

---

Abschlussbericht

# Zusammensetzung und Schadstoff- gehalt von Siedlungsabfällen

---

Bayerisches Landesamt  
für Umweltschutz



**Augsburg, 2003 ISBN – 3-936385-42-4**

Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umweltschutz  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160, 86179 Augsburg  
Tel.: (0821) 9071 – 0  
Fax: (0821) 9071 – 5556  
E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: <http://www.bayern.de/lfu>

Redaktionelle Bearbeitung : Hildegard Rothe

Projektleiter: Dr.-Ing. Clemens Marb  
Bearbeiter: Ines Przybilla, geb. Vorndran (01.09.1998 – 12.03.2001)  
Franz Neumeyer (29.01.2001 – 31.05.2001)  
Janet Fripan (01.04.2001 – 31.03.2003)

Bayerisches Landesamt für Umweltschutz  
Josef-Vogl-Technikum  
Am Mittleren Moos 46, 86167 Augsburg  
Tel.: (0821) 7000 - 290  
Fax: (0821) 7000 - 299  
E-Mail: [josef-vogl-technikum@lfu.bayern.de](mailto:josef-vogl-technikum@lfu.bayern.de)

Zitiervorschlag:  
Bayer. Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.):  
Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen

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

© Bayerisches Landesamt für Umweltschutz, Augsburg 2003

# Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung .....	3
1	Einleitung .....	5
2	Stand des Wissens .....	7
2.1	Abfallzusammensetzung.....	7
2.2	Untersuchungen der Inhaltsstoffe .....	9
3	Material und Methoden.....	11
3.1	Restmüllsortierung .....	11
3.1.1	Allgemeines .....	11
3.1.2	Stichprobenplanung.....	11
3.1.3	Sortierung .....	12
3.1.4	Auswertung der Daten und Hochrechnung .....	14
3.2	Auswahl der Gebietskörperschaften.....	15
3.3	Mobile Abfallsortieranlage .....	17
3.4	Analytik.....	18
3.4.1	Analysestoffgruppen .....	18
3.4.2	Probenahme und Probenvorbereitung.....	19
3.4.3	Analysemethoden.....	21
3.4.4	Auswertung.....	23
4	Ergebnisse und Diskussion.....	25
4.1	Restmüllzusammensetzung.....	25
4.1.1	Datenbestand .....	25
4.1.2	Abfallzusammensetzung.....	26
4.1.3	Verpackungen .....	28
4.1.4	Behälterspezifische Daten.....	30
4.1.5	Restmüllaufkommen in Abhängigkeit von demographischen Einflussfaktoren .....	31
4.1.5.1	Kategorie Landkreis/Stadt.....	31
4.1.5.2	Kategorie Einwohnerstrukturklassen.....	32
4.1.5.3	Kategorie Gebietsstrukturen.....	33
4.1.6	Restmüllaufkommen in Abhängigkeit des Abfallwirtschaftssystems .....	34
4.1.6.1	Erfassung von Bioabfällen im Hol- bzw. Bringsystem .....	35
4.1.6.2	Erfassung von Papier, Pappe, Kartonagen.....	36
4.1.6.3	Erfassung von Leichtverpackungen.....	37
4.1.6.4	Ergebnis des Systemvergleichs .....	37
4.1.7	Hochrechnung für Bayern.....	38

4.1.8	Zeitliche Veränderung in Restmüllaufkommen und -zusammensetzung .....	39
4.1.8.1	Landkreis L1 .....	39
4.1.8.2	Landkreis L4 .....	41
4.1.8.3	Ergebnis der zeitlichen Betrachtung .....	42
4.2	Physikalisch-chemische Eigenschaften und Inhaltsstoffe.....	44
4.2.1	Physikalisch-chemische Eigenschaften .....	44
4.2.1.1	Wassergehalt.....	44
4.2.1.2	Glühverlust.....	46
4.2.1.3	Heizwert.....	46
4.2.2	Anorganische Inhaltsstoffe .....	48
4.2.2.1	Kohlenstoff .....	48
4.2.2.2	Chlor, Schwefel, Stickstoff, Phosphor.....	48
4.2.2.3	Alkali- und Erdalkalimetalle .....	49
4.2.2.4	Schwermetalle .....	50
4.2.2.5	Sonstige Metalle .....	58
4.2.3	Organische Inhaltsstoffe .....	59
4.2.3.1	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) .....	59
4.2.3.2	Chlorphenole.....	61
4.2.3.3	Polychlorierte Biphenyle (PCB).....	62
4.2.3.4	Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F) .....	63
5	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	65
	Danksagung.....	67
	Literatur .....	69

## Zusammenfassung

Die Kenntnis der Zusammensetzung und der physikalisch-chemischen Eigenschaften des Restmülls ist eine wesentliche Voraussetzung für die Auslegung von Abfallbehandlungsanlagen (Feuerungs-/Leistungsdiagramm, Erfordernisse der Abgasreinigung etc.) sowie für die Schließung der Stoffbilanz (Input) entlang des Behandlungswegs. Darüber hinaus erlaubt sie, die Nachhaltigkeit umweltverträglichen Produktdesigns anhand des Restmülls abzulesen und die Wirksamkeit abfallwirtschaftlicher Regelungen zu beurteilen.

Im Rahmen eines auf fünf Jahre angelegten FuE-Vorhabens – gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen – wurde der Restmüll von insgesamt 15 repräsentativen bayerischen Gebietskörperschaften (9 Landkreise, 5 kreisfreie Städte, 1 Abfallzweckverband) in je zwei Sortierungen beprobt. Um innerhalb der Gebietskörperschaften mögliche Einflüsse der Siedlungsdichte auf die Abfallzusammensetzung untersuchen zu können, erfolgte die Beprobung separat nach ländlichen, städtischen und innerstädtischen Strukturen. Insgesamt wurde im Rahmen des Vorhabens der Restmüll von knapp 29.000 Bürgern mit einem Gesamtvolumen von knapp 800 m<sup>3</sup> gesammelt und klassiert. Zur Vereinheitlichung der Vorgehensweise kam eine Mobile Abfallsortieranlage zum Einsatz. Mit ihr wurden vor Ort die Korngrößenfraktionen mit Partikeldurchmessern  $d_p \leq 10$  mm (Fein-) und  $10 < d_p \leq 40$  mm (Mittelfraktion) abgetrennt und das Überkorn ( $d_p > 40$  mm) anschließend manuell nach 47 Fraktionen sortiert. Deren Massenanteile dienten der Ermittlung der durchschnittlichen Abfallzusammensetzung der jeweiligen Gebietskörperschaft. Hierbei wurde der Anteil der einzelnen Siedlungsstrukturen an der Gesamtbevölkerung des Untersuchungsgebiets als Gewichtungsfaktor herangezogen.

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

- Das spezifische bayerische Restmüllaufkommen aus Haushalten (ohne Geschäftsmüll und Sperrmüll) beläuft sich auf 112,5 kg/(E·a). Berücksichtigt man Literaturwerte zum Geschäftsmüllanteil, steht das ermittelte Restmüllaufkommen aus Haushalten im Einklang mit der bayerischen Abfallbilanz.
- Circa zwei Drittel der Restmüllmasse werden durch die Sortierfraktionen Organik (Bio- und Gartenabfälle, 23 %), Hygieneprodukte (15 %), Mittel- (14 %) und Feinfraktion (11 %) gebildet.
- Die im Restmüll vorgefundenen, großteils schwer abschöpfbaren spezifischen Wertstoffmengen umfassen im Mittel 55,0 kg/(E·a). Bei der hier angewendeten Definition von „Wertstoff“ wurde jedoch die tatsächliche Verwertbarkeit (eingeschränkt z.B. durch Verschmutzungsgrad und hygienische Aspekte) bei den Sortierungen nicht berücksichtigt. In Abhängigkeit vom Wertstofffassungssystem wurden z.T. deutlich geringere Gehalte gefunden. Insbesondere erwies sich das bequemere Hol- gegenüber dem Bringsystem als überlegen.
- Das Restmüllaufkommen nimmt mit der Besiedlungsdichte zu und liegt im innerstädtischen Bereich um bis zu 30 % über den ländlichen Strukturen. Ursache sind u.a. höhere Beiträge der Fraktion Organik (Bioabfälle), aber auch von Papier, Pappe und Kartonagen.

Die Sortierfraktionen wurden nach der jeweiligen Sortierung zu Analysestoffgruppen zusammengefasst und diese auf physikalisch-chemische Parameter und Inhaltsstoffe hin untersucht. Die einzelnen Aufbereitungs-, Homogenisierungs-, Extraktions- und Aufreinigungsschritte erfolgten in einer auf die jeweilige Analysestoffgruppe abgestimmten Vorgehensweise. Neben physikalisch-chemischen Leitparametern wurde die Elementzusammensetzung sowie der Gehalt organischer Schadstoffe ermittelt.

Die Ergebnisse der Restmüllanalytik lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Während die physikalischen-chemischen Parameter Wassergehalt, Glühverlust und Heizwert relativ geringe Schwankungen zwischen den Einzelanalysen aufweisen, schwanken die Ergebnisse der Schadstoffgehalte zum Teil erheblich, obwohl die Untersuchungen an ‚sortenreinen‘ Analysestoffgruppen vorgenommen wurden.
- Der Heizwert des Restmülls beträgt 8,4 MJ/kg. Die höchsten Beiträge hierzu liefern die Abfallfraktionen Kunststoffe/-verpackungen (1,6 MJ/kg) und Organik (1,2 MJ/kg). Sowohl eine Erhöhung des Massenanteils hochkalorischer Fraktionen (z.B. Kunststoffe/-verpackungen) als auch eine Reduzierung niederkalorischer Fraktionen (v.a. mineralische Feinfraktion sowie die wasserhaltigen Fraktionen Organik und Hygieneprodukte) würden zu einer Steigerung des Heizwerts von Restmüll beitragen.
- Schwermetalle werden hauptsächlich durch die Fraktionen Elektronikschrott, Sonstige Verbunde, Inertes und Feinfraktion in den Restmüll eingetragen.
- Am Anteil der organischen Schadstoffe im Restmüll sind v.a. die Fraktionen Leder, Gummi, Kork (PAK, PCDD/F), Schuhe (PCPh), Feinfraktion (PAK) sowie Kunststoffe (ohne Verpackungen) und Holz (jeweils PCB) beteiligt.
- Der Vergleich der Schadstofffrachten macht deutlich, dass seit den 80iger Jahren in jedem Fall 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.

Mit dem FuE-Vorhaben konnten aktuelle Daten zur stofflichen Zusammensetzung und dem Schadstoffpotenzial des Restmülls gewonnen werden. Die Restmüllzusammensetzung bestimmende Faktoren sind aufgrund der gewonnenen Daten direkt verfügbar. Weitere potenzielle Einflussgrößen können anhand der nunmehr vorhandenen Datenbasis einer weiterführenden systematischen Analyse, z.B. unter Einsatz von Methoden der schließenden Statistik, unterzogen werden.

# 1 Einleitung

Das Aufkommen und die Eigenschaften von Siedlungsabfällen sind Schlüsselfaktoren einer integrierten Abfallwirtschaft [1, 2]. Für eine weitere Optimierung und Beurteilung abfallwirtschaftlicher Konzepte sind daher belastbare und aktuelle Daten zur Zusammensetzung, zu physikalisch-chemischen Leitparametern und Schadstoffgehalten zwingend erforderlich.

Der Stand des Wissens hinsichtlich möglicher Einflussgrößen auf das Abfallaufkommen (und dessen Zusammensetzung) liefert ein uneinheitliches Bild. So fand Medina [3] im Rahmen einer Studie mit Daten aus 123 Ländern eine enge, positive Korrelation zwischen dem Abfallaufkommen und dem Bruttosozialprodukt. Diese Aussage gilt jedoch nur im Bereich eines jährlichen Pro-Kopf-Einkommens von < 7.000 US \$, während im Bereich höherer Einkommen kein eindeutiger Trend bzw. z.T. eine negative Korrelation vorliegt. Vor diesem Hintergrund muss in Industrieländern von einem komplexen Wirkungsgefüge aus sozioökonomischen und -kulturellen Aspekten, wie Produktionsmustern (Materialsubstitution, IPP), individuellem Konsumverhalten, Motivation zur Mülltrennung etc., ausgegangen werden [4].

In Bayern und den anderen Bundesländern [5] hat sich im vergangenen Jahrzehnt das Restmüllaufkommen und die Restmüllzusammensetzung deutlich gewandelt. Vor allem neue Gesetze, Verordnungen als auch ein verändertes Umweltbewusstsein der Bürger haben die abfallwirtschaftliche Situation nachhaltig geprägt. Auf gesetzlicher Ebene beeinflussten in den vergangenen Jahren insbesondere die Verpackungsverordnung von 1991 [6] und ihre Novellierungen [7], das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz von 1994 [8] sowie das novellierte bayerische Abfallwirtschaftsgesetz [9], die TA Siedlungsabfall [10], die TA Abfall [11] und die Abfallablagerungsverordnung [12] die abfallwirtschaftlichen Rahmenbedingungen. Daneben tragen zum unterschiedlichen Restmüllaufkommen aus privaten Haushalten in den einzelnen Gebietskörperschaften weiche Faktoren wie Verbraucherverhalten, Abfallberatung, Öffentlichkeitsarbeit etc. bei [13].

Detaillierte und flächendeckende Informationen über das Restmüllaufkommen und die Restmüllzusammensetzung in Bayern liegen für die Zeit von 1983 bis 1985 aus der Bundesweiten Hausmüllanalyse [14] vor. Die Gebietskörperschaften Bayerns führen in unregelmäßigen Abständen Restmüllsortieranalysen durch; ein Vergleich dieser Daten ist aufgrund unterschiedlicher methodischer Ansätze nur bedingt möglich. Physikalisch-chemische Analysen werden bei den Sortieranalysen der Gebietskörperschaften i.d.R. nicht oder nur auf wenige Parameter (Glühverlust, Heizwert, Wassergehalt) begrenzt durchgeführt.

Mit dem fünfjährigen Forschungsprojekt „Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen“ – gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen – soll für Bayern eine umfangreiche aktuelle Datenbasis zum Aufkommen, zur Zusammensetzung und zu den physikalisch-chemischen Eigenschaften und Inhaltsstoffen des Restmülls aus privaten Haushalten erarbeitet werden. Dabei soll auch die Abschöpfung der Wertstoffe im Restmüll sowie der Einfluss der Restmüllbehältergröße und der vorhandenen Wertstofffassungssysteme (Hol-, Bringsystem) auf den Wertstoffanteil im Restmüll untersucht werden. Zur Erfassung der Daten wurden 17 Restmüllsortieranalysen in verschiedenen entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften und Abfallzweckverbänden Bayerns durchgeführt. Die angewandte einheitliche Methodik und Auswertung der Restmüllsortieranalysen gewährleistet statistisch abgesicherte Ergebnisse und ermöglicht den Vergleich zwischen unterschiedlichen Gebietskörperschaften. Um eine einheitliche Durchführung der Sortierungen – insbesondere bei der Klassierung des Restmülls – zu gewährleisten, wurde eine eigens für das Vorhaben konzipierte Mobile Abfallsortieranlage eingesetzt.





## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Abfallzusammensetzung

Statistisch gesicherte Daten über die Restmüllzusammensetzung und das Restmüllaufkommen aus privaten Haushalten in Bayern sind allein aus der überregional und systematisch durchgeführten Bundesweiten Hausmüllanalyse [14] für die Jahre von 1983 bis 1985 verfügbar. Seither hat sich die abfallwirtschaftliche Situation erheblich verändert, was folgender Vergleich zeigt: Nach der Bayerischen Abfallbilanz betrug das spezifische Restmüllaufkommen (Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle) im Jahr 1988 274,1 kg/(E·a) [15] und im Jahr 2001 179,5 kg/(E·a) [16]; d.h. die Restmüllmasse hat sich in 14 Jahren um fast 100 kg/(E·a) verringert.

Die Landkreise und kreisfreien Städte Bayerns sind nach Art. 12 des Bayerischen Abfallwirtschaftsgesetzes [9] verpflichtet, jährlich eine Bilanz über Art, Herkunft und Menge der in ihrem Gebiet angefallenen Abfälle sowie deren Verwertung und Entsorgung vorzulegen. Detailliertere Informationen über die Zusammensetzung und das Aufkommen von Restmüll aus privaten Haushalten sind in diesen Daten nicht enthalten. Die Restmüllzusammensetzung wird von der Abfallbilanz grundsätzlich nicht explizit erfasst, wogegen die Massenströme für Haus- und Geschäftsmüll summarisch genannt werden.

Für die erfolgreiche Anpassung von Abfallwirtschaftskonzepten an die aktuellen 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 Sammel-systems, Einführung einer Bio-, Papier- und/oder Gelber Tonne/Gelber Sack oder um das Trennverhalten der Bürger genauer kennen zu lernen. Aufgrund unterschiedlicher methodischer Ansätze sind die zahlreichen Sortierungen der einzelnen Gebietskörperschaften nur bedingt vergleichbar und erlauben daher kaum detaillierte Rückschlüsse auf die strukturellen Ursachen der Restmüllzusammensetzung [17].

Das Restmüllaufkommen und -zusammensetzung wird u.a. – vgl. [18, S. 27; 19] – von

- Fläche und Einwohnerzahl der Gebietskörperschaft
- örtlichen und regionalen Unterschieden in Wirtschaftskraft, Sozial- und Gebietsstruktur
- Jahreszeiten, Heizungssystem
- Art der Wertstoffeffassung (Hol- und Bringsystem)
- Standortdichte von Wertstoffinseln und -höfen
- Behältergröße, Frequenz und Organisation der Abfuhr
- Bemessung und Höhe der Gebühren
- Öffentlichkeitsarbeit der Entsorgungsträger

beeinflusst.

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 [20]. 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, Gebührenerhe-

bung, Konsumverhalten, Möglichkeit der Eigenkompostierung und Sprachprobleme für die Restmüllzusammensetzung ebenso eine wesentliche Rolle [21].

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

Bis dato existiert auf bundesweiter Ebene keine einheitliche Richtlinie über die Vorgehensweise bei Abfallsortieranalysen. Der Vorschlag, Regelungen zur Durchführung von Analysen im Anhang A II der Technischen Anleitung Siedlungsabfall [10] aufzunehmen, wurde damals auf Länderebene abgelehnt. Eine Übersicht über bestehende Abfallsortierrichtlinien und Merkblätter gibt Tab. 1.

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 [22]. Weitere Ausführungen zur Durchführung von Abfallsortierungen finden sich in der Bundesweiten Hausmüllanalyse [14] und in einem 1993 vom Freistaat Thüringen herausgegebenen Merkblatt [23]. Schließlich veröffentlichte 1998 nach intensiver Auswertung von Abfallsortieranalysen das Land Brandenburg eine Richtlinie [24], die vom Umweltbundesamt (UBA) empfohlen wird. Mit der in Brandenburg existierenden Richtlinie vergleichbar sind die Richtlinie des Freistaates Sachsen [25] und die Empfehlungen des Landes Nordrhein-Westfalen [26].

Tab. 1: Übersicht über bestehende Abfallsortierrichtlinien

---

Merkblätter des Verbandes Kommunaler Fuhrparks- und Stadtreinigungsbetriebe (VKF/VKS), M 1 – 4 (1964) [22]
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Mehrere Untersuchungen über das Jahr verteilt, jeweils 5 Tage</li> <li>▪ Probenahme direkt vor Ort; Sortierung am gleichen Tag</li> <li>▪ Aufteilung in Fein- (0 – 8 mm), Mittel- (8 – 40 mm) und Grobmüll (40 – 120 mm), Siebrest (&gt; 120 mm) mittels Trommelsieb</li> <li>▪ Stoffgruppen: Eisen- und NE-Metalle; Inertes einschl. Glas; Textilabfälle; Papier/Pappe/Stroh; Holz, Leder/Gummi/Horn/Knochen; Kunststoffe bei Grobfraction und Siebrest. Auslese von Eisen- und NE-Metallen aus der Fein- und Mittelfraktion</li> <li>▪ Zerkleinerung mittels Hammermühle auf unter 8 mm, daraus weitere Analyse auf Wassergehalt, Glühverlust</li> </ul>
Vorgehensweise bei der Bundesweiten Hausmüllanalyse 1983 – 1985 [14]
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stichprobeneinheit (SPE) 1 m<sup>3</sup></li> <li>▪ Sortiergruppen: Pappe, Papier, Verpackungsverbund, Fe-Metall, NE-Metall, Glas, Kunststoff, Textilien, Mineralien, Materialverbund, Windeln, Problemmüll, Vegetabilien</li> <li>▪ Klassierung des Sortierrests nach 4 Klassen</li> </ul>
Merkblatt des Freistaats Thüringen (1993) [23]
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stichprobenumfang 1 Mass.-% der Grundgesamtheit</li> <li>▪ Berücksichtigung jahreszeitlicher Schwankungen</li> <li>▪ Siebanalyse für 8 mm und 40 mm</li> <li>▪ Stoffgruppen: Pappe, Papier, Papierverbund, Kunststoffe, davon Folien, Glas, Fe-Metalle, NE-Metalle, Bioabfälle, sonstige Verbunde, Textilien, Inertes, Hygieneprodukte, Holz/Leder/Knochen/Gummi, Problemstoffe</li> <li>▪ Physikalisch-chemische Untersuchungen</li> </ul>
Richtlinie des Landes Brandenburg (1998) [24]
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Stichprobeneinheit 1,1 m<sup>3</sup></li> <li>▪ Stichprobenumfang mind. 20 SPE</li> <li>▪ Bei Unterteilung (Schichtung) mind. 6 SPE je Schichtungsmerkmal</li> <li>▪ Maschinelle Siebung bei 10 mm und 40 mm Lochdurchmesser</li> <li>▪ Sortierung nach Ober- und Untergruppen</li> <li>▪ Berücksichtigung von jahreszeitlichen Schwankungen durch vier Wiederholungsuntersuchungen</li> </ul>

---

## 2.2 Untersuchungen der Inhaltsstoffe

Bei einer veränderten Abfallzusammensetzung sind auch Veränderungen der physikalisch-chemischen Eigenschaften und des Schadstoffgehalts von Restmüll anzunehmen. Insbesondere gesetzliche Verpflichtungen (z.B. Produktverantwortung laut Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [8], Batterieverordnung [27], Chemikalien-Verbotsverordnung [28]) haben zum Ziel, eine langfristige Schadstoffentfrachtung des Restmülls zu erreichen. Andererseits bewirkt die fortlaufende Getrennthaltung von beispielsweise Verpackungsabfällen gemäß Verpackungsverordnung [6] massenanteilig eine Erhöhung langlebiger und damit häufig schadstoffhaltigerer Bestandteile im Restmüll. Ebenso kontrovers und uneinheitlich ist die Veränderung von physikalisch-chemischen Parametern wie dem Heizwert: der Entzug von heizwertreichen Fraktionen (z.B. Leichtstoffverpackungen) durch Wertstoffsammelsysteme vermindert auch den Gesamtheizwert des Restmülls [29, 30].

Untersuchungen zu Schadstoffgehalten und Inhaltsstoffen von Restabfällen werden i.d.R. nur sehr vereinzelt durchgeführt. Aktuelle Veröffentlichungen sind – von Ausnahmen abgesehen [31, 32, 33] – zum Großteil Literaturvergleiche [34, 35, 36]. Hauptaugenmerk liegt dabei auf den Schwermetallen, da diese mit relativ einfachen Verfahren (z.B. Königswasseraufschluss und Atomabsorptionsspektrometrie) in verhältnismäßig geringen Konzentrationen bestimmt und zudem für alle Umweltmedien in Form von Richtwerten beurteilt werden können – vgl. z.B. [10, 37]. Der Gehalt organischer Schadkomponenten wird dagegen routinemäßig seltener bestimmt, da die Probenaufbereitung weitaus vielschichtiger ist und die zu bestimmenden Gehalte im Ultraspurenbereich liegen. Zudem ist 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 zwischen Untersuchungen sicher zu stellen. Entsprechend der TA Siedlungsabfall [10] ist für die Untersuchung von Abfällen nach der „Richtlinie zur Entnahme und Vorbereitung von Proben und aus festen, schlammigen und flüssigen Abfällen“ (PN 2/78 K [38]) 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, so dass im Einzelfall eine andere Vorgehensweise erarbeitet werden muss.

Tab. 2: Übersicht über Vorgehensweisen bei der Probenahme von heterogenen Abfällen

Vorschrift	Anzahl	Mindestumfang
TASi [10]	1 Probe je angefangene 5 Mg bzw. 5 m <sup>3</sup>	1.000 g bzw. 1.000 ml
PN 2/78 K [38]	5 Proben je 50 Mg	Bei Einzelproben: näherungsweise $G[\text{kg}] = 0,06 [\text{kg}/\text{mm}] \times d_p [\text{mm}]$ 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 [39]	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

Im Jahr 2002 wurde die PN 2/78 von der LAGA PN 98 „Grundregeln für die Entnahme von Proben aus festen und stichfesten Abfällen sowie abgelagerten Materialien“ [39] abgelöst. Aus Gründen der Praktikabilität bei der Probenahme wird dort an Stelle der Masse das Volumen zur Festlegung des Probenahmeumfangs herangezogen (vgl. Tab. 2).

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 Elements). Daneben können zur Elementbestimmung unterschiedliche Analysemethoden (z.B. für anorganische Schadstoffe: Königswasseraufschluss mit anschließender Atomabsorptionsspektroskopie oder Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma, Röntgenfluoreszenzanalytik aus der Feststoffprobe) Anwendung finden, was bei einem Vergleich der Messdaten zu berücksichtigen ist [40].

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Restmüllsortierung

#### 3.1.1 Allgemeines

Als Grundlage für Planung und Durchführung der Restmüllsortierungen diente die vom Umweltbundesamt empfohlene „Richtlinie für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle im Land Brandenburg“ [24] (siehe Abschnitt 2).

Einige Vorgaben dieser Richtlinie wurden für das Projektvorhaben modifiziert: Zur Erfassung jahreszeitlich bedingter Schwankungen in Restmüllaufkommen und -zusammensetzung wurden *zwei* fünftägige Restmüllsortierkampagnen anstatt der empfohlenen *vier* durchgeführt. Die Sortierkampagnen während der warmen Jahreszeit mit einem erhöhten Gartenabfallaufkommen fanden in den Monaten Mai bis Oktober, die während der kalten Jahreszeit (Heizperiode) in den Monaten November bis April statt. Bei der Planung der Sortierkampagnen wurden Ferienzeiten und Feiertage bewusst ausgespart, um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch Kumulationseffekte zu vermeiden. Weiterhin wurde darauf geachtet, keine Geschäfts- und Gewerbeabfälle zu beproben.

Die Durchführung der Restmüllsortieranalysen wurde von uns aktiv begleitet und in fünf separaten, öffentlichen Ausschreibungen an mittelständische Unternehmen (z.B. Ingenieurbüros) vergeben. Es waren über den Projektzeitraum drei verschiedene Unternehmen mit der Durchführung der Sortierkampagnen beauftragt.

#### 3.1.2 Stichprobenplanung

Die Untersuchung des Restmülls aus Haushalten erfolgte anhand repräsentativer Stichproben. Entsprechend der Richtlinie des Landes Brandenburg umfasste die Stichprobe einer fünftägigen Sortierkampagne mindestens 20 Stichprobeneinheiten (SPE); dabei repräsentiert ein 1.100 l Container eine Stichprobeneinheit. In der Praxis wurden dazu bei der Stichprobenziehung kleinere Behältergrößen in bereitgestellte 1.100 l Container umgeleert als auch bei größeren Wohnanlagen die 1.100 l Container als Ganzes beprobt.

Um den Einfluss der Merkmale – z.B. Gebietsstruktur, Behältergröße, Wertstofffassungssystem – auf das Restmüllaufkommen und -zusammensetzung einer Gebietskörperschaft zu bestimmen, wurde eine gezielte Schichtung vorgenommen. Jedes definierte Schichtungsmerkmal (z.B. Gebietsstruktur) wurde zur Einhaltung der Fehlertoleranz mit mindestens 6 SPE beprobt.

Im Rahmen des Projektes wurde eine Schichtung nach Gebietsstrukturen vorgenommen. Die Tab. 3 zeigt die Einteilungskriterien für die festgelegten Gebietstrukturen „ländlich“, „städtisch“ und „innerstädtisch“, während die Abb. 1 bis 3 die Gebietsstrukturen beispielhaft anhand von Bild-

Tab. 3: Definitionskriterien der Gebietsstrukturen

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



Abb. 1: Gebietsstruktur „ländlich“



Abb. 2: Gebietsstruktur „städtisch“



Abb. 3: Gebietsstruktur „innerstädtisch“

material aus den untersuchten Gebietskörperschaften wiedergeben. Bei kreisfreien Städten wurde alternativ zur Gebietsstruktur „ländlich“ die Struktur „Stadttrand“ eingeführt.

Die gewählte Schichtung nach Gebietsstrukturen lässt deutliche Unterschiede in Restmüllaufkommen und -zusammensetzung aufgrund siedlungsspezifischer und sozioökonomischer Gegebenheiten erwarten und ermöglicht eine relativ problemlose Erhebung der Daten für die Auswertung.

Neben den Gebietsstrukturen wurden die unterschiedlichen Restmüllbehältergrößen im jeweiligen Untersuchungsgebiet differenziert erfasst. Unterschiede in den Restmüllereigenschaften sind besonders zwischen großen Restmüllcontainern mit einem Volumen von 1.100 l

und kleineren Restmülltonnen mit 40 – 240 l zu erwarten. Restmüllcontainer sind vor allem in dicht besiedelten innerstädtischen Strukturen und in Großwohnanlagen anzutreffen.

Weiterhin wurde bei der Stichprobenplanung die Erfassung und Verwertung der Bioabfälle in den untersuchten Gebietskörperschaften berücksichtigt. Falls die Gegebenheiten vor Ort oder die spätere Auswertung der erfassten Daten eine Differenzierung zuließen, wurden die gezogenen SPE beispielsweise nach Biotonnen-Nutzer, Eigenkompostierer und Nicht-Eigenkompostierer unterteilt.

### 3.1.3 Sortierung

Jede gesammelte Stichprobeneinheit wurde separat mit Hilfe der Mobilen Abfallsortieranlage (siehe Abschnitt 3.3) mechanisch klassiert. Analog, wie in der Brandenburger Richtlinie [23] vorgeschlagen, erfolgte die Abtrennung der Feinfraktion bei einem Siebschnitt von 10 mm ( $d_p \leq 10$  mm) und die der Mittelfraktion bei 40 mm ( $10 < d_p \leq 40$  mm). Der Siebüberlauf entspricht dabei der Grobfraktion ( $d_p > 40$  mm).

Die Grobfraktion wurde händisch in 47 Sortierfraktionen separiert, die zu 12 Obergruppen zusammengefasst sind. Die Fein- und Mittelfraktion gelten jeweils für sich als eine Sortier- bzw. eine Obergruppe. In Tab. 4 ist der vollständige Stoffgruppenkatalog aufgeführt.

Tab. 4: Übersicht über die sortierten Stoffgruppen und Obergruppen

Obergruppe	Stoffgruppe	
Feinfraktion	▪ Feinfraktion	
Mittelfraktion	▪ Mittelfraktion	
Papier, Pappe, Kartonage	▪ PPK-Verpackungen ▪ PPK-Druckerzeugnisse	▪ PPK-Verpackungen (DSD) ▪ Sonstige PPK
Glas	▪ Behälterglas ▪ Sonstiges Glas	▪ Behälterglas (DSD)
Kunststoffe	▪ Kunststoffverpackungen ▪ Kunststofffolien (Verpackungen) ▪ Sonstige Folien > DIN A4 ▪ Sonstige Kunststoffartikel	▪ Kunststoffverpackungen (DSD) ▪ Kunststofffolien (DSD) ▪ Styropor
Metalle	▪ Fe-Metallverpackungen ▪ NE-Metallverpackungen ▪ Sonstige Metallteile	▪ Fe-Metallverpackungen (DSD) ▪ NE-Metallverpackungen (DSD)
Organik	▪ Küchenabfälle ▪ Tierkadaver	▪ Gartenabfälle ▪ Sonstige organische Stoffe
Holz	▪ Holzverpackungen ▪ Sonstiges Holz	▪ Holzverpackungen (DSD)
Textilien	▪ Bekleidungstextilien ▪ Schuhe	▪ Sonstige Textilien
Inertes	▪ Inertes außer Glas	▪ Inert-Verpackungen
Verbunde	▪ Verbundverpackungen ▪ Elektronikschrott ▪ Fahrzeugteile ▪ Sonstige Verbunde	▪ Verbundverpackungen (DSD) ▪ Renovierungsabfälle ▪ Staubsaugerbeutel
Hygieneprodukte	▪ Windeln	▪ Hygienepapiere
Sonstige Stoffe	▪ Leder ▪ Sonstige Stoffe	▪ Gummi ▪ Kork
Problemabfall	▪ Problemabfall ▪ Medikamente	▪ Batterien

Eine Besonderheit des Sortierkatalogs ist die Unterteilung von Verpackungsabfällen in Verpackungen mit bzw. ohne einem Grünen Punkt-Aufdruck. In der Praxis ist die Unterscheidung nicht immer eindeutig, insbesondere dann, wenn die Verpackungen zerkleinert vorliegen oder stark verschmutzt sind. Zudem sind i.d.R. nicht sämtliche Bestandteile einer Verpackung mit Grünem Punkt (Umverpackung ja, innere Verpackung nein) gekennzeichnet. Für die Zuordnung derartiger Verpackungen zu den betreffenden Sortiergruppen wurden generell folgende Festlegungen getroffen: Verpackungen bzw. Verpackungsbestandteile ohne Grünen Punkt (z.B. Teile von Zigarettenschachteln oder Gefriergutverpackungen), die erfahrungsgemäß Bestandteil einer Verpackung mit Grünem Punkt sind, wurden der entsprechenden Sortierfraktion mit Grünem Punkt zugeordnet.

