



**Restmüllzusammensetzung in Phasing-Out-Gebieten
(EU Ziel-2-Programm Bayern)
Abschöpfbares Wertstoffpotenzial als Funktion
abfallwirtschaftlicher Rahmenbedingungen**

Schlussbericht





**Restmüllzusammensetzung in Phasing-Out-Gebieten
(EU Ziel-2-Programm Bayern)
Abschöpfbares Wertstoffpotenzial als Funktion
abfallwirtschaftlicher Rahmenbedingungen
Schlussbericht**

Impressum

Restmüllzusammensetzung in Phasing-Out-Gebieten (EU Ziel-2-Programm Bayern): Abschöpfbares Wertstoffpotenzial als Funktion abfallwirtschaftlicher Rahmenbedingungen

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86179 Augsburg
Tel.: (0821) 90 71 - 0
Fax: (0821) 90 71 - 55 56
E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de
Internet: www.lfu.bayern.de

Eine Behörde im Geschäftsbereich des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz.

Bearbeitung/Text/Konzept:

Ref. 33/LfU

Druck:

Eigendruck Bayer. Landesamt für Umwelt

© Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg, 2007

Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck und Wiedergabe – auch auszugsweise – nur mit Genehmigung des Herausgebers.



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



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
1 Einleitung	7
2 Stand des Wissens	9
2.1 Abfallaufkommen und -zusammensetzung	9
2.2 Untersuchung der Inhaltsstoffe	12
2.3 Phasing-Out-Gebiete (EU Ziel-2-Programm Bayern)	13
3 Vorgehensweise	15
3.1 Planung und Durchführung der Restmüllsortierungen	15
3.1.1 Stichprobenplanung	15
3.1.2 Sortierung	16
3.1.3 Mobile Abfallsortieranlage	17
3.2 Auswertung und Hochrechnung	18
3.3 Auswahl der Gebietskörperschaften	22
3.4 Analytik	25
3.4.1 Analysestoffgruppen	25
3.4.2 Probenahme und Probenvorbereitung	26
3.4.3 Analysemethoden	28
3.4.4 Auswertung	30
4 Ergebnisse und Diskussion	31
4.1 Datenbestand	31
4.1.1 Restmüllaufkommen	31
4.1.2 Restmüllzusammensetzung	33
4.1.3 Wertstoffaufkommen in Abhängigkeit des Abfallwirtschaftssystems	39
4.1.4 Behälterspezifische Daten	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	45
4.2.1.3 Heizwert	46

4.2.2	Anorganische Inhaltsstoffe	47
4.2.2.1	Kohlenstoff	47
4.2.2.2	Chlor, Schwefel, Stickstoff, Phosphor	48
4.2.2.3	Alkali- und Erdalkalimetalle	48
4.2.2.4	Schwermetalle	49
4.2.3	Organische Inhaltsstoffe	56
4.2.3.1	Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	56
4.2.3.2	Polychlorierte Biphenyle (PCB)	56
4.2.3.3	Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F)	57
5	Öffentlichkeitsarbeit	59
6	Schlussfolgerung und Ausblick	61
7	Literatur	63

Zusammenfassung

Bei dem Forschungsprojekt „Restmüllzusammensetzung in Phasing-Out-Gebieten (EU Ziel-2-Programm Bayern): Abschöpfbares Wertstoffpotenzial als Funktion abfallwirtschaftlicher Rahmenbedingungen“ wurden Restmüllsortieranalysen in verschiedenen bayerischen Gebietskörperschaften durchgeführt. Dabei wurde auf eine einheitliche, durch vorangegangene Projekte am Josef-Vogl-Technikum des Bayerischen Landesamtes für Umwelt bereits etablierte Vorgehensweise zurückgegriffen, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

In dem auf zwei Jahre ausgelegten EFRE-Vorhaben wurde der Restmüll von sechs Landkreisen, die ganz oder teilweise dem Phasing-Out-Gebiet Bayerns zugeordnet sind, 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. Zur Berücksichtigung saisonaler Schwankungen wurden pro Gebietskörperschaft zwei Restmüllsortierkampagnen (Sommer, Winter) durchgeführt. Insgesamt wurden bei dem Vorhaben 40,2 Mg bzw. 241,7 m³ Restabfall von 10.088 Abfallerzeugern sortiert. Zur Vereinheitlichung der Vorgehensweise kam eine Mobile Abfallsortieranlage zum Einsatz. Mit ihr wurden die Korngrößenfraktionen mit Partikeldurchmessern $d_p \leq 10$ mm (Fein-) und $10 < d_p \leq 40$ mm (Mittelfraktion) abgetrennt und der Siebüberlauf ($d_p > 40$ mm) anschließend händisch nach 47 Fraktionen sortiert. Deren Massenanteile dienten der Ermittlung der durchschnittlichen Abfallzusammensetzung der jeweiligen Gebietskörperschaft. Hierbei wurde der Anteil der in den einzelnen Siedlungsstrukturen lebenden Bevölkerung an der Gesamtbevölkerung des Untersuchungsgebiets als Gewichtungsfaktor herangezogen.

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

- Das spezifische Restmüllaufkommen (ohne Geschäftsmüll) im Phasing-Out-Gebiet Bayerns beläuft sich im Mittel auf 98,3 kg/(E·a).
- Über zwei Drittel der Restmüllmasse bestehen aus den Sortierfraktionen Organik (26,2 Mass.-%), Hygieneprodukte (16,4 Mass.-%), Fein- (11,4 Mass.-%) und Mittelfraktion (14,6 Mass.-%).
- Die im Restmüll noch vorhandenen, großteils allerdings schwer abschöpfbaren spezifischen Wertstoffmengen umfassen im Mittel 46,9 Mass.-%. Bei der im Projekt angewandten Definition des Begriffs „Wertstoff“ blieb bei den Sortierungen die tatsächliche Verwertbarkeit (z. B. durch Verschmutzungsgrad und hygienische Aspekte eingeschränkt) unberücksichtigt. Die Einstufung als „Wertstoff“ erfolgte auch unabhängig davon, ob in der jeweiligen Gebietskörperschaft hierfür eine getrennte Erfassung erfolgt. In Abhängigkeit vom Wertstoffeffassungs- und Gebührensystem wurden z. T. deutlich geringere Gehalte festgestellt. Insbesondere erwiesen sich das bequemere Holsystem für Wertstoffe wie Bioabfall, Papier, Pappe, Kartonaugen und Leichtverpackungen sowie monetäre Anreize durch gewichts- oder volumenbezogene Leistungsgebührenanteile als Faktoren zur Reduzierung des Restmüllaufkommens. Inwieweit dies bei einer ganzheitlichen Betrachtung sämtlicher Abfallströme aus Haushaltungen und deren Verwertungs- und Entsorgungswege in jeder Hinsicht nachhaltig ist, war nicht Gegenstand der Untersuchung.
- Das Restmüllaufkommen nimmt mit der Bebauungsdichte zu und liegt in Gebietskörperschaften mit innerstädtischen Strukturen ca. 15 Mass.-% über den ländlichen Strukturen, wobei die Differenzen zwischen den einzelnen Gebietskörperschaften sehr unterschiedlich sind.

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, differieren die Ergebnisse der Schadstoffgehalte zum Teil erheblich, obwohl die Untersuchungen an ‚sortenreinen‘ Analysestoffgruppen vorgenommen wurden.
- Der Heizwert des Restmülls beträgt 8,3 MJ/kg; die höchsten Beiträge liefern die Abfallfraktionen Sonstige Kunststoffe und Kunststoffverpackungen. Sowohl eine Erhöhung des Masseanteils hochkalorischer Fraktionen (z. B. Kunststoffe/-verpackungen) als auch eine Reduzierung niederkalorischer Fraktionen (v. a. mineralische Feinfraktion sowie die wasserhaltigen Fraktionen Organik und Hygieneprodukte) würden zu einer Steigerung des Heizwerts von Restmüll beitragen.
- Schwermetalle werden hauptsächlich durch die Fraktionen Feinfraktion, Elektronikschrott, Inertes, Leder/Gummi/Kork und Sonstige Verbunde in den Restmüll eingetragen.
- Am Anteil der organischen Schadstoffe im Restmüll sind v. a. die Fraktionen Leder/Gummi/Kork (PAK, PCB, PCDD/F), Schuhe (PAK, PCDD/F), Sonstige Kunststoffe (PAK), Renovierungsabfälle (PCB) sowie die Feinfraktion (PAK) beteiligt.
- Der Vergleich der Schadstofffrachten macht deutlich, dass seit den 80er Jahren des vergangenen Jahrhunderts eine deutliche Entfrachtung des Restmülls stattgefunden hat.

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

Mit dem Forschungsvorhaben konnten aktuelle Daten zur stofflichen Zusammensetzung und dem Schadstoffpotenzial des Restmülls im Phasing-Out-Gebiet 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

Die Ermittlung der Restmüllzusammensetzung und der im Restmüll vorhandenen Wertstoffe in Abhängigkeit von den lokalen Abfallwirtschaftssystemen ermöglicht eine Einschätzung der Effizienz abfallwirtschaftlicher Maßnahmen. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich Handlungsempfehlungen für die Optimierung eines Abfallwirtschaftsraumes ableiten. Durch Änderungen des gesetzlichen Rahmens (z. B. neue Zielvorgaben für die Verwertung von Verpackungsabfällen [1], ElektroG [2]), des Konsumverhaltens der Bürger und der vor Ort etablierten Abfallwirtschaftskonzepte unterliegt das Abfallaufkommen und dessen Zusammensetzung einem ständigem Wandel, dessen Kenntnis eine Voraussetzung für die fortlaufende Optimierung ist.

Bei dem zweijährigen Forschungsprojekt „Restmüllzusammensetzung in Phasing-Out-Gebieten (EU Ziel-2-Programm Bayern): Abschöpfbares Wertstoffpotenzial als Funktion abfallwirtschaftlicher Rahmenbedingungen“ wurden in Phasing-Out-Gebieten von sechs bayerischen Gebietskörperschaften Restmüllsortieranalysen durchgeführt. Bei deren Auswahl wurden abfallwirtschaftliche Gesichtspunkte, wie Änderungen kommunaler Satzungen (z. B. Einführung eines neuen Gebührensystems), berücksichtigt, die das Abfallaufkommen und die -zusammensetzung beeinflussen. Außerdem hängen das Abfallaufkommen und die -zusammensetzung auch von sog. „weichen Faktoren“ ab, wozu beispielsweise die Art der Gebührenberechnung und deren Akzeptanz in der Bevölkerung, die Entfernung Wohnung – Depotcontainer/Wertstoffhof und die Wohnverhältnisse zählen.

Die einheitliche Methodik und Auswertung der Abfallsortierkampagnen liefert statistisch gesicherte Ergebnisse über Restmüllaufkommen und -zusammensetzung und ermöglicht einen Vergleich zwischen den verschiedenen abfallwirtschaftlichen Systemen der untersuchten Gebietskörperschaften.

2 Stand des Wissens

2.1 Abfallaufkommen und -zusammensetzung

Vorhandene Datenbasis

Die Landkreise und kreisfreien Städte Bayerns sind nach Art. 12 des Bayerischen Abfallwirtschaftsgesetzes [3] verpflichtet, jährlich eine Bilanz über Art, Herkunft und Menge der in ihrem Gebiet anfallenden Abfälle sowie deren Verwertung und Entsorgung für die Bayerische Abfallbilanz vorzulegen. Detailliertere Informationen über die Restmüllzusammensetzung und das Aufkommen von Restmüll aus privaten Haushalten werden von den Abfallbilanzen grundsätzlich nicht erfasst; die Massenströme der über die Restmülltonne erfassten Abfälle (Haus- und Geschäftsmüll) werden nur summarisch genannt.

Statistisch gesicherte Daten über die Restmüllzusammensetzung und das Restmüllaufkommen aus privaten Haushalten in Bayern sind allein aus der überregional und systematisch durchgeführten Bundesweiten Hausmüllanalyse [4] für die Jahre 1983 bis 1985 verfügbar. Seither hat sich die Datenbasis erheblich verändert, was folgender Vergleich zeigt: Nach der Bayerischen Abfallbilanz betrug das spezifische Restabfallaufkommen (Hausmüll und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle) im Jahr 1988 274,1 kg/(E·a) [5] und im Jahr 2005 174,2 kg/(E·a) [6]; d. h., die spezifische Restmüllmasse hat sich in 17 Jahren um 100 kg/(E·a) bzw. 36 Mass.-% verringert.

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

Eigene Aktivitäten

Das Restabfallaufkommen und die -zusammensetzung aus privaten Haushalten war Inhalt des fünfjährigen Forschungsvorhabens „Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen“ [8]. Dabei wurde der Restmüll aus 15 repräsentativen bayerischen Gebietskörperschaften (9 Landkreise, 5 kreisfreie Städte, 1 Abfallzweckverband) beprobt. Berücksichtigt wurden Einflussfaktoren wie Gebietsstruktur, Behältergröße, Wertstofffassungssystem.

Die Vorgehensweise basierte auf der „Richtlinie für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle im Land Brandenburg“ [9].

Bei der Untersuchung des Restmülls von 29.000 Bürgern mit einem Gesamtvolumen von 800 m³ in den Jahren 1998 bis 2003 wurden folgende Ergebnisse erzielt (vgl. [8]):

- Das spezifische bayerische Restmüllaufkommen aus Haushalten beläuft sich auf 112,5 kg/(E·a)
- Ca. zwei Drittel der Restmüllmasse werden durch die Sortierfraktionen Organik (23 Mass.-%), Hygieneprodukte (15 Mass.-%), Fein- (11 Mass.-%) und Mittelfraktion (14 Mass.-%) gebildet
- Die im Restmüll vorgefundenen, größtenteils schwer abschöpfbaren spezifischen Wertstoffmengen umfassen im Mittel 55,0 kg/(E·a)

- Das Restmüllaufkommen nimmt mit der Besiedlungsdichte zu und liegt im innerstädtischen Bereich um bis zu 30 Mass.-% über den ländlichen Strukturen

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

Daten über das Restabfallaufkommen und die -zusammensetzung im Phasing-Out-Gebiet [10] Bayerns liegen bisher nicht vor.

Methodik von Hausmüllanalysen

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

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

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

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

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

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

Bis dato existiert auf bundesweiter Ebene keine einheitliche Richtlinie über die Vorgehensweise bei Abfallsortieranalysen, vgl. Übersicht in Tab. 1 über bestehende Abfallsortierrichtlinien und Merkblätter. Der Vorschlag, Regelungen zur Durchführung von Analysen im Anhang A II der Technischen Anleitung Siedlungsabfall [15] aufzunehmen, wurde auf Länderebene abgelehnt.

Tab. 1: Übersicht über bestehende Abfallsortierrichtlinien

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

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

Vorgehensweise bei der Bundesweiten Hausmüllanalyse 1983 – 1985 [4]

- Stichprobeneinheit (SPE) 1 m³
- Sortiergruppen: Pappe, Papier, Verpackungsverbund, Fe-Metall, NE-Metall, Glas, Kunststoff, Textilien, Mineralien, Materialverbund, Windeln, Problemmüll, Vegetabilien
- Klassierung des Sortierrests nach 4 Klassen

Merkblatt des Freistaats Thüringen (1993) [17]

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

Richtlinie des Landes Brandenburg (1998) [9]

- Stichprobeneinheit 1,1 m³
 - Stichprobenumfang mind. 20 SPE
 - Bei Unterteilung (Schichtung) mind. 6 SPE je Schichtungsmerkmal
 - Maschinelle Siebung bei 10 mm und 40 mm Lochdurchmesser
 - Sortierung nach Ober- und Untergruppen
 - Berücksichtigung von jahreszeitlichen Schwankungen durch vier Wiederholungsuntersuchungen
-

Bereits im Jahr 1964 gab der Verband Kommunaler Fuhrparks- und Stadtreinigungsbetriebe (heute: Verband Kommunale Abfallwirtschaft und Stadtreinigung e.V.) Merkblätter über die Vorgehensweise bei der Durchführung von Abfallsortierungen heraus [16]. Weitere Ausführungen zur Durchführung von Abfallsortierungen finden sich in der Bundesweiten Hausmüllanalyse [4] und in einem 1993 vom Freistaat Thüringen herausgegebenen Merkblatt [17]. Schließlich veröffentlichte 1998 nach intensiver Auswertung von Abfallsortieranalysen das Land Brandenburg eine Richtlinie [9], die vom Umweltbundesamt (UBA) empfohlen wird. Mit der in Brandenburg existierenden Richtlinie vergleichbar sind die Richtlinie des Freistaates Sachsen [18] und die Empfehlungen des Landes Nordrhein-Westfalen [19].

2.2 Untersuchung der Inhaltsstoffe

Mit einer veränderten Abfallzusammensetzung gehen auch Veränderungen der physikalisch-chemischen Eigenschