionserscheinungen und für die Bildung von polychlorierten Dibenzodioxinen / -furanen (Müllverbrennung) von Interesse. Die höchsten Chlorgehalte wurden mit 53,1 g/(kg TM) in der Analysestoffgruppe Leder, Gummi, Kork bestimmt. Auch die Stoffgruppen Sonstige Kunststoffe mit 33,2 g/(kg TM), Renovierungsabfälle mit 16,9 g/(kg TM) und Schuhe mit 15,0 g/(kg TM) weisen hohe Chlorkonzentrationen auf. Einen wesentlichen Beitrag zum Gesamtchlorgehalt im Restmüll liefern aufgrund ihres Masseanteils die Analysestoffgruppen Organik, Mittel-, Feinfraktion und Sonstige Kunststoffe.

#### 4.2.2.3 Alkali- und Erdalkalimetalle

Von den Alkali- und Erdalkalimetallen wurden die Gehalte von Calcium, Kalium, Magnesium und Natrium im Restmüll ermittelt (vgl. Tab. 20). Insgesamt bestimmen diese Elemente 2,4 Mass.-% des Restmülls, wovon der Hauptteil mit 60 Mass.-% auf Calcium entfällt.

Tab. 20: Calcium-, Kalium-, Magnesium- und Natriumgehalte der Analysestoffgruppen (bezogen auf Trockenmasse) und von Restmüll (feucht) [mg/kg].

Analysestoffgruppe	Calcium	Kalium	Magnesium	Natrium
Feinfraktion	48.700	10.645	8.872	3.997
Mittelfraktion	24.017	10.640	2.843	3.432
Organik	10.970	8.877	< 2.000	3.063
Hygieneprodukte	8.577	2.793	< 2.000	5.097
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	13.167	1.777	< 2.000	2.363
Papier, Pappe, Kartonagen (PPK)	28.233	< 1.600	< 2.000	< 2.000
Glas	70.867	7.367	10.890	66.000
Textilien	2.627	< 1.600	< 2.000	< 2.000
Inertes	69.867	13.283	5.480	6.637
Verbundverpackungen	20.400	< 1.600	< 2.000	< 2.000
Sonstige Verbunde	11.760	1.767	2.120	2.443
Holz	2.243	< 1.600	< 2.000	< 2.000
Sonstige Kunststoffe	9.500	< 1.600	< 2.000	< 2.000
Renovierungsabfälle	90.033	2.540	2.790	< 2.000
Schuhe	36.700	< 1.600	< 2.000	2.457
Elektronikschrott	10.933	1.777	2.517	< 2.000
Leder, Gummi, Kork	42.400	< 1.600	2.137	< 2.000
Staubsaugerbeutel	28.500	7.783	2.720	4.660
Restmüll (feucht)	14.319	3.536	2.046	3.981

Die Haupt„quellen“ für Calcium, Kalium und Magnesium sind die „mineralischen“ Analysestoffgruppen Feinfraktion, Glas und Inertes sowie die Mittelfraktion. Natrium dagegen liegt in größeren Mengen nur in der Fraktion Glas vor.

#### 4.2.2.4 Schwermetalle

Aus der Reihe der Schwermetalle wurden exemplarisch die Elemente Blei, Cadmium, Chrom, Eisen, Kupfer, Mangan, Nickel, Quecksilber, Zink und Zinn betrachtet; der Quecksilbergehalt wurde aus einem Königswasseraufschluss mittels Atomabsorptionsspektrometrie (AAS), die anderen Schwermetalle in der Feststoffprobe mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) bestimmt.

In Tabelle 21 sind die ermittelten Schwermetallkonzentrationen in den trockenen Analysestoffgruppen sowie im feuchten Restmüll dargestellt.

Tab. 21: Schwermetallgehalte der Analysestoffgruppen (bezogen auf Trockenmasse) und von Restmüll (feucht) [mg/kg].

Analysestoffgruppe	Blei	Cadmium	Chrom	Eisen	Kupfer
Feinfraktion	209	< 5,0	162	20.058	69
Mittelfraktion	28	< 5,0	76	6.240	67
Organik	30	< 5,0	47	2.143	36
Hygieneprodukte	14	< 5,0	28	< 2.000	297
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	19	5,7	87	2.747	46
Papier, Pappe, Kartonagen (PPK)	22	< 5,0	25	2.067	41
Glas	2.424	< 5,0	463	2.010	41
Textilien	24	< 5,0	25	2.387	38
Inertes	3.327	5,3	100	12.933	69
Verbundverpackungen	10	< 5,0	24	< 2.000	183
Sonstige Verbunde	473	10,7	3.921	5.607	453
Holz	17	< 5,0	20	< 2.000	8
Sonstige Kunststoffe	273	12,3	48	2.203	122
Renovierungsabfälle	19	< 5,0	92	3.803	16
Schuhe	142	< 5,0	2.477	3.227	31
Elektronikschrott	790	5,3	298	2.757	7.760
Leder, Gummi, Kork	1.037	< 5,0	1.244	< 2.000	155
Staubsaugerbeutel	171	< 5,0	173	20.877	174
Restmüll (feucht)	201	3,0	117	3.123	80

Tab. 21 (Forts.): Schwermetallgehalte der Analysestoffgruppen (bezogen auf Trockenmasse) und von Restmüll (feucht) [mg/kg].

Analysestoffgruppe	Mangan	Nickel	Quecksilber	Zink	Zinn
Feinfraktion	865	62	0,10	306	21
Mittelfraktion	248	40	0,36	270	31
Organik	187	49	12,07 <sup>*)</sup>	77	32
Hygieneprodukte	181	18	1,28	150	32
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	< 150	23	1,43	117	30
Papier, Pappe, Kartonagen (PPK)	< 150	16	0,94	196	37
Glas	158	34	1,57	134	24
Textilien	< 150	16	2,60	163	28
Inertes	359	37	1,09	1.006	261
Verbundverpackungen	< 150	< 15	5,55	76	54
Sonstige Verbunde	194	48	2,37	1.746	34
Holz	156	< 15	0,56	68	32
Sonstige Kunststoffe	422	27	0,29	467	38
Renovierungsabfälle	< 150	31	0,82	792	30
Schuhe	< 150	25	2,45	2.163	32
Elektronikschrott	1.019	188	104,63	2.307	443
Leder, Gummi, Kork	< 150	25	2,70	3.833	19
Staubsaugerbeutel	515	59	1,44	545	78
Restmüll (feucht)	159	20	2,12 <sup>**)</sup>	169	24

<sup>\*)</sup> unplausibler Wert (siehe Abschnitt Quecksilber)

<sup>\*\*)</sup> erhöhter Wert aufgrund der unplausiblen Gehalte in der Analysestoffgruppe Organik

## Blei

Die Bleigehalte in den untersuchten Analysestoffgruppen liegen im Mittel zwischen 10 und 3.330 mg/(kg TM) und belaufen sich auf 201 mg/kg im (feuchten) Restmüll.

In Abbildung 16 sind die Bleigehalte der Analysestoffgruppen bezogen auf die Trockenmasse und auf den feuchten Restmüll gegenübergestellt.

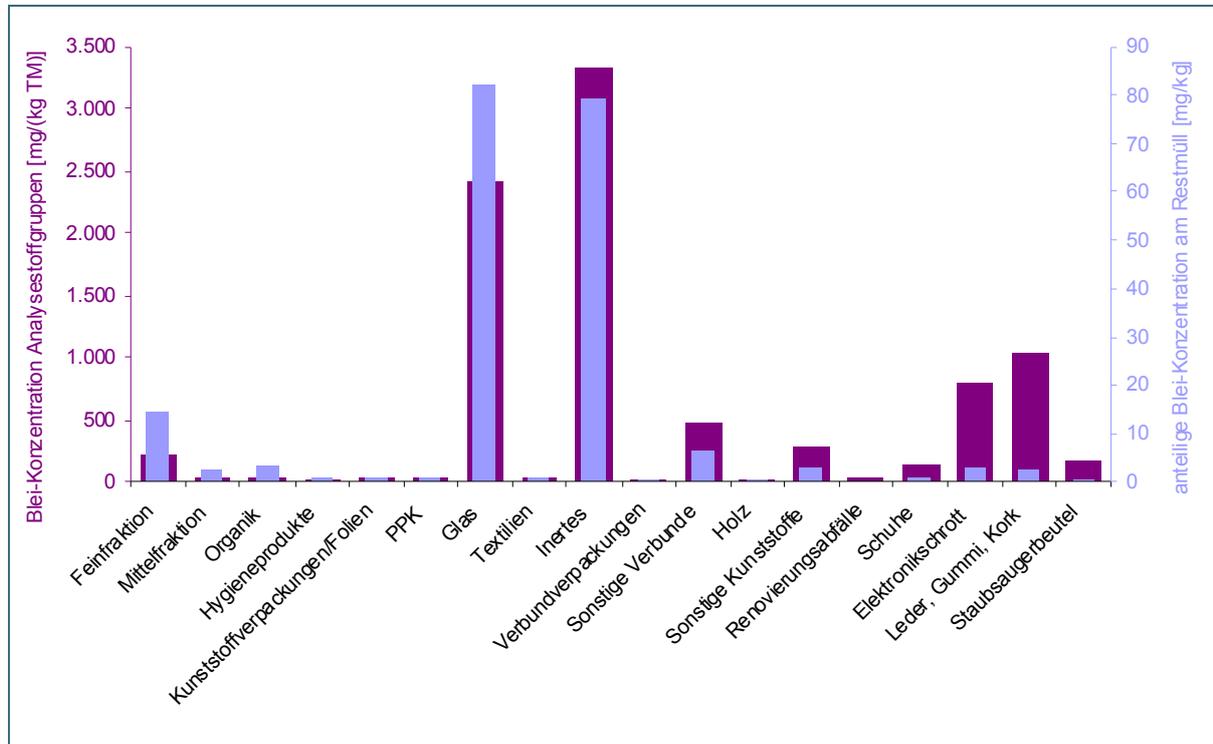


Abb. 16: Bleigehalte der einzelnen Analysestoffgruppen (linke Ordinate) und deren Beitrag zum Gesamtbleigehalt des Restmülls (rechte Ordinate).

Die Darstellung zeigt, dass die Analysestoffgruppen Inertes und Glas mit den höchsten Bleigehalten in der Trockenmasse (Promillebereich) auch den größten Anteil an der Bleifracht des Restmülls ausmachen, obwohl diese einstellige Masseanteile (2,5 bzw. 3,4 Mass.-%; vgl. Tab. 17) am Restmüll besitzen.

## Cadmium

Neben der Analysestoffgruppe Sonstige Kunststoffe (langlebige Kunststoffartikel) mit 12,3 mg zeigen auch die Sonstigen Verbunde mit 10,7 mg Cadmium je kg Trockenmasse vergleichsweise hohe Konzentrationen an Cadmium. Insgesamt wurde ein Cadmiumgehalt von 3,0 mg pro kg Restmüll (feucht) entsprechend 4,7 mg/(kg TM) ermittelt. Andere Autoren nennen für Restmüll Cadmiumgehalte von 1-6 mg/(kg TM) [54] und 0,3 mg/(kg TM) [55]. Bei der Bundesweiten Hausmüllanalyse von 1983 wurden noch 10–15 mg Cadmium pro kg trockenen Restmüll festgestellt [40].

## Chrom

Der Gesamtgehalt im Restmüll beträgt 117 mg/kg. Die höchsten Gehalte wurden in den Analysestoffgruppen Sonstige Verbunde, Schuhe und Leder, Gummi, Kork bestimmt.

Im Labor werden chromhaltige Legierungen wegen deren Korrosionsbeständigkeit vielfach verwendet.

Dies hat u. a. zur Folge, dass die von uns gezogenen Proben bei der Probenzerkleinerung zwangsläufig mit chromhaltigen Materialien in Berührung kommen. Das Ausmaß einer möglichen Chromkontamination durch die eingesetzten Schneidwerkzeuge konnte nicht quantifiziert werden, obwohl die Mahlwerkzeuge Abriebspuren aufwiesen.

### **Eisen**

Die untersuchten Analysestoffgruppen ergeben einen Eisengehalt von insgesamt circa 3,1 g Eisen pro kg Restmüll. Hauptmasseträger sind die Fein- und Mittelfraktion sowie Inertes, was bereits durch geogene Einträge begründet werden kann.

Bei der Ergebnisinterpretation ist zu berücksichtigen, dass zum einen stark eisenhaltige Analysestoffgruppen vor der Probenzerkleinerung mit Hilfe eines Magneten entschrottet wurden. Zum anderen wurden die maßgeblichen eisenhaltigen Fraktionen (Metallverpackungen und Sonstige Metalle) nicht beprobt (vgl. Abschnitt 3.4.1). Der tatsächliche Eisengehalt des Restmülls liegt daher erheblich über den Analysewerten; bei den ermittelten Werten handelt es sich um Mindestgehalte.

### **Kupfer**

Im Restmüll sind pro kg etwa 80 mg Kupfer {128 mg/(kg TM)} enthalten, wovon der Hauptanteil auf die Analysestoffgruppen Elektronikschrott und Hygieneprodukte entfällt. In [54] werden für Restmüll Gehalte von 124 – 795 mg/(kg TM) genannt; die vorliegenden Ergebnisse bewegen sich am unteren Ende dieses Bereichs.

### **Mangan**

Im Restmüll liegt ein Gehalt von 159 mg/kg vor. Den größten Beitrag dazu liefert mit einer Mangankonzentration von 865 mg/(kg TM) die Analysestoffgruppe Feinfraktion.

### **Nickel**

Der Gesamtgehalt an Nickel im Restmüll beträgt 20 mg/kg. Nickel kommt v. a. in den Analysestoffgruppen Organik, Fein- und Mittelfraktion vor. Wie auch Chrom wird Nickel insbesondere bei hochlegierten Stählen eingesetzt, die u. a. in den im Labor eingesetzten Zerkleinerungswerkzeugen Verwendung finden und eventuell mit dem Probengut in Berührung kommen. Auf eine Verfälschung der Analysewerte aufgrund von Abrieb bei der Probenaufbereitung – analog zu Chrom – kann jedoch nicht geschlossen werden, da im Vergleich zu [54] keine erhöhten Werte festgestellt wurden.

### **Quecksilber**

Die höchsten Quecksilbergehalte liegen in den Analysestoffgruppen Elektronikschrott und Organik vor. Die hohen Konzentrationen in der Stoffgruppe Organik {im Mittel 12,1 mg/(kg TM)} sind nicht plausibel, da bei vorangegangenen Untersuchungen gleicher Methodik für diese Stoffgruppe um zwei Größenordnungen niedrigere Quecksilbergehalte {0,04 mg/(kg TM) [8]; 0,14 mg/(kg TM) [9]} ermittelt wurden; die Ursache der hohen Werte ist nicht bekannt.

Insgesamt wurde für Restmüll aus Haushalten ein Quecksilbergehalt von 2,12 mg/kg bestimmt. Auch dieser Wert scheint aufgrund der unplausiblen Konzentrationen in der Analysestoffgruppe Organik zu hoch; die bisher ermittelten Restmüllgehalte lagen mit 0,12 mg/kg [8] bzw. 0,15 mg/kg [9] um eine Größenordnung niedriger.

Die Abbildung 17 zeigt die Verteilung der Quecksilbergehalte auf die einzelnen Analysestoffgruppen; aus o. g. Gründen sind die (unplausibel hohen) Werte für die Analysestoffgruppe Organik nicht dargestellt.

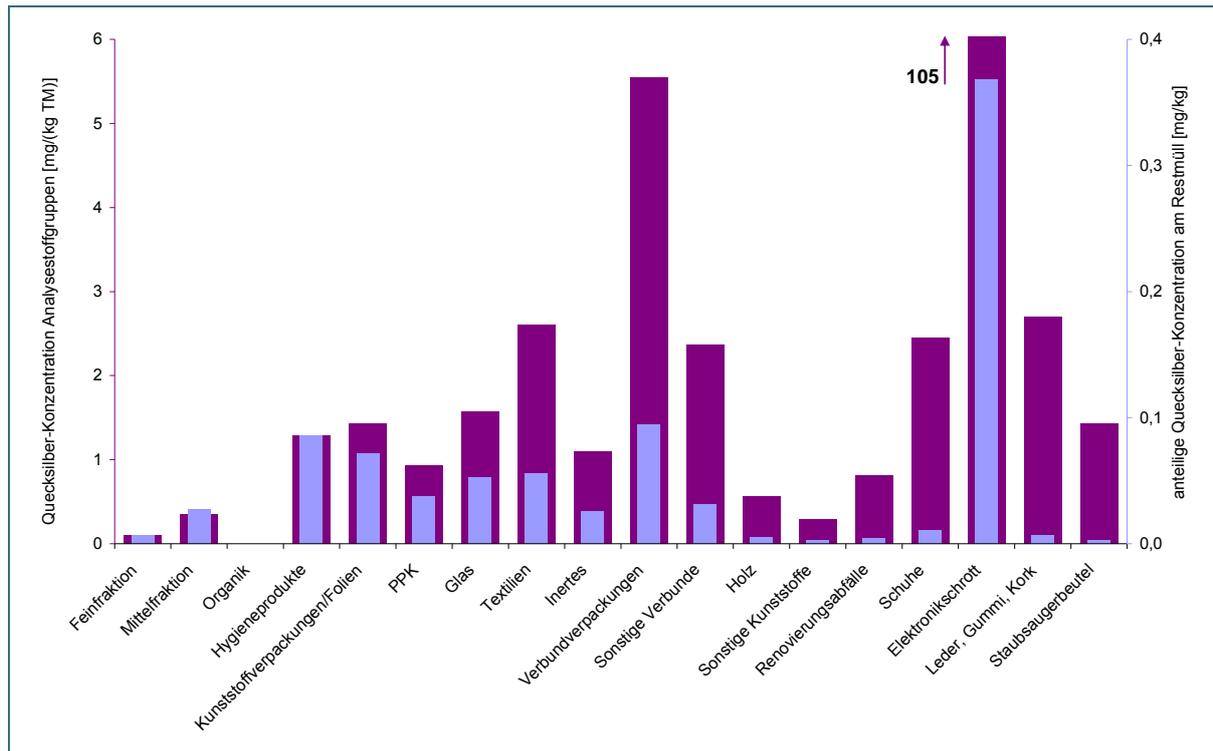


Abb. 17: Quecksilbergehalte der einzelnen Analysestoffgruppen außer Organik (linke Ordinate) und deren Beitrag zum Gesamtquecksilbergehalt des Restmülls (rechte Ordinate).

## Zink

Pro kg Restmüll sind insgesamt 169 mg Zink {269 mg/(kg TM)} enthalten. Im Vergleich zu [54], wo ein Wertebereich von 257 bis 2.207 mg/(kg TM) genannt wird, liegt dieser Wert im unteren Bereich. Im Restmüll tritt Zink vor allem in den Analysestoffgruppen Leder, Gummi, Kork, Elektronikschrott, Schuhe, Sonstige Verbunde und Inertes im Promillebereich auf.

## Zinn

Der Zinngehalt im Restmüll (feucht) beträgt 24 mg/kg; der tatsächliche Zinngehalt liegt aufgrund der nicht beprobten Stoffgruppe der Metalle (z. B. Konservendosen) mit Sicherheit höher. Erhöhte Konzentrationen treten in den Analysestoffgruppen Elektronikschrott und Inertes auf.

## Sonstige Metalle

Neben den im vorangegangenen Abschnitt behandelten Schwermetallen wurden noch weitere, mehr oder weniger umweltrelevante Metalle wie Aluminium, Arsen und Titan in den einzelnen Analysestoffgruppen bestimmt; vgl. Tabelle 22.

Tab. 22: Aluminium-, Arsen- und Titangehalte der Analysestoffgruppen (bezogen auf Trockenmasse) und von Restmüll (feucht) [mg/kg].

Analysestoffgruppe	Aluminium	Arsen	Titan
Feinfraktion	17.417	5,2	2.842
Mittelfraktion	< 15.000	< 5,0	1.660
Organik	< 15.000	< 5,0	< 1.000
Hygieneprodukte	< 15.000	< 5,0	< 1.000
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	< 15.000	< 5,0	8.687
Papier, Pappe, Kartonagen (PPK)	< 15.000	< 5,0	1.073
Glas	< 15.000	124,3	< 1.000
Textilien	< 15.000	< 5,0	1.253
Inertes	50.667	6,3	3.380
Verbundverpackungen	21.867	< 5,0	1.140
Sonstige Verbunde	< 15.000	17,7	1.537
Holz	< 15.000	< 5,0	1.243
Sonstige Kunststoffe	< 15.000	< 5,0	2.867
Renovierungsabfälle	< 15.000	< 5,0	2.590
Schuhe	< 15.000	< 5,0	2.773
Elektronikschrott	< 15.000	21,0	5.870
Leder, Gummi, Kork	< 15.000	< 5,0	2.870
Staubsaugerbeutel	< 15.000	< 5,0	1.617
Restmüll (feucht)	9.444	7,1	1.256

Der Aluminiumgehalt von Restmüll beträgt 9,4 g/kg. Hauptsächlich erfolgen Aluminiumeinträge in den Restmüll neben der nicht untersuchten Stoffgruppe NE-Metalle durch die Analysestoffgruppen Feinfraktion und Inertes (z. B. in Form von Alumosilikaten).

Der Arsengehalt im Restmüll beträgt 7,1 mg/kg; die höchste Arsenkonzentration wurde in der Analysestoffgruppe Glas bestimmt.

Im Restmüll findet man – auf alle Analysestoffgruppen verteilt, hauptsächlich in der Analysestoffgruppe Kunststoffverpackungen inkl. Folien – pro kg 1,3 g Titan.

### 4.2.3 Organische Inhaltsstoffe

Mit Ausnahme der Analysestoffgruppen Glas und Inertes wurden die organischen Schadstoffverbindungen an jeweils einer Einzelprobe (Fein- und Mittelfraktion: jeweils zwei Einzelproben) der 16 verbleibenden Stoffgruppen bestimmt. Ein größerer Probenumfang war im Projektzeitraum nicht realisierbar, da die Aufbereitung und Messung der Probenextrakte aufgrund der matrixspezifischen Quersensitivitäten einen großen analytischen Aufwand bedeutet (s. u.). In den folgenden Darstellungen werden die aktuellen Analyseergebnisse mit früheren Daten [8] verglichen; bei der Interpretation ist die unterschiedliche Analysenzahl zu berücksichtigen, d. h., die aktuellen Daten stellen im Vergleich zu den früher erhobenen eine Momentaufnahme dar.

#### 4.2.3.1 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

In Abbildung 18 sind die PAK-Konzentrationen (Summenwert der 16 PAK nach EPA) in den Analysestoffgruppen (bezogen auf Trockenmasse) im Vergleich zu den in [8, 29] ermittelten Werten dargestellt; aufgrund analytischer Schwierigkeiten bei den Stoffgruppen Verbundverpackungen und Renovierungsabfälle – die Probenmatrix ließ sich nicht hinreichend abtrennen – können für die genannten Stoffgruppen keine PAK-Gehalte angegeben werden.

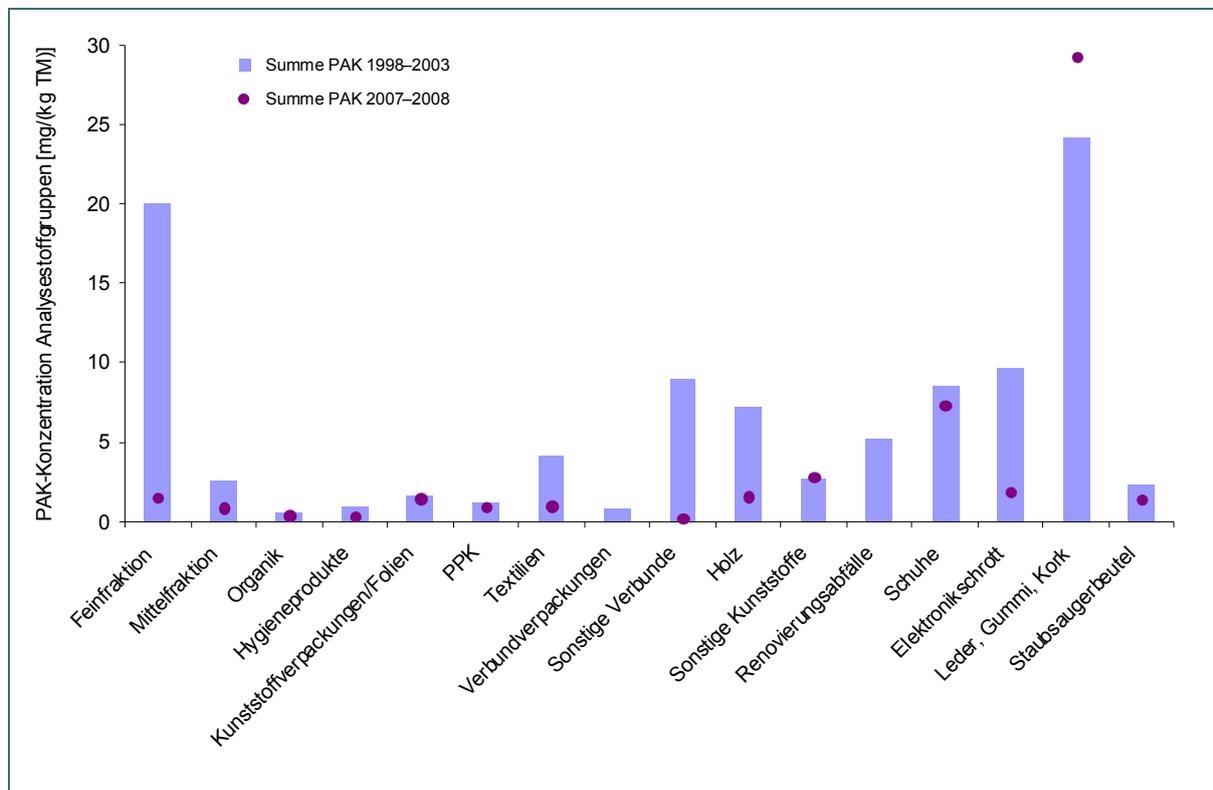


Abb. 18: PAK-Gehalte der einzelnen Analysestoffgruppen 2007–2008 im Vergleich zu den in [8, 29] ermittelten Werten

Die höchste PAK-Summenkonzentration von knapp 30 mg/(kg TM) wurde in der Analysestoffgruppe Leder, Gummi, Kork ermittelt. Im Restmüll beträgt der Gesamtgehalt an PAK nach EPA 0,52 mg/kg und liegt aufgrund des geringen Gehalts in der analysierten Feinfraktion deutlich unterhalb des bei früheren Untersuchungen ermittelten Werts [7] von 2,84 mg/kg.

#### 4.2.3.2 Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Von den 16 auf organische Schadstoffverbindungen zu untersuchenden Analysestoffgruppen wurden bislang elf auf polychlorierte Biphenyle und polychlorierte Dibenzodioxine / -furane analysiert; für die Analysestoffgruppen Leder, Gummi, Kork, Renovierungsabfälle, Sonstige Kunststoffe, Textilien und Verbundverpackungen stehen die Ergebnisse noch aus.

Hinsichtlich der sechs untersuchten Indikatorkongenere (PCB Nr. 28, 52, 101, 138, 153 und 180) wurden die höchsten PCB-Summengehalte für die Analysestoffgruppen Papier, Pappe, Kartonagen {94 µg/(kg TM)} und Holz {85 µg/(kg TM)} ermittelt (siehe Abb. 19). In Summe weist der analysierte Restmüll pro kg einen PCB-Gesamtgehalt von mindestens 7,7 µg {mindestens 12,3 µg/(kg TM)} auf. Zum Vergleich: In den Jahren 1972/1973 wurden im Restmüll Gehalte von 40 bis 9.700 µg/(kg TM), im Jahr 1989 in feuchtem Restmüll Gehalte von 500 µg/kg bestimmt [56]. Damit scheinen sich die PCB-Verbotsbestimmungen [23] im auch Restmüll widerzuspiegeln.

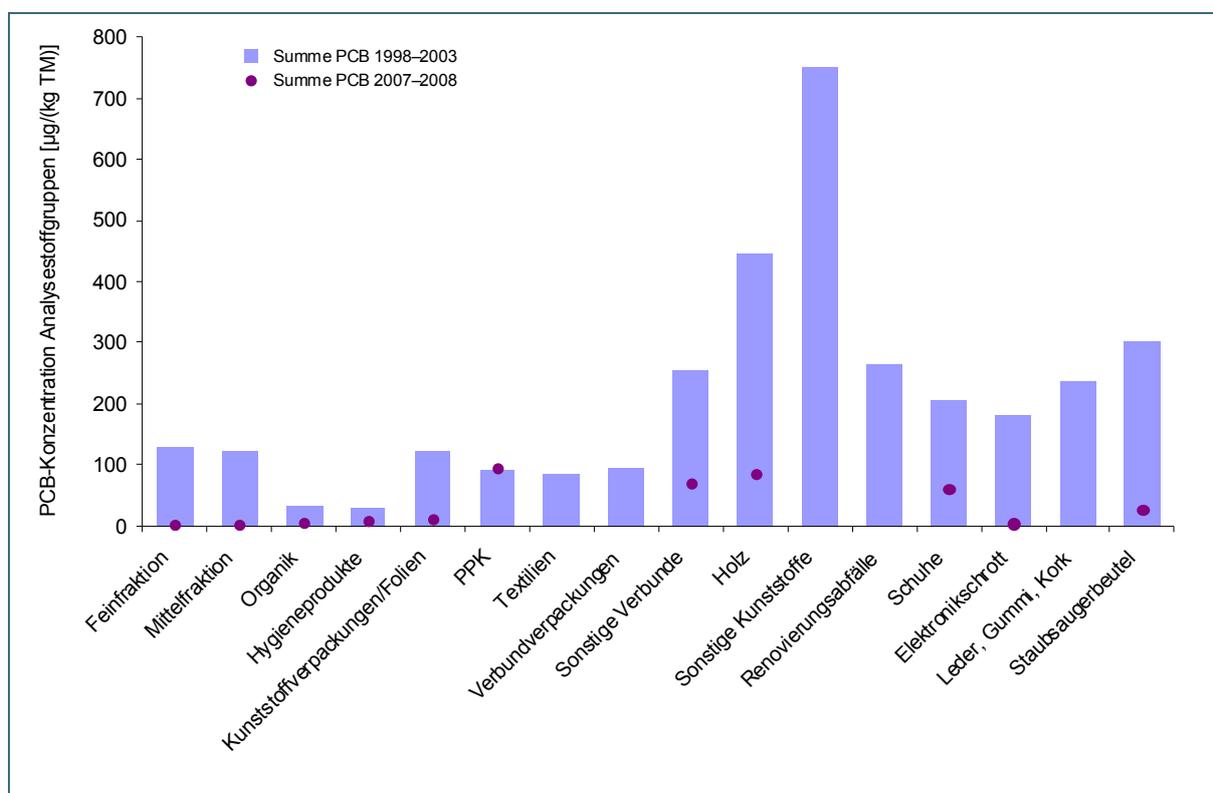


Abb. 19: PCB-Gehalte der einzelnen Analysestoffgruppen 2007–2008 im Vergleich zu den in [8, 29] ermittelten Werten

#### 4.2.3.3 Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F)

Die höchsten Summengehalte an polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen entsprechend der 17. BImSchV [33] wurden mit 150 ng I-TEQ/(kg TM) für die (trockene) Analysestoffgruppe Staubsaugerbeutel ermittelt (siehe Abb. 20). Insgesamt weist der feuchte Restmüll eine PCDD/F-Gesamtkonzentration von mindestens 2,0 ng I-TEQ/kg auf.

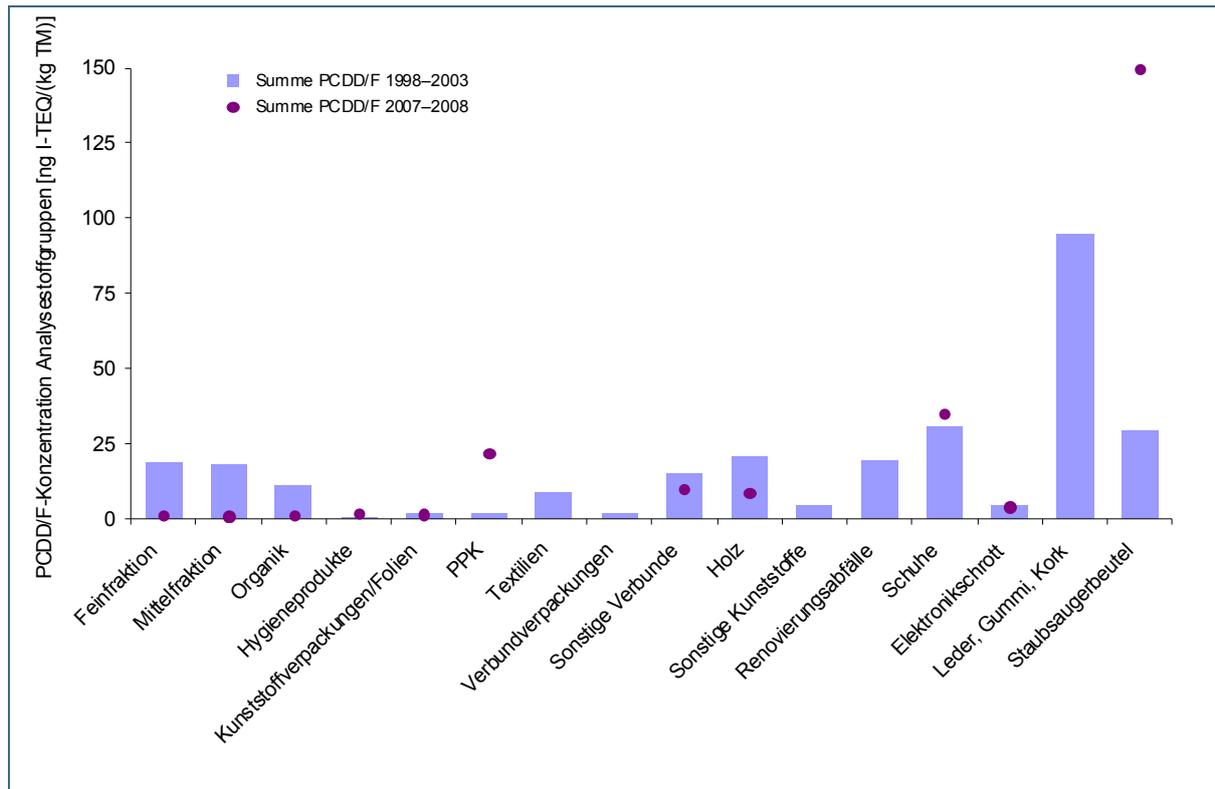


Abb. 20: PCDD/F-Gehalte der einzelnen Analysestoffgruppen 2007–2008 im Vergleich zu den in [8, 29] ermittelten Werten

Die Literaturangaben für PCDD/F-Gehalte im Restmüll bewegen sich von 10 bis 256 ng I-TEQ/kg und liegen im Mittel bei 50 ng I-TEQ/kg [57, 58, 59, 60]. Bei diesen Angaben handelt es sich um Untersuchungen aus den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts. Die Ergebnisse einer aktuellen spanischen Studie [61, 62], aus dem Jahr 2000 korrelieren durchaus mit den ermittelten Werten: bei der Probenahme aus unsortiertem Restmüll wurden PCDD/F-Gehalte von 2 bis 9 ng I-TEQ/kg, eine Probe mit 64 ng I-TEQ/kg ermittelt.

## 5 Untersuchung der Entsorgungswege neben der Restmülltonne

In einer der fünf Gebietskörperschaften (kreisfreie Stadt S7) wurden ergänzend zur bereits dargestellten Restmüllsortierung die Entsorgungswege von Abfällen aus Privathaushalten neben der Restmülltonne detaillierter untersucht [63]. Die Sortierungen und Sichtungen fanden im Anschluss an die Restmüllanalyse S7 im IV. Quartal 2007 statt; jahreszeitliche Einflüsse wurden nicht betrachtet. Die Stichprobenahmen der separat erfassten Wertstoffe fanden in den Untersuchungsgebieten der Restmüllanalyse statt, um zu den Restmüllkomplementäre Daten zu gewinnen.

### 5.1 Vorgehensweise

Die Untersuchung beinhaltete die wichtigsten dem Bürger zur Verfügung stehenden Erfassungssysteme für Abfälle aus Privathaushalten mit Ausnahme des bereits untersuchten Holsystems für Restmüll {Restmülltonne; 14-tägige Leerung; spezifisches Restmüllaufkommen: 134,7 kg/(E-a)}; in der Gebietskörperschaft S7 sind dies (vgl. Tab. 8 und 9):

- Holsystem für Papier, Pappe, Kartonagen (Papiertonne; 14-tägige Leerung)
- Holsystem für Leichtverpackungen aus Kunststoff, Metall und Verbundstoff (Gelber Sack; 14-tägige Abholung)
- Bringsystem für Behälterglas (Wertstoffhof, Depotcontainer)
- Bringsystem für Metallverpackungen (Wertstoffhof, Depotcontainer)

Die Wertstoffstichproben wurden je nach Wertstoffart manuell in unterschiedliche Fraktionen sortiert; das Behälterglas wurde gesichtet.

Wie bei den Restmüllsortierungen war es Ziel der Untersuchung, durch eine ähnliche Vorgehensweise vergleichbare Daten zu Wertstoffaufkommen und -zusammensetzung (insbesondere unter dem Aspekt der Wertstoffqualität: Unterscheidung in systemkonforme und fremde Anteile) zu erhalten.

Zusätzlich wurden an allen Depotcontainer-Standorten der Gebietskörperschaft die illegalen Ablagerungen protokolliert.

### 5.2 Ergebnisse

#### 5.2.1 Holsystem für Papier, Pappe, Kartonagen

Die PPK-Abfälle wurden mittels eines Handsiebes (Siebschnitt  $d_p < 40$  mm) klassiert und die Grobfraction manuell in sieben Stoffgruppen aus zwei Obergruppen sortiert:

- PPK (systemkonform): Druckerzeugnisse, Pappe- / Kartonagenverpackungen, Papierverpackungen, Sonstige Pappe / Kartonagen
- Störstoffe (systemfremd): Hygienepapiere, Verschmutzte PPK, Sonstige Abfälle

Das über die Papiertonne erfasste PPK-Aufkommen aus Haushalten beträgt 63,5 kg/(E-a). Demgegenüber liegt das PPK-Aufkommen im Restmüll mit 7,6 kg/(E-a) um den Faktor 8 niedriger.

In der Papiertonne liegen 97,8 Mass.-% an Papier, Pappe, Kartonagen vor. Störstoffe nehmen einen Masseanteil von 1,9 Mass.-% ein. Die Siebfraction  $d_p < 40$  mm fällt in geringer Masse (0,3 Mass.-%) an.

Im Unterschied zu anderen getrennt erfassten Wertstoffen liegt in der Papiertonne ein sehr hoher „Reinheitsgrad“ hinsichtlich der mit diesem Sammelsystem erfassten Wertstofffraktion vor.

### 5.2.2 Holsystem für Leichtverpackungen aus Kunststoff, Metall und Verbundstoff

Der Gelbe Sack und dessen Inhalt wurden mittels der Abfallsortieranlage in Fein-, Mittel- und Grobfraktion klassiert und die Grobfraktion in zehn Stoffgruppen manuell sortiert. Diese wurden vier Obergruppen zugeordnet:

- Leichtverpackungen (systemkonform): Kunststoff- / Verbundverpackungen, Gelbe Säcke
- Sonstige Verpackungen (systemfremd): PPK-, Metallverpackungen, Behälterglas
- Sonstige Wertstoffe (systemfremd): PPK-, Metall-Nichtverpackungen
- Störstoffe (systemfremd): Kunststoff-Nichtverpackungen, Sonstige Abfälle, Problemabfall

Die über den Gelben Sack erfasste Masse an Leichtverpackungen aus Haushalten liegt bei 19,7 kg/(E-a); dem steht ein LVP-Aufkommen im Restmüll von 7,2 kg/(E-a) gegenüber.

Die Hauptmasse bilden die systemkonformen Leichtverpackungen mit einem Anteil von 77,4 Mass.-%. Sonstige Verpackungen summieren sich auf 6,4 Mass.-%, Sonstige Wertstoffe auf 1,7 Mass.-%. Störstoffe nehmen insgesamt 12,9 Mass.-% ein; auf die Mittelfraktion entfallen 1,5 Mass.-%, auf die Feinfraktion 0,1 Mass.-%.

Der Gesamtgehalt an systemfremden Abfällen inkl. Fein- und Mittelfraktion beträgt 22,6 Mass.-%. Dazu liefern die als Restmüll zu entsorgenden Abfälle (Fein- und Mittelfraktion, Störstoffe) einen Beitrag von 14,5 Mass.-%.

### 5.2.3 Bringsystem für Behälterglas

Der Inhalt der Glascontainer wurde gesichtet. Der Volumenanteil an Störstoffen wurde getrennt für die Fraktionen Weiß- (= farbloses), Grün- und Braunglas erfasst; Fehlwürfe in Bezug auf die Glasfarbe wurden dabei nicht als Störstoffe eingestuft.

Der mittlere Volumenanteil an Störstoffen beträgt für Glas gesamt 0,56 Vol.-%. Bezogen auf die einzelnen Glassorten weist Grünglas den geringsten Störstoffanteil auf (0,29 Vol.-%), Braunglas den höchsten (1,73 Vol.-%). Die Anzahl und die Art der Störstoffe variieren je nach Glassorte; die meisten Störstoffe findet man im Weißglas.

### 5.2.4 Bringsystem für Metallverpackungen

Der Inhalt der Metallcontainer wurden unklassiert (vernachlässigbare Anteile an kleinstückigen Abfällen) manuell sortiert in:

- Metallverpackungen (systemkonform)
- Metall-Nichtverpackungen (systemfremd)
- Störstoffe (systemfremd)

Der Anteil an Metallverpackungen liegt bei 73,8 Mass.-%, an Metall-Nichtverpackungen bei 6,0 Mass. %. Der hohe Störstoffgehalt von 20,2 Mass.-% resultiert in erster Linie aus Fehlwürfen von (schwerem) Behälterglas. Für die Behälterglasfassung ist an allen Standorten unmittelbar neben dem Metallcontainer ein baugleicher Depotcontainer für Glas aufgestellt. Dies kann trotz eindeutiger Kennzeichnung u. U. eine Erklärung für die Fehlwürfe sein.

Damit handelt es sich bei über einem Viertel der mit dem Depotcontainer Metall erfassten Abfälle um systemfremde Stoffe.

### **5.2.5 Illegale Ablagerungen an Depotcontainer-Standorten**

Die Einteilung der neben den Depotcontainern abgelagerten Abfälle erfolgte anhand der im Bringsystem zu sammelnden Wertstoffe Behälterglas und Metallverpackung, der Rest wurde unter dem Begriff Sonstige Abfallstoffe zusammengefasst.

Das spezifische Aufkommen an illegal an den Containerstandorten abgelagerten Abfällen beträgt 0,25 kg/(E-a). Den Hauptanteil machen die Sonstigen Abfallstoffe mit 85,5 Mass.-% aus. Der Rest teilt sich auf die mit Containern zu sammelnden Wertstoffe Behälterglas (9,8 Mass.-%) und Metallverpackungen (4,7 Mass.-%) auf.

Künftige Untersuchungen mit dem Fokus einer ganzheitlichen Betrachtungsweise erfordern aufbauend auf den aktuellen Ergebnissen eine Detailoptimierung der Methodik. Hierzu ist es v. a. notwendig, für alle Abfallströme an Stelle von Sichtungs- Sortierdaten zu erheben, um sämtliche Stoffströme für die Verwertungs- bzw. für die Entsorgungsschiene belastbar quantifizieren zu können.



## 6 Öffentlichkeitsarbeit

Verschiedene Aktivitäten prägten die Öffentlichkeitsarbeit zu dem Projekt. Öffentlichkeitswirksame Termine mit Repräsentanten der Gebietskörperschaften und Abfallzweckverbände waren ein fester Bestandteil, um den Bürger vor Ort über das EFRE-Vorhaben und die Ergebnisse der Sortieranalysen zu informieren.

In allen fünf untersuchten Gebietskörperschaften fanden während der zweiten Sortierwoche (Sommersortierung) Pressetermine statt. Dabei wurde die Vorgehensweise bei der Restmüllsortierung erläutert und erste Ergebnisse vorgestellt. Die lokale Presse berichtete ausführlich darüber; in einem Fall (Landkreis L23) brachte ein überregionaler Sender einen mehrminütigen Rundfunkbeitrag.

Im Vorfeld der Sommersortierung in der kreisfreien Stadt S8 fand ein Wertstoffhoffest statt, das über 5.000 Bürger besuchten. Dort wurde die Restmüllsortierung mit der mobilen Abfallsortieranlage „live“ demonstriert sowie die Arbeiten und (Zwischen-)Ergebnisse des laufenden Vorhabens erläutert.

Zum Abschluss der operativen Durchführung der Restmüllsortierungen gab das Bayerische Landesamt für Umwelt eine Pressemitteilung heraus, die in Fachkreisen auf gute Resonanz stieß.

Die Ergebnisse der Sonderuntersuchung in der kreisfreien Stadt S7 wurden bei einer Dienstbesprechung der Abfallberater des zugehörigen Regierungsbezirks präsentiert und mit den Abfallberatern diskutiert.



## 7 Literatur

- [1] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT:  
Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2006 – Informationen aus der Abfallwirtschaft.  
Augsburg 2007, 86 S.
- [2] ANONYM:  
Vierte Verordnung zur Änderung der Verpackungsverordnung vom 30. Dezember 2005.  
BGBl. I (2006) 1, S. 2–5
- [3] ANONYM:  
Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG). Vom 16. März 2005. BGBl. I (2005) 17, S. 762–774  
<http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/elektrog.pdf>
- [4] ANONYM:  
Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und sonstigen Entsorgung von Abfällen in Bayern (Bayerisches Abfallwirtschaftsgesetz – BayAbfG). Vom 9. August 1996.  
GVBl (1996) 18, S. 396–404; zuletzt geändert am 05.04.2006, GVBl (2006) 7, S. 178–179
- [5] BAGHOORN, M.; GÖSSELE, P.; KAWORSKI, W.:  
Bundesweite Hausmüllanalyse 1983–1995. Auftrag des Umweltbundesamtes an die TU Berlin.  
UBA-Forschungsbericht 103 03 508.  
Berlin 1986, 317 S.
- [6] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN:  
Abfallwirtschaft – Hausmüll in Bayern – Bilanzen 1988/89 und Ausblick.  
München 1991, 66 S.
- [7] AMANN, H.:  
Menge und Zusammensetzung von Hausmüll in Bayern in den Jahren 1992 bis 1996.  
Diplomarbeit Fachhochschule München, München 1998, 87 S.
- [8] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT:  
Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen. Abschlussbericht.  
Augsburg 2003, 76 S.  
[http://www.bestellen.bayern.de/application/stmugv\\_app000008?SID=1807150586&ACTIONxSESxSHOWPIC\(BILDxKEY:ifu\\_abfall\\_00096,BILDxCLASS:Artikel,BILDxTYPE:PDF\)=X](http://www.bestellen.bayern.de/application/stmugv_app000008?SID=1807150586&ACTIONxSESxSHOWPIC(BILDxKEY:ifu_abfall_00096,BILDxCLASS:Artikel,BILDxTYPE:PDF)=X)
- [9] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT:  
Restmüllzusammensetzung in Phasing-Out-Gebieten (EU Ziel-2-Programm Bayern): Abschöpfbares Wertstoffpotenzial als Funktion abfallwirtschaftlicher Rahmenbedingungen. Schlussbericht.  
Augsburg 2007, 69 S.
- [10] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, VERKEHR UND TECHNOLOGIE:  
EU-Regionalförderung, Ziel-2-Programm Bayern 2000–2006.  
[http://www.stmwivt.bayern.de/EFRE\\_2000-2006/Dokumente/EU-Regionalforderung.pdf](http://www.stmwivt.bayern.de/EFRE_2000-2006/Dokumente/EU-Regionalforderung.pdf)
- [11] BILITEWSKI, B.; HÄRDTLE, G.; MAREK, K.:  
Abfallwirtschaft – Eine Einführung.  
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1991, 634 S.

- [12] EDER, G.; BARGHOORN, M.; BREY, E.; DOBERSTEIN, J.; FUCHS, J.; GÖSSELE, P.:  
Einflussgrößen bei häuslichen Abfällen. Auftrag des Umweltbundesamtes an die TU-Berlin. UBA-  
Forschungsbericht 103 03 503.  
Erich Schmidt Verlag, Berlin 1983, 151 S.
- [13] ABBE, A.; POHLMANN, M.; SCHIETINGER, G.; STRETZ, J.; ZACHÄUS, D.:  
Zusammenführung und gemeinsame Auswertung von Hausmüllanalysen.  
Abfallwirtschaftsjournal (1998) **3**, S. 17–21
- [14] NOLTING, B.:  
Restmüllanalyse im Landkreis Schweinfurt. Auftrag des Landkreises Schweinfurt an die ARGUS.  
Berlin 1996, 43 S.
- [15] ANONYM:  
Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz.  
Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsab-  
fällen – TA Siedlungsabfall. Vom 14. Mai 1993.  
BAnz. **45** (1993), S. 3–51
- [16] VERBAND KOMMUNALER FUHRPARKS UND STADTREINIGUNGSBETRIEBE (VKF), HEUTE: VERBAND KOM-  
MUNALE ABFALLWIRTSCHAFT UND STADTREINIGUNG E. V. (VKS):  
Merkblatt M1–4: Müllanalysen.  
Köln 1964
- [17] THÜRINGER MINISTERIUM FÜR UMWELT UND LANDESPLANUNG:  
Merkblatt zur Durchführung von Hausmüllanalysen.  
St. Anz. (1993) **20**, S. 767–768
- [18] LANDESUMWELTAMT BRANDENBURG:  
Richtlinie für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Menge und Zusam-  
mensetzung fester Siedlungsabfälle im Land Brandenburg. Teil I. In: Müll-Handbuch: Sammlung  
und Transport, Behandlung und Ablagerung sowie Vermeidung und Verwertung von Abfällen,  
Band **2**. Hrsg.: Hösel, G.; Bilitewski, B.; Schenkel, W.; Schnurer, H..  
Erich Schmidt Verlag, Berlin. Kennzahl 1706, Lfg 7/99, 24 S.
- [19] SÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE:  
Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen.  
Dresden 1998
- [20] LANDESUMWELTAMT NORDRHEIN-WESTFALEN:  
Leitfaden für die Analyse zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung von Abfällen aus  
Haushaltungen.  
Materialien Nr. **47**, Essen 1998, 127 S.
- [21] ANONYM:  
Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung  
von Abfällen (KrW-/AbfG – Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz). Vom 27. September 1994.  
BGBl. I (1994) **66**, S. 2705–2728; zuletzt geändert am 21.08.2002, BGBl. I (2002) **59**,  
S. 3302-3317

- [22] ANONYM:  
Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren (Batterieverordnung – BattV). Fassung vom 2. Juli 2001.  
BGBl. I (2001) **33**, S. 1486–1491; zuletzt geändert am 09.09.2001, BGBl. I (2001) **47**, S. 2331-2339
- [23] 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) **39**, S. 1151–1166, 1498; zuletzt geändert am 19.05.2003, BGBl. I (2003) **20**, S. 712–714
- [24] THOMÉ-KOZMIENZKY, K.J.:  
Thermische Abfallbehandlung.  
EF-Verlag, Berlin 1994, 1081 S.
- [25] BANK, M.:  
Basiswissen Umwelttechnik, 3. aktualisierte und erw. Auflage.  
Vogel-Verlag, Würzburg 1995, 1429 S.
- [26] MAYSTRE, L.Y.; VIRET, F.:  
A goal-oriented characterization of urban waste.  
Waste Management & Research **13** (1995), S. 207–218
- [27] ROTTER, S.:  
Schwermetalle in Haushaltsabfällen – Potenzial, Verteilung und Steuerungsmöglichkeiten durch Aufbereitung. Dissertation an der Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden. Hrsg.: Bilitewski, B.; Werner, P. Schriftenreihe des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten der TU Dresden, Band **27**, 1. Auflage.  
Dresden 2002, 119 S. + Anhang
- [28] KOST, T.:  
Brennstofftechnische Charakterisierung von Haushaltsabfällen.  
Dissertation an der Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden. Hrsg.: Bilitewski, B.; Weltin, D.; Werner, P.. Schriftenreihe des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten der TU Dresden, Band **16**, 1. Auflage.  
Dresden 2001, 135 S. + Anhang
- [29] WEIGAND, H.; MARB, C:  
Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Restmüll aus Haushaltungen – Teil III: Physikalisch-chemische Eigenschaften und Schadstoffgehalte.  
Müll und Abfall **38** (2006) **5**, S. 236–246
- [30] MAST, P.-G.; SÜßKRAUT, G.; VAN DEN ELSSEN, H.; STEKETEE, J.; DUZIJJIN, R.:  
Einfluss der Abfallzusammensetzung auf Schadstoffgehalt und -menge der Verbrennungsrückstände. Auftrag des Umweltbundesamtes an die TauwUmwelt GmbH. UBA-Forschungsbericht 103 1090.  
Berlin 1996

- [31] BLUME, J.:  
Die optimale Restmüllentsorgungstechnologie: biologisch und/oder thermisch?  
Müll und Abfall **28** (1996) **3**, S. 157–168
- [32] HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT (HRSG.):  
Systemvergleich Restabfallbehandlung.  
Schriftenreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt: Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Heft 167.  
Wiesbaden 1994
- [33] ANONYM:  
Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe – 17. BImSchV). Vom 23. November 1990.  
BGBl. I (1990) **64**, S. 2545–2553, ber. BGBl. I (1990) **70**, S. 2832; zuletzt geändert BGBl. I (2001) **40**, S. 1950–2022
- [34] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (HRSG.):  
Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen und chemischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Beseitigung von Abfällen – PN 2/78K – Grundregeln für die Entnahme von Proben aus Abfällen und abgelagerten Stoffen. Stand: 12/83. In: Müll-Handbuch. Hrsg. Hösel, G.; Bilitewski, B.; Schenkel, W.; Schnurer, H.. Band **3**, Kennzahl 1859, S. 1  
Erich Schmidt Verlag, Berlin
- [35] LÄNDERARBEITSGEMEINSCHAFT ABFALL (HRSG.):  
Richtlinie für das Vorgehen bei physikalischen, chemischen und biologischen Untersuchungen im Zusammenhang mit der Verwertung/Beseitigung von Abfällen. LAGA PN 98 – Grundregeln für die Entnahme von Proben aus festen und stichfesten Abfällen sowie abgelagerten Materialien.  
Dezember 2001. Fassung 2002.  
StAnz. Nr. **23** vom 09.06.2003, S. 2288
- [36] CUHLS, C.; SCHÖNEBORN, C.; KRAUS, M.; JAEKEL, F.; SCHNOOR, E.:  
Untersuchung von Elektro-Kleingeräten im Siedlungsabfall mit RFA, ICP-AES, ICP-MS und AAS – ein Methodenvergleich.  
Müll und Abfall **31** (1999) **12**, S. 716–727
- [37] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, VERKEHR UND TECHNOLOGIE:  
Liste der unter Ziel 2 der Strukturfonds in Bayern förderfähigen Gebiete. Zeitraum 2000 bis 2006.  
[http://www.stmwivt.bayern.de/EFRE\\_2000-2006/Dokumente/foerdergebiete.pdf](http://www.stmwivt.bayern.de/EFRE_2000-2006/Dokumente/foerdergebiete.pdf)
- [38] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT:  
Ergebnisse dreier Hausmüllsortierkampagnen Nov./Dez. 2004. (Interner) Endbericht.  
Augsburg 2005, 43 S.
- [39] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT:  
Restmüllsortieranalysen 1998/99, 2002 und 2004/05. (Interner) Bericht.  
Augsburg 2005, 30 S.

- [40] GREINER, B.; BARGHOORN, M.; DOBBERSTEIN, J.; EDER, G.; FUCHS, J.; GÖSSELE, P.:  
Chemisch-physikalische Analyse von Hausmüll. Auftrag des Umweltbundesamtes an die TU Berlin. UBA-Forschungsbericht 83-033.  
Berlin 1983, 161 S.
- [41] BIDLINGMAIER, W.:  
Schwermetalle im Hausmüll: Herkunft, Schadwirkung, Analyse.  
Erich Schmidt Verlag, Berlin 1990
- [42] SCHÄFER, M.; HOFFMANN, E.:  
Schadstoffe in Biomüll.  
Entsorgungspraxis (2000) **4**, S. 15–19
- [43] ANONYM:  
DIN 38 414-22: Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Teil 22: Bestimmung des Gefriertrockenrückstandes und Herstellung der Gefriertrocknungsmasse des Schlammes (S 22).  
September 2000
- [44] ANONYM:  
DIN 38 414-3: Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Teil 3: Bestimmung des Glührückstandes und Glühverlustes der Trockenmasse eines Schlammes (S3).  
November 1985
- [45] ANONYM:  
DIN 51 900 1–3: Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes.  
August 1977, zuletzt geändert April 2000
- [46] ANONYM:  
DIN 38 406-12: Kationen (Gruppe E) – Teil 12: Bestimmung von Quecksilber (E12).  
Juli 1980
- [47] ANONYM:  
DIN 38 414-7: Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Teil 7: Aufschluss mit Königswasser zur nachfolgenden Bestimmung des säurelöslichen Anteils von Metallen (S7).  
Januar 1983
- [48] ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY:  
Polynuclear Aromatic Hydrocarbons – Method 610.  
Federal Register **44** (1979) **233**, S. 69514–69517
- [49] 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
- [50] WEIGAND, H.; MARB, C.:  
Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Restmüll aus Haushaltungen – Teil II: Restmüllzusammensetzung als Funktion von Siedlungsstruktur und Abfallwirtschaftssystem.  
Müll und Abfall **37** (2005) **10**, S. 522–530

- [51] KNORR, W.; HENTSCHEL, B.; MARB, C.; SCHÄDEL, S.; SWEREV, M.; VIERLE, O.; LAY, J.P.:  
Rückstände aus der Müllverbrennung – Chancen für eine stoffliche Verwertung von Aschen und Schlacken. Hrsg.: Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Reihe Initiativen zum Umweltschutz, Band **13**.  
Erich Schmidt Verlag, Berlin 1999, 258 S.
- [52] ANONYM:  
Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallablagerungsverordnung – AbfAbIV). Vom 20. Februar 2001.  
BGBl. I (2001) **10**, S. 305–324; zuletzt geändert BGBl. I (2006) **59**, S. 2859–2873
- [53] THOMÉ-KOZMIENSKY, K.J.:  
Verfahren und Stoffe in der Kreislaufwirtschaft.  
EF-Verlag, Berlin 1995, 1089 S.
- [54] MAST, P.-G.; SÜßKRAUT, G.; VAN DEN ELSEN, H.; STEKETEE, J.; DUZIJIN, R.:  
Einfluss der Abfallzusammensetzung auf Schadstoffgehalt und -menge der Verbrennungsrückstände. Auftrag des Umweltbundesamtes an die TauwUmwelt GmbH. UBA-Forschungsbericht 103 1090.  
Berlin 1996
- [55] SPUIZIAK-SALZENBERG, D.; RIEMER, S.; BAYLEY-BLECKWEDEL, B.; BÄR G.:  
Probenaufbereitungssystem zur Qualitätssicherung für Abfälle zur energetischen (stofflichen) Verwertung.  
Entsorgungspraxis (1998) **10**, S. 36–40
- [56] WILKEN, M.; ZESCHMAR-LAHL, B.:  
Menge und Zusammensetzung der festen Abfälle – Schadstoffe in festen Abfällen. In: Müll-Handbuch. Hrsg. Hösel, G.; Bilitewski, B.; Schenkel, W.; Schnurer, H.. Band **3**, Kennzahl 1752, S. 1  
Erich Schmidt Verlag, Berlin
- [57] THOMÉ-KOZMIENSKY, K.J.:  
Verfahren und Stoffe in der Kreislaufwirtschaft.  
EF-Verlag, Berlin 1995, 1089 S.
- [58] WILKEN, M.; CORNELSEN, B.; ZESCHMAR-LAHL, B.; JÄGER, J.:  
Distribution of PCDD/PCDF and other organochlorine compounds in different municipal solid waste fractions.  
Chemosphere **25** (1992) **7–10**, S. 1517–1523
- [59] SPAHL, R.; DORN, I.H.; HORN, H.C.; HESS, K.:  
Katalytische Dioxinzerstörung für Abfallverbrennungsanlagen.  
Entsorgungspraxis (1993) **5**, Sonderdruck
- [60] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN:  
Dioxine und Furane. Erstellt vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz. 1. Auflage.  
München 1993

- [61] ABAD, E.; ADRADOS, M.A.; CAIXACH, J.; FABRELLAS, B.; RIVERA, J.:  
Dioxin mass balance in a municipal waste incinerator.  
*Chemosphere* **40** (2000), S. 1143–1147
- [62] ABAD, E.; ADRADOS, M.A.; CAIXACH, J.; RIVERA, J.:  
Dioxin Abatement Strategies and Mass Balance at a Municipal Waste Management Plant.  
*Environmental Science & Technologies* **36** (2002) **1**, S. 92–99
- [63] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT:  
Untersuchung der Entsorgungswege neben der Restmülltonne. (Interner) Bericht.  
Augsburg 2008, 27 S.