Dieselbe Vorgehensweise traf auch auf verschmutzte Verpackungen zu. Bei bunten Papier-, Pappe-, Kartonageschnipseln hingegen erfolgte die Zuordnung zur Sortierfraktion ohne Grünem Punkt-Aufdruck. Neben der gesamten Grobfraktion einer SPE wurde ein Teil der Mittelfraktion – ca. 10 l – händisch nach den Obergruppen des Sortierkataloges sortiert. Zur Erfassung der Batterien (ohne Knopfzellen) im Restmüll wurde die gesamte Mittelfraktion jeder SPE nach diesen durchsucht, da sie aufgrund ihrer Größe hauptsächlich durch das 40 mm-Sieb fallen. Die Feinfraktion wurde nicht sortiert, da eine Trennung dieses feinkörnigen Materials (Straßenkehrschutt, Asche, Tierstreu etc.) in verschiedene Stoffgruppen nicht möglich ist.

Pro SPE wurde die Gesamtmasse der SPE sowie die jeder Sortierfraktion mit einer Genauigkeit von 100 g ermittelt.

### 3.1.4 Auswertung der Daten und Hochrechnung

Zur Bestimmung von behälterspezifischen Daten wurden bei Sammlung und Sortierung der Füllgrad und das Nenn-Volumen der beprobten Abfalltonnen festgehalten, woraus sich Raum- und Schüttgewicht des Restmülls sowie bereitgestelltes und genutztes Behältervolumen bestimmen lassen.

Der Füllgrad in Vol.-% ist das Verhältnis von verfülltem zum tatsächlichen Behältervolumen. Er wurde bei der Probenahme auf 10 % geschätzt. Das Raumgewicht in kg/l berechnet sich aus der Masse einer SPE bezogen auf das Gesamtbehältervolumen. Im Gegensatz dazu ergibt sich das Schüttgewicht in kg/l aus der Masse einer SPE bezogen auf das verfüllte Behältervolumen. Hohe Schüttgewichte weisen auf schwere Abfallbestandteile (z.B. Feinmüll, Organik, Inertes) oder auf eine Verdichtung des Restmülls hin; niedrige Schüttgewichte sind meist auf sperrige oder voluminöse (z.B. Verpackungen) Restmüllbestandteile zurückzuführen. Mit dem spezifischen bereitgestellten Behältervolumen in l/(E·Wo) wird das für jeden Bewohner zur Verfügung gestellte Behältervolumen je fiktivem Leerungsintervall von einer Woche beschrieben. Die Gebietskörperschaften legen per Abfallwirtschaftssatzung ein Mindestbehältervolumen fest. Aus der Multiplikation des Füllgrades mit der beprobten Tonnengröße unter Berücksichtigung der an die Tonne angeschlossenen Einwohner und dem fiktivem Leerungsintervall ergibt sich das spezifische genutzte Behältervolumen in l/(E·Wo).

Schließlich wurden neben den behälterspezifischen Daten auch die Restabfallmasse und -zusammensetzung erfasst. Das spezifische Restmüllaufkommen in kg/(E·Wo) oder kg/(E·a) spiegelt dabei die angefallene Restmüllmasse je Einwohner und Zeitraum wider und erlaubt den direkten Vergleich von Gebietskörperschaften unterschiedlicher Größe.

Die Hochrechnung basiert auf einer modifizierten (geschichteten) Verhältnisschätzung, die sich in folgende Hauptrechen Schritte untergliedert:

- separate Auswertung der ermittelten Erhebungsdaten für jede Stichprobeneinheit (Anzahl der erfassten Einwohner, Behälterfüllgrade, Masse der Sortierfraktionen pro Woche etc.)
- getrennte Berechnung der einwohnerspezifischen Werte (z.B. Abfallaufkommen pro Einwohner und Woche) für jede Gebietsstruktur (ländlich, städtisch, innerstädtisch) unter Verwendung recherchierter Einwohnerzahlen der beprobten Adressen
- Hochrechnung für die entsprechende Gebietskörperschaft durch Verhältnisschätzung anhand der Schicht „Gebietsstrukturen“
- Berechnung der Jahresdurchschnittswerte des Restmüllaufkommens einer Gebietskörperschaft aus den Ergebnissen beider Sortierungen unter Berücksichtigung der Jahresganglinie.

Die ermittelten Ergebnisse wurden statistisch geprüft und einer Fehlerrechnung unterzogen. Bei der Interpretation der Daten wurde auch die im Restmüll verbleibende Wertstoffmasse betrachtet. Unter potenziell verwertbaren Stoffen wurden dabei die Sortierfraktionen Küchen- und Gartenabfälle, Papier, Pappe, Kartonagen, Behälterglas, Textilien, Holz, Elektronikschrott sowie Kunststoff-, Metall- und Verbundverpackungen (sogenannte Leichtverpackungen) zusammengefasst. Inwieweit diese „Wertstoffe“ tatsächlich verwertbar gewesen wären oder aufgrund von Verschmutzungen oder hygienischen Aspekten nur über die Restmülltonne schadlos entsorgt werden konnten, konnte im Rahmen dieser Sortieranalysen nicht unterschieden werden. Gerade durch die Vermischung des Restmülls in der Mülltonne ist diese Unterscheidung (verwertbarer – nicht verwertbarer Wertstoff) bei Sortieranalysen generell kaum möglich. Zudem ist die Verwertbarkeit von unterschiedlichen Verwertungsverfahren (z.B. Kompostierung oder Vergärung von Abfällen organischen Ursprungs) abhängig. Die angegebenen Wertstoffmengen stellen somit die Obergrenze des tatsächlich verwertbaren Potenzials dar.



### 3.2 Auswahl der Gebietskörperschaften

In Bayern gibt es 96 entsorgungspflichtige Gebietskörperschaften (71 Landkreise, 25 kreisfreie Städte), die sich auf 7 Regierungsbezirke verteilen. Von 96 Gebietskörperschaften haben sich 12 Landkreise und 4 kreisfreie Städte zu 6 Abfallzweckverbänden zusammengeschlossen. Im Rahmen des Projektes wurden daraus 15 Gebietskörperschaften für die Durchführung der Restmüllsortierungen ausgewählt.

Bei der Auswahl der Gebietskörperschaften wurden entsprechend der Bayerischen Abfallbilanz [16] folgende Kriterien berücksichtigt:

- spezifisches Restmüllaufkommen und Bioabfallaufkommen
- Wertstofffassungssysteme für Bioabfall, Papier, Pappe, Kartonagen, Leichtverpackungen
- Einwohnerdichte.

Mit einer Gesamtstichprobe für Bayern von 15 Gebietskörperschaften wurde in jedem Regierungsbezirk mindestens eine Restmüllsortierung durchgeführt.

Die Bayerische Abfallbilanz 2001 [16] teilt zur Beschreibung der abfallwirtschaftlichen Situation die entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften in Einwohner-Strukturklassen ein. Dabei wird in Abhängigkeit von der Besiedlungsdichte zwischen ländlichen, ländlich dichten, städtischen und großstädtischen Gebietsstrukturen unterschieden. Die Tab. 5 zeigt die Verteilung der Einwohner-Strukturklassen für Bayern sowie für die ausgewählten Gebietskörperschaften. Mit den repräsentativen Stichproben wurde der Restmüll von nahezu 1,7 Mio. Einwohnern „erfasst“ (Anteil: 13,6 % der Bevölkerung Bayerns). Aufgrund der ähnlichen Verteilung der beprobten Einwohner und der bayerischen Bevölkerung auf die Einwohner-Strukturklassen ist davon auszugehen, dass die Stichprobenauswahl die Grundgesamtheit der Einwohner in Bayern bezüglich der Einwohner-Strukturklassen repräsentativ widerspiegelt.

Eine Auswahl von Gebietskörperschaften, die die vielfältigen Möglichkeiten der Wertstofffassung (Hol- und Bringsystem) bayernweit repräsentiert, gestaltet sich im Unterschied zu den

Tab. 5: Strukturelle Aufteilung nach der Bayerischen Abfallbilanz [16] und der für das Projekt ausgewählten 15 Gebietskörperschaften

Einwohner-Strukturklasse	Einwohner/km <sup>2</sup>	Anzahl der Gebietskörperschaften/Abfallzweckverbände	Einwohner	Anteil der Gesamtbevölkerung %
ländlich	< 125	39	4.278.224	35
ländlich dicht	125 – 500	36	4.774.711	39
städtisch	500 – 1.750	17	1.147.776	9
großstädtisch	> 1.750	4	2.077.402	17
Summe		96	12.278.113	100

Einwohner-Strukturklasse	Einwohner/km <sup>2</sup>	Anzahl der beprobten Gebietskörperschaften/Abfallzweckverbände	Einwohner	Anteil der Gesamtbevölkerung %
ländlich	< 125	5	737.721	44
ländlich dicht	125 – 500	5 + 2 <sup>*)</sup>	509.682	30
städtisch	500 – 1.750	4	195.500	12
großstädtisch	> 1.750	1	232.129	14
Summe		15 + 2 <sup>*)</sup>	1.675.032	100

<sup>\*)</sup> zwei Gebietskörperschaften wurden mit drei bzw. vier Jahren Abstand ein zweites Mal beprobt

Tab. 6: Übersicht über die Wertstofffassung im Holsystem in Bayern [16]

Holsystem	Anzahl der Gebietskörperschaften	angeschlossene Einwohner
Biotonne	79	78 %
Papiertonne	52	56 %
Papiersack	3	2 %
Bündelsammlung Papier	54	44 %
Straßensammlung Textilien	55	48 %
Abholung Grüngut	30	22 %
Abholung Kunststoffe (nicht DSD)	6	4 %
Tonne für gemischte Verpackungen	9	6 %
Sack für gemischte Verpackungen	53	45 %

Einwohner-Strukturklassen deutlich schwieriger: Die Umsetzung abfallwirtschaftlicher Fragestellungen und Festlegung in Abfallwirtschaftssatzungen ist entsprechend [9] und [41] den entsorgungspflichtigen Körperschaften und Gemeinden übertragen. Im Extremfall unterscheiden sich sogar innerhalb einer entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaft die Abfallwirtschaftssatzungen der einzelnen Gemeinden. Anhand der verschiedenen Wertstofffassungssysteme wird dies im Folgenden erläutert.

Grundsätzlich unterteilt man die Wertstoffsammlung in Bring- und Holsysteme. Beispiele für Bringsysteme sind u.a. die Abgabe von unterschiedlichen Wertstofffraktionen (Aluminium, Glas, Grüngut, Kunststoffe, Papier/Pappe/Kartonagen, Weißblech etc.) am Wertstoffhof und/oder an freizugänglichen Depotcontainern. Die Anzahl der Standorte zur Wertstoffabgabe bzw. die Standplatzdichte (Anzahl der Einwohner je Standplatz) variiert zwischen den einzelnen Gebietskörperschaften z.T. erheblich. Einige Varianten für die Wertstofffassung im Holsystem sind in Tab. 6 dargestellt. Die vielfältigen Kombinationen von Hol- und Bringsystemen zur Erfassung einzelner Wertstofffraktionen (z.B. Papier/Pappe/Kartonagen über die Papiertonne – Holsystem; Glas – Bringsystem) führt zu einer Vielzahl an unterschiedlichen Abfallwirtschaftssystemen.

Unter der Annahme, dass Wertstoffe, die gemäß Abfallsatzung zu zentralen Sammelstellen gebracht werden müssen (Bringsystem), aus Bequemlichkeit in geringerem Maße abgeschöpft werden als bei Holsystemen, beeinflusst dies auch die Restmüllzusammensetzung und das Abfallaufkommen.

Einen bedeutenden Massenanteil der Wertstoffe stellt u.a. aufgrund des Wassergehalts die organische Fraktion dar. Die Unterschiede zwischen vergleichbaren Gebietskörperschaften (z.B. mit/ohne Biotonne) sollten daher in Bezug auf das Bioabfallaufkommen im Restmüll besonders ausgeprägt sein. Daher wurden bei der Auswahl der zu beprobenden Gebietskörperschaften die unterschiedlichen Erfassungssysteme für Bioabfälle berücksichtigt, auch wenn die tatsächlichen Unterschiede zwischen den einzelnen Gebietskörperschaften aufgrund beispielsweise des Gebührensystems, der Bevölkerungsstruktur oder auch der Abfallberatungsaktivitäten weitaus vielschichtiger und nicht direkt quantifizierbar sind.

Bayernweit verfügt die Mehrzahl (82 %) der entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften über eine Bioabfallfassung im Holsystem. Aus statistischen Überlegungen wurden die Gegebenheiten nicht vollständig auf die Auswahl übertragen: zehn Gebietskörperschaften erfassen die Bioabfälle im Holsystem (Biotonne), fünf haben keine Biotonne.

Für die Erfassung von Papier, Pappe, Kartonagen und Leichtverpackungen wurde bei der Auswahl der Gebietskörperschaften versucht, Hol- und Bringsysteme gleichermaßen einzubeziehen, so dass

Tab. 7: Sortierkampagnen in den Gebietskörperschaften und jeweilige Wertstofffassung (Auswahl) im Holsystem nach [16]

Untersuchungsgebiete	Einwohner	Bioabfälle	Papier/Pappe	DSD	1. Kampagne	2. Kampagne
L1	109.033		(X) <sup>*)</sup>		11/98	5/99
L2	119.427	X	(X) <sup>*)</sup>	X <sup>**)</sup>	11/98	5/99
L3	92.223		X	X	9/99	2/00
L4	89.133	X		X	9/99	2/00
L5	112.304	X	X		10/99	3/00
L6	99.003	X	X		6/01	11/01
L7	168.292		(X) <sup>*)</sup>		7/01	12/01
L8	131.194	X	X (X) <sup>*)</sup>		9/01	01/02
L9	224.014	X	X	X	10/01	03/02
L10	126.675	X	X (X) <sup>*)</sup>	X	2/02	10/02
L11	siehe L1	siehe L1	siehe L1	siehe L1	6/02	11/02
L12	siehe L4	siehe L4	siehe L4	siehe L4	7/02	12/02
S1	40.959	X	(X) <sup>*)</sup>		5/00	11/00
S2	59.074				5/00	12/00
S3	38.332	X	X	X	6/00	11/00
S4	255.899	X	X	X	9/00	2/01
S5	59.121	***)	(X) <sup>*)</sup>	X	2/02	9/02
Summe	1.724.683	10	8 (7) <sup>*)</sup>	8		
Bayern	12.278.113	79	54 (55) <sup>*)</sup>	62		

\*) (X): eingeschränktes Papier-Holsystem, da in Form von bis zu fünf Bündelsammlungen pro Jahr

\*\*) nur in einzelnen Gemeinden (entspricht etwa 10 % der Einwohner)

\*\*\*) nur Großwohnanlagen mit Biotonne, sonst sehr dichtes Sammelplatznetz

jeweils acht der beprobten Gebietskörperschaften über Holsysteme für Papier, Pappe, Kartonage (Papiertonne) bzw. für Leichtverpackungen (Gelbe Tonne/Sack) verfügen.

In Tab. 7 ist die ausgewählte Stichprobe mit fünf Städten (Abk. S), neun Landkreisen und einem Zweckverband (Abk. L) chronologisch und in anonymisierter Form dargestellt. Dem Zweckverband L9 obliegt die Entsorgungspflicht für zwei Landkreise und er wird daher zur Gruppe der Landkreise gezählt. Für die Erfassung zeitlicher Veränderungen in Restmüllaufkommen und -zusammensetzung wurden in den Gebietskörperschaften L1 und L4 die Sortieranalysen wiederholt (L1 = L11; L4 = L12).

### 3.3 Mobile Abfallsortieranlage

Bei der Durchführung der Restmüllsortieranalysen wurde für eine gleich bleibende Methodik eine Mobile Abfallsortieranlage eingesetzt. Diese besteht aus einem zweistufigen Siebaggregat mit den dazugehörigen Aufgabe- und Austrageeinheiten, vgl. Abb. 4. Kernstück der Anlage ist die Siebtrommel (Durchmesser 1,2 m). Die Sieblänge liegt konstant bei zweimal 1,5 m; die Neigung (0 – 3,5°) und Umdrehungsgeschwindigkeit (Drehzahl 0 – 20 U/min) sind stufenlos einstellbar. Neigungsgrad und Umdrehungsgeschwindigkeit der Siebtrommel wurden aufgrund der Erfahrungen aus der ersten Sortierkampagne festgelegt. In der Praxis können in Abhängigkeit vom Grad der Vorsortierung und der Abfallzusammensetzung mit der Mobilien Abfallsortieranlage ca. 100 kg Restmüll pro Stunde klassiert werden.

Für die mechanische Klassierung wird der Restmüll über das Aufgabeband der Siebtrommel zugeführt. Im ersten Siebabschnitt wird die Feinfraktion ( $d_p \leq 10$  mm), im zweiten die Mittelfraktion ( $10 < d_p \leq 40$  mm) abgetrennt und über Trichter und seitlich auslaufende Transportbänder in 240 l Tonnen ausgetragen. Der verbleibende Grobmüll ( $d_p > 40$  mm) gelangt als Siebüberlauf ebenfalls über einen Trichter und ein seitlich verlaufendes Transportband auf den Sortiertisch, wo eine händische Sortierung in die gewünschten Stofffraktionen erfolgt.

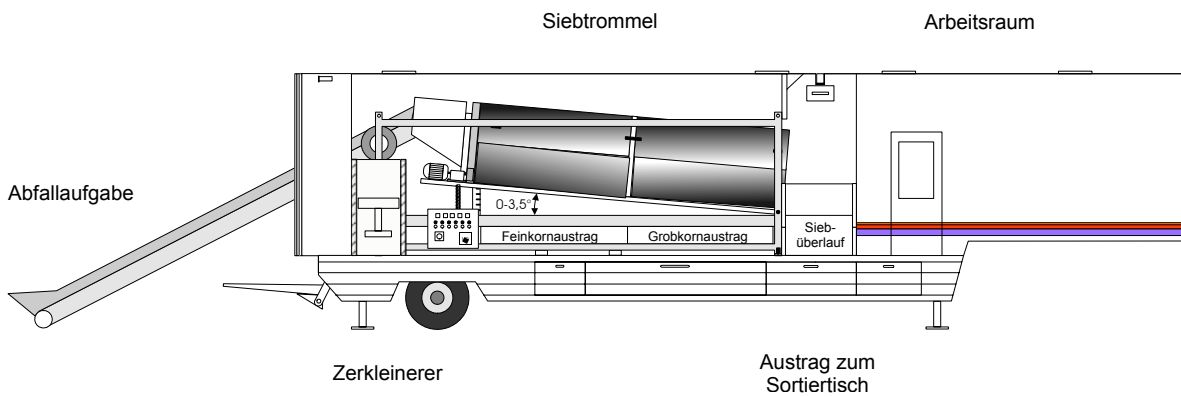


Abb. 4: Mobile Abfallsortieranlage, schematische Darstellung

Neben der Klassiereinheit ist in der Anlage ein Zweiwellenzerkleinerer installiert. Er wird zur Vorzerkleinerung von Proben für physikalisch-chemische Analysen benötigt. Im Arbeitsraum der Anlage befindet sich eine Werkbank für kleinere Reparaturarbeiten und eine Arbeitsplatte zur Probenvorbereitung.

Die gesamte Anlage ist in einen 13 m langen Sattelaufleger eingebaut. Bei Bedarf ist die Sortieranlage auch als separate Einheit außerhalb des Fahrzeugs einsetzbar.

### 3.4 Analytik

#### 3.4.1 Analysestoffgruppen

Ein wesentliches Ziel dieses Vorhabens ist die Charakterisierung des Restmülls aus Haushalten hinsichtlich der physikalisch-chemischen Eigenschaften und des Schadstoffinventars.

Für die Erarbeitung einer umfassenden Datenbasis wurden während der 34 Restmüllsortierkampagnen in den 15 ausgewählten Gebietskörperschaften Proben für die Analytik gezogen. Unter Berücksichtigung stofflicher Ähnlichkeiten wurden ausgehend von den 49 Sortierfraktionen 18 Analysestoffgruppen gemäß Tab. 8 festgelegt. Üblicherweise wurden bei einer Sortierkampagne nicht alle Analysestoffgruppen beprobt. Dabei wurde davon ausgegangen ist, dass zwischen physikalisch-chemischer Zusammensetzung einer Analysestoffgruppe und dem beprobten Gebiet kein direkter funktionaler Zusammenhang besteht. Im Durchschnitt wurden je Sortierkampagne sechs bis neun Analysestoffgruppen beprobt. Die Zusammenstellung der Analysestoffgruppen anhand „stofflicher“ Ähnlichkeiten bedingt zumindest für einen Teil die Beprobung mehrerer Sortierfraktionen (siehe zweite Tabellenspalte). Entsprechend den Anteilen der Analysestoffgruppen am Restmüll wurden ca. 96 Mass.-% des Restmülls beprobt. Die verbleibenden 3,8 Mass.-% entfallen auf Fahrzeugteile, Flachglas, Metalle, Problemstoffe, Styropor und Sonstige Stoffe. Die Nichtberücksichtigung dieser Stoffgruppen bei dem Analytikprogramm resultiert entweder aus den zu geringen Massenanteilen für eine repräsentativen Stichprobe (z.B. Fahrzeugteile) oder eingeschränkten Aufbereitungstechniken für die physikalisch-chemische Analyse (z.B. Metalle) [31, 42].

Über den gesamten Projektzeitraum wurden 304 Einzelstichproben für die Analytik gezogen. Mit Ausnahme der Analysestoffgruppe „Renovierungsabfälle“ standen für die Auswertung je Analysestoffgruppe mindestens 16 Einzelwerte zur Verfügung. Einschränkungen bei der Probenahme – wie beispielsweise bei den Renovierungsabfällen – resultieren aus dem unregelmäßigen Vorkommen dieser Fraktionen im Restmüll.

Die analytische Bearbeitung der gezogenen Proben erfolgte für die anorganischen Parameter mit Ausnahme der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) am Josef-Vogl-Technikum und für den Großteil der organischen Parameter (außer polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe) in unseren Zentrallaboratorien.

Tab. 8: Zusammenfassung der Sortierfraktionen zu Analysestoffgruppen (Auflistung in alphabetischer Reihenfolge) und Stichprobenzahl

Analysestoffgruppe	Abfallsortierfraktion	Anzahl der Proben
Elektronikschratt	Elektronikschratt	16
Feinfraktion	Feinfraktion	25
Glas	Behälterglas mit / ohne GP <sup>*)</sup>	16
Holz	Holzverpackungen mit / ohne GP <sup>*)</sup> Sonstiges Holz	16
Hygieneprodukte	Windeln Hygienepapiere	16
Inertes	Inertes Inert-Verpackungen	16
Kunststoffverpackung inkl. Folien	Kunststoffverpackungen mit / ohne GP <sup>*)</sup> Kunststofffolien (Verpackungen mit / ohne GP <sup>*)</sup> Folien (keine Verpackungen)	17
Leder, Gummi, Kork	Leder Gummi Kork	16
Mittelfraktion	Mittelfraktion	25
Organik	Küchenabfälle Gartenabfälle Tierkadaver Sonstige organische Stoffe	16
Papier, Pappe, Kartonagen	PPK-Verpackungen mit / ohne GP <sup>*)</sup> PPK-Druckerzeugnisse mit / ohne GP <sup>*)</sup> Sonstige PPK	16
Renovierungsabfälle	Renovierungsabfälle	13
Schuhe	Schuhe	16
Sonstige Kunststoffe	Sonstige Kunststoffe	16
Sonstige Verbunde	Sonstige Verbunde	16
Staubsaugerbeutel	Staubsaugerbeutel(inhalt)	16
Textilien	Bekleidungstextilien Sonstige Textilien	16
Verbundverpackungen	Verbundverpackungen mit / ohne GP <sup>*)</sup>	16
Summe		304

<sup>\*)</sup> Differenzierung der Sortierfraktion nach Grünem Punkt-Aufdruck

Insbesondere bei der Probenaufbereitung und Analytik der Abfallproben traten im Projektverlauf erhebliche Schwierigkeiten auf. Die Mehrzahl dieser Probleme konnte durch eine detaillierte Optimierung bzw. Anpassung der jeweiligen Aufbereitungs- und Analyseverfahren an die Matrices einzelner „Restmüllfraktionen“ (≙ Analysestoffgruppe) unter erhöhtem personellen und zeitlichen Mehraufwand gelöst werden [43].

### 3.4.2 Probenahme und Probenvorbereitung

Aufgrund der einheitlichen Methodik bei der Durchführung der Restmüllsortieranalysen 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 aus einem Kollektiv ca. 8 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 Folie 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 Analytestoffgruppe eine Teilprobe von bis zu 7 l gezogen und in Kunststoffsäcken aufbewahrt. Die wöchentliche Mischprobe einer Analytestoffgruppe 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  $d_p \leq 40$  mm direkt umgefüllt werden konnten, wurden die Analytestoffgruppen der Grobfraktion (außer „Staubsaugerbeutel“) 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 Analytestoffgruppe berücksichtigt (z.B. Organik und/oder Hygieneprodukte zu Beginn, Verbunde, Elektronikschrott am Ende). Die zur Beprobung gesammelten Staubsaugerbeutel einer Sortierwoche wurden aufgerissen und deren Inhalt vermischt.

Im Labor schlossen sich an die Wassergehaltsbestimmung mittels Gefriertrocknung weitere Zerkleinerungsschritte an. Je nach Analytestoffgruppe 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 Abb. 5 zeigt die Vorgehensweise bei der Zerkleinerung der beprobten Stoffgruppen detailliert auf. Erfahrungsgemäß erfordert ein Großteil der Analytestoffgruppen mehrere Zerkleinerungsschritte mit unterschiedlichen Aggregaten, um die geforderte Analysenkorngröße von maximal 0,5 mm zu erreichen. Lediglich die Analytestoffgruppe Feinfraktion, Glas und Inertes wurden ausschließlich mit der Kugelmühle auf eine Korngröße  $d_p \leq 0,5$  mm gemahlen. Mit Ausnahme der genannten drei Analytestoffgruppen wurden die Proben zunächst mit einer langsamlaufenden Schneidmühle in mehreren Zerkleinerungsvorgängen auf  $d_p \leq 2$  mm, seltener  $d_p \leq 1$  mm gebracht.

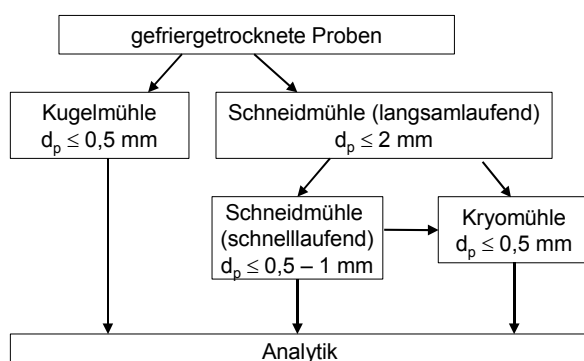


Abb. 5: Vorgehensweise bei der Probenzerkleinerung im Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser

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

Soweit das rheologische Verhalten der Stoffe es erlaubte, konnten die Proben anschließend mit einer schnelllaufenden Schneidmühle auf  $d_p \leq 0,5$  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  $d_p \leq 0,5$  mm gebracht.

Problematisch bei der Zerkleinerung ist neben der Erwärmung des Mahlgutes der Verschleiß der Mahlwerkzeuge [44, 45, 46]. 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), polychlorierten Biphenyle (PCB) und polychlorierten Phenole (PCPh) ausgewählt.

Die im Rahmen des Projektes 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 Gefriertrocknung ermittelt [47]. 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 [48]. Der Glühverlust bezeichnet dabei den beim Glühen als Gas entweichenden Massenanteil einer Stoffprobe.

Entsprechend DIN 51 900 wurde der *Heizwert* der gezogenen Proben ermittelt [49]. Mit Hilfe eines Kalorimeters wird zunächst der Brennwert der Probe bestimmt. Der Heizwert errechnet sich dann 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 Analysemethode beruht auf der katalytischen 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.

Tab. 9: Neben den PAK-Verbindungen nach EPA [43] zusätzlich quantifizierte PAK-Verbindungen

Benzo[b]fluoren (BbF)	Perylen (PER)
Bezo[b]naphtho[2,1-d]thiophen (BNT)	Dibenz[a,j]anthracen (DBajA)
Benzo[ghi]fluoranthren (BghiF)	Anthanthren (ANT)
Benzo[e]pyren (BeP)	Coronen (COR)

*Kohlenstoff* und *Schwefel* wurden mittels eines Kohlenstoff-/Schwefel-Analysators bestimmt. Das eingesetzte Analysesystem ermöglicht die Simultanbestimmung von Schwefel und Gesamt-Kohlenstoff (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 Kohlendioxid 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, Calcium, Cadmium, Chlor, Chrom, Eisen, Kalium, Kupfer, Magnesium, Mangan, Natrium, Nickel, Phosphor, Silizium, Titan, Zink, Zinn* diente die Röntgenfluoreszenz-Analyse (RFA). Die zu Tabletten gepressten Abfallproben wurden nach dieser Methode mit einem Sequenz-Röntgenspektrometer untersucht.

Für die *Quecksilber*bestimmung gemäß DIN 38406 [50] wurde die Kaltdampf-Atomabsorptionsspektroskopie herangezogen. Nach Aufschluss der Proben mit Königswasser entsprechend DIN 38 414 – 7 [51] erfolgte die Quantifizierung mit einem Quecksilber-Analysator.

### Organische Parameter

Aus der Substanzklasse der *polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe* (PAK) wurden die 16 Einzelverbindungen nach EPA [52] sowie 8 weitere PAK-Verbindungen (vgl. Tab. 9) 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 [37, 53].

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.

Die Gehalte an *polychlorierten Phenolen* (PCPh) der Abfallproben wurden als Summenkonzentrationen der Mono-, Di-, Tri- und Tetrachlorphenole bzw. Einzelkonzentration von Pentachlorphenol (PCP) erfasst. Dazu werden die Proben zunächst mit Natriumcarbonatlösung extrahiert und das Extrakt aufgereinigt. Nach Derivatisierung der Chlorphenole erfolgt die Bestimmung 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 16 Einzelwerte vor. Ausgenommen davon ist die Analysestoffgruppe Renovierungsabfälle, da hier bei den Probenahmen zu wenig Probenmaterial vorlag. Eine geringere Anzahl an Einzelwerten kann bei den übrigen Stoffgruppen und Parametern auftreten, wenn die Inhomogenität der Probe bzw. die Analysekorngroße eine Analytik nicht zuließ.

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 1 zeigt die Berechnung der analysestoffgruppenspezifischen Fracht.

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

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 Massenanteile der Analysestoffgruppen am Restmüll gem. Gl. (2) zu

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

mit

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

Die Massenanteile der Analysestoffgruppen am Restmüll, vgl. Tab. 23 in Abschnitt 4.2, liefern die zu berechnende Restmüllzusammensetzung von 15 (17) durchgeführten Sortieranalysen.



## 4 Ergebnisse und Diskussion

### 4.1 Restmüllzusammensetzung

#### 4.1.1 Datenbestand

Im Rahmen des Vorhabens wurden im Laufe von fünf Jahren 17 Sortierungen in 15 verschiedenen Gebietskörperschaften (9 Landkreise, 5 Städte, 1 Abfallzweckverband) durchgeführt. Dabei wurde der Restmüll von 28.752 Einwohnern eingesammelt, klassiert und in 47 Fraktionen sortiert. Die gesamte eingesammelte und sortierte Restmüllmenge beläuft sich auf 113 Mg bzw. 792 m<sup>3</sup>. Die Sortierkampagnen dauerten insgesamt 36 Wochen. Die Einzelergebnisse der 17 Sortierungen sind in Zwischenberichten zu diesem Vorhaben [54, 58] detailliert dargestellt.

In Abb. 6 ist das ermittelte spezifische Restmüllaufkommen in den einzelnen Untersuchungsgebieten aufgeführt. Das höchste Aufkommen lag bei 204 kg/(E-a), das geringste bei 72 kg/(E-a). Die Wertstoffmenge setzt sich im Wesentlichen aus den Fraktionen Organik sowie Kunststoffverpackungen, Papier, Pappe, Kartonagen (PPK) und Glas zusammen. Dabei ist allerdings einschränkend zu berücksichtigen, dass eine klare Trennung zwischen Wertstoffen und Reststoffen im Restmüll nicht immer eindeutig ist (vgl. auch Abschnitt 3.1.4). So lässt sich teilweise nicht mehr feststellen, ob der Wertstoff, als er in die Tonne gegeben wurde, noch verwertbar gewesen wäre (z.B. Nutzung einer Einkaufstasche als Restmülltüte, durchfeuchtete Textilien und Papiere). Die Hälfte der jeweiligen Wertstoffpotenziale sind in der Regel in der organischen Fraktion zu finden. Insbesondere bei den Landkreisen ohne Biotonne und bei den Städten wurden die höchsten Anteile ermittelt (siehe auch Abschnitte 4.1.5.1 und 4.1.6.1). Zum Aufkommen der Stoffgruppe Küchenabfälle (aus Obergruppe Organik) muss dazu jedoch angemerkt werden, dass hierin sowohl Abfälle pflanzlichen als auch tierischen Ursprungs zusammengefasst sind. Gemäß der Verordnung über den Abfallwirtschaftsplan in Bayern vom Jahre 2001 [59] sollen mittlerweile jedoch in kommunalen Sammel-

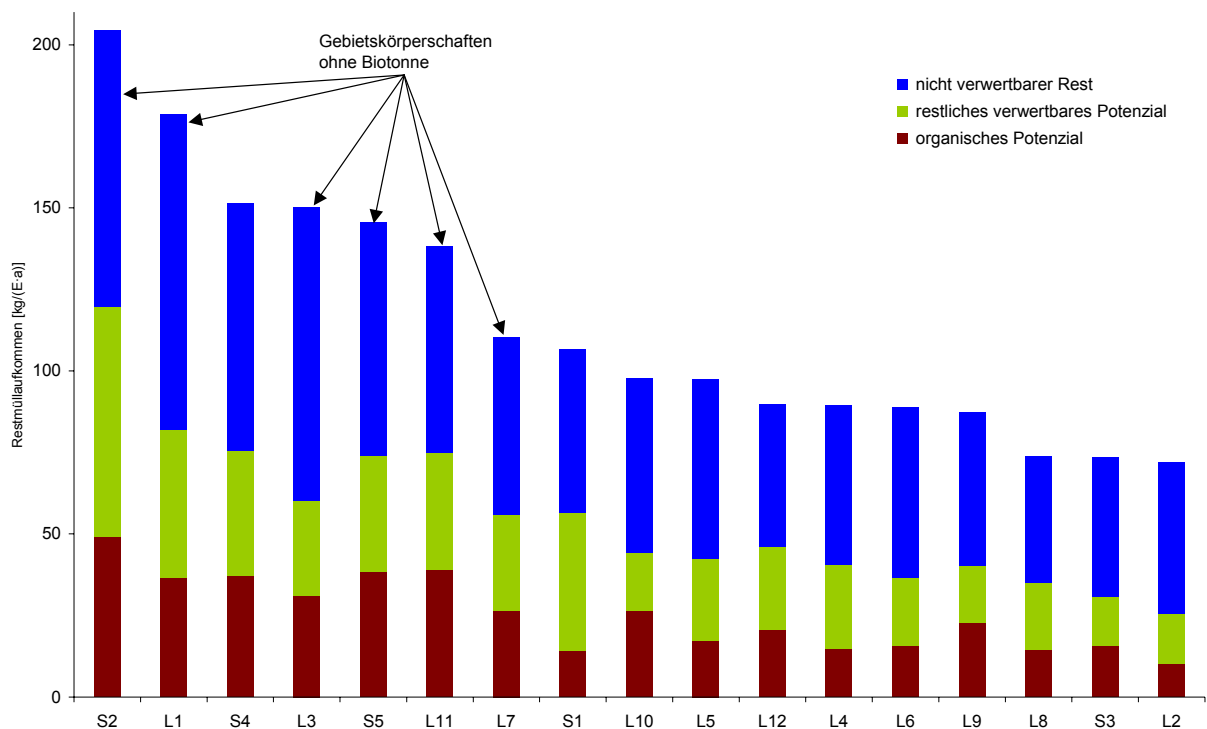


Abb. 6: Restmüllaufkommen in den untersuchten Gebietskörperschaften unterteilt in nicht verwertbaren Rest, organisches und restlich verwertbares Potenzial (maximal verwertbares Wertstoffpotenzial)

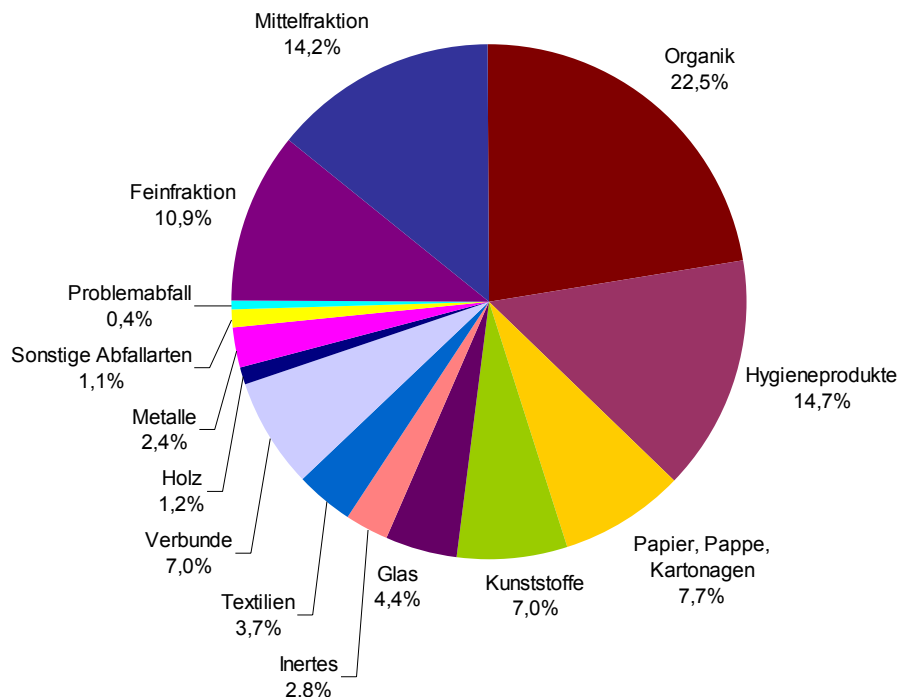


Abb. 7: Restmüllzusammensetzung nach Obergruppen in Mass.-%

systemen möglichst nur Bioabfälle pflanzlichen Ursprungs getrennt erfasst und verwertet werden. Kleinere Mengen von Bioabfällen tierischen Ursprungs aus Haushalten sollen aus hygienischen Aspekten möglichst über die Restmüllfassung entsorgt werden.

#### 4.1.2 Abfallzusammensetzung

Auf Grundlage der Mittelwertbildung ergibt sich die in Abb. 7 dargestellte Abfallzusammensetzung nach Obergruppen. Die höchsten Anteile nehmen dabei die Stoffgruppen Organik, Hygieneprodukte sowie die Mittel- und Feinfraktion ein und bestimmen somit zwei Drittel des Restmülls.

Die Feinfraktion besteht v.a. aus Straßenkehricht, die Mittelfraktion – v.a. in Gebietskörperschaften ohne Biotonne – aus organischen Materialien (60 – 90 Mass.-%); Hygieneprodukte werden dominiert von Windeln und die Papierfraktion wird zu 56 Mass.-% von Druckerzeugnissen bestimmt. Die indifferente Obergruppe Verbunde setzt sich zu 26 Mass.-% aus Verbundverpackungen, 19 Mass.-% Renovierungsabfällen, 10 Mass.-% Elektronikschrott, 8 Mass.-% Staubsaugerbeutel und 37 Mass.-% Sonstigen Verbunden zusammen. Eine detaillierte Auflistung der einzelnen sortierten Stoffgruppen gibt Tab. 10.

Das maximal nutzbare Wertstoffpotenzial im Restmüll Bayerns beläuft sich mit 55,0 kg/(E·a) auf knapp 50 Mass.-% des Restmülls, wobei die Organik mit weitem Abstand vor den übrigen Wertstoffen die Hälfte des Wertstoffpotenzials ausmacht (Tab. 11). Die einzelnen Wertstofffraktionen zeigen wie das Gesamtrestmüllaufkommen auffällige Schwankungsbreiten. Vergleicht man die noch im Restmüll vorhandenen Wertstoffmassen mit denen, die in Bayern (gemäß [16]) separat erfasst werden, so zeigt sich bei Papier, Pappe, Kartonagen, Glas oder auch bei Holz, eine gute Effizienz der Erfassungssysteme. Bei anderen Wertstoffen scheinen noch vergleichsweise große Wertstoffpotenziale im Restmüll zu verbleiben. Neben den unter Abschnitt 4.1.1 bereits aufgeführten Anmerkungen zur Verwertbarkeit ist gerade bei beispielsweise den leichtgewichtigen Kunststoff- und Verbund-Verpackungen jedoch zu berücksichtigen, dass anhaftende feuchte Restinhalts-

Tab. 10: Spezifische Restmüllzusammensetzung nach sortierten Stoffgruppen; alle Werte in kg/(E-a)

Obergruppe	Stoffgruppe	Spezifische Restmüllmasse
Feinfraktion	Feinfraktion	12,2
Mittelfraktion	Mittelfraktion	16,0
Organik	Küchenabfälle	22,8
	Gartenabfälle	2,3
	Tierkadaver	0,1
	Sonstige organische Stoffe	0,1
Hygieneprodukte	Windeln	10,8
	Hygienepapiere	5,5
Papier, Pappe, Kartonagen	PPK-Verpackungen	3,0
	PPK-Druckerzeugnisse	5,5
	Sonstige PPK	0,3
Kunststoffe	Kunststoffverpackungen	3,8
	Kunststofffolien	2,3
	Styropor	0,1
	Sonstige Kunststoffartikel	1,6
Glas	Behälterglas	4,4
	Sonstiges Glas	0,6
Inertes	Inertes außer Glas	2,8
	Inert-Verpackungen	0,0
Textilien	Bekleidungstextilien	1,7
	Sonstige Textilien	1,5
	Schuhe	1,0
Verbunde	Verbundverpackungen	2,1
	Elektronikschrott	0,9
	Renovierungsabfälle	1,6
	Fahrzeugteile	0,1
	Staubsaugerbeutel	0,7
	Sonstige Verbunde	3,0
Holz	Holzverpackungen	0,1
	Sonstiges Holz	1,3
Metalle	Fe-Metallverpackungen	1,3
	NE-Metallverpackungen	0,6
	Sonstige Metallteile	0,8
Sonstige Abfallarten	Leder	0,1
	Gummi	0,2
	Kork	0,0
	Sonstige Stoffe	0,9
Problemabfall	Sonderabfall	0,2
	Batterien	0,1
	Medikamente	0,1
Summe Restabfall		112,5

stoffe die Ergebnisse verfälschen können. Entsprechend einem Wassergehalt von bis zu 20 Mass.-% (siehe Abschnitt 4.2.1.1) sind die aufgeführten Werte für diese beiden Stoffgruppen ggf. nach unten zu korrigieren. Bei Elektronikschrott ist zu erwarten, dass die EU-Richtlinie zu Elektro- und Elektronik-Altgeräten [60] mittelfristig eine bessere Abschöpfung aus dem Restmüll nach sich zieht.

Bei den Sortierungen gesondert berücksichtigt wurde auch der Massenanteil von Batterien (ohne Knopfzellen). Aufgrund ihrer Abmessungen fallen sie i.d.R. durch das 40 mm-Sieb der Mobilen

Tab. 11: Maximale potenzielle Wertstoffmengen im Restmüll einschließlich Schwankungsbreiten sowie Sammelmengen in Bayern [16]; alle Werte in kg/(E-a)

Wertstofffraktion	Mittelwert	Schwankungsbreite		Abfallbilanz 2001
Organik	25,3	10,3	49,3	57,9
Papier, Pappe, Kartonagen	8,7	2,9	27,0	80,4
Kunststoff-Verpackungen	6,3	3,0	14,3	8,3
Behälterglas	4,4	2,2	10,8	31,5
Textilien	4,1	2,6	6,5	2,8
Metall-Verpackungen	1,9	1,1	3,9	7,1
Verbund-Verpackungen	2,1	1,0	4,3	2,2
Holz	1,3	0,4	3,1	16,3
Elektronikschrott	0,9	0,5	1,4	1,5
Summe	55,0	24,0	120,6	208,0

Abfallsortieranlage und finden sich in der Mittelfraktion. Dazu wurde die gesamte Mittelfraktion jeder Stichprobeneinheit vollständig nach Batterien durchsucht. Die gefundenen Batterien (i.d.R. 1 bis 3, mitunter aber auch bis zu 15 Stück pro SPE) wurden separat ausgewogen, so dass ein spezifisches Batterieaufkommen im Restmüll von 0,14 kg/(E-a) angegeben werden kann; hierin nicht enthalten sind Kleinbatterien (v.a. Knopfzellen), die aufgrund ihrer Größe der nicht weiter differenzierten Feinfraktion angehören und deren Aufkommen im Restmüll daher nicht erfasst wurde. Vergleicht man diesen Wert mit den neuesten Rücklaufmengen für Batterien der Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS) von 0,137 kg/(E-a) im Jahr 2002 [61], so belegen die Daten, dass sich noch ein erhebliches Batterie-Potenzial im Restmüll befindet.

#### 4.1.3 Verpackungen

Die im Restmüll verbleibenden Verpackungen wurden einer differenzierten Betrachtung unterzogen. Unterschieden wurde dabei zwischen Papier-, Kunststoff-, Glas-, Holz-, Nichteisen- und Eisenmetall- und Verbundverpackungen. Sie machen zusammen 14,9 Mass.-% des Restmülls aus, was einem spezifischen Aufkommen von 16,8 kg/(E-a) entspricht. Dies deckt sich mit den Ausführungen der Bund/Länder Arbeitsgruppe Verpackungsverordnung [62], die einer Studie des Witzhausen-Instituts folgend von circa 14 Mass.-% ausgehen.

Tab. 12: Aufkommen und Anteil von Verpackungen mit und ohne Grünem Punkt (GP) im Restmüll; falls nicht anders angegeben, alle Werte in kg/(E-a)

Verpackungsart	ohne GP	mit GP	Summe	Anteil der Verpackungen mit GP an Summe Verpackungen Mass.-%
Glas	0,92	3,51	4,43	79,3
Kunststoffe	0,88	3,02	3,90	77,5
Papier, Pappe, Kartonagen	1,94	1,22	3,16	38,5
Verbunde	0,31	1,84	2,15	85,7
Fe-Metall	0,10	1,18	1,28	92,0
Kunststofffolien	0,63	0,53	1,16	45,6
NE-Metall	0,28	0,34	0,62	55,0
Holz	0,07	0,01	0,08	11,3
Inertes	0,04	n.b.	0,04	n.b.
Summe	5,17	11,66	16,83	
Anteil am Restmüll [Mass.-%]	4,6	10,4	15,0	69,3

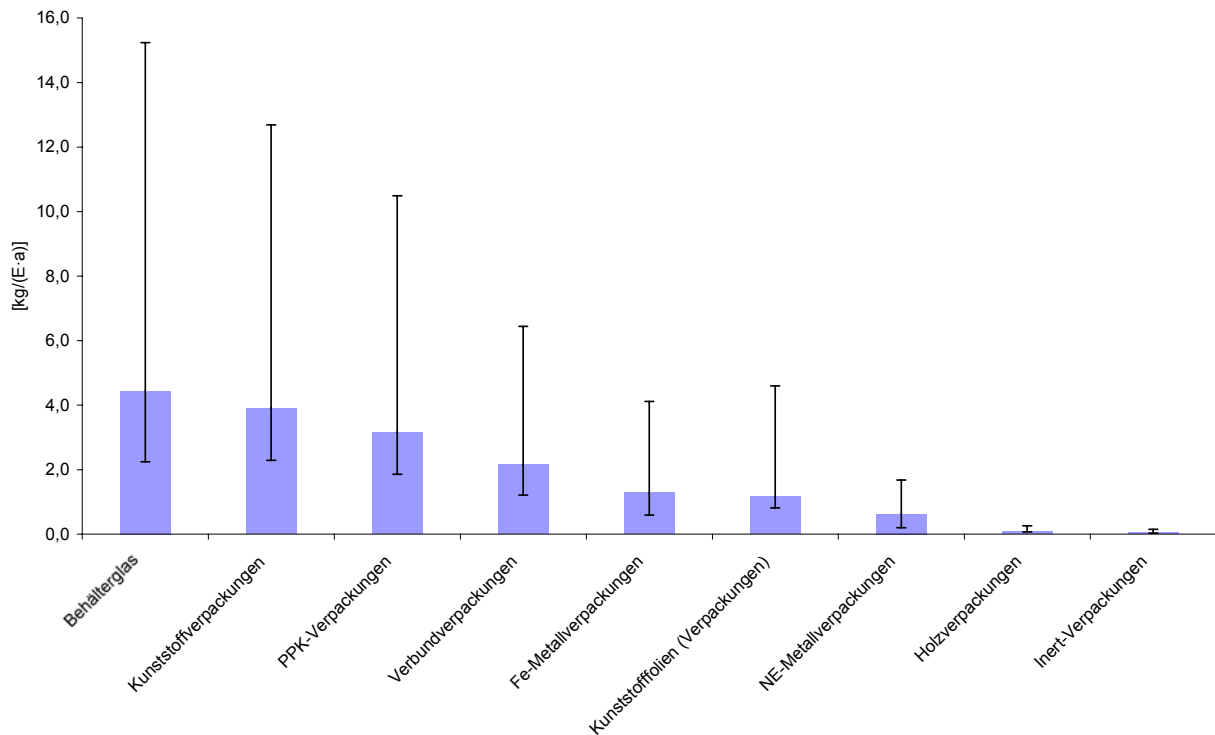


Abb. 8: Spezifisches Verpackungsaufkommen im Restmüll einschließlich Angabe der Schwankungsbreite

Das höchste Aufkommen wurde mit 4,4 kg/(E·a) aufgrund ihres spezifischen Gewichts bei Glasverpackungen ermittelt; allerdings liegen Kunststoffverpackungen (Folien zusammen mit sonstigen Kunststoffverpackungen) sogar über 5 kg/(E·a) (vgl. Tab. 12).

Wie in Abb. 8 dargestellt, kann das lokale Verpackungsaufkommen jedoch – abhängig vom Untersuchungsgebiet und den vorhandenen abfallwirtschaftlichen und sozioökonomischen Gegebenheiten – vom Mittelwert erheblich abweichen.

Bei über zwei Drittel der Verpackungsmasse handelte es sich um Verpackungen mit Grünem Punkt, wobei die größten Anteile für die Eisenmetall-, Verbund-, Glas- und Kunststoffverpackungen ermittelt wurden. Verpackungen, die rein aus Papier (z.B. Tüten aus Einzelhandelsgeschäften wie Bäcker-, Metzger-, Obstläden) oder Pappe bestehen, sind dagegen häufig nicht mit einem Grünen Punkt versehen. Ungeachtet dieses scheinbar hohen Anteils von Verpackungen mit Grünem Punkt werden die gemäß [6] geforderten Sammel- bzw. Verwertungsquoten der durch die Duale System Deutschland AG mit dem Grünem Punkt lizenzierten Verpackungen laut Mengenstromnachweis 2002 [63, 64] sicher erfüllt.

In ländlichen Gebieten verbleiben weniger Verpackungen im Restabfall als in städtischen und innerstädtischen (vgl. Tab. 13). Die Bereitschaft, Verpackungen getrennt zu halten und nicht mit dem

Tab. 13: Aufkommen von Leichtverpackungen in den verschiedenen Gebietsstrukturen

Verpackungsmaterial	Stadtrand/ländlich		städtisch		innerstädtisch	
	kg/(E·a)	davon mit GP Mass.-%	kg/(E·a)	davon mit GP Mass.-%	kg/(E·a)	davon mit GP Mass.-%
Kunststoffe	3,9	65,8%	4,7	72,7%	7,1	74,5%
Eisen-Metalle	0,9	80,3%	1,0	94,5%	1,9	94,8%
Nicht-Eisen-Metalle	0,5	53,5%	0,6	50,4%	0,8	55,8%
Verbunde	1,5	83,4%	2,0	86,9%	3,0	88,1%
Summe Leichtverpackungen	6,8	70,7%	8,3	77,1%	12,7	79,5%

Tab. 14: Behälterfüllgrade in den verschiedenen Gebietsstrukturen; alle Werte in Vol.-%

Gebietsstruktur	Landkreise	Städte	gesamt
ländlich/Stadtrand	89	84	87
städtisch	90	87	89
innerstädtisch	96	94	95
Gesamt	91	89	90

Restmüll zu entsorgen, ist im ländlichen Bereich am größten (siehe auch Abschnitt 4.1.5.3). Daneben sind für das vergleichsweise höhere Verpackungsaufkommen im innerstädtischen Bereich die vorwiegend kleineren Haushaltsgrößen und das damit verbundene Konsumverhalten (z.B. Kleinverpackungen im Gegensatz zu Großverpackungen) mitverantwortlich [13].

#### 4.1.4 Behälterspezifische Daten

Behälterspezifische Daten, wie Füllgrad, Schüttgewicht, bereitgestelltes und genutztes Behältervolumen kennzeichnen einerseits das individuelle Verbraucherverhalten und andererseits das Abfallwirtschaftssystem. Häufig ist in Abfallwirtschaftssatzungen ein mindestens vorzuhaltendes Volumen je Einwohner und Woche festgelegt.

Die behälterspezifischen Daten berechnen sich aus dem Füllgrad und dem Volumen des jeweiligen Restmüllgefäßes; beide Größen wurden bei der Probenahme vor Ort erfasst. Hieraus ergeben sich die genutzten und bereitgestellten Volumina und verrechnet mit der Restmüllmasse das durchschnittliche Schüttgewicht des Abfalls in den Restmülltonnen. In Tab. 14 sind die im Rahmen des Vorhabens ermittelten Behälterfüllgrade dargestellt. Im Durchschnitt waren die beprobten Behälter mit 90 Vol.-%, in innerstädtischen Gebieten bis 95 Vol.-% befüllt.

In Tab. 15 ist das bereitgestellte dem genutzten Behältervolumen gegenübergestellt. Die größten bereitgestellten und genutzten Behältervolumina findet man in den innerstädtischen Bereichen der Städte, die geringsten in den städtischen Bereichen der Landkreise. Im Durchschnitt wurde je Einwohner ein Restmüllvolumen von 20,5 l je Woche bereitgestellt, wovon 18,2 l je Woche effektiv genutzt wurden. Eine Reduzierung dieses relativ geringen Überangebots von 2,3 l/(E·Wo) ist aufgrund der üblicherweise eingesetzten Tonnengrößen kaum möglich und auch aus (abfall-)wirtschaftlichen Überlegungen nicht sinnvoll.

Das Schüttgewicht erlaubt eine Aussage über die Dichte und die Verdichtung des Abfalls in der Restmülltonne. In Tab. 16 sind die ermittelten Schüttgewichte in den einzelnen Strukturgebieten dargestellt. Im Durchschnitt liegt das ermittelte Schüttgewicht bei 151 kg je m<sup>3</sup>. Die geringsten Schüttgewichte findet man im innerstädtischen Bereich, was sich zum einen mit einem erhöhten Aufkommen an Leichtverpackungen deckt (vgl. Tab. 13 in Abschnitt 4.1.5.3) und zum anderen in den dort anzutreffenden größeren Restmüll-Behältern (in der Regel 1.100-Liter-Container) begründet werden kann: im Unterschied zu kleineren Behältern können in diese auch sperrigere Abfälle unzerkleinert und unverdichtet eingefüllt werden. Die erhöhten Schüttgewichte im ländlichen

Tab. 15: Bereitgestelltes und genutztes Behältervolumen in den verschiedenen Gebietsstrukturen; alle Werte in l/(E·Wo)

Gebietsstruktur	bereitgestelltes Behältervolumen			genutztes Behältervolumen		
	Landkreise	Städte	gesamt	Landkreise	Städte	gesamt
ländlich/Stadtrand	17,5	23,0	19,3	15,3	18,5	16,3
städtisch	16,1	24,2	18,8	14,2	19,9	16,1
innerstädtisch	19,6	30,0	23,1	18,8	27,9	21,8
Gesamt	17,7	26,2	20,5	15,8	22,9	18,2



Tab. 16: Schüttgewichte in den verschiedenen Gebietsstrukturen; alle Werte in kg/l

Gebietsstruktur	Landkreise	Städte	gesamt
ländlich/Stadtrand	0,165	0,151	0,160
städtisch	0,156	0,148	0,153
innerstädtisch	0,132	0,139	0,134
Gesamt	0,155	0,145	0,151

Bereich können auch auf im Vergleich „schwerere“ Abfallbestandteile, wie Inertes und die Feinfraktion, zurückgeführt werden (vgl. Abb. 10 in Abschnitt 4.1.5.3). Vergleicht man sämtliche Sortiererergebnisse, so schwanken die Schüttgewichte zwischen 0,107 (Landkreis, ländlich) und 0,189 (Landkreis, innerstädtisch) kg Restmüll pro Liter.

Die Möglichkeit, die Behältergröße oder die Häufigkeit der Leerung zu wählen und dabei die eigenen Müllgebühren zu reduzieren, schafft beim Bürger Anreize sein Restmüllaufkommen und/oder -volumen zu reduzieren. Die Untersuchungsergebnisse belegen, dass dies u.a. mit höheren Schüttgewichten durch verstärktes Vorzerkleinern und Verdichten des Restmülls (siehe auch Abschnitt 4.1.8.1) einhergeht.

#### 4.1.5 Restmüllaufkommen in Abhängigkeit von demographischen Einflussfaktoren

##### 4.1.5.1 Kategorie Landkreis/Stadt

Wie schon aus Abschnitt 4.1.1 ersichtlich, zeichnen sich deutliche Unterschiede im Restmüllaufkommen und in der -zusammensetzung zwischen Landkreisen und Städten ab. Es wurden insgesamt zehn Landkreise (dabei ein aus zwei Landkreisen bestehender Abfallzweckverband) und fünf Städte beprobt. In Tab. 17 ist das Restmüllaufkommen, die durchschnittliche Restmüllzusammensetzung nach Obergruppen sowie die Schwankungsbreite für Landkreise und Städte – getrennt hochgerechnet auf Bayern – dargestellt. Von den doppelt beprobten Landkreisen wurde die jeweils zweite Untersuchung (L11 und L12) in die Mittelung einbezogen.

Für die *Landkreise* ergibt sich ein durchschnittliches Restmüllaufkommen von 100,5 kg/(E·a). Die Hauptmasse des Restmülls – ca. 63 Mass.-% – liefern die Obergruppen Organik mit 22,4 kg/(E·a),

Tab. 17: Restmüllzusammensetzung von bayerischen Landkreisen und Städten nach Obergruppen – vgl. Tab. 10 – einschließlich Angabe der Schwankungsbreiten (Minimum, Maximum); alle Werte in kg/(E·a)

Obergruppe	Landkreise			Städte		
	Mittelwert	Schwankungsbreite		Mittelwert	Schwankungsbreite	
Feinfraktion	12,2	8,2	21,9	12,3	7,7	15,7
Mittelfraktion	13,8	7,4	28,5	20,4	8,8	35,8
Organik	22,4	10,3	39,1	31,0	14,1	49,3
Hygieneprodukte	15,4	12,8	21,4	18,6	15,1	23,3
Papier, Pappe, Kartonagen	6,2	3,4	11,1	13,7	2,8	27,0
Kunststoffe	7,4	4,6	10,8	8,7	3,9	15,9
Glas	4,1	2,5	6,8	6,8	2,6	11,4
Inertes	2,8	1,7	5,7	3,8	2,5	4,7
Textilien	3,6	2,6	4,8	5,2	3,2	6,5
Verbunde	7,5	2,0	12,9	8,7	4,7	12,1
Metalle	2,4	1,7	3,6	3,4	1,6	5,2
Holz	1,0	0,4	2,4	2,0	0,8	3,1
Sonstige Abfallarten	1,3	0,2	2,5	1,2	0,8	1,8
Problemabfall	0,4	0,1	0,8	0,5	0,3	0,9
Summe Restabfall	100,5	72,0	150,2	136,3	73,5	204,4

Tab. 18: Spezifisches Wertstoffaufkommen im Restmüll von Landkreisen und Städten Bayerns; alle Werte in kg/(E·a)

Wertstofffraktion	Landkreise	Städte
Organik	22,4	31,0
Papier, Pappe, Kartonagen	6,2	13,7
Kunststoffe inkl. Styropor	5,8	7,4
Glas	3,6	6,1
Textilien	3,6	5,2
Metalle	2,4	3,4
Verbunde	1,9	2,5
Holz	1,0	2,0
Kork	0,0	0,0
Summe	47,7	72,1

Hygieneprodukte mit 15,5 kg/(E·a), Mittelfraktion mit 13,9 kg/(E·a) und Feinfraktion mit 12,2 kg/(E·a). Die Problemabfälle belaufen sich auf 0,4 kg/(E·a).

Für die untersuchten kreisfreien *Städte* ergibt sich ein mittleres Restmüllaufkommen von 136,4 kg/(E·a). Somit produziert jeder Einwohner einer Stadt im Jahr durchschnittlich 25 % mehr Restmüllmasse als ein Landkreis-Bewohner. Die Hauptmassebildner des städtischen Restmülls sind wiederum die Obergruppen Organik mit 31,0 kg/(E·a), Mittelfraktion mit 20,4 kg/(E·a), Hygieneprodukte mit 18,6 kg/(E·a) und Feinfraktion mit 12,3 kg/(E·a), aber auch Papier, Pappe, Kartonagen mit 13,7 kg/(E·a). Die genannten Obergruppen machen etwa 70 Mass.-% des Restmüllaufkommens aus.

Mit Ausnahme der Sortiergruppen Sonstige Stoffe und Feinmüll ist das spezifische Aufkommen der Obergruppen in Städten durchweg höher als in Landkreisen. Der Anteil des Problemabfalls im Restmüll der Städte ist mit dem in Landkreisen vergleichbar. Bei Landkreisen wie bei Städten ergeben sich aufgrund der vielfältigen Abfallwirtschaftssysteme hohe Schwankungen im spezifischen Aufkommen.

Aus den durchgeführten Sortieranalysen ergibt sich für Landkreise ein durchschnittliches maximal nutzbares Wertstoffaufkommen von 47,7 kg/(E·a), für Städte von 72,1 kg/(E·a) (vgl. Tab. 18). Es verbleiben demnach 50 Mass.-% mehr Wertstoffe im Restmüll der Städte als im Restmüll der Landkreise. Bis auf den Wertstoff Kork ist das spezifische Aufkommen aller Wertstoffe im Restmüll der Städte höher als das der Landkreise. Die Hauptmasse der Wertstoffe nimmt jeweils mit über 40 Mass.-% die organische Fraktion ein, gefolgt von den Fraktion Papier, Pappe, Kartonagen und Kunststoffverpackungen. Die Aussagen zur Verwertbarkeit in den Abschnitten 4.1.1 und 4.1.2 gelten entsprechend.

#### 4.1.5.2 Kategorie Einwohnerstrukturklassen

Die bayerische Abfallbilanz [16] unterteilt die Gebietskörperschaften in die über die Einwohnerdichte definierten Einwohnerstrukturklassen ländlich, ländlich dicht, städtisch und großstädtisch. Im Rahmen des Vorhabens wurden jeweils fünf ländliche und ländlich dichte, vier städtische und eine großstädtische Gebietskörperschaft beprobt. Die Tatsache, dass Bayern eher ländlich als großstädtisch strukturiert ist und daher lediglich eine großstädtische Gebietskörperschaft untersucht wurde, ist bei der Interpretation von Abb. 9 zu berücksichtigen.

Es zeichnet sich mit steigender Einwohnerdichte auch eine Zunahme des spezifischen Abfallaufkommens einzelner Stoffgruppen ab. Dies gilt mit Ausnahme der Feinfraktion für alle Obergruppen der städtischen Gebietskörperschaften. Bei der großstädtischen Gebietskörperschaft bilden lediglich die Obergruppen Hygieneprodukte, Pappe, Papier, Kartonagen und die Kunststoffe nicht die massenmäßig stärkste Fraktion. Das gesamte Restmüllaufkommen beträgt in ländlichen Gebiets-

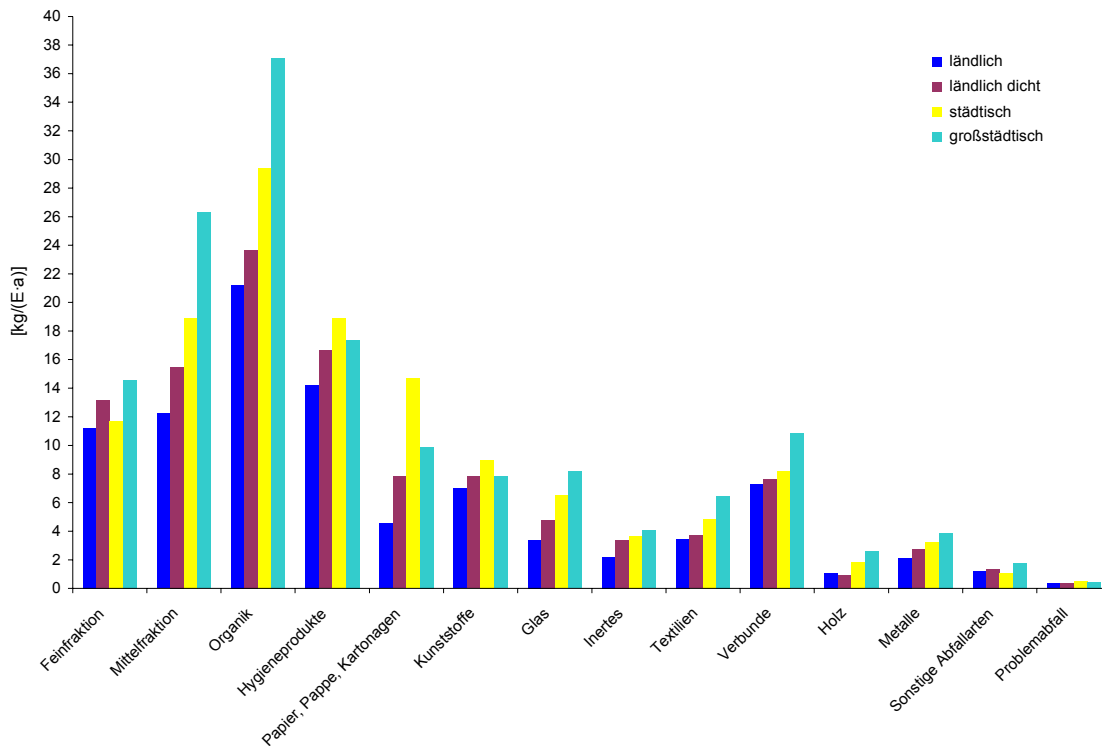


Abb. 9: Vergleich des spezifischen Aufkommens der Sortier-Übergruppen – vgl. Tab. 10 – in Abhängigkeit der verschiedenen Einwohnerstrukturklassen

körperschaften 91,5 kg/(E-a), in ländlich dichten 109,6 kg/(E-a), in städtischen 132,5 kg/(E-a) und in großstädtischen 151,3 kg/(E-a).

Da es sich bei den Einwohnerstrukturklassen ländlich und ländlich dicht um Landkreise, bei städtisch und großstädtisch um kreisfreie Städte handelt, lassen sich die in Abschnitt 4.1.5.1 getroffenen weiteren Aussagen übertragen.

#### 4.1.5.3 Kategorie Gebietsstrukturen

Wie im Abschnitt 3.1.2 erläutert, wurde für die einzelnen Sortierungen eine Schichtung des Untersuchungsgebiets entsprechend der Gebietsstrukturen vorgenommen, was letztlich die Wohnbauungsdichte widerspiegelt. Jedes Schichtungsmerkmal (ländlich/Stadtrand, städtisch, innerstädtisch) wurde entsprechend [24] bei jeder Sortierung mit mindestens sechs Stichprobeneinheiten berücksichtigt. Die im Folgenden dargestellte Auswertung fasst die Ergebnisse der einzelnen Landkreise und Städte für jedes Schichtungsmerkmal zusammen.

Insgesamt errechnet sich für ländliche Gebiete ein Restmüllaufkommen von 100,8 kg/(E-a), für städtische von 102,0 kg/(E-a) und für innerstädtische von 134,1 kg/(E-a). Betrachtet man die einzelnen Übergruppen, nimmt das spezifische Abfallaufkommen – abgesehen von der Feinfraktion und der Sortiergruppe Inertes – mit der Bebauungsdichte zu. Die Feinfraktion besteht vorwiegend aus Straßenkehricht, Asche und Tierstreu, die Inertfraktion kann mitunter nicht unerhebliche Anteile an Baubuchmaterial beinhalten. Das verstärkte Aufkommen dieser beiden Stoffgruppen im ländlichen Bereich mit hohem Eigenheimanteil (z.B. verstärkt Heimwerkertätigkeiten) und mit eingeschränkter öffentlicher Gehsteig- und Straßenreinigung sowie vermehrter Holzofenfeuerung ist plausibel und steht in keinem Widerspruch zu der Aussage, dass das Abfallaufkommen mit zunehmender Bebauungsdichte steigt.

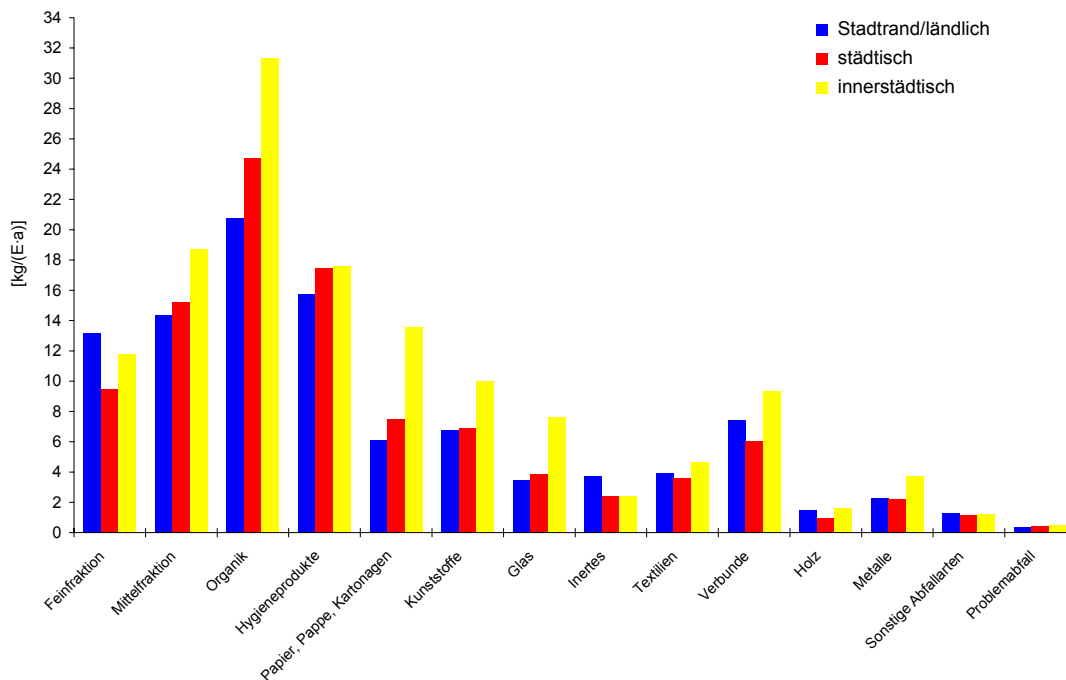


Abb. 10: Vergleich des spezifischen Aufkommens der Sortier-Obergruppen – vgl. Tab. 10 – in Abhängigkeit der verschiedenen Gebietsstrukturen

Der zunehmende Grad der Bebauung hat i.d.R. zur Folge, dass im innerstädtischen Bereich mehrere Haushalte den gleichen, größer dimensionierten Restmüllbehälter benutzen. Die Abrechnung der Müllgebühren erfolgt i.d.R. über die (Miet-)Nebenkosten, wodurch eine direkte Einflussnahme des Einzelnen auf die Müllgebühren eingeschränkt wird. Die Akzeptanz von Trennsystemen ist im innerstädtischen Bereich kleiner als im ländlichen Bereich, was sich massenanteilig v.a. bei den wertstoffreichen Obergruppen Organik und Papier, Pappe, Kartonagen widerspiegelt. Dagegen ist der Anteil an z.B. Hygieneartikeln in allen Gebietsstrukturen vergleichsweise ähnlich, da hier das Aufkommen im Restabfall größtenteils unabhängig von Müllgebühren und Trennsystemen ist. Insbesondere schlagen sich größere Behälter, geringere „Identifikation“ mit dem produzierten eigenen Restmüll und auch eingeschränkte räumliche Verhältnisse, um Abfälle getrennt zu halten, in höheren Restmüllmassen nieder.

#### 4.1.6 Restmüllaufkommen in Abhängigkeit des Abfallwirtschaftssystems

In Bayern existieren in den einzelnen Gebietskörperschaften unterschiedliche Abfallwirtschafts- und damit Wertstofffassungssysteme, vgl. Abschnitt 3.2. Entsprechend variieren die Massenanteile der einzelnen Wertstoffgruppen im Restmüll der einzelnen Gebietskörperschaften.

In den beprobten Gebietskörperschaften stellen die Stoffgruppen Organik, Papier, Pappe, Kartonagen und Leichtverpackungen (Kunststoff-, Verbund-, Metallverpackungen) die im Restmüll masse-relevanten Wertstoffe dar, für die auch unterschiedliche Erfassungssysteme eingeführt sind. Deren Anteil am Restmüll der untersuchten Gebietskörperschaften – abhängig vom Erfassungssystem – wird im Weiteren dargestellt.

Die Betrachtungen beziehen sich dabei auf den Vorrang der Abfallvermeidung und damit Restmüllminderung bzw. der (stofflichen) Verwertung des KrW-/AbfG [8]. Dabei werden physikalisch-chemische Änderungen (z.B. Änderung des Heizwertes durch Wertstoffentzug) des verbleibenden Restabfalls zunächst ebenso außer Acht gelassen (siehe dazu Abschnitt 4.2) wie die Frage der Wirtschaftlichkeit der Einführung oder Nicht-Einführung neuer abfallwirtschaftlicher Systeme.

#### 4.1.6.1 Erfassung von Bioabfällen

In zwei Drittel der beprobten Gebietskörperschaften werden Bioabfälle im Holsystem gesammelt. Da 78 % der bayerischen Bevölkerung an eine Biotonne angeschlossen sind (siehe Abschnitt 3.2), erfassen die Stichproben die tatsächliche Situation in Bayern annähernd. Für die Untersuchungsgebiete mit Biotonne ergibt sich im Mittel ein Restmüllaufkommen von 93,8 kg/(E·a), für die Gebiete ohne Biotonne von 149,7 kg/(E·a).

Die Abb. 11 zeigt das Organikaufkommen im Restmüll der untersuchten Gebietskörperschaften in Abhängigkeit vom Erfassungssystem. In Gebietskörperschaften mit Biotonne (Holsystem) liegen i.d.R. die verbleibenden Organikmassen im Restmüll unter den Gebietskörperschaften ohne Biotonne. Die Gebietskörperschaft S4 stellt dabei eine Ausnahme dar: es verbleiben trotz einer Erfassung im Holsystem größere Massen an Organik im Restmüll. Tendenziell weisen Städte im Allgemeinen ein höheres Wertstoffaufkommen im Restmüll auf, da dort i.d.R. die Bereitschaft der Bürger zur Getrennterfassung von Wertstoffen – aufgrund z.B. eines anonymen Wohnumfelds oder aufkommensunabhängiger Gebührengestaltung – geringer ist (siehe auch Abschnitt 4.1.5.1). Andererseits zeigt die Graphik am Beispiel der Gebietskörperschaft L7, dass auch ohne Holsystem für Bioabfälle das verbleibende Organik-Restpotenzial nicht über dem der Gebietskörperschaften mit Biotonne (hier L10) liegen muss.

Neben dem Erfassungssystem beeinflussen auch eine Vielzahl anderer Faktoren den Organikgehalt im Restmüll, wie beispielsweise das bereitgestellte Restmüllbehältervolumen, das Gebührenmodell (z.B. personen- oder volumenabhängig) für alle Abfallfraktionen (Restmüll und Wertstoffe) oder der Grad bzw. die Förderung der Eigenkompostierung. Neben der Einführung einer Biotonne sind also weitere Maßnahmen nötig, um den Organikgehalt im Restmüll unter 15 kg/(E·a) zu senken.

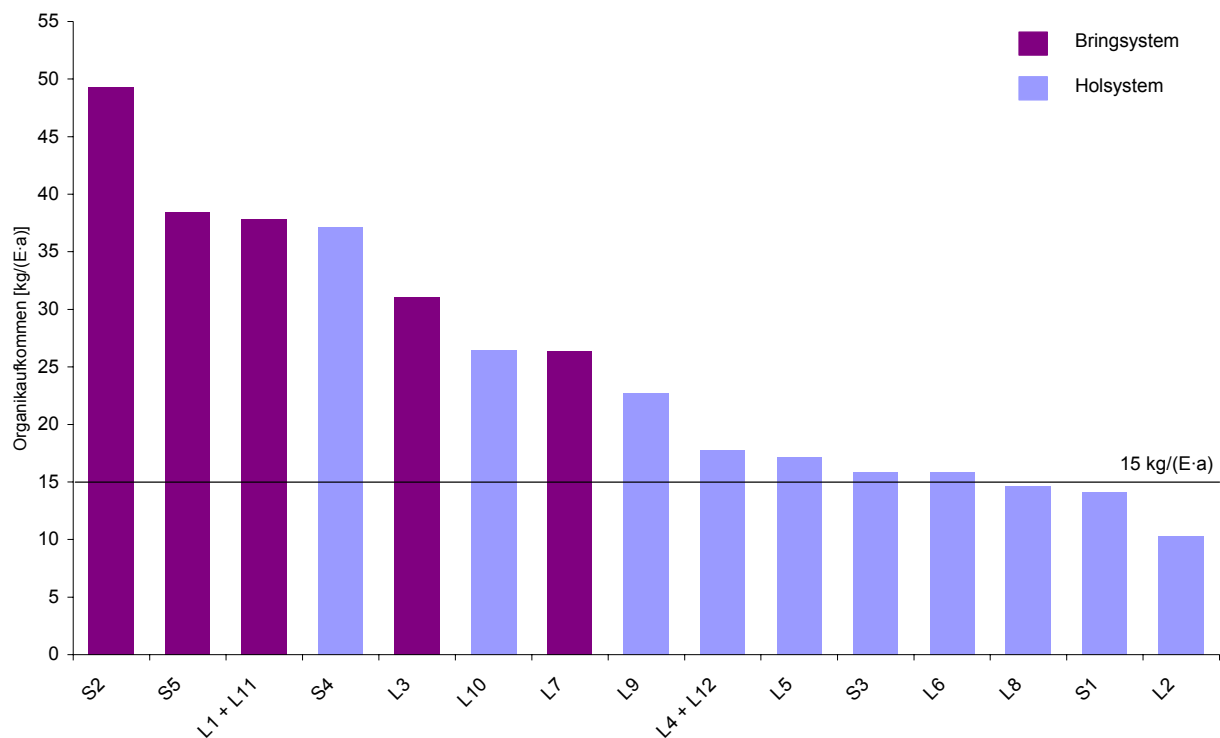


Abb. 11: Vergleich des spezifischen Organikaufkommens (Bio- und Gartenabfälle) im Restmüll der 15 untersuchten Gebietskörperschaften in Abhängigkeit des Erfassungssystems (Bring- oder Holsystem)

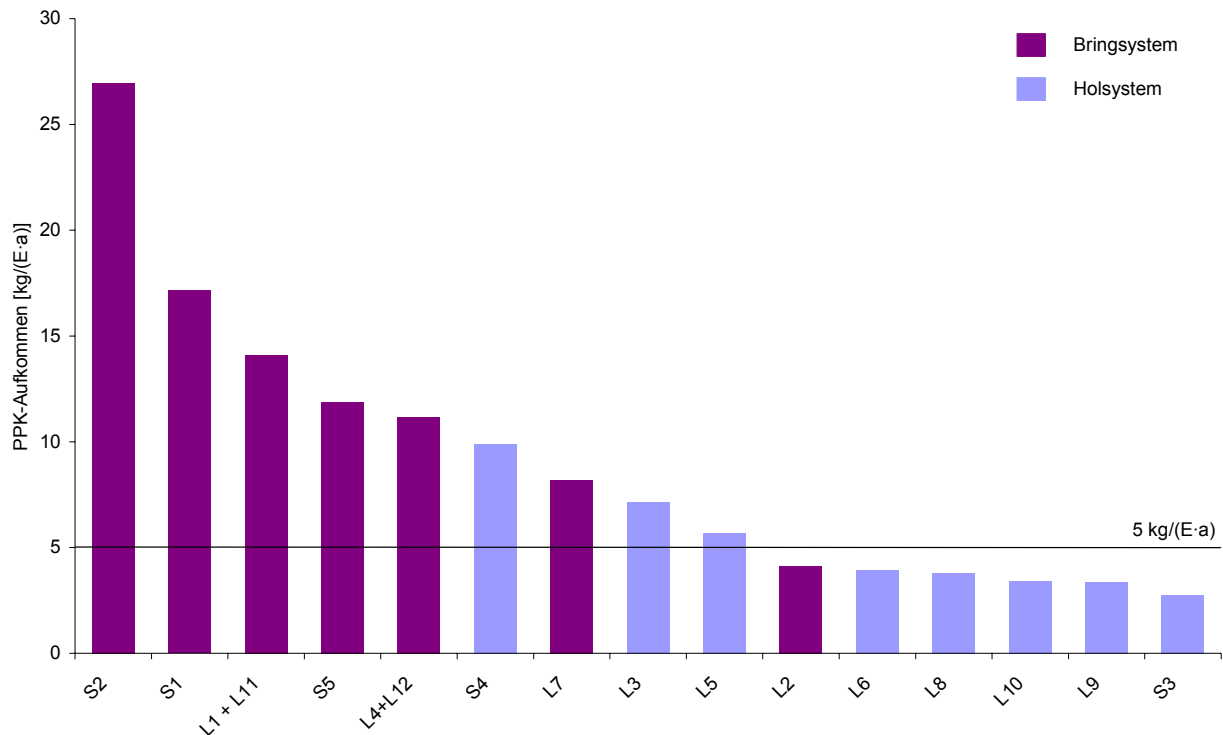


Abb. 12: Vergleich des spezifischen Aufkommens an Papier, Pappe und Kartonagen (PPK) im Restmüll der 15 untersuchten Gebietskörperschaften in Abhängigkeit des Erfassungssystems (Bring- oder Holsystem)

#### 4.1.6.2 Erfassung von Papier, Pappe, Kartonagen

Acht der 15 beprobten Landkreise und Städte verfügen über Holsysteme für die Papier-, Pappe-, Kartonagen-Fraktion mit maximal vierwöchigem Abholturnus. Die Abb. 12 zeigt die ermittelten Massen an Papier/Pappe/Kartonagen im Restmüll der untersuchten Gebietskörperschaften. Mit Ausnahme der Landkreise L7 und L2 weisen alle Gebietskörperschaften mit einer Erfassung dieser Obergruppe im Bringssystem höhere Anteile im Restmüll auf als Gebietskörperschaften mit einer Papiertonne. Dabei verbleiben i.d.R. in den Städten massenmäßig mehr Papier, Pappe und Kartonagen im Restmüll als in Landkreisen.

Die Wertstoffmenge an Papier, Pappe und Kartonagen im Restmüll schwankt zwischen 2,8 und 27,0 kg/(E·a) und liegt im Schnitt bei den Gebietskörperschaften ohne Papiertonne bei 13,4 und mit Papiertonne bei 5,0 kg/(E·a). Der Landkreis L2 verfügt über keine Papiertonne, erreicht aber dennoch einen vergleichsweise niedrigen Anteil im Restmüll von 4,2 kg/(E·a). Ursache hierfür ist ein ausgeprägtes volumenbezogenes Gebührenabrechnungssystem (Wertmarkensystem) in den einzelnen Gemeinden sowie eine regelmäßige und häufige Bündelsammlung für Altpapier-Druckerzeugnisse, die den größten Anteil an der Fraktion Papier, Pappe, Kartonagen ausmachen.

Zusammengefasst zeigen die Ergebnisse, dass durch die Einführung einer Papiertonne (Holsystem) das Papier-, Pappe-, Kartonagen-Aufkommen im Restmüll auf etwa 5 kg/(E·a) gesenkt werden kann. Im Bringssystem lassen sich Werte um 7,5 kg/(E·a) für die im Restmüll verbleibende papierhaltigen Fraktionen durchaus erreichen.

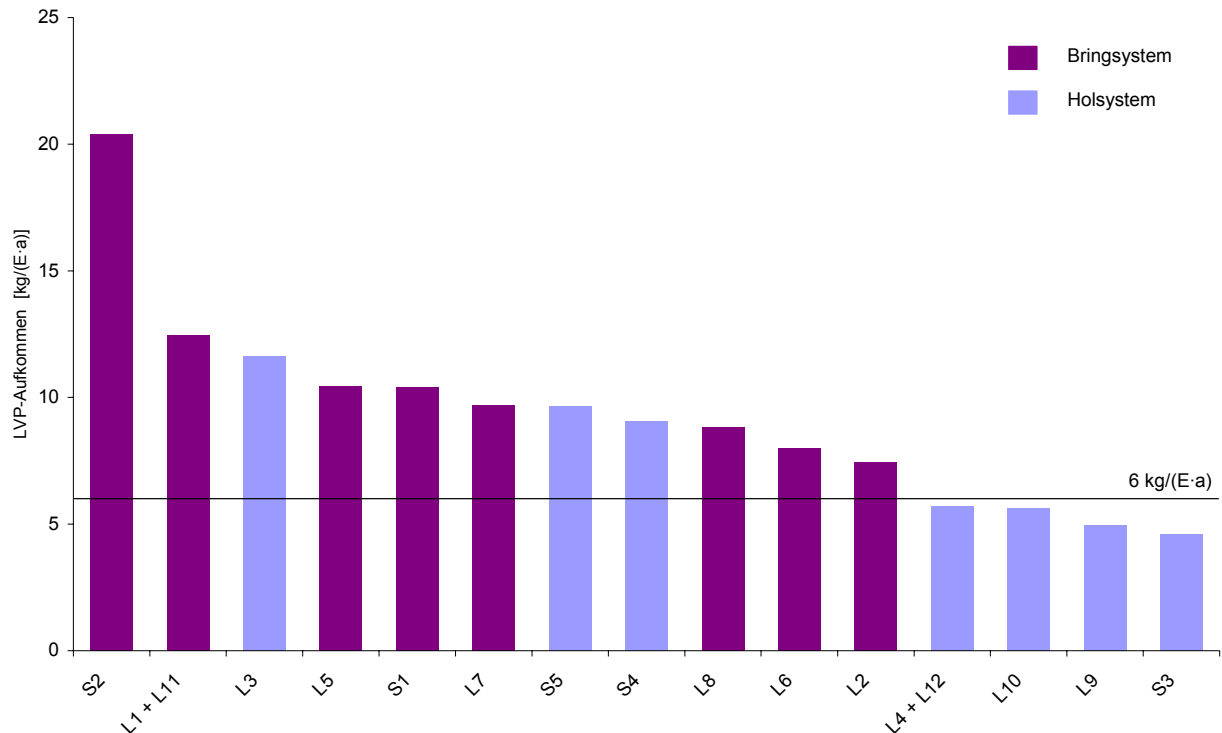


Abb. 13: Vergleich des spezifischen Leichtverpackungsaufkommens im Restmüll der 15 untersuchten Gebietskörperschaften in Abhängigkeit des Erfassungssystems (Bring- oder Holsystem)

#### 4.1.6.3 Erfassung von Leichtverpackungen

Unter Leichtverpackungen (LVP) werden Kunststoff-, Verbund- sowie Metallverpackungen zusammengefasst. Sieben bzw. acht (in einem Landkreis bei nur 10 % der Einwohner) der 15 beprobten Gebietskörperschaften erfassen Leichtverpackungen über ein Holsystem (Gelbe Tonne, Gelber Sack); in Bayern sind 51 % der Einwohner an ein Holsystem für LVP, vgl. Tab. 6, angeschlossen.

Der im Restmüll verbleibende LVP-Anteil ist bezüglich der Bring- oder Holsysteme der Gebietskörperschaften uneinheitlich, siehe Abb. 13. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass Restmassen unter 6,0 kg/(E·a) nur Gebietskörperschaften mit Holsystemen erreichen. Die mit Abstand höchste Masse an Leichtverpackungen im Restmüll befand sich mit 20,4 kg/(E·a) in der Stadt S2, die die Leichtverpackungen über Wertstoffinseln im Bringsystem erfasst; im Mittel über alle beprobten Gebietskörperschaften verbleiben 9,3 kg/(E·a) Leichtverpackungen im Restmüll.

#### 4.1.6.4 Ergebnis des Systemvergleichs

Für alle eingeführten und in den vorangegangenen Abschnitten betrachteten Sammelsysteme wird deutlich, dass der Komfort der Abfallsammlung die Abfallzusammensetzung und das -aufkommen bestimmt. Allerdings bleiben auch bei einem optimierten System noch Wertstoffe im Restabfall, wobei deren tatsächliche Verwertbarkeit (vgl. Abschnitte 4.1.1 und 4.1.2) nicht eindeutig bestimmt werden kann.

Der Erfolg eines Systems und die Qualität der gewonnenen Wertstoffe ist in jedem Fall von den örtlichen Gegebenheiten (z.B. Bebauungsstruktur) und der Motivation der Einwohner (z.B. in Form von Aufklärungs- und Überzeugungsarbeit) abhängig. Vor der Einführung neuer Systeme ist diese Tatsache in die Überlegungen einzubeziehen und der gesamte Entsorgungsweg ökonomisch und ökologisch ganzheitlich zu betrachten.

#### 4.1.7 Hochrechnung für Bayern

Anhand der Sortiererergebnisse in 15 Gebietskörperschaften ergibt eine Mittelwertbildung ein durchschnittliches Restmüllaufkommen von 112,5 kg/(E·a) für Bayern.

Anstelle der Mittelwertbildung kann man die Daten für die Hochrechnung verschieden gewichten. Hierbei wurden im Folgenden – wie auch bei der Mittelwertbildung – von den doppelt beprobten Gebietskörperschaften (L1 und L11 bzw. L4 und L12) jeweils nur die Ergebnisse der zweiten, aktuelleren Sortierkampagne einbezogen. Soweit nicht anderweitig angegeben, wurden zur Hochrechnung der Sortierdaten auf Bayern die Gewichtungsfaktoren der bayerischen Abfallbilanz 2001 [16] herangezogen.

##### *Hochrechnung nach Landkreisen und kreisfreien Städten*

73,8 % der Einwohner in Bayern leben in Landkreisen, 26,2 % wohnen in kreisfreien Städten; anhand von Landkreisen und Städten (vgl. Abschnitt 4.1.5.1) hochgerechnet ergibt sich entsprechend für Bayern ein Restmüllaufkommen von 109,9 kg/(E·a).

##### *Hochrechnung nach Einwohnerstrukturklassen*

34,9 % der Einwohner in Bayern leben in ländlichen, 38,9 % in ländlich dichten, 9,4 % in städtischen und 16,8 % in großstädtischen Gebieten. Das Abfallaufkommen in den Gebietskörperschaften – nach Einwohnerstrukturklassen aufgegliedert – ist in Abschnitt 4.1.5.2 dargestellt. Nach diesen gewichtet errechnet sich für Bayern ein Restmüllaufkommen von 112,5 kg/(E·a).

##### *Hochrechnung nach Abfallerfassungssystem*

78 % der bayerischen Bürger haben Zugang zu eigenen Biotonnen. Danach ergibt sich für Bayern ein Restmüllaufkommen von 106,1 kg/(E·a) (vgl. Abschnitt 4.1.6.1); analog gewichtet nach dem Anschluss an eine Papiertonne ergibt sich ein Restmüllaufkommen von 112,7 kg/(E·a) und nach dem Anschluss an die Sammlung von Leichtverpackungen ein Restmüllaufkommen von 112,5 kg/(E·a).

In Abb. 14 ist eine Auswahl der verschiedenen Hochrechnungsergebnisse nach Obergruppen sortiert zusammenfassend dargestellt.

Die nach den unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren ermittelten spezifischen Restmüllmassen pro Einwohner und Jahr belaufen sich auf 106 bis über 112 kg/(E·a). Insbesondere der Vergleich der reinen Mittelwertbildung mit der Hochrechnung nach Einwohnerstrukturklassen {jeweils 112,5 kg/(E·a)} zeigt, dass die Stichprobe der 15 Gebietskörperschaften für Bayern repräsentativ gewählt war.

Zur weiteren Plausibilitätsprüfung lässt sich das bayerische Restmüllaufkommen gemäß [16] heranziehen. Das Gesamthausmüllaufkommen wird hier mit 149,2 kg/(E·a) angegeben. Darin mitenthalten ist das Geschäftsmüllaufkommen, das zusammen mit dem Restmüll aus Haushalten erfasst wird, im vorliegenden Vorhaben jedoch nicht einbezogen wurde. In der kommunalen Abfallwirtschaft wird das Geschäftsmüllaufkommen auf etwa 20 bis 30 Mass.-% des Gesamthausmülls geschätzt [65, 66]. Nimmt man einen Geschäftsmüllanteil von 25 Mass.-% an, errechnet sich ein spezifisches Restmüllaufkommen von 111,9 kg/(E·a), was die in diesem Vorhaben ermittelten Wertebereich von 106 bis über 112 kg/(E·a) bestätigt.



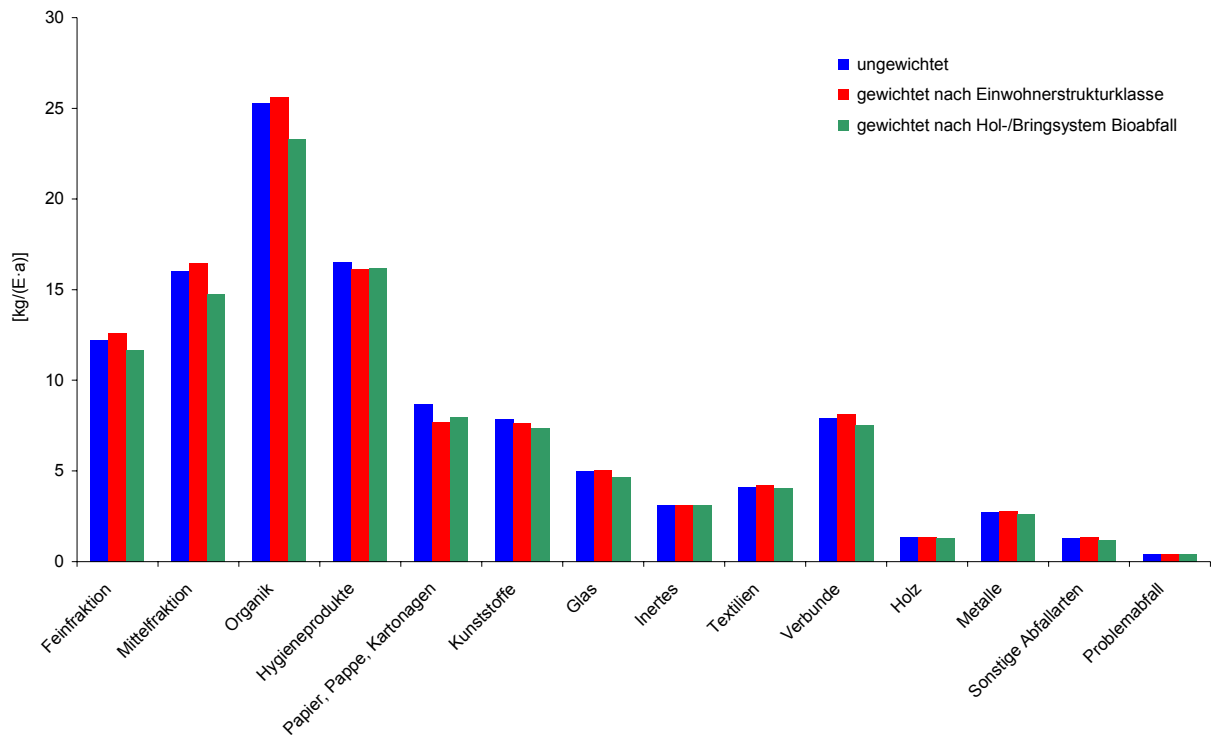


Abb. 14: Vergleich des spezifischen Aufkommens der Sortier-Obergruppen – vgl. Tab. 10 – in Abhängigkeit unterschiedlicher Hochrechnungsmethoden

#### 4.1.8 Zeitliche Veränderung in Restmüllaufkommen und -zusammensetzung

Für die Erfassung der Veränderungen in Restmüllaufkommen und -zusammensetzung innerhalb eines Zeitintervalls von über drei Jahren wurden in den Landkreisen L1 und L4 gegen Projektende die Sortierungen wiederholt (L11 und L12).

##### 4.1.8.1 Landkreis L1

Im *Landkreis L1* wurde die erste Sortierung in den Jahren 1998 bzw. 1999 und die zweite Sortierung im Jahr 2002 durchgeführt. In der Zwischenzeit wurde im Jahr 2001 die Gebührenberechnung von einem vom Leerungsrhythmus unabhängigen Behältermaßstab auf ein sog. Ident-System umgestellt. Dazu wurden die Restmüllgefäße mit einem Chip versehen, wodurch jede Leerung der Restmülltonne automatisch erfasst und abgerechnet wird. Diese Systemänderung hat sichtbare Auswirkungen auf das Abfallaufkommen und besonders auf die behälterspezifischen Kenndaten. In Tab. 19 sind die ermittelten Behälterfüllgrade der Sortierung der Jahre 1998/1999 denen der Sortierung des Jahres 2002 gegenübergestellt.

Der Vergleich der beiden Restmüllsortierungen zeigt auf Kreisebene sowie in den einzelnen Gebietsstrukturen nach der Systemumstellung im Jahr 2001 eine deutliche Zunahme des Behälter-

Tab. 19: Vergleich der Behälterfüllgrade des Landkreises L1 (= L11) zwischen den Sortierkampagnen der Jahre 1998/1999 und 2002; alle Werte in Vol.-% [55, 58]

Gebietsstruktur	Sortierung 1998/1999	Sortierung 2002
ländlich	93	101
städtisch	89	97
innerstädtisch	93	96
Landkreis	92	98

Tab. 20: Vergleich der Schüttgewichte der SPE im Landkreis L1 (= L11) zwischen den Sortierkampagnen der Jahre 1998/1999 und 2002; alle Werte in kg/l [55, 58]

Gebietsstruktur	Sortierung 1998/1999	Sortierung 2002
ländlich	0,172	0,206
städtisch	0,150	0,201
innerstädtisch	0,139	0,149
Landkreis	0,155	0,185

füllgrades um durchschnittlich 6 Vol.-%. Dabei nimmt in innerstädtischen Strukturen der Behälterfüllgrad mit ca. 3 Vol.-% am wenigsten zu (vgl. Tab. 19).

Das Restmüllschüttgewicht der untersuchten Gebietsstrukturen und des Landkreises zeigt ebenfalls wie der Behälterfüllgrad eine deutliche Zunahme nach Einführung des Ident-Systems (vgl. Tab. 20). Insbesondere haben die Schüttgewichte in ländlichen mit ca. 17 % und städtischen Strukturen mit ca. 25 % stark zugenommen. Für den Landkreis ergibt sich zwischen den Jahren 1998/1999 und 2002 eine Zunahme des Schüttgewichts um ca. 16 %. Diese hohen Schüttgewichte in ländlichen und städtischen Strukturen resultieren aus einer Verpressung des Restmülls in den überwiegend kleinen Behältern dieser Gebietsstrukturen. Ein Anstieg von Abfallfraktionen mit hoher Dichte scheidet aufgrund der Sortiererergebnisse aus. Die Behältervolumina werden offensichtlich optimaler ausgenutzt, um durch eine geringere Leerungsanzahl die individuellen Entsorgungskosten zu senken.

Die Tab. 21 zeigt das bereitgestellte spezifische Behältervolumen und das -überangebot in den drei Gebietsstrukturen und im Landkreis vor und nach der Umstellung des Abfallwirtschaftssystems. Hinsichtlich der Behälterbereitstellung wird deutlich, dass in ländlichen und städtischen Strukturen mit der freien Wahl des Leerungsrhythmus das bereitgestellte spezifische Behältervolumen etwa um die Hälfte verringert wurde. Nur in innerstädtischen Strukturen ist das bereitgestellte spezifische Behältervolumen nahezu gleich geblieben. In innerstädtischen Bebauungsgebieten (dominiert von Wohnblöcken) werden v.a. 1.100 l Restmüllcontainer eingesetzt. Entsprechend der Einwohnerstruktur werden dort i.d.R. größere Behältervolumina pro Einwohner zur Verfügung gestellt und der einzelne Bürger kann trotz des neuen Ident-Systems nicht die Leerungshäufigkeit der Container beeinflussen. Für den Landkreis hat sich das bereitgestellte Behältervolumen von 32 l/(E·Wo) auf 20,8 l/(E·Wo) vermindert. Die deutliche Verringerung der bereitgestellten Behältervolumina in ländlichen und städtischen Strukturen führt zu einem wesentlich geringeren Behälterüberangebot. Im Mittel hat sich durch die Maßnahme das Behälterüberangebot im Landkreis um 90 Vol.-% auf 0,5 l/(E·Wo) reduziert.

Neben den zeitlichen Veränderungen der behälterspezifischen Kenndaten ergeben sich auch deutliche Unterschiede im Restmüllaufkommen und der Restmüllzusammensetzung. Im Jahr 1998/1999 wurde ein spezifisches Restmüllaufkommen im Kreisgebiet von 178,5 kg/(E·a) ermittelt. Die Sortierung im Jahr 2002 erbrachte einen Rückgang der spezifischen Restmüllmasse um ca. 23 Mass.-% auf 138,2 kg/(E·a).

Tab. 21: Vergleich des bereitgestellten spezifisches Behältervolumens und Behälterüberangebots im Landkreis L1 (= L11) zwischen den Sortierungen der Jahre 1998/1999 und 2002; alle Werte in l/(E·Wo) [55, 58]

Gebietsstruktur	Sortierung 1998/1999		Sortierung 2002	
	Behälter- bereitstellung	Behälter- überangebot	Behälter- bereitstellung	Behälter- überangebot
ländlich	35	5,0	15	0,1
städtisch	31	6,0	17	0,5
innerstädtisch	29	3,0	30	1,1
Landkreis	32	5,0	21	0,5

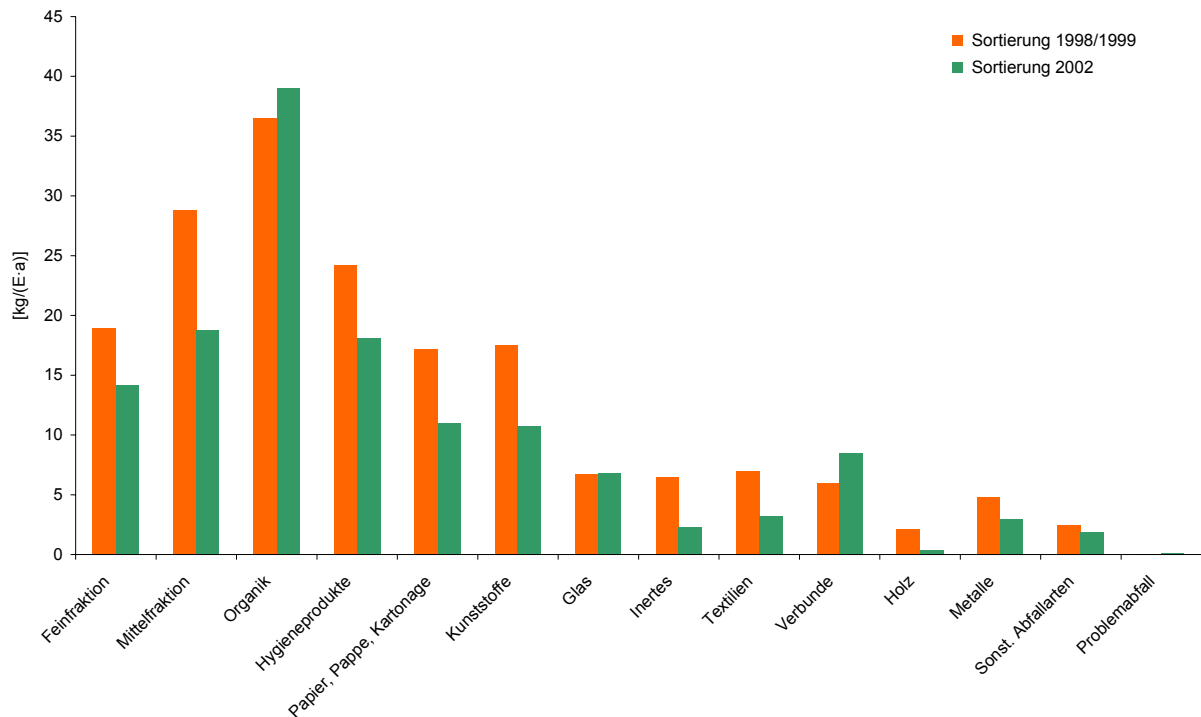


Abb. 15: Vergleich des spezifischen Aufkommens der Sortier-Obergruppen – vgl. Tab. 10 – im Landkreis (L1 = L11) vor (Jahre 1998/1999) und nach (Jahr 2002) der Umstellung des Abfallwirtschaftssystems [55, 58]

In Abb. 15 ist das spezifische Aufkommen der Obergruppen der Sortierkampagnen im Jahr 1998/1999 denen der Sortierung im Jahr 2002 gegenübergestellt. Mit Ausnahme der Obergruppen Glas, Organik, Verbunde und Problemabfälle sind die Massen der Obergruppen im Jahr 2002 stark zurückgegangen. Insbesondere der Rückgang der Wertstofffraktionen Kunststoffe, Papier, Pappe, Kartonagen und Textilien legen eine intensivere Nutzung der getrennten Wertstofffassung über Wertstoffhöfe bzw. Wertstoffcontainer nahe. Eine Reduzierung der spezifischen Masse der Organikfraktion durch z.B. verstärkte Eigenkompostierung organischer Abfälle ist dagegen nicht festzustellen.

#### 4.1.8.2 Landkreis L4

Im *Landkreis L4* wurden die Sortierungen in den Jahren 1999/2000 und 2002 durchgeführt; dazwischen fanden keine Umstellungen des Abfallwirtschaftssystems statt.

Das spezifische Restmüllaufkommen im Landkreis (L4, L12) hat sich im Verlauf der drei Jahre kaum verändert. In den Jahren 1999/2000 wurde ein spezifisches Restmüllaufkommen von 89,3 kg/(E-a) und im Jahr 2002 von 89,9 kg/(E-a) ermittelt. Die Restmüllzusammensetzung im Landkreis gibt Abb. 16 vergleichend wieder.

Insgesamt sind die Unterschiede in der Restmüllzusammensetzung des Landkreises zwischen der Sortierung 1999/2000 und 2002 vor dem Hintergrund eines in etwa konstanten Restmüllaufkommens als gering zu bewerten. Die größten Schwankungen traten bei der Mittelfraktion (– 28 Mass.-%), Organik (+ 39 Mass.-%) und Hygieneprodukten (– 13 Mass.-%) auf. Die Abnahme bei der Mittelfraktion kann ihre Ursache in der Zunahme der Organikfraktion haben, da gerade die Mittelfraktion i.d.R. einen hohen Organikanteil mit teilweise unterschiedlichen Trenneigenschaften aufweist.

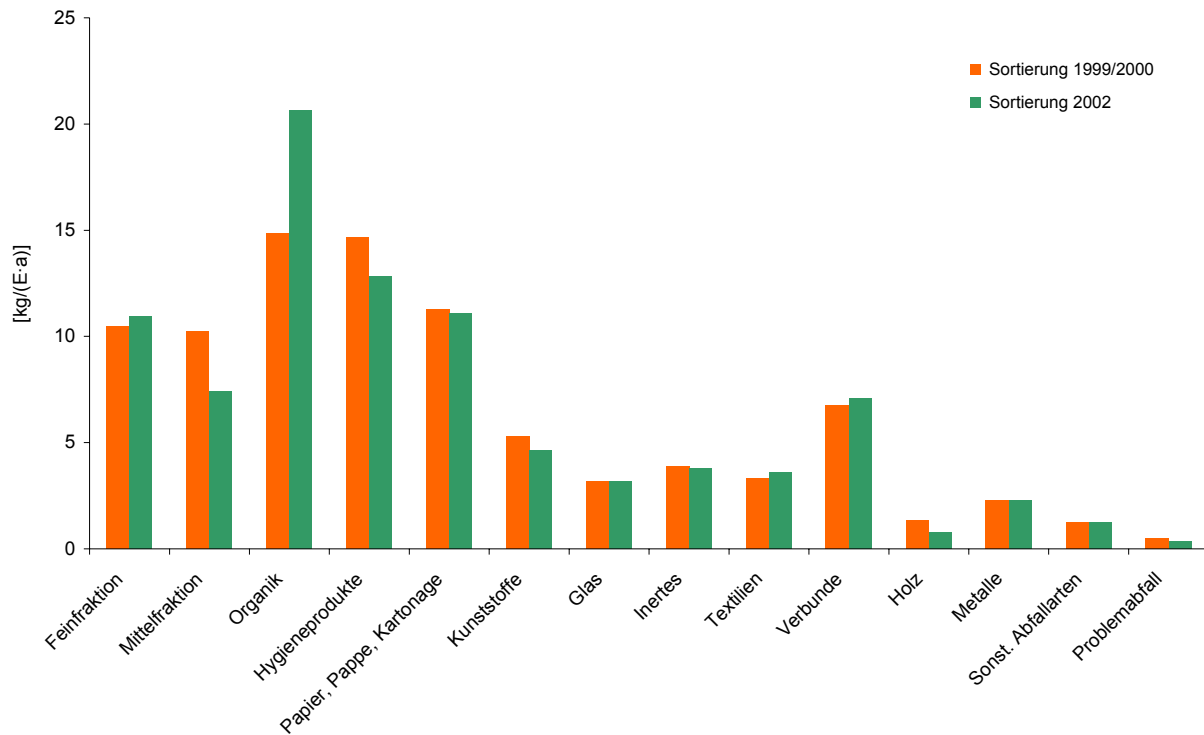


Abb. 16: Vergleich des spezifischen Aufkommens der Sortier-Obergruppen – vgl. Tab. 10 – im Landkreis L4 (= L12) zwischen den Sortierungen der Jahre 1999/2000 und 2002 [56, 58]

Das bereitgestellte spezifische Behältervolumen sowie das Behälterüberangebot ist in Tab. 22 für die einzelnen Gebietsstrukturen und den Landkreis für beide Sortierungen dargestellt. Hieraus ist eine Zunahme des bereitgestellten Behältervolumens von den Jahren 1999/2000 zum Jahr 2002 ersichtlich; die Behälterbereitstellung erhöhte sich um Werte zwischen 1,0 und 4,4 l/(E·Wo), wobei städtische Strukturen den höchsten Anstieg verzeichnen. Auf Kreisebene standen im Jahr 2002 jedem Bürger im Mittel knapp 2 l/Wo mehr an Restmüllbehältervolumen zur Verfügung. Da das gesamte Abfallaufkommen weitgehend konstant geblieben ist, kann man nicht von einer Verschlechterung der abfallwirtschaftlichen Situation sprechen.

#### 4.1.8.3 Ergebnis der zeitlichen Betrachtung

Es bleibt festzuhalten, dass sich Systemänderungen in Richtung aufkommensabhängiger Gebührengestaltung (z.B. Einführung eines Ident-Systems) eindeutig auch auf das Verbraucherverhalten und so das Restmüllaufkommen auswirken.

Ohne entsprechende Systemänderungen ist eine Reduzierung des Restmüllaufkommens allein aufgrund konsequenter Öffentlichkeitsarbeit kaum möglich; zur Sicherung des erreichten Restmüll- und Wertstoffaufkommens ist diese unverzichtbar.

Tab. 22: Vergleich des bereitgestellten spezifischen Behältervolumens und Behälterüberangebots im Landkreis L4 zwischen den Sortierungen der Jahre 1999/2000 und 2002; alle Werte in l/(E·Wo) [56, 58]

Gebietsstruktur	Sortierung 1999/2000		Sortierung 2002	
	Behälter- bereitstellung	Behälter- überangebot	Behälter- bereitstellung	Behälter- überangebot
ländlich	14,9	1,8	15,9	3,0
städtisch	13,9	1,5	18,3	1,8
innerstädtisch	18,6	1,8	20,9	1,2
Landkreis	15,5	1,8	17,4	2,4

Inwieweit eine Systemänderung zielführend ist oder evtl. zu einer Verschiebung der Abfallströme (z.B. Sperrmüll, Geschäftsmüll, wilde Ablagerungen) führt, war nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

## 4.2 Physikalisch-chemische Eigenschaften und Inhaltsstoffe

Während der Sortierkampagnen wurden von 16 Analysestoffgruppen jeweils mindestens 13, insgesamt 306 Einzelproben gezogen und auf zahlreiche physikalisch-chemische Parameter und Inhaltsstoffe untersucht (vgl. Abschnitt 3.4). In den folgenden Abschnitten werden die Analyseergebnisse für die jeweiligen Einzelfractionen (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 im Rahmen der Sortierkampagnen ermittelten und in Tab. 23 aufgelisteten Massenanteile herangezogen. Nach der Fein- und Mittelfraktion sind die Stoffgruppen der Grobfraktion in der Reihenfolge abnehmender Massenanteile aufgelistet; in den folgenden Tabellen und Abbildungen wird diese Reihenfolge beibehalten. Der nicht analysierte verbleibende Rest von 3,8 Mass.-% beinhaltet die Stoffgruppen Fahrzeugteile, Flachglas, Metalle, Problemstoffe, Styropor und Sonstige Stoffe (siehe Abschnitt 3.4.1).

### 4.2.1 Physikalisch-chemische Eigenschaften

#### 4.2.1.1 Wassergehalt

Der Gesamtwassergehalt des untersuchten Restmülls beträgt 37,0 Mass.-%. Hauptmasseträger sind die Analysestoffgruppen Hygieneprodukte und Organik sowie die Mittelfraktion, die ebenfalls zu hohen Anteilen aus organischer Masse besteht (vgl. Abb. 17). In Korrelation zum Abholrhythmus der Restmülltonne (wöchentlich, 14-tägig oder länger) infiltrieren stark wasserhaltige Fraktionen (v.a. Organik, Hygieneprodukte, nicht vollständig entleerte Gebinde (Flaschen, Tetrapacks)) teilweise die anderen Inhaltsstoffe (z.B. Papier, Pappe, Kartonagen).

Die Wassergehalte (bzw. Trockenrückstände) bilden mit der prozentualen Massenverteilung der Analysestoffgruppen im Originalzustand (vgl. Tab. 23) die Basis für die Berechnung der Anteile nachfolgender analytischer Parameter am Restmüll (Frachten).

Tab. 23: Massenanteile der Analysestoffgruppen – vgl. Tab. 8 – am Restmüll

Analysestoffgruppe	Massenanteil am Restmüll (feucht) in Mass.-%
Feinfraktion	10,9
Mittelfraktion	14,2
Organik	22,5
Hygieneprodukte	14,5
Papier, Pappe, Kartonagen	7,7
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	5,5
Glas	4,4
Inertes	2,8
Textilien	2,8
Sonstige Verbunde	2,6
Verbundverpackungen	1,9
Sonstige Kunststoffe	1,4
Renovierung(sabfälle)	1,4
Holz	1,2
Schuhe	0,9
Elektronikschrott	0,8
Staubsaugerbeutel	0,6
Leder, Gummi, Kork	0,3
Summe	96,2

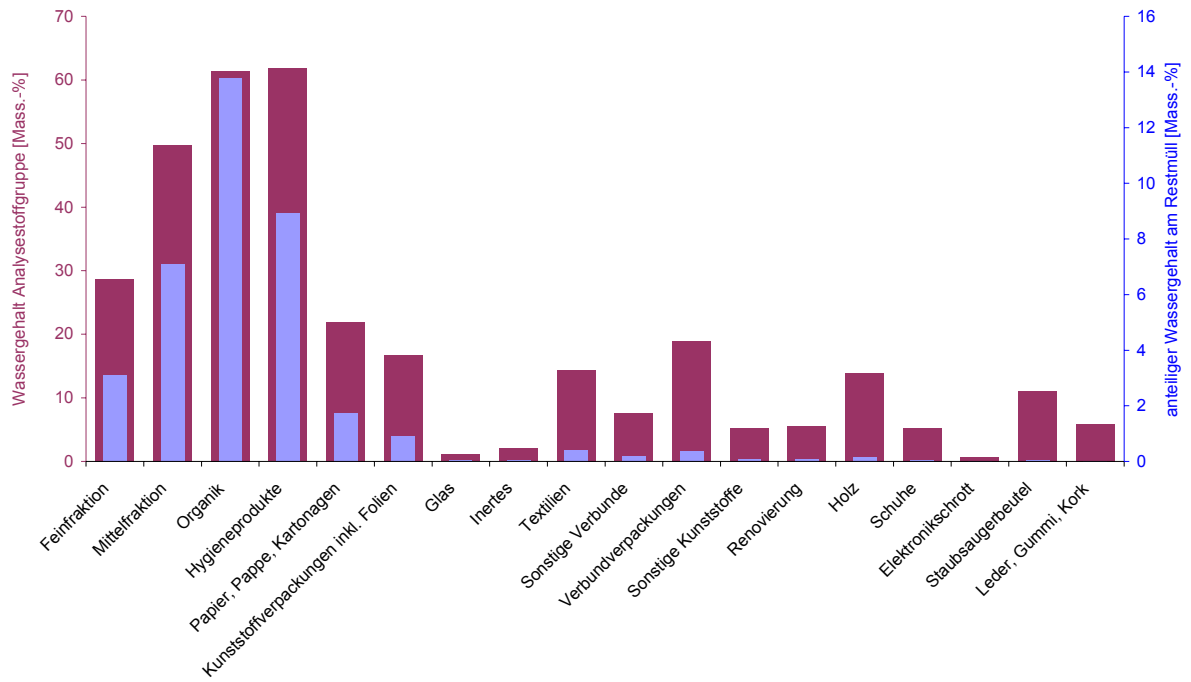


Abb. 17: Wassergehalte der einzelnen Analysestoffgruppen (linke Ordinate) und deren Beitrag (rechte Ordinate) zum Gesamtwassergehalt des Restmülls (37,0 Mass.-%)

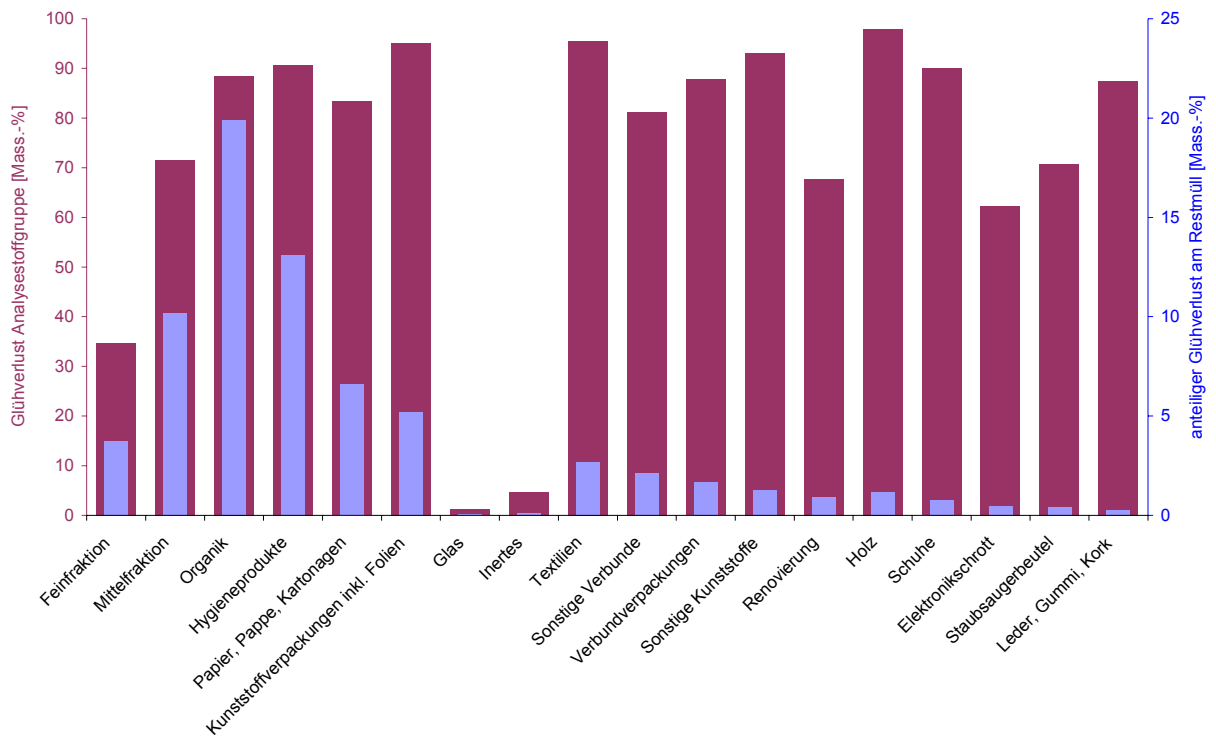


Abb. 18: Glühverluste der einzelnen Analysestoffgruppen (linke Ordinate) und deren Beitrag (rechte Ordinate) zum Gesamtglühverlust des Restmülls (70,7 Mass.-%)

#### 4.2.1.2 Glühverlust

Der Glühverlust der Einzelfractionen liegt – abgesehen von den Analysestoffgruppen Glas, Inertes und Feinfraktion – jeweils bei über 60 Mass.-% (siehe Abb. 18).

Bei der Verbrennung von 1 kg Restmüll bleiben noch knapp 0,3 kg als nicht brennbarer Rest zurück. Dieser Wert liegt in der Größenordnung von Rohschlackeanteilen (bezogen auf den Abfallinput) bei der thermischen Abfallbehandlung [67]. Ohne weitere Behandlung halten das Zuordnungskriterium der TASI [10] für den Glühverlust von maximal 5 Mass.-% lediglich die Stoffgruppen Glas und Inertes ein.

#### 4.2.1.3 Heizwert

Bei den in Abb. 19 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 [68], einem niederkalorischen Brennstoff, entspricht.

Nur die Analysestoffgruppen, deren Massenanteil am Restmüll unter 6 % liegt, weisen Heizwerte von über 10 MJ/kg auf. Die höchsten Heizwerte wurden mit über 30 MJ/kg für Kunststoffe und Kunststoffverpackungen ermittelt. Neben diesen bestimmen aufgrund ihrer hohen Massenanteile auch die organische Fraktion, die Mittelfraktion, die Hygieneprodukte sowie Papier, Pappe, Kartonnagen maßgeblich den Energiegehalt des Restmülls.

Den Einfluss der im Restmüll enthaltenen Bioabfallmasse ( $\cong$  Organikfraktion) auf den Heizwert zeigt folgendes fiktives Szenario: Eine einseitige Erhöhung des Bioabfall-Anteils im Restmüll um beispielsweise 20 kg/(E-a) würde den Heizwert des Restmülls auf 7,9 MJ/kg absenken (vgl.

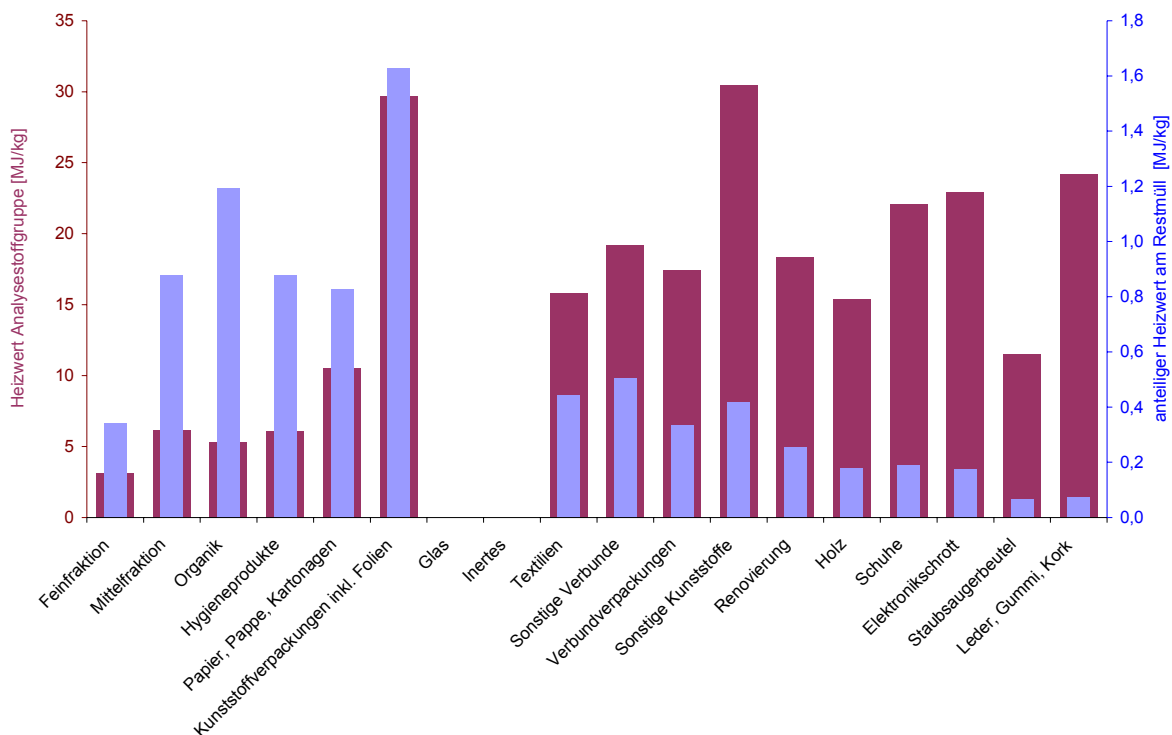


Abb. 19: Heizwerte der einzelnen Analysestoffgruppen (linke Ordinate) und deren Beitrag (rechte Ordinate) zum Gesamtheizwert des Restmülls (8,4 MJ/kg)



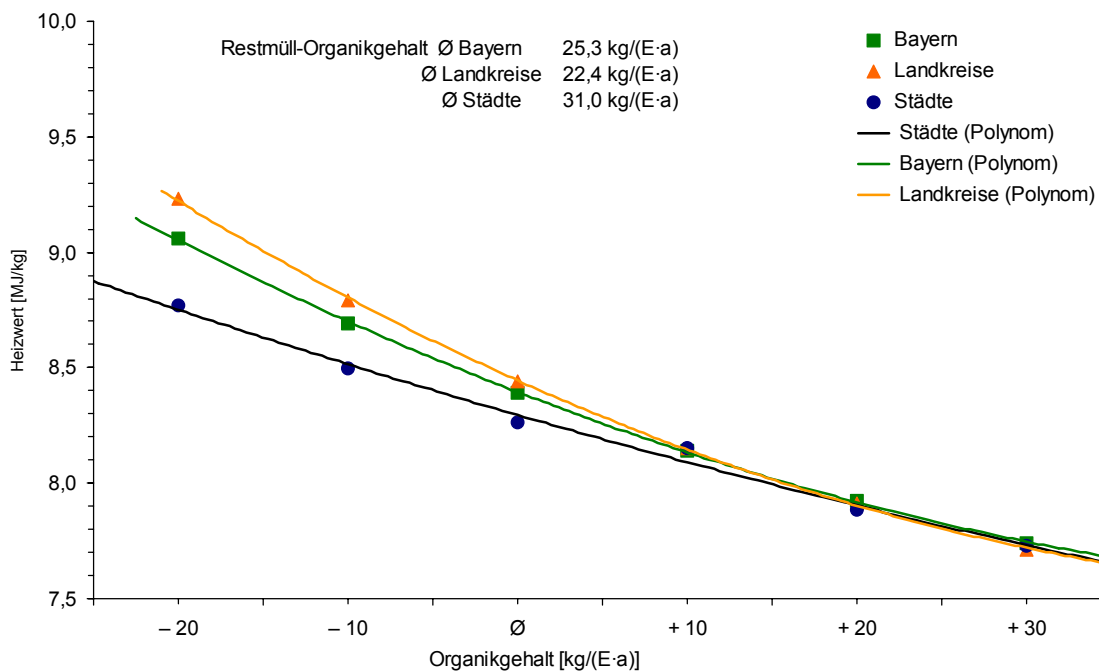


Abb. 20: Veränderung des Heizwertes von Restmüll in Abhängigkeit vom Organik-Anteil des Restmülls

Abb. 20). Durch eine Reduzierung des Organikgehalts auf Null würde sich für Landkreise ein durchschnittlicher Heizwert von 9,3 MJ/(kg Restmüll), für Städte von 8,9 MJ/(kg Restmüll) und für Bayern insgesamt von fast 9,2 MJ/(kg Restmüll) erzielen lassen. Diese Überlegungen zeigen, wie schmal das Band ist, durch gezieltes Entfrachten des Restmülls, speziell von organischer Substanz, den Heizwert zu beeinflussen – vgl. auch [5; 29, S. 36; 30, S. 953]. Sie belegen außerdem, dass Restmüll aus Haushalten ohne heizwertreiche Gewerbeabfälle die Voraussetzung zur thermischen Verwertung nach dem KrW/AbfG [8] von 11 MJ/kg nur erfüllen kann, wenn entsprechende Massen an heizwertreichen und damit kunststoffhaltigen Abfällen im Restmüll verbleiben und feuchte, heizwertarme Abfälle ausgeschleust werden.

## 4.2.2 Anorganische Inhaltsstoffe

### 4.2.2.1 Kohlenstoff

In jedem Kilogramm Restmüll sind 220 g vorwiegend organisch gebundener Kohlenstoff enthalten. Mit die größten Anteile sowohl in der Trockenmasse (TM) (mehr als 70 Mass.-%) als auch im Restmüll (mehr als 3 Mass.-%) nehmen dabei die Kunststoffverpackungen ein (siehe Tab. 24).

Das Ablagerungskriterium der TASI [10] von maximal 3 Mass.-% organisch gebundenem Kohlenstoffgehalt (TOC) wird ohne weitere Behandlung lediglich von den Stoffgruppen Glas und Inertes eingehalten.

### 4.2.2.2 Chlor, Schwefel, Stickstoff, Phosphor

In jedem Kilogramm Restmüll sind im Mittel 8,5 g Stickstoff, 3,9 g Chlor, 1,7 g Schwefel und 0,9 g Phosphor zu finden.

Im Hinblick auf die Abfallbehandlung ist besonders der Chlorgehalt als Ursache für Korrosionserscheinungen und für die Bildung von Dioxinen/Furanen (Müllverbrennung) von Interesse.

Die höchsten Chlorgehalte wurden mit über 34 g/(kg TM) in den Stoffgruppen Sonstige Kunststoffe – hier handelt es sich i.d.R. um langlebige Kunststoffartikel – und Elektronikschrott, der PVC-haltige Kabel und Flammenschutzmittel [69, 70] enthält, bestimmt. Auch in den Analysestoffgruppen Leder, Gummi, Kork und Schuhe sind etwa 24 g Chlor je kg TM enthalten (siehe Tab. 25).

Tab. 24: Kohlenstoffgehalte (anorganisch und organisch gebunden, gesamt) der Einzelfractionen und vom Restmüll (feucht); alle Werte in Mass.-%

Analysestoffgruppe	Trockenmasse			Restmüll
	C <sub>anorganisch</sub> <sup>*)</sup>	C <sub>organisch</sub> <sup>*)</sup>	C <sub>gesamt</sub>	C <sub>gesamt</sub>
Feinmüll	1,2	15,0	16,3	1,25
Mittelmüll	0,3	38,7	37,6	2,68
Organik	0,0	43,0	42,3	3,66
Hygieneprodukte	0,0	46,3	46,6	2,57
Papier, Pappe, Kartonagen	0,8	37,4	38,1	2,35
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	0,0	73,2	73,1	3,34
Glas	0,0	0,6	0,6	0,03
Inertes	0,9	1,0	1,9	0,05
Textilien	0,0	46,4	46,6	1,12
Sonstige Verbunde	0,2	47,9	47,9	1,16
Verbundverpackungen	0,3	47,8	48,0	0,75
Sonstige Kunststoffe	0,1	68,8	68,8	0,89
Renovierungsabfälle	2,2	44,7	47,1	0,62
Holz	0,0	46,0	45,7	0,46
Schuhe	0,1	51,3	51,8	0,42
Elektronikschrott	0,0	49,4	44,4	0,33
Staubsaugerbeutel	0,5	35,0	35,6	0,18
Leder, Gummi, Kork	0,1	55,7	56,6	0,16
Restmüll feucht				22,03

\*) Hinweis: da der anorganisch gebundene Kohlenstoffgehalt nicht bei allen Proben bestimmt wurde, ist bei einzelnen Stoffgruppen rechnerisch der organisch gebundene Kohlenstoffgehalt größer als der Gesamt-Kohlenstoffgehalt

Tab. 25: Konzentrationen von Chlor, Phosphor, Schwefel und Stickstoff der Analysestoffgruppen (Trockenmasse) und vom Restmüll (feucht); alle Werte in mg/kg

Analysestoffgruppe	Chlor	Phosphor	Schwefel	Stickstoff
Feinfraktion	6.730	2.970	6.350	8.850
Mittelfraktion	8.280	3.080	4.270	18.770
Organik	8.580	3.210	1.900	26.190
Hygieneprodukte	3.920	940	840	14.840
Papier, Pappe, Kartonagen	1.550	290	970	4.660
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	2.830	410	1.080	8.300
Glas	560	480	50	420
Inertes	1.430	690	10.410	550
Textilien	1.220	450	2.170	34.290
Sonstige Verbunde	13.060	350	3.520	20.040
Verbundverpackungen	3.500	380	1.030	5.420
Sonstige Kunststoffe	34.840	550	970	9.710
Renovierungsabfälle	8.990	380	3.590	18.080
Holz	680	180	590	17.950
Schuhe	24.040	300	4.550	38.180
Elektronikschrott	35.770	580	1.160	18.270
Staubsaugerbeutel	12.400	1.210	8.850	43.710
Leder, Gummi, Kork	23.860	420	10.600	36.730
Restmüll feucht	3.930	900	1.740	8.480

#### 4.2.2.3 Alkali- und Erdalkalimetalle

Von den Alkali- und Erdalkalimetallen wurden die Gehalte von Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium im Restmüll ermittelt (vgl. Tab. 26). Insgesamt bestimmen diese Elemente knapp 3,4 Mass.-% des Restmülls, wovon der Hauptanteil auf Calcium mit fast 64 % entfällt.

Die Hauptquellen für Kalium, Magnesium und Calcium liegen in den „mineralischen“ Stoffgruppen Feinfraktion, Inertes und Renovierungsabfälle (Calcium in gipshaltigen Abfällen). Natrium dagegen liegt in größeren Mengen nur in der Fraktion Glas (einfaches „Normalglas“ kann zu 12,9 Mass.-% aus Natriumoxid bestehen [71, S. 781]) vor.

Tab. 26: Konzentrationen von Natrium, Kalium, Magnesium und Calcium der Analysestoffgruppen (Trockenmasse) und vom Restmüll (feucht); alle Werte in mg/kg

Analysestoffgruppe	Natrium	Kalium	Magnesium	Calcium
Feinfraktion	4.520	16.400	20.160	83.550
Mittelfraktion	4.450	13.010	2.900	33.070
Organik	3.720	9.890	1.790	12.620
Hygieneprodukte	8.600	3.030	1.820	9.510
Papier, Pappe, Kartonagen	1.490	1.670	2.810	36.340
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	1.900	1.990	1.970	7.640
Glas	55.290	4.870	11.020	66.730
Inertes	4.330	14.540	11.350	82.540
Textilien	1.430	1.460	1.810	5.750
Sonstige Verbunde	4.060	2.100	2.330	25.010
Verbundverpackungen	1.900	1.620	1.940	17.290
Sonstige Kunststoffe	3.340	1.300	2.170	14.260
Renovierungsabfälle	1.940	2.010	2.240	112.110
Holz	1.460	1.780	1.770	2.390
Schuhe	3.530	1.400	2.130	20.750
Elektronikschrott	4.160	2.380	3.390	23.970
Staubsaugerbeutel	11.160	7.450	4.160	33.770
Leder, Gummi, Kork	3.120	1.660	2.060	19.580
Restmüll feucht	4.560	4.230	3.330	21.430

4.2.2.4 Schwermetalle

Bei der Abgrenzung der Schwermetalle von den sonstigen Metallen und Elementen wurde eine Elementdichte von 5,0 g/cm<sup>3</sup> zugrunde gelegt [44, 72]. In den meisten Fällen haben die Schwermetalle bereits in niedrigen, teilweise erst in höheren Konzentrationen oder in bestimmten Oxidationsstufen {z.B. Chrom (VI)} toxische Wirkung.

Aus der Reihe der Schwermetalle wurden die Elemente Blei, Cadmium, Chrom, Eisen, Kupfer, Mangan, Nickel, Quecksilber, Zink und Zinn exemplarisch herausgezogen; der Quecksilbergehalt wurde aus einem Königswasseraufschluss mittels AAS, die anderen Schwermetalle in der Feststoffprobe mittels RFA bestimmt (vgl. Abschnitt 3.4.3).

In Tab. 27 sind die ermittelten Schwermetallkonzentrationen in den getrockneten Analysestoffgruppen sowie im feuchten Restmüll dargestellt. Die Anmerkungen zu den Schwermetallen bez. Herkunft und Vorkommen erfolgen u.a. in Anlehnung an die Ausführungen von [34, 71].

**Blei**

Blei ist nicht essentiell für den menschlichen Organismus. Toxisch wirken Blei-Ionen u.a. bei Reaktionen mit Enzymen und Proteinen. In der Luft liegt Blei häufig als Blei(II)oxid vor, industriell v.a. in Form von Organobleiverbindungen. In der Natur akkumuliert sich Blei und lagert sich leicht an Staub- und Rußpartikeln an, weshalb Blei ubiquitär vorliegt [72].

Blei ist in einer breiten Produktpalette zu finden; Blei und seine Verbindungen werden/wurden zur Herstellung von Akkumulatoren, Batterien, Farben, technischen Folien, Kabelummantelungen, Loten und Flussmitteln, Rohren etc. sowie im Strahlenschutz eingesetzt [74, 75].

Die breite Verwendung von Blei in Elektro-/Elektronikprodukten belegen die Bleigehalte von über 2.700 mg/(kg TM) in der Analysestoffgruppe Elektronikschrott [34, 76]. Über 1.400 mg/(kg TM) Blei in der Inerten Analysestoffgruppe ist ein Beleg für bleihaltige Glasuren [34, 44].

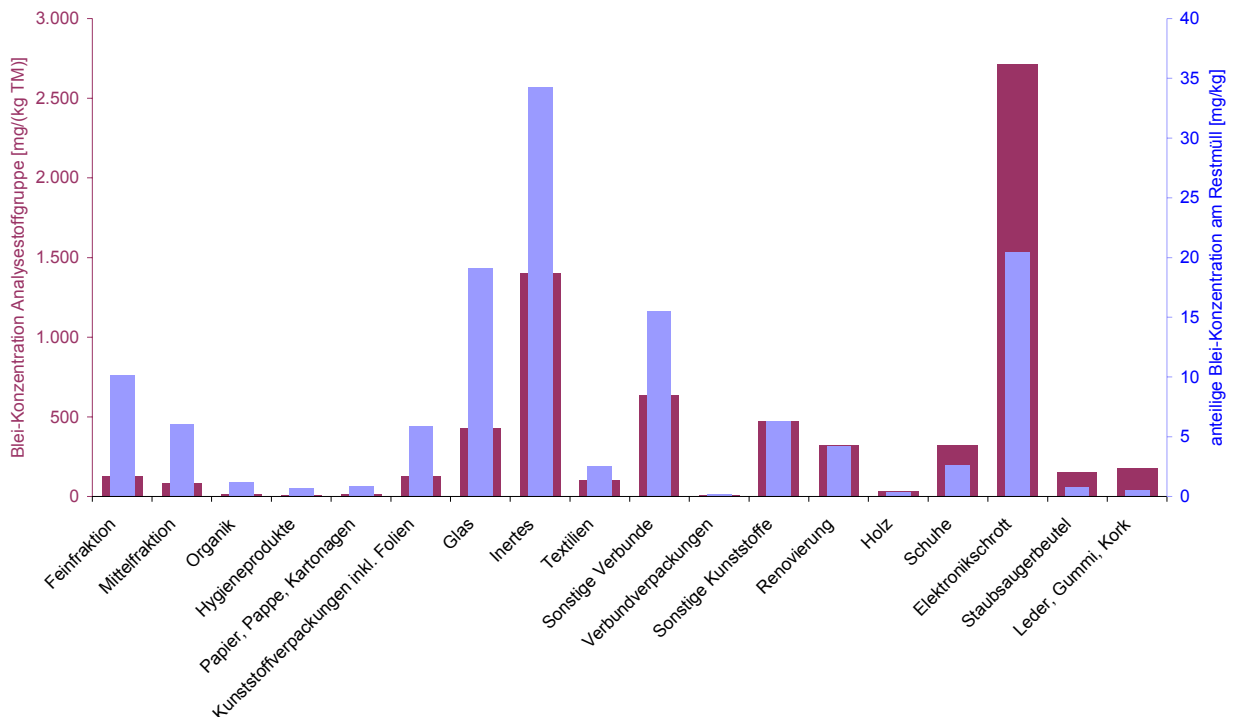


Abb. 21: Bleigehalte der Analysestoffgruppen (linke Ordinate) und deren Beitrag zum Restmüll (rechte Ordinate) (132 mg/kg)

Die Bleigehalte in den untersuchten Stoffgruppen schwanken insgesamt zwischen 10 und 2.700 mg/(kg TM) und belaufen sich auf knapp 132 mg/kg im Restmüll. Aufgrund der EU-Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten vom Jahr 2003 (Umsetzung bis Juli 2006) ist mittelfristig mit einem Rückgang des Bleianteils im Elektronikschrott und damit im Restmüll zu rechnen [77].

In Abb. 21 sind die Bleigehalte der Analysestoffgruppen bezogen auf die Trockenmasse und auf den Restmüll gegenübergestellt. In dieser Darstellung zeigt sich deutlich, dass die Analysestoffgruppen Elektronikschrott und Inertes mit den höchsten Bleigehalten in der Trockenmasse auch den größten Anteil an der Bleifracht des Restmülls ausmachen, obwohl diese eher geringe Massenanteile (0,8 und 2,8 Mass.-%) am Restmüll besitzen.

### **Cadmium**

Wie auch bei dem Element Blei wirken v.a. Cd(II)-Verbindungen toxisch auf den menschlichen Organismus. Eine Aufnahme kann z.B. über Zigarettenrauch erfolgen.

In den Luftpfad werden Cadmiumverbindungen als Nebenprodukte aus der Zinkgewinnung und durch Industrie- und Verbrennungsanlagen emittiert. Cadmium und seine Verbindungen werden/wurden als Korrosionsschutz, als Bestandteil von Batterien, Akkumulatoren und Solarzellen, als Halbleiter, als Leuchtstoffe, als Farbpigmente sowie als Stabilisatoren in Kunststoffen (PVC) und Reifen eingesetzt [62, 74, 75].

Aufgrund dieses Einsatzspektrums tragen neben der Analysestoffgruppe Elektronikschrott {200 mg/(kg TM)} auch die Sonstigen Kunststoffe (langlebige Kunststoffartikel) mit 76 mg Cadmium je kg Trockenmasse maßgeblich zum Cadmiumgehalt des Restmülls bei. Der Einsatz von Cadmium in der Glas- und Porzellanindustrie spiegelt sich in einem Cadmiumgehalt von über 32 mg pro kg in der Analysestoffgruppe Inertes wider [28, 59].

Insgesamt wurde ein Cadmiumgehalt von 6,1 mg (feucht) bzw. 7,3 mg (trocken) pro kg Restmüll ermittelt. Andere Autoren nennen für Restmüll Cadmium-Gehalte von 1 – 6 mg/(kg TM) [34] und 0,3 mg/(kg TM) [78]. Bei den Untersuchungen im Rahmen der Bundesweiten Hausmüllanalyse von 1983 wurden noch 10 – 15 mg Cadmium pro kg trockenen Restmüll angesetzt [44]. Der Einsatz von Cadmium wird gemäß [77] spätestens ab dem 01.07.2006 in Elektro- und Elektronikgeräten eingeschränkt, was mittelfristig eine weitere Reduzierung dieses Schwermetalls im Restmüll erwarten lässt.

### **Chrom**

Chrom liegt neben der elementaren Form auch in zahlreichen Oxidationsstufen vor. Von den Chromverbindungen wirkt v.a. Chrom(VI) hochtoxisch, Chrom (III) ist dagegen in gewissen Verbindungen und Konzentrationen für den menschlichen Organismus essentiell. Die Aufnahme in den Körper ist stark von der Bindungsform des Chroms (z.B. als organischer Komplex) abhängig und erfolgt größtenteils oral.

Chrom wird zur Herstellung korrosionsbeständiger, hoch beanspruchter Stähle sowie in der Galvanikindustrie zum Veredeln von Metalloberflächen verwendet; ebenso findet man Chrom und seine Verbindungen in Metalllegierungen, in Farbpigmenten, in Katalysatoren sowie als Ätz-, Beiz-, Oxidations- und Färbemittel. In der Lederverarbeitenden Industrie ist Chrom der wichtigste mineralische Gerbstoff.

Der Gesamtmassengehalt im Restabfall beträgt 212 mg/kg bzw. 243 mg/(kg TM). Chrom ist das einzige untersuchte Schwermetall, das – auf die Trockenmasse bezogen – nicht von der Analysestoffgruppe Elektronikschrott dominiert wird. Vielmehr wurden aufgrund des o.a. Einsatzspektrums die höchsten Gehalte in den Analysestoffgruppen Leder, Gummi, Kork und Schuhe bestimmt.

Tab. 27: Schwermetallgehalte der Analysestoffgruppen (Trockenmasse) und vom Restmüll; alle Werte in mg/kg

Analysestoffgruppe	Blei	Cadmium	Chrom	Eisen	Kupfer
Feinfraktion	131	2,4	279	17.870	223
Mittelfraktion	83	4,3	90	7.570	139
Organik	15	2,8	20	1.410	33
Hygieneprodukte	11	2,5	21	1.210	24
Papier, Pappe, Kartonagen	14	2,3	30	1.550	54
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	129	3,1	89	2.100	90
Glas	429	2,6	372	1.390	14
Inertes	1.402	32,6	197	14.990	51
Textilien	100	2,4	118	1.670	57
Sonstige Verbunde	638	26,6	2.750	12.320	834
Verbundverpackungen	11	3,0	28	2.630	102
Sonstige Kunststoffe	473	76,2	334	3.700	101
Renovierungsabfälle	322	24,5	88	1.730	75
Holz	36	2,8	13	1.050	34
Schuhe	324	12,9	5.992	2.180	57
Elektronikschrott	2.713	228,8	728	21.430	20.459
Staubsaugerbeutel	154	3,9	183	8.480	119
Leder, Gummi, Kork	180	18,5	7.885	1.950	192
Restmüll trocken	208	9,6	336		353
Restmüll feucht	132	6,1	212		222

Im Labor wird Edelstahl wegen seiner 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 quantitativ nicht ermittelt werden; Abrieberscheinungen an den Mahlwerkzeugen der verwendeten Schneidmühlen waren allerdings durchaus sichtbar. Dies könnte erklären, warum beispielsweise in [34] mit 26 bis 62 mg/(kg TM) um den Faktor 10 geringere Chromgehalte für den Restmüll genannt werden (siehe auch Abb. 23).

### Eisen

Eisen gehört aufgrund seiner Elementdichte zu den Schwermetallen, hat aber keine umwelttoxische Relevanz. Bei stark erhöhten Trinkwasserwerten kann es beispielsweise zu überhöhten Werten im menschlichen Körper kommen [72].

Die untersuchten Analysestoffgruppen ergeben einen Eisengehalt von insgesamt circa 3,5 g Eisen pro kg Restmüll.

Hauptmasseträger sind neben der Analysestoffgruppe Elektronikschrott die Feinfraktion und Inertes, was bereits durch geogene Einträge begründet werden kann. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass zum einen die Analysestoffgruppen Elektronikschrott, Leder, Gummi, Kork, Schuhe und die Mittelfraktion vor der Zerkleinerung 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 ermittelten Werten; bei den von uns ermittelten Werten handelt es sich um Mindestgehalte.

Tab. 27 (Fortsetzung): Schwermetallgehalte der Analysestoffgruppen (Trockenmasse) und vom Restmüll; alle Werte in mg/kg

Mangan	Nickel	Quecksilber	Zink	Zinn	Analysestoffgruppe
1.476	26,5	0,394	373	27,6	Feinfraktion
266	16,8	0,110	382	16,4	Mittelfraktion
73	7,6	0,039	60	8,8	Organik
51	9,1	0,103	281	10,5	Hygieneprodukte
52	9,7	0,057	139	8,9	Papier, Pappe, Kartonagen
111	20,1	0,083	948	17,7	Kunststoffverpackungen inkl. Folien
131	16,4	0,007	103	18,2	Glas
532	36,0	0,026	917	102,4	Inertes
57	11,7	0,656	256	10,8	Textilien
155	148,3	0,640	2.289	48,5	Sonstige Verbunde
63	13,3	0,047	95	32,3	Verbundverpackungen
82	18,2	0,080	626	46,4	Sonstige Kunststoffe
82	21,8	0,291	1.686	8,7	Renovierungsabfälle
106	6,6	0,512	162	12,8	Holz
42	13,4	0,183	1.819	22,4	Schuhe
506	1.543,8	1,688	4.448	563,2	Elektronikschrott
230	27,7	0,714	684	21,5	Staubsaugerbeutel
49	30,9	1,630	5.155	13,5	Leder, Gummi, Kork
293	38,0	0,191	505	26,5	Restmüll trocken
188	24,1	0,118	319	16,7	Restmüll feucht

## Kupfer

Kupfer ist für viele Organismen essentiell. Erst bei zu starker Absorption durch den menschlichen Körper wirkt Kupfer toxisch.

Kupfer wird v.a. in der Elektroindustrie (Drähte, Stangen), im Apparate- und Maschinenbau (Bleche, Rohre) wegen seiner guten Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit, z.B. für Heiz- und Kühlschlangen, eingesetzt. Große Kupfermengen werden für Legierungen (Bronze, Messing, Rotguss, Neusilber, Konstantan usw.) benötigt. Daneben finden Kupfer und seine Verbindungen Anwendung als Legierungsbestandteil rostfreie Stähle, in Akkumulatoren, Katalysatoren sowie als Farbpigmente für Glasuren und Email und beim Vernickeln von Glas, Porzellan, Keramik [76].

Im Restmüll sind pro kg etwa 222 mg Kupfer enthalten, wovon der Hauptanteil auf die Analysestoffgruppe Elektronikschrott entfällt. Das breite Anwendungsspektrum von Kupfer schlägt sich auch in den Analysestoffgruppen Sonstige Verbunde, Mittel- und Feinfraktion sowie Leder, Gummi, Kork nieder. In [34] werden für Restmüll Gehalte von 124 – 795 mg/(kg TM) genannt, die vorliegenden Ergebnisse bewegen sich in dieser Spanne im unteren Bereich (siehe auch Abb. 23).

## Mangan

Mangan gehört wie Eisen zu den Schwermetallen, gilt aber nicht als toxisch. Allerdings sind Manganverbindungen mit toxischer Wirkung bekannt (z.B. Kaliumpermanganat). Einsatz findet Mangan u.a. in Legierungen und als Antiklopfmittel in Treibstoffen.

Im Restmüll liegt ein Gehalt von 188 mg/kg vor. Den größten Beitrag dazu liefert die Analysestoffgruppe Feinfraktion mit fast 1,5 g pro kg Trockenmasse.

## Nickel

In geringen Mengen soll Nickel essentiell für den menschlichen Organismus sein; allerdings geht von Nickel auch ein gewisses Allergiepotenzial aus, soweit ein dauerhafter Hautkontakt mit nickelhaltigen Gegenständen vorliegt. Daneben werden nickelhaltige Stäube und einige Nickelverbindungen auch als karzinogen eingestuft [72].

Ähnlich wie Kupfer kommt Nickel v.a. in Legierungen in der Analysestoffgruppe Elektronikschrott vor. Wie auch Chrom wird Nickel insbesondere bei hochlegierten Stählen eingesetzt. Auf Abriebverfälschungen in der Probenaufbereitung – analog zu Chrom – kann jedoch nicht geschlossen werden, da im Vergleich zu [34] keine erhöhten Werte festgestellt wurden.

Der Gesamtgehalt an Nickel im Restmüll beträgt 24 mg/kg.

### Quecksilber

Im Unterschied zu zahlreichen anderen Schwermetallen ist Quecksilber in keiner Form essentiell für den menschlichen Organismus; neben elementarem Quecksilber sind auch alle Quecksilberverbindungen mehr oder minder toxisch. Insbesondere organisch gebundenes Quecksilber wird vom menschlichen Körper leicht resorbiert. Elementares Quecksilber wird aufgrund seiner Flüchtigkeit v.a. über den Atemweg vom Körper aufgenommen.

Quecksilber ist v.a. in Batterien, als Schaltelemente in Elektrogeräten sowie in Thermometern, Manometern und als Elektrodenmaterial zu finden. Anorganische/organische Quecksilberverbindungen werden/wurden u.a. in der Porzellanmalerei, als Desinfektionsmittel, als Fungizide und Insektizide, als Saat- und Holzbeizmittel verwendet.

Elementares Quecksilber lagert sich leicht an Materialien mit großer spezifischer Oberfläche an, was die vergleichsweise hohen Quecksilbergehalte der Analysestoffgruppen Feinfraktion und Staubsaugerbeutel(inhalte) belegen.

Die höchsten Quecksilbergehalte liegen neben der Analysestoffgruppe Elektronikschrott in der Stoffgruppe Leder, Gummi, Kork vor, was ebenso wie bei der Fraktion Textilien als Mittel zur Appretur schließen lässt. Insgesamt wurde für Restmüll aus Haushalten ein Quecksilbergehalt von 0,118 mg/kg bestimmt.

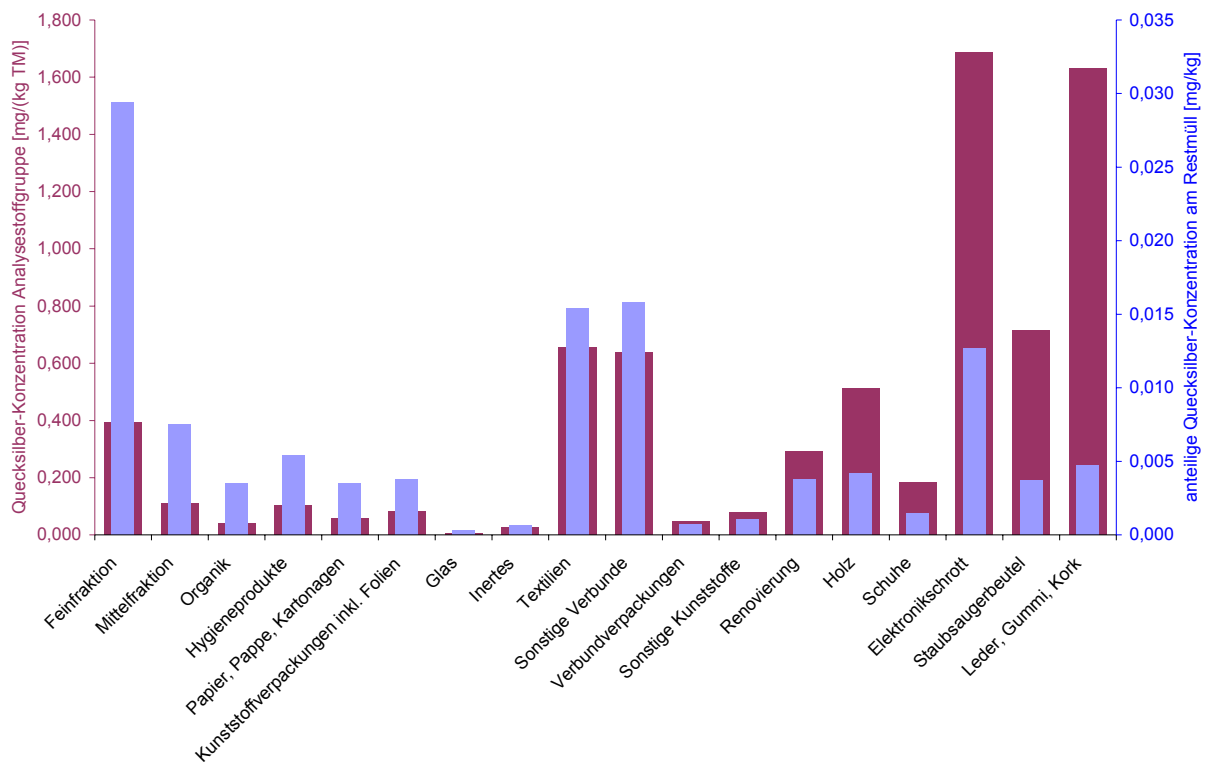


Abb. 22: Quecksilbergehalte der Analysestoffgruppen (linke Ordinate) und deren Beitrag zum Restmüll (rechte Ordinate) (0,12 mg/kg)



Die Abb. 22 zeigt die Verteilung der Quecksilbergehalte; im Unterschied zu der Verteilung der Blei-gehalte (vgl. Abb. 21) sind bei Quecksilber die Analysestoffgruppen mit den höchsten Gehalten in der Trockenmasse (Elektronikschrott; Leder, Gummi, Kork) nicht auch für den feuchten Restmüll maßgeblich. Vielmehr wirkt sich hier das massenanteilige Übergewicht der Feinfraktion aus.

Wie bereits bei Blei, Cadmium und Chrom erwähnt, ist auch bei Quecksilber aufgrund von [77] mittelfristig mit einer weiteren Entfrachtung des Elektronikschrotts zu rechnen.

### **Zink**

Zink ist Bestandteil vieler Enzyme und daher essentiell für alle Organismen. Anorganische Zinkverbindungen sind nicht akut toxisch, da ein Überangebot vom Organismus wieder ausgeschieden wird.

Zink wird hauptsächlich als Korrosionsschutz (Verzinken, Galvanisieren) im Metallbau eingesetzt und ist in Messing und anderen Legierungen (Druckguss), die in Haushaltsgegenständen, Armaturen u.ä. zu finden sind, enthalten [34, 71, 72]. Daneben ist Zink auch in Medikamenten, Kosmetika etc. zu finden.

Im Restmüll ist Zink in den Analysestoffgruppen Leder, Gummi, Kork, Elektronikschrott, Sonstige Verbunde, Schuhe und Renovierungsabfälle im Promillebereich zu finden.

Im Restmüll sind pro kg insgesamt 319 mg bzw. pro kg Trockenmasse 505 mg Zink enthalten. Im Vergleich zu [34], wo ein Wertebereich von 257 bis 2.207 mg/(kg TM) genannt wird, liegt dieser Wert im unteren Bereich.

### **Zinn**

Metallisches Zinn gilt nicht als toxisch, dagegen können v.a. organische Zinnverbindungen durchaus stark toxisch wirken.

Zinn wird industriell als Korrosionsschutz auf Eisenblech (z.B. Nahrung in verzinnten Dosen), als Bestandteil von Legierungen (z.B. Weichlot, Lagermetalle), in Organozinnverbindungen sowie als PVC-Hitzestabilisator eingesetzt [34, 71, 72]. Letzteres erklärt die erhöhten Gehalte im Elektronikschrott. Der Gehalt von Zinn in den Analysestoffgruppen beträgt 16,7 mg/(kg TM). Der tatsächliche Zinngehalt im Restmüll liegt aufgrund der nicht beprobten Stoffgruppe der Metalle (z.B. Konservendosen) mit Sicherheit höher.

### **Vergleich einzelner Schwermetalle im Restmüll**

Vergleicht man die Analyseergebnisse mit den Daten anderer Autoren, so stellt man fest, dass die Aufbereitung und Probenanzahl aus den Literaturstellen nicht immer eindeutig hervorgeht und dadurch vergleichende Aussagen nicht in vollem Umfang möglich sind. Häufig beschränken sich die Autoren bei der Schwermetallbetrachtung auf den Vergleich von Literaturdaten.

In Tab. 28 sind für einzelne Analysestoffgruppen die im Rahmen des Projekts ermittelten Schwermetallgehalte relativ aktuellen Literaturwerten [31, 34] gegenübergestellt. Bei den Veröffentlichungen [31] und [34] handelt es sich um Forschungsarbeiten, in deren Rahmen eigene Untersuchungen zusammen mit Literaturdaten aufgeführt werden. Unsere Analysewerte bewegen sich – von Ausnahmen abgesehen – innerhalb der Schwankungsbreiten der Literaturzitate. Bei der Analysestoffgruppe Leder, Gummi, Kork überschreiten unsere Ergebnisse die Literaturwerte bei den Elementen Chrom, Kupfer und Quecksilber, bei der Analysestoffgruppe Inertes bei dem Element Cadmium, der Analysestoffgruppe Holz bei dem Element Quecksilber und bei der Analysestoffgruppe Sonstige Kunststoffe bei dem Element Chrom.

Tab. 28: Literaturvergleich einzelner Schwermetallgehalte einzelner Analysestoffgruppen mit den ermittelten Werten; 1. Reihe jeweils eigene Daten, 2. Reihe aus [34], 3. Reihe aus [31]; alle Werte in mg/(kg TM)

Analysestoffgruppe	Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Quecksilber
Feinfraktion	130,9	2,4	278,9	222,9	26,5	0,39
	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	195	1,1	k.A.	k.A.	k.A.	0,26
Mittelfraktion	83,1	4,3	89,1	138,5	16,8	0,11
	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	236	1,6	k.A.	k.A.	k.A.	0,27
Organik	15,1	2,8	19,8	32,6	7,6	0,04
	9,2 – 407	< 1 – 4,3	182 – 420	3,6 – 111	150 – 673	< 0,1 – 0,34
	34,1 – 219	0,4 – 1,6	11,0 – 45,0	k.A.	k.A.	0,1 – 0,9
Papier, Pappe, Kartonagen	14,2	2,3	29,8	54,0	9,7	0,06
	< 10 – 71,4	< 1 – 5,3	5 – 26,4	22,4 – 88,5	< 4 – 19,9	< 0,1 – 0,3
	14,0 – 66,2	0,2 – 1,3	4,4 – 23,7	k.A.	k.A.	0,08 – 0,2
Glas	429,0	2,6	372,2	13,9	16,4	0,01
	170 – 628	< 1 – 3	163 – 351	5,7 – 33	1,3 – 32,7	< 0,02 – 0,2
	8,9– 104,3	0,1 – 0,9	115,8 – 275,3	k.A.	k.A.	0,02
Inertes	1.402	32,6	196,9	51,4	36,0	0,03
	30 – 3.970	1,3 – 1,84	53,8 – 137	17 – 227	5 – 60	< 0,2 – 0,04
	11,5 – 1.174	0,5 – 2,7	115,8 – 275,3	k.A.	k.A.	0,02
Textilien	100,4	2,4	118,2	56,9	11,7	0,66
	38,3 – 58,3	< 1 – 5	54,8 – 227	30 – 186	7,3 – 27,3	< 0,1
	16,5 – 120,0	0,5 – 2,2	49,6 – 116,0	k.A.	k.A.	0,1 – 0,7
Verbundverpackungen	10,7	3,0	27,8	101,5	13,3	0,05
	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	28	0,5	k.A.	k.A.	k.A.	0,02
Sonstige Kunststoffe	472,8	76,2	334,0	100,7	18,2	0,08
	40 – 602	12 – 151	9 – 154	34 – 520	8 – 85	0,06 – 0,32
	56,6 – 296,3	5,0 – 36,0	7,0 – 50,9	k.A.	k.A.	0,1 – 0,4
Holz	35,8	2,8	13,2	33,6	6,6	0,51
	25 – 751	0,78 – 2,5	7,8 – 5,1	11 – 35,5	0,3 – 32,5	< 0,1 – 0,17
	16,0 – 134,3	0,3 – 0,4	6,3 – 21,9	k.A.	k.A.	0,1
Leder, Gummi, Kork	180,0	18,5	7.884,9	191,9	30,9	1,6
	< 10 – 334	5 – 70	16,4 – 3.910	18,9 – 53,5	25 – 46,2	0,05 – 0,06
	133,1 – 253,0	4,0 – 11,5	1.043 – 1.715	k.A.	k.A.	0,2 – 0,4
Staubsaugerbeutel	154,3	3,9	182,9	118,6	27,7	0,71
	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
	91	2,0	k.A.	k.A.	k.A.	0,49

Maßgeblich für eine umweltverträgliche Behandlung (z.B. Müllverbrennung usw.) ist der Schadstoffgehalt des Gesamtrestmülls. In Abb. 23 sind beispielhaft die Schwermetallgehalte von Chrom, Kupfer, Blei und Zink aus drei verschiedenen Untersuchungen unseren Ergebnissen gegenübergestellt [34, 44, 78]. Es zeigt sich deutlich, dass die Schadstoffgehalte des Restmülls wie auch die der Analysestoffgruppen (vgl. auch Tab. 28) erhebliche Schwankungsbreiten aufweisen. Umso wichtiger ist eine entsprechend große Anzahl an Analysen, um fundierte Mittelwerte angeben zu können. Unsere Mittelwerte korrelieren mit den Literaturwerten und reihen sich in den oberen Bereich der Analysedaten ein, was beispielsweise aus den Unterschieden zwischen Feststoff- und nasschemischer Analytik als auch aus der Analyseanzahl resultieren kann.

In Abb. 24 sind die Werte aus Output-Input-Massenbilanzierungen an Müllverbrennungsanlagen (Restmüll, Gewerbeabfälle) [67] den Schwermetallgehalten für Restmüll aus Haushalten gegenübergestellt. Die aus Bilanzierungen errechneten Input-Werte werden von den vorliegenden Daten im Mittel durchgängig unterschritten. Dies kann ein Indiz für die Annahme sein, dass die anderen Siedlungsabfälle höher als Restmüll aus Haushalten mit Schwermetallen belastet sind.

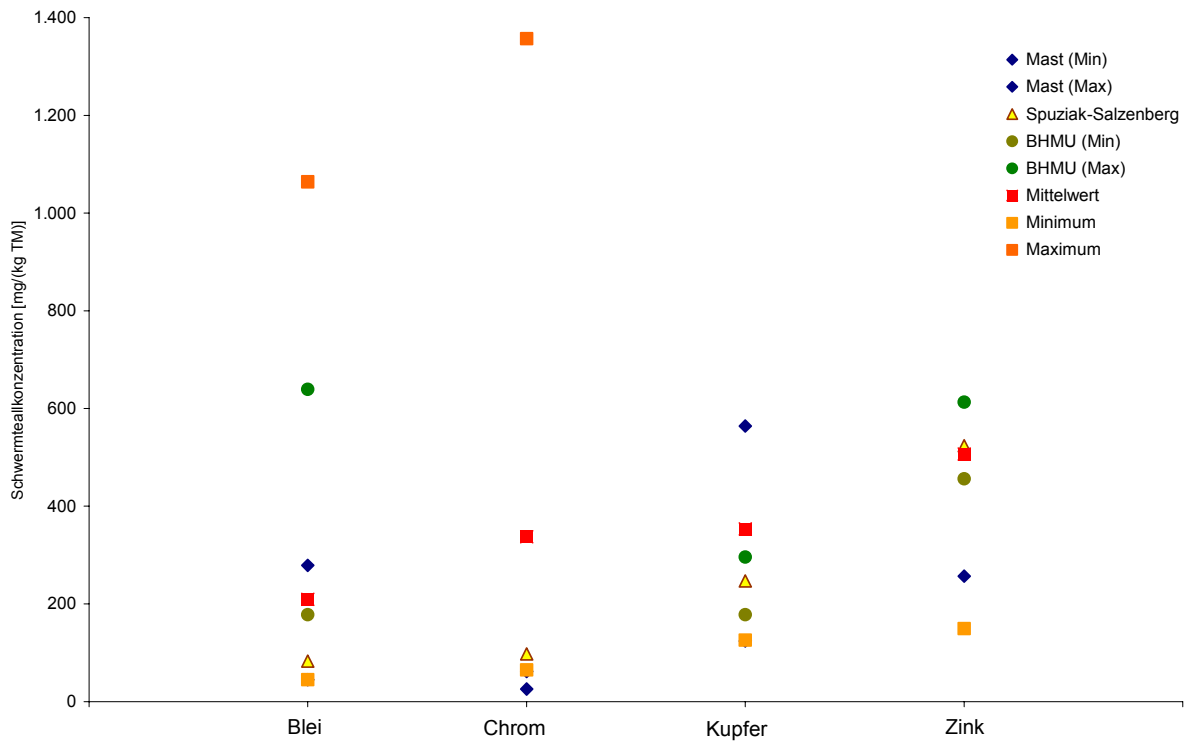


Abb. 23: Ermittelte Schwermetallgehalte von trockenem Restmüll im Vergleich zu Mast et al. [34], Spuziak-Salzenberg et al. [78], BHMU [44]

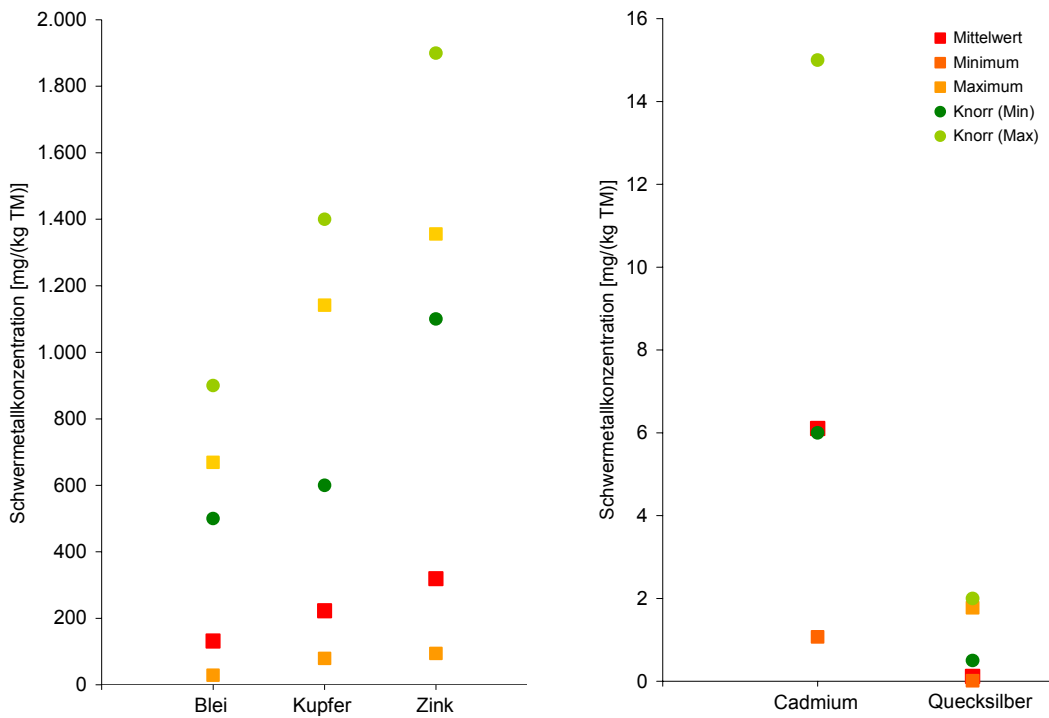


Abb. 24: Ermittelte Schwermetallgehalte von feuchtem Restmüll im Vergleich zu Knorr et al. [67]

Tab. 29: Gehalt von Aluminium, Arsen und Titan der Analysestoffgruppen (Trockenmasse) und vom Restmüll (feucht); alle Werte in mg/kg

Analysestoffgruppen	Aluminium	Arsen	Titan
Feinfraktion	23.210	27,7	3.370
Mittelfraktion	7.600	10,9	1.070
Organik	1.280	8,3	960
Hygieneprodukte	2.620	6,7	1.270
Papier, Pappe, Kartonagen	12.570	8,6	1.040
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	5.130	7,0	11.070
Glas	5.580	50,1	930
Inertes	65.970	12,3	4.210
Textilien	2.190	8,3	1.130
Sonstige Verbunde	5.160	28,7	2.960
Verbundverpackungen	23.720	6,7	1.480
Sonstige Kunststoffe	6.490	25,5	5.760
Renovierungsabfälle	6.860	5,0	4.770
Holz	740	7,7	1.090
Schuhe	1.830	7,7	2.430
Elektronikschrott	12.460	11,0	11.170
Staubsaugerbeutel	8.890	6,5	1.310
Leder, Gummi, Kork	2.070	6,8	3.360
Restmüll feucht	6.400	9,0	1.600

#### 4.2.2.5 Sonstige Metalle

Neben den im vorangegangenen Abschnitt behandelten Schwermetallen wurden noch weitere, mehr oder weniger umweltrelevante Metalle in den einzelnen Analysestoffgruppen bestimmt. Eine Auflistung der Ergebnisse ist in Tab. 29 gegeben.

Aluminium ist in dreiwertiger Form für Fische toxisch. Beim Menschen ist keine akut toxische Wirkung bekannt; allerdings wird die Alzheimersche Krankheit mit erhöhten Aluminium-Konzentrationen in Zusammenhang gebracht.

Der Aluminium-Gehalt von Restmüll beträgt 6,4 g/kg. Hauptsächlich erfolgen Aluminiumeinträge in den Restmüll neben der nicht untersuchten Stoffgruppe NE-Metalle durch Inertes (z.B. in Form von Alumosilikaten), Verbundverpackungen (metallisch) und die Feinfraktion. In der Papierindustrie wird Aluminium als Füllstoff eingesetzt [71], was sich in über 12 g/(kg TM) in der Stoffgruppe Papier, Pappe, Kartonagen niederschlägt.

In geringen Konzentrationen ist Arsen vermutlich ein essentielles Spurenelement, in höheren Konzentrationen wirkt es toxisch. Dies gilt insbesondere für das dreiwertige Arsen; elementares Arsen ist dagegen nicht giftig.

Der Arsen-Gehalt im Restmüll beträgt 9 mg/kg. Einsatz findet Arsen in Legierungen, Halbleitern, farbigem Glas und Pigmenten [34, 71, 76]. Dem entsprechend wurde der höchste Arsengehalt auch in der Analysestoffgruppe Glas bestimmt. Der frühere Einsatz von Arsen in Pflanzenschutzmitteln [71, 72] scheint keinen Einfluss mehr auf den Arsengehalt des Restmülls zu besitzen.

Von elementarem Titan ist keine Toxizität bekannt. Ob eine Titanverbindung toxisch wirkt, hängt v.a. von der jeweiligen Titanverbindung ab. Titan wird als Titanoxid-Pigment vielseitig bei der Herstellung von Kunststoffen, Farben, Gummi, Papier, Keramik und Kosmetika verwendet [72].

Im Restmüll finden sich auf alle Stoffgruppen verteilt – hauptsächlich in den Analysestoffgruppen Elektronikschrott und Kunststoffverpackungen – pro kg knapp 1,6 g Titan wieder.

### 4.2.3 Organische Inhaltsstoffe

Mit Ausnahme der Analysestoffgruppen Inertes und Glas wurden die organischen Schadstoffverbindungen in sämtlichen Stoffgruppen bestimmt. Die Aufbereitung und Extraktion der Abfallfraktionen stellte insbesondere aufgrund der matrixspezifischen Querempfindlichkeiten eine große analytische Herausforderung dar, weshalb nicht von jeder gezogenen Proben alle organischen Schadstoffverbindungen untersucht werden konnten. Die Anmerkungen zu den einzelnen organischen Schadstoffverbindungen bzgl. Herkunft und Vorkommen erfolgen u.a. entsprechend der Angaben nach [72, 73, 79].

#### 4.2.3.1 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Neben den 16 PAK nach EPA wurden weitere acht PAK-Kongenere (vgl. Tab. 9) in das Untersuchungsprogramm aufgenommen.

In Abb. 25 sind die Konzentrationen in den Analysestoffgruppen (trocken), in Abb. 26 die Verteilung der einzelnen PAK-Kongenere pro kg Restmüll dargestellt.

Hohe Konzentrationen von über 29.000  $\mu\text{g}/(\text{kg TM})$  wurden in den Analysestoffgruppen Leder, Gummi, Kork und Feinfraktion ermittelt. Da die Stoffgruppe Feinfraktion über 10 Mass.-% zum Restmüll beiträgt, bildet diese Fraktion den Haupteintragspfad für den PAK-Gehalt des Restmülls. Im Restmüll beträgt der Gesamtgehalt an PAK nach EPA 2.840  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , die acht zusätzlich bestimmten PAK liefern einen Beitrag von 340  $\mu\text{g}/\text{kg}$ .

In die Umwelt gelangen PAK v.a. über unvollständig ablaufende Verbrennungsprozesse (Anlagerung an Staub- und Rußpartikel); PAK sind aber auch teilweise Bestandteil von Klebern und werden bei der Lederverarbeitung und Gummiproduktion eingesetzt, was die hohen Gehalte in der Stoffgruppe Leder, Gummi, Kork erklärt [80, 81].

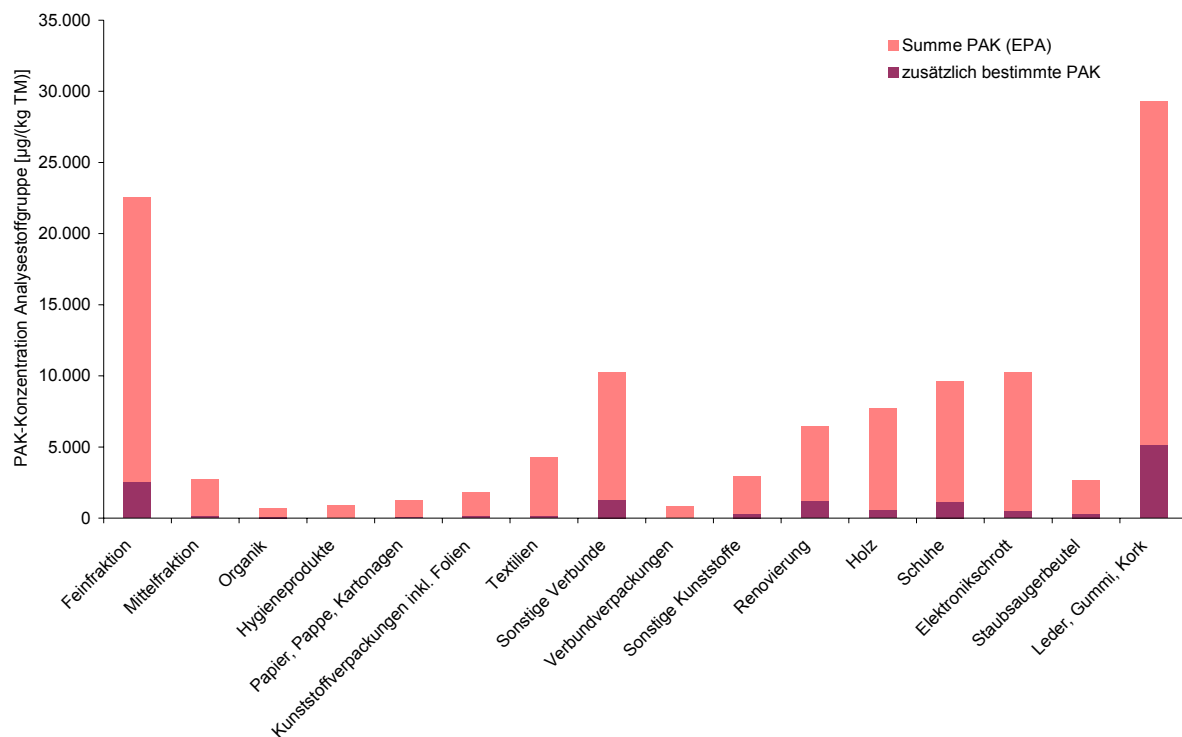


Abb. 25: Konzentration der Summe der PAK in den einzelnen Analysestoffgruppen – aufgeteilt in PAK nach EPA und die acht zusätzlich bestimmten PAK (vgl. Tab. 9)

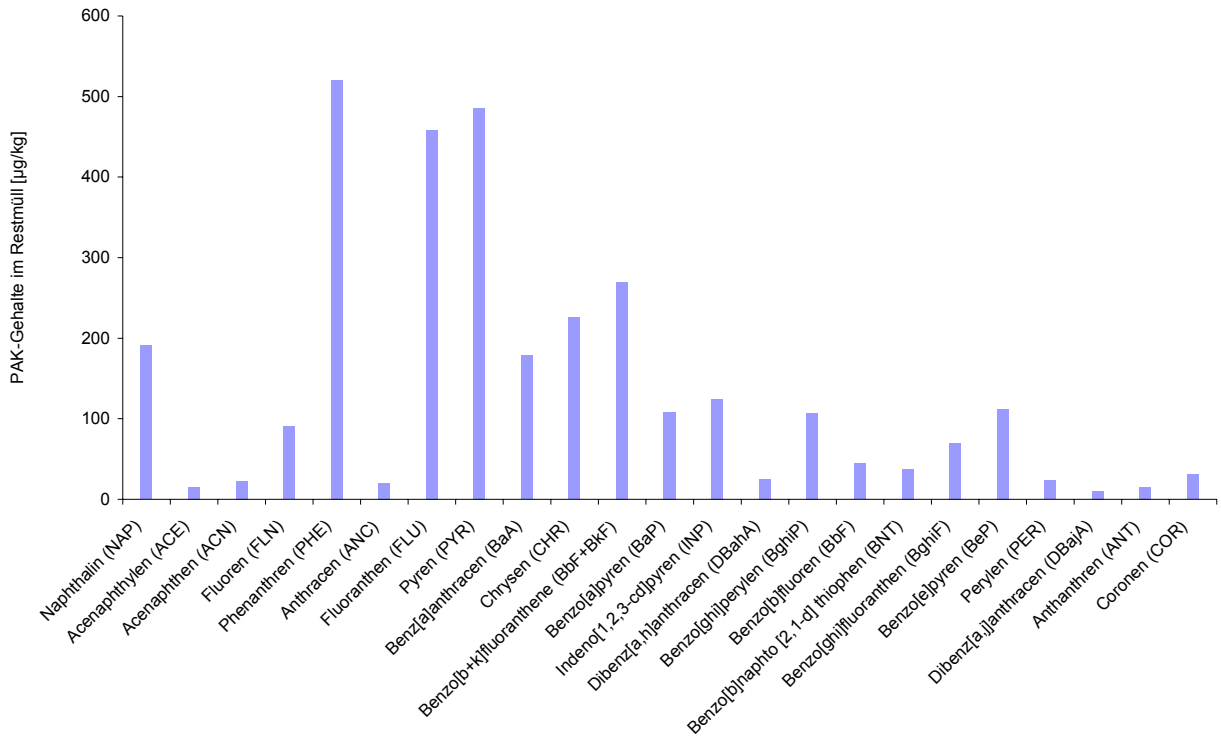


Abb. 26: Verteilung der untersuchten 24 PAK-Kongenere auf den Restmüll (3.180 µg/kg)

Die Verteilung des kanzerogenen Benzo(a)pyren auf die einzelnen Analysestoffgruppen ist in Abb. 27 dargestellt. Wie im Gesamtrestmüll liegen die höchsten Konzentrationen von Benzo(a)pyren in den Stoffgruppen Feinfraktion und Leder, Gummi, Kork vor.

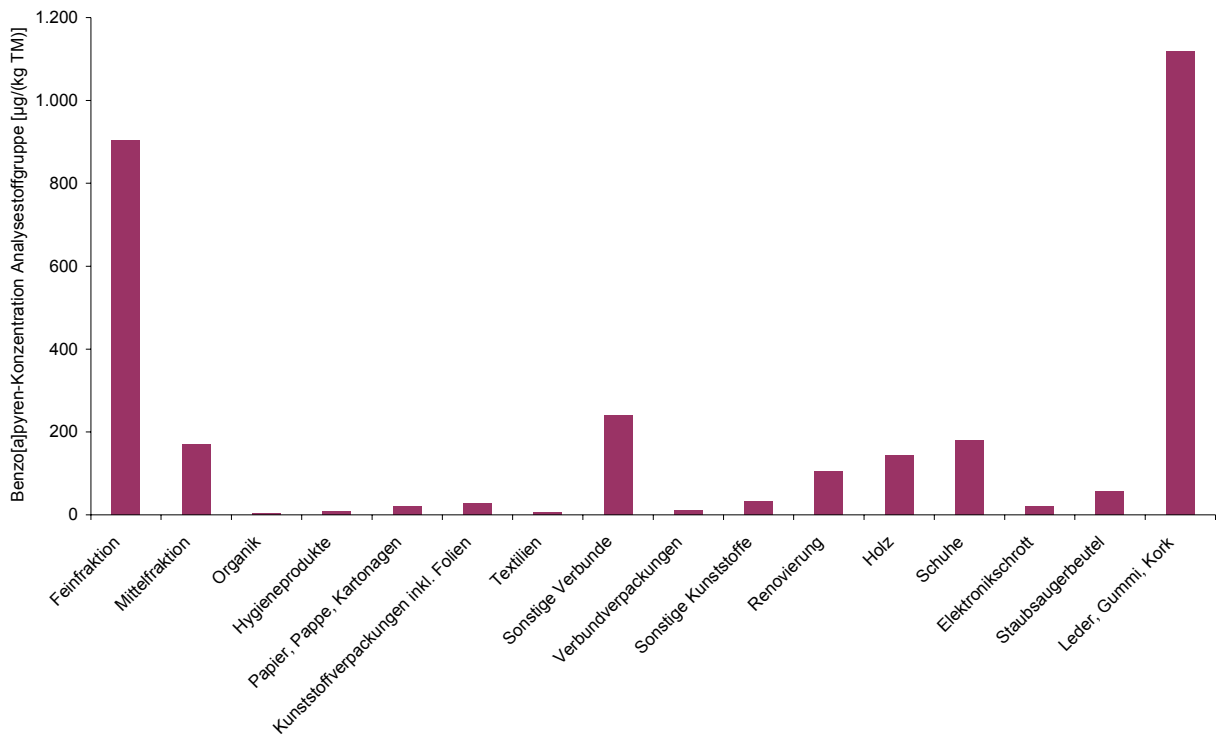


Abb. 27: Gehalte an Benzo(a)pyren in den einzelnen Analysestoffgruppen

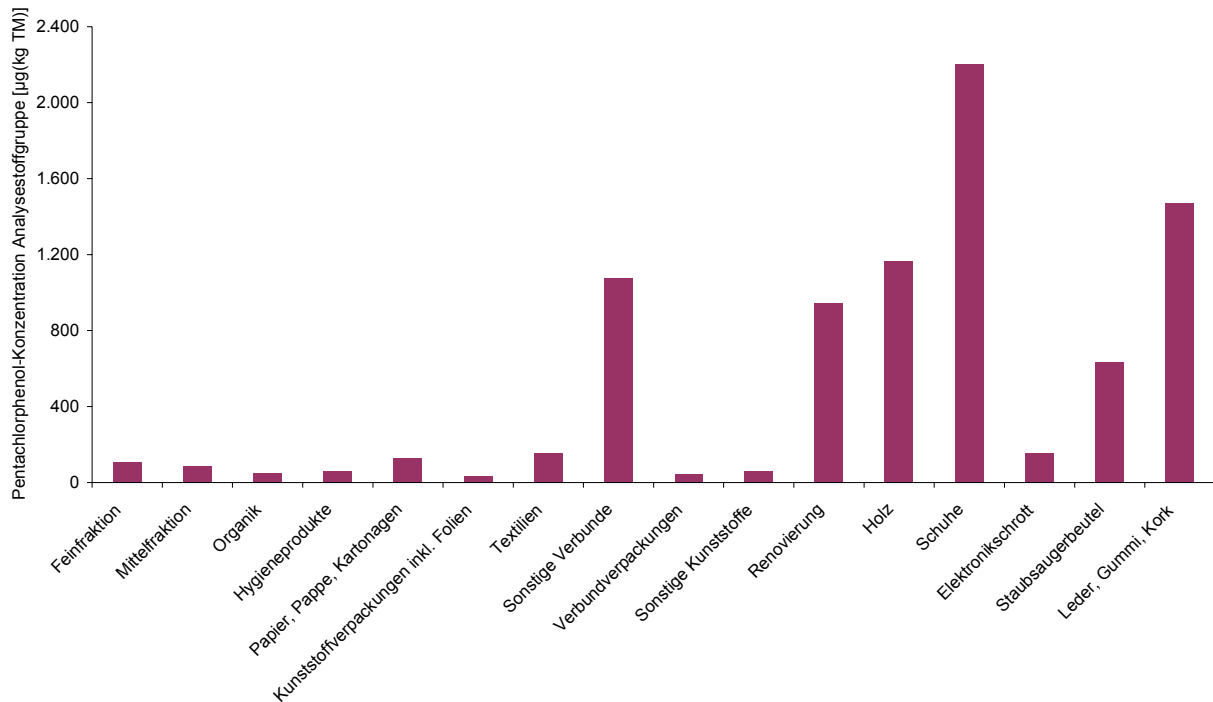


Abb. 28: Pentachlorphenol-Gehalte der einzelnen Analysestoffgruppen

#### 4.2.3.2 Chlorphenole

Leitverbindung der Chlorphenole ist das Pentachlorphenol (PCP), dessen Gehalt in den einzelnen Analysestoffgruppen in Abb. 28 dargestellt ist.

Verwendet wurde PCP v.a. als Appretur im Leder- und Textilschutz. Außerdem für die Wohnraumluft häufig diskutiert ist der Gehalt in Holzschutzmitteln [70, 82, 83]. Seit 1989 ist die Verwendung von Pentachlorphenol in der BRD verboten (PCP-Verbotsverordnung [84], die 1996 in die Chemikalienverbotsverordnung [28] aufgenommen wurde). Neben der gesundheitlichen Gefährdung sind PCP-haltige Produkte produktionsbedingt auch für den Eintrag an PCDD/F verantwortlich [72, 85]. Die höchsten Gehalte wurden entsprechend der Verwendung von PCP im Restmüll in der Analysestoffgruppe Schuhe mit 2.200 µg/(kg TM) festgestellt, gefolgt von den Stoffgruppen Leder, Gummi, Kork {ca. 1.470 µg/(kg TM)} und Holz {1.170 µg/(kg TM)}.

Insgesamt sind im feuchten Restmüll pro kg 124 µg PCP und 239 µg Chlorphenole enthalten. Die Abb. 29 zeigt die Verteilung des Gesamtchlorphenolgehalts auf die einzelnen Chlorierungsgrade.

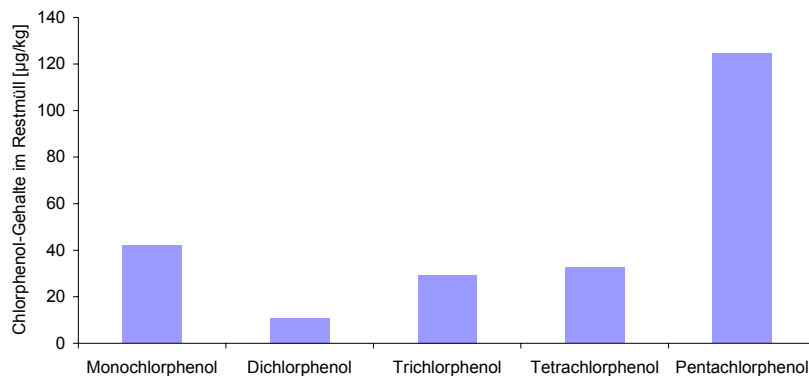


Abb. 29: Gehalt an Mono-, Di-, Tri-, Tetra- und Pentachlorphenol im Restmüll (245 µg/kg)

#### 4.2.3.3 Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Polychlorierte Biphenyle wurden u.a. als Zusätze in Kunststoffen, Papierbeschichtungen, Klebstoffen, Imprägnier- und Flammschutzmitteln sowie Kondensatoren verwendet [70, 72, 85]. Bei der Müllverbrennung gelten PCB wie auch Chlorphenole als Vorläufersubstanzen für polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F); coplanaren dioxinähnlichen PCB wird eine mit den PCDD/F vergleichbare Toxizität zugeschrieben. Die toxischen Eigenschaften der PCB sind abhängig vom Chlorierungsgrad und recht unterschiedlich.

Die polychlorierten Biphenyle sind eine Gruppe von insgesamt 209 Kongeneren. Die Kongenere Nr. 28, 52, 101, 138, 153 und 180 werden aufgrund ihrer Persistenz in der Umwelt, ihres typischen Vorkommens in Produkten und aufgrund der vergleichsweise eindeutigen Bestimmungsmöglichkeiten zu sogenannten Indikatorkongeneren zusammengefasst [86]. Diese wurden im Rahmen dieses Vorhabens bestimmt.

Bezogen auf die Indikatorkongenere weist Restmüll pro kg einen PCB-Gehalt von 76,6 µg auf. Die höchsten Gehalte, aber auch die größten Schwankungen wurden für die Analysestoffgruppe Sonstige Kunststoffe {750 µg/(kg TM)} und Holz {450 µg/(kg TM)} ermittelt (siehe Abb. 30). Auch in den Stoffgruppen Renovierungsabfälle mit z.B. alten Tapeten und entsprechenden Zusatzstoffen und Beschichtungen sowie bei den Staubsaugerbeuteln befinden sich 250 bis 300 µg/(kg TM). Obwohl PCB aufgrund ihrer Hitzebeständigkeit und Viskosität in Elektrobauteilen umfangreich verwendet wurden, liegt in der Analysestoffgruppe Elektronikschrott von Restmüll lediglich eine PCB-Konzentration von 180 µg/(kg TM) vor.

Als Vergleich: In den Jahren 1972/1973 wurden im Restmüll Gehalte von 40 – 9.700 µg/(kg TM), im Jahr 1989 in feuchtem Restmüll Gehalte von 500 µg/kg bestimmt [85]. Auch bei den PCB scheinen demnach die Verbotsbestimmungen [28] zu greifen.

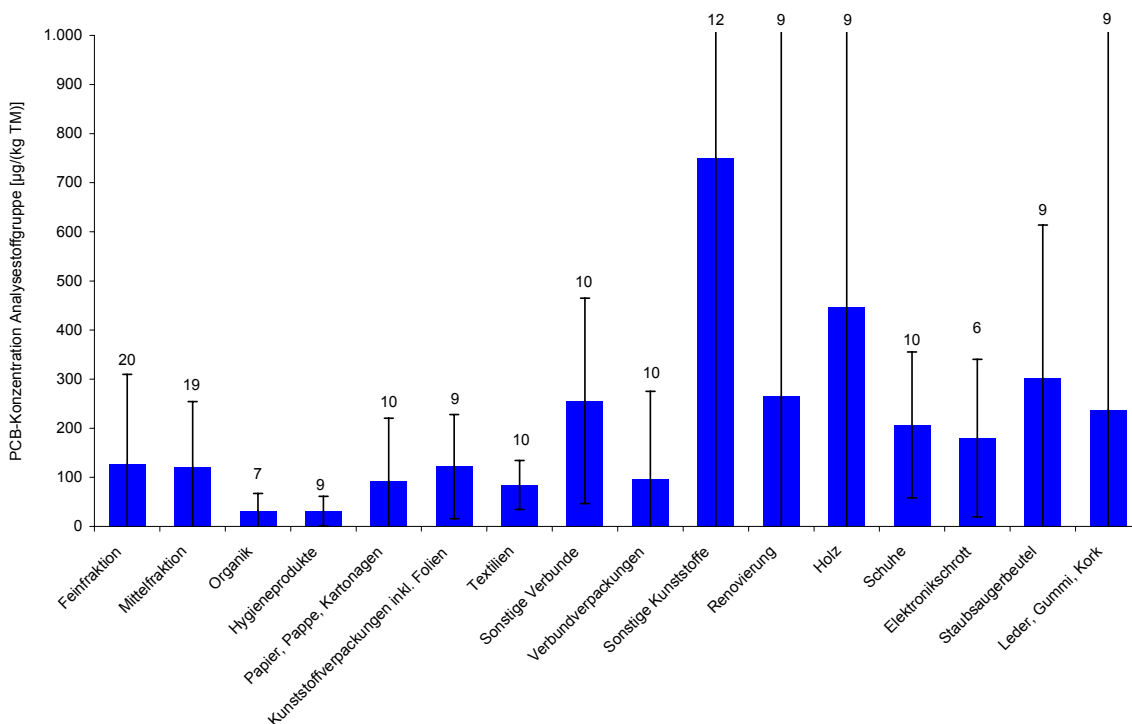


Abb. 30: PCB-Gehalte der einzelnen Analysestoffgruppen einschließlich Schwankungsbreite und Anzahl der untersuchten Proben



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

Gezielt produziert werden Dioxine/Furane nicht; sie kommen allerdings als Verunreinigungen von PCP (z.B. Pflanzen- und Holzschutzmittel, Textil- und Lederproduktion) und PCB vor und bilden sich bei Verbrennungsprozessen während der Abkühlung der Verbrennungsabgase. Aufgrund ihrer Reaktionsträgheit sind sie ubiquitär vorhanden [72].

In den Analysestoffgruppen wurden die polychlorierten Dibenzodioxine und -furane entsprechend der 17. BImSch V [37] analysiert. Bekanntester Vertreter ist das 2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-p-dioxin, mit der höchsten Toxizität.

Insgesamt weist der feuchte Restmüll eine PCDD/F-Konzentration von 5,8 ng I-TEQ/(kg) auf. Die höchsten Gehalte wurden in der (trockenen) Analysestoffgruppe Leder, Gummi, Kork mit 94,6 ng I-TEQ/(kg TM) ermittelt.

Die Ergebnisse unterschreiten Literaturangaben für PCDD/F-Gehalte im Restmüll von 10 – 256 ng I-TEQ/(kg), im Mittel 50 ng I-TEQ/(kg) [68, 87, 88, 89]. Bei diesen Literaturangaben handelt es sich um Untersuchungen aus den 80iger Jahren. Seitdem haben sich die Abfallinhaltsstoffe in Menge und Zusammensetzung wesentlich gewandelt; diverse Verbote, z.B. im Rahmen der bereits erwähnten Chemikalienverbotsverordnung [83], scheinen ihre Wirkung zu zeigen.

Die Ergebnisse einer aktuellen spanischen Studie [90, 91] aus dem Jahr 2000 korrelieren größtenteils mit unseren Werten: bei der Probenahme aus unsortiertem Restmüll wurden PCDD/F-Gehalte von 2 bis 9, eine Probe mit 64 ng I-TEQ/kg ermittelt. Bei der Untersuchung von BRAM (Brennstoff aus Müll) wurden hohe Gehalte für Textilien {157 ng I-TEQ/(kg TM)} gefolgt von Kunststoffen {22 ng I-TEQ/(kg TM)}, und Papier {6 ng I-TEQ/(kg TM)} bestimmt.

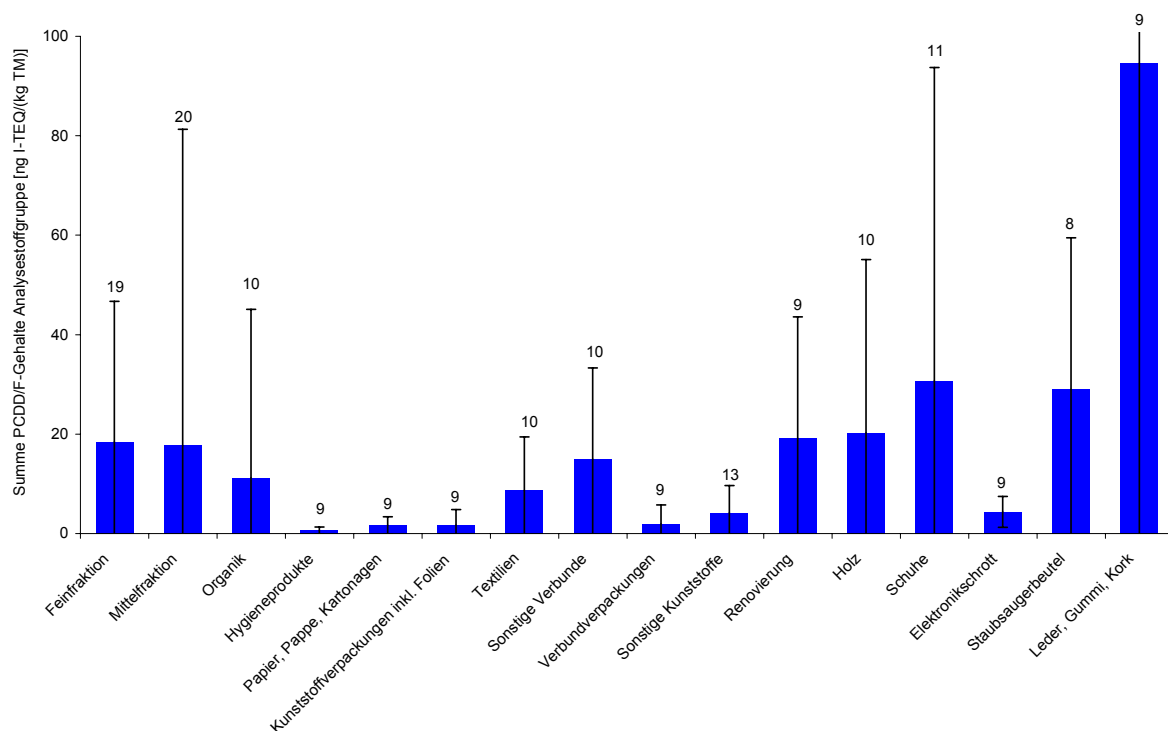


Abb. 31: PCDD/F-Gehalte der einzelnen Analysestoffgruppen einschließlich Schwankungsbreite und Anzahl der analysierten Proben



## 5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Das FuE-Vorhaben „Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen“ hat im Rahmen einer Laufzeit von fünf Jahren statistisch abgesicherte Erkenntnisse zum durchschnittlichen Restmüllaufkommen und dessen Zusammensetzung in Bayern geliefert. Aufgrund der einheitlichen Planung und Durchführung der Restmüllsortieranalysen, insbesondere durch den Einsatz einer dafür konzipierten Mobilen Abfallsortieranlage, war es möglich, die Ergebnisse unterschiedlicher Gebietskörperschaften miteinander zu vergleichen. Zudem konnten somit wesentliche Einflussfaktoren der Restmüllzusammensetzung identifiziert werden.

Der umfangreiche und detaillierte Sortierkatalog gestattet es, Aussagen zu den Anteilen verschiedener potenzieller Wertstoffe, z.B. Papier, Organik, Leichtverpackungen im Restmüll zu treffen. Inwieweit die im Rahmen des Projekts erfassten Wertstoffe tatsächlich verwertbar gewesen wären, wurde bei dieser Fragestellung nicht berücksichtigt. Aufgrund der Vermischung und ggf. gegenseitigen Verschmutzung innerhalb der Restmülltonne kann dies im Rahmen von Sortieranalysen auch nicht beantwortet werden.

Für die genannten Wertstoffe zeigte sich, dass durch die Erfassung im „bequemerem“ Holsystem der verbleibende Anteil im Restmüll deutlich gesenkt werden kann. Die Ausschöpfung der Erfassungsquoten von Wertstoffen im Hol- oder Bringsystem hängt jedoch zusätzlich von „weichen“ Faktoren ab, die in dem Forschungsvorhaben nicht berücksichtigt werden konnten. Diese umfassen z.B. die Akzeptanz der Abfallentsorgung in der Bevölkerung, die Intensität der Öffentlichkeitsarbeit, die Standortdichte der Wertstoffhöfe und Containerinseln, die Frequenz der Abfuhrzyklen sowie die Art der Gebührenberechnung. Einige dieser Faktoren sind mit der nunmehr vorhandenen Datenbasis einer systematischen Analyse, z.B. unter Einsatz von Methoden der schließenden Statistik zugänglich, andere können nur anhand einer eigens darauf abgestimmten Vorgehensweise untersucht werden.

Mit der physikalisch-chemischen Analytik konnten aktuelle Daten zu physikalisch-chemischen Leitparametern und zur Schadstoffbelastung des Restmülls gewonnen werden. Diese Ergebnisse können auf Restmüll aus nicht beprobten Gebietskörperschaften mit bekannter stofflicher Zusammensetzung (Berücksichtigung der einzelnen Massenanteile) näherungsweise übertragen werden. Die Schadstoffgehalte zeigen im Vergleich zu Literaturwerten einen tendenziellen Rückgang, wobei sich die verbleibenden Gehalte vorrangig auf langlebige Konsumgüter konzentrieren und damit das ‚Gedächtnis des Mülls‘ reflektieren. Inwieweit künftig eine weitere Schadstoffentfrachtung durch verstärkte Getrennthaltung einzelner Abfallbestandteile angestrebt sowie ökonomisch und ökologisch zielführend sein wird, ist maßgeblich von den Strategien zur Abfallvermeidung und -recycling, von rechtlichen Entwicklungen, den Erfolgen bei der integrierten Produktpolitik, alternativen Abfallbehandlungsmethoden und der Motivation durch die lokale Abfallwirtschaftspolitik abhängig.

Eine Weiterführung der Restmüllsortieranalysen in anderen Gebietskörperschaften Bayerns erscheint vor dem Hintergrund der bisherigen Ergebnisse als zweckmäßig, um v.a. auch zeitliche Trends belastbar beschreiben zu können.



## Danksagung

Der vorliegende Abschlussbericht ist das Ergebnis des vom Bayerischen Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen geförderten fünfjährigen Forschungsvorhabens „Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen“. Wir danken den Verantwortlichen im bayerischen Umweltministerium für die großzügige finanzielle Unterstützung, ohne die die Durchführung des Projekts nicht möglich gewesen wäre.

Im Rahmen des Vorhabens wurden Abfallsortieranalysen in fünfzehn bayerischen Gebietskörperschaften durchgeführt. Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Abfallbehörden vor Ort, die uns bei der Durchführung der Sortierungen, bei der Suche nach entsprechenden Sortierhallen, bei der Ermittlung der notwendigen Planungs- und Auswertedaten u.v.m. tatkräftig unterstützt haben, gilt unser besonderer Dank.

Zu Dank verpflichtet sind wir außerdem den Kolleginnen und Kollegen unserer Zentrallaboratorien für die Untersuchung der Abfallproben auf anorganische sowie auf organische Parameter. Daneben danken wir allen Kolleginnen und Kollegen des Josef-Vogl-Technikums, die ebenfalls zum Gelingen des Projekts beigetragen haben. Nur mit ihrer Unterstützung war es möglich, den Probenumfang zu bewältigen.



## Literatur

- [1] Porcel, O.; Aguilar, F.J.; del Leon, J.J.; Revilla J.; Diz, J.:  
The physical-chemical components of the municipal solid waste of the city of Cordoba.  
J. Solid Waste Technol. Managem. 24 (1997), S. 57-65
- [2] Kowalewski, R.; Lea, W.R.; Tittlebaum, M. E.:  
A standardized data reporting methodology for long-term integrated municipal solid waste management – A case study.  
J. Solid Waste Technol. Managem. 26 (1999), S. 26-35
- [3] Medina, M.:  
The effect of income on municipal solid waste generation rates for countries of varying levels of economic development: A model.  
J. Solid Waste Technol. Managem. 24 (1997), S. 149-155
- [4] Anonym:  
Getting more for less. Improving collection efficiency.  
United States Environmental Protection Agency, Solid Waste and Energy response, EPA530-R-99-038, 1999, 45 S.
- [5] Kranert M., Clauß D.:  
Veränderte Abfallzusammensetzung beeinflusst die thermische Behandlung.  
UmweltPraxis (2002) 3, S. 12-14
- [6] Anonym:  
Verordnung über die Vermeidung von Verpackungsabfällen (VerpackV – Verpackungsverordnung).  
Vom 12. Juni 1991.  
BGBl. I (1991), S. 1234
- [7] Anonym:  
Verordnung über die Vermeidung und Verwertung von Verpackungsabfällen (VerpackV – Verpackungsverordnung). Vom 21. August 1998.  
BGBl. I (1998), S. 2379; zuletzt geändert am 15.05.2002, S. 1572
- [8] 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), S. 2705; zuletzt geändert am 21.08.2002, S. 3322
- [9] Anonym:  
Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und sonstigen Entsorgung von Abfällen in Bayern (Bayerisches Abfallwirtschaftsgesetz – BayAbfG). Vom 9. August 1996.  
Bayerisches Gesetz- und Verordnungsblatt (1996) 18, S. 396; zuletzt geändert 2003, S. 325, 332
- [10] Anonym:  
Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen – TA Siedlungsabfall. Vom 14. Mai 1993.  
BAnz. (1993), S. 4967 und Beilage
- [11] Anonym:  
Zweite Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. Teil 1: Technische Anleitung zur Lagerung, chemisch/physikalischen, biologischen Behandlung, Verbrennung und Ablagerung von besonders überwachungsbedürftigen Abfällen – TA Abfall. Vom 12. März 1991.  
GMBI. I (1991), S. 139, berichtigt S. 467
- [12] Anonym:  
Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (AbfAbIV – Abfallablagerungsverordnung). Vom 20. Februar 2001.  
BGBl. I (2001), S. 305, zuletzt geändert am 24.07.2002, S. 2807

- [13] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Veranst.):  
Tagungsband zur Fachtagung Restmüllanalysen – eine Grundlage eines nachhaltigen  
Stoffstrommanagements in der Abfallwirtschaft am 5. Dezember 2002 in Augsburg.  
Augsburg 2002
- [14] Barghoorn, M.; Gössele, P; Kaworski, W.:  
Bundesweite Hausmüllanalyse 1983 – 1985. Auftrag des Umweltbundesamtes an die TU Berlin. UBA-  
Forschungsbericht 103 03 508.  
Berlin 1986, 317 S.
- [15] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen:  
Abfallwirtschaft Hausmüll in Bayern Bilanzen 1988/90 und Ausblick.  
München 1991, 66 S.
- [16] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz:  
Abfallwirtschaft – Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2001.  
Augsburg 2002, 76 S. + CD-ROM
- [17] Ammann, H.:  
Menge und Zusammensetzung von Hausmüll in Bayern in den Jahren 1992 bis 1996. Diplomarbeit  
am Abfalltechnikum des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz.  
Augsburg 1998, 70 S. + Anhang
- [18] Bilitewski, B.; Härdtle, G.; Marek, K.:  
Abfallwirtschaft – Eine Einführung.  
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1991, 634 S.
- [19] 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.
- [20] Abbe, A.; Pohlmann, M.; Schietinger, G.; Stretz, J.; Zachäus, D.:  
Zusammenführung und gemeinsame Auswertung von Hausmüllanalysen.  
Abfallwirtschaftsjournal (1998) 3, S. 17-21
- [21] Nolting, B.:  
Restmüllanalyse im Landkreis Schweinfurt. Auftrag des Landkreises Schweinfurt an die ARGUS.  
Berlin 1996, 43 S.
- [22] Verband Kommunaler Fuhrparks- und Stadtreinigungsbetriebe (VKF), heute: Verband Kommunale  
Abfallwirtschaft und Stadtreinigung e.V. (VKS):  
Merkblatt M1 – M4: Müllanalysen.  
Köln 1964
- [23] Thüringer Ministerium für Umwelt und Landesplanung:  
Merkblatt zur Durchführung von Hausmüllanalysen.  
St. Anz. (1993) 20, S. 767-768
- [24] Landesumweltamt Brandenburg:  
Richtlinie für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Menge und  
Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle im Land Brandenburg. Fachbeiträge des  
Landesumweltamts – Titelreihe Nr. 34.  
Potsdam 1998, 27 S.
- [25] Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie:  
Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen.  
Dresden 1998
- [26] Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen:  
Leitfaden für die Analyse zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung von Abfällen aus  
Haushaltungen.  
Materialien Nr. 47, Essen 1998, 127 S.



- [27] Anonym:  
Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren. BattV – Batterieverordnung (BattV). Fassung vom 2. Juli 2001.  
BGBl. I (2001) 33, S. 1486, zuletzt geändert am 09.09.2001, S. 2331
- [28] Anonym:  
Verordnung über Verbote und Beschränkungen des Inverkehrbringens gefährlicher Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse nach dem Chemikaliengesetz (ChemVerbotsV – Chemikalien-Verbotsverordnung). In der Fassung vom 19. Juli 1996.  
BGBl. I (1996), S. 1151, 1498; zuletzt geändert 19.05.2003, S. 712
- [29] Thomé-Kozmienzky, K.J.:  
Thermische Abfallbehandlung.  
EF-Verlag, Berlin 1994, 1081 S.
- [30] Bank, M.:  
Basiswissen Umwelttechnik, 3. aktualisierte und erw. Auflage.  
Vogel-Verlag, Würzburg 1995, 1429 S.
- [31] Maystre, L.Y.; Viret, F.:  
A goal-oriented characterization of urban waste.  
Waste Management & Research 13 (1995), S. 207 – 218
- [31] 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
- [33] 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
- [34] Mast, P.-G.; Süßkraut, G.; van den Elsen, H.; Stekete, J.; Duzijin, R.:  
Einfluß der Abfallzusammensetzung auf Schadstoffgehalt und -menge der Verbrennungsrückstände.  
Auftrag des Umweltbundesamtes an die TauUmwelt GmbH. UBA-Forschungsbericht 103 1090.  
Berlin 1996
- [35] Blume, J.:  
Die optimale Restmüllentsorgungstechnologie: biologisch und/oder thermisch?  
Müll und Abfall (1996) 3, S. 157-168
- [36] Hessische Landesanstalt für Umwelt (Hrsg.):  
Systemvergleich Restabfallbehandlung.  
Schriftenreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt: Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Heft 167.  
Wiesbaden 1994
- [37] 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), S. 2545, ber. S. 2832; zuletzt geändert (2001), S. 1950

- [38] 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
- [39] 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
- [40] 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 (1999) 12, S. 716
- [41] Anonym:  
Gemeindevorordnung für den Freistaat Bayern (Gemeindeordnung – GO). Fassung vom 22. August 1998.  
GVBl. (1998), S. 796, zuletzt geändert (2001), S. 140
- [42] Harant, M.; Hochuber, J.; Lorber, K.E.; Nelles, M.; Rolland, Ch.:  
Endbericht zum Großversuch zur Sammlung und Verwertung von Elektro- und Elektronikaltgeräten (EAG) in der Steiermark, Endbericht der wissenschaftlichen Begleitstudie.  
Eigenverlag der Steiermärkischen Landesregierung, Schriftenreihe der FA I c, Band 7:  
Elektronikschrott Projekt Steiermark.  
Graz 1998
- [43] Körner, W.:  
Matrixspezifische Analytik für organische Schadstoffe im Restmüll. In: Tagungsband zur Fachtagung des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutzes (Veranstalter): Restmüllanalysen – eine Grundlage eines nachhaltigen Stoffstrommanagements der Abfallwirtschaft am 05.12.2002 in Augsburg.  
Augsburg 2002, S. 49-53
- [44] Greiner, B.; Barghoorn, M.; Dobberstein, J.; Eder, G.; Fuchs, J.; Gösele, P.:  
Chemisch-physikalische Analyse von Hausmüll. Auftrag des Umweltbundesamtes an die TU Berlin.  
UBA-Forschungsbericht 83-033.  
Berlin 1983, 161 S.
- [45] Bidlingmaier, W.:  
Schwermetalle im Hausmüll: Herkunft, Schadwirkung, Analyse.  
Erich Schmidt Verlag, Berlin 1990
- [46] Schäfer, M.; Hoffmann, E.:  
Schadstoffe in Biomüll.  
Entsorgungspraxis (2000) 4, S. 15 - 19
- [47] Anonym:  
DIN 38414-22 Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Teil 22: Bestimmung des Gefriertrockenrückstandes und Herstellung der Gefriertrocknungsmasse des Schlammes (S 22).  
September 2000
- [48] Anonym:  
DIN 38414-3 Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Teil 3: Bestimmung des Glührückstandes und Glühverlustes der Trockenmassen eines Schlammes (S3).  
November 1985

- [49] Anonym:  
DIN 51900 1-3 Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes.  
August 1977, zuletzt geändert April 2000
- [50] Anonym:  
DIN 38406-12: Kationen (Gruppe E): Bestimmung von Quecksilber (E12).  
Juli 1980
- [51] Anonym:  
DIN 38414-7: Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Teil 7: Aufschluss mit Königswasser zur nachfolgenden Bestimmung des säurelöslichen Anteils von Metallen (S7).  
Januar 1983
- [52] Environmental Protection Agency:  
Polynuclear Aromatic Hydrocarbons – Method 610.  
Federal Register 44 (1979) 233, S. 69514-69517
- [53] 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
- [54] Marb, C.; Vorndran, I.:  
Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen, 1. Zwischenbericht (unveröffentlicht). Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen an das Bayerische Landesamt für Umweltschutz. Forschungsvorhaben L8. Augsburg 1999
- [55] Marb, C.; Vorndran, I.:  
Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen, 2. Zwischenbericht (unveröffentlicht). Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen an das Bayerische Landesamt für Umweltschutz. Forschungsvorhaben L8. Augsburg 2000
- [56] Marb, C.; Vorndran, I.; Neumeyer, F.; Fripan, J.:  
Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen, 3. Zwischenbericht (unveröffentlicht). Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen an das Bayerische Landesamt für Umweltschutz. Forschungsvorhaben L8. Augsburg 2001
- [57] Marb, C.; Przybilla, I.; Fripan, J.:  
Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen, 4. Zwischenbericht (unveröffentlicht). Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen an das Bayerische Landesamt für Umweltschutz. Forschungsvorhaben L8. Augsburg 2002
- [58] Marb, C.; Przybilla, I.; Neumeyer, F.; Fripan, J.:  
Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen, 5. Zwischenbericht (unveröffentlicht). Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen an das Bayerische Landesamt für Umweltschutz. Forschungsvorhaben L8. Augsburg 2003
- [59] Anonym:  
Verordnung über den Abfallwirtschaftsplan Bayern (AbfPV) vom 18. Dezember 2001.  
GVBl. Nr. 26 vom 31.12.2001
- [60] Anonym:  
Richtlinie 2002/96/EG vom 27. Januar 2003 des europäischen Parlaments und des Rates über Elektro- und Elektronik-Altgeräte.  
ABl. L Nr. 37 vom 13.02.2003, S. 24

- [61] Anonym:  
GRS nahm 2002 um sieben Prozent mehr Batterien zurück als im Vorjahr.  
Euwid (2003) 15, S. 3
- [62] Anonym:  
Bericht der Bund/Länder-Arbeitsgruppe Verpackungsverordnung, März 2002.  
[http://www.abfall-intern.de/html/stat/verpackVO\\_bericht.php](http://www.abfall-intern.de/html/stat/verpackVO_bericht.php), aufgerufen am 14.05.2003
- [63] Duales System Deutschland AG:  
Mengenstromnachweis 2002, Ausgabe Bayern.  
Köln 2003
- [64] Bühnemann, A.; Christiani, J.; Racht G.:  
Prüfbericht zum Mengenstromnachweis der DSD AG vom 02.07.2003. Auftrag der DSD AG an die ARGE cyclos/HTP.  
Osnabrück, Aachen 2003, 97 S.
- [65] Clauß, D.:  
Untersuchung zum Geschäftsmüllanteil am Hausmüllaufkommen eines Landkreises in Baden-Württemberg.  
[http://www.uni-stuttgart.de/siwa/sia/projekte/pro\\_ts1.htm](http://www.uni-stuttgart.de/siwa/sia/projekte/pro_ts1.htm), aufgerufen am 25.03.2003
- [66] Anonym:  
Daten, Fakten, Hintergründe zur Abfallwirtschaft – Geschäftsmüll.  
<http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/abfallwirtschaft/de/siedlungsabfall/geschaefmüll.shtml>, aufgerufen am 25.03.2003
- [67] 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.
- [68] Thomé-Kozmiensky, K.J.:  
Verfahren und Stoffe in der Kreislaufwirtschaft.  
EF-Verlag, Berlin 1995, 1089 S.
- [69] Schlummer, M.; Brandl, F.; Mäurer, A.; Luck, T.:  
Störstoffproblem gelöst.  
Müllmagazin (2001) 3, S. 39
- [70] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.):  
Fachinformation Chlorchemie – Wege und Perspektiven eines Grundstoffes in Bayern.  
München 2000
- [71] Holleman, A.F.; Wiberg, E.:  
Lehrbuch der Anorganischen Chemie. 91.-100. verb. u. stark erw. Auflage von Wiberg, N.  
Walter de Gruyter Verlag, Berlin, New York 1985, 1451 S.
- [72] Streit, B.:  
Lexikon Ökotoxikologie.  
VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim 1992, 731 S.
- [73] Umweltbüro Oetzel:  
Schadstofflexikon.  
<http://www.umweltanalytik.com>, aufgerufen am 10.04.2003
- [74] Wolf, M.:  
Flammschutzmittel und Schwermetalle in Kunststoffen.  
In: Tagungsband zur Fachtagung des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutzes (Veranstalter):  
Umweltrelevante Inhaltsstoffe in Elektro(nik)altgeräten am 25.09.2001 in Augsburg.  
Augsburg 2001, S. 35 - 40

- [75] Eder, G.:  
Umweltbelastungen durch Verpackungen - Schadstoffe in Papier- und Kunststoffverpackungen.  
Hrsg. Golding, A., Fußer A.: Verpackungen - Umweltbelastung und Strategien zur Vermeidung.  
C.F. Müller Verlag, Karlsruhe 1992, S. 17 - 30
- [76] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz:  
Umweltrelevante Inhaltsstoffe in Elektro- und Elektronikgeräten.  
Augsburg 2002, 56 S.
- [77] Anonym:  
Richtlinie 2002/95/EG vom 27. Januar 2003 des europäischen Parlaments und des Rates zur  
Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten.  
ABl. L Nr. 37 vom 13.02.2003, S. 19
- [78] Spuziak-Salzenberg, D.; Riemer, S.; Bayley-Bleckwedel, B.; Bär G.:  
Probenaufbereitungssystem zur Qualitätssicherung für Abfälle zur energetischen (stofflichen)  
Verwertung.  
Entsorgungspraxis (1998) 10, S. 36 – 40
- [79] Umweltlabor GmbH Arguk:  
Info-Reihe: Schadstoffinformation.  
<http://www.arguk.de>, aufgerufen am 10.04.2003
- [80] Anonym:  
Möglichkeiten zum Ersatz von polyaromatischen Weichmachern.  
<http://www.rubber-compounding.com>, aufgerufen am 09.04.2003
- [81] Anonym:  
Branchenbezogene Merkblätter Nr. 10 – Lederverarbeitung.  
<http://www.umwelt.sachsen.de/lfug/salfaweb-nt/berichte/brabl10-1.4.html>, aufgerufen am 09.04.2003
- [82] Behling, G.; Koller, U.:  
Fachinformation „Umwelt und Gesundheit“ Pentachlorphenol.  
<http://www.umweltministerium.bayern.de/service/umwberat/ubbpcp.htm>, aufgerufen am 09.04.2003
- [83] Anonym:  
Richtlinie für die Bewertung und Sanierung Pentachlorphenol (PCP)-belasteter Baustoffe und Bauteile  
in Gebäuden (PCP-Richtlinie) – Fassung Oktober 1996.  
MBI. NW (1997), S. 1058
- [84] Anonym:  
Pentachlorphenolverbotsverordnung (PCP-Verbotsverordnung).  
BGBl. I (1989) Nr. 59, S. 2235.
- [85] 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
- [86] Ballschmitter, K.:  
PCB in der Umwelt und ihre Analytik – Rückblick und Gegenwart.  
In: Tagungsband zur Fachtagung des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutzes (Veranstalter):  
Dioxinähnliche PCB in der Umwelt – Quellen, Verbleib, Exposition und gesundheitliche Bewertung  
am 13./14.01.2003 in Augsburg.  
Augsburg 2003, S. 15-18
- [87] 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
- [87] Spahl, R.; Dorn, I.H.; Horn, H.C.; Hess, K.:  
Katalytische Dioxinzerstörung für Abfallverbrennungsanlagen.  
Entsorgungspraxis (1993) 5, Sonderdruck

- [89] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen:  
Dioxine und Furane. Erstellt vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz. 1. Auflage.  
München 1993
- [90] 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
- [91] 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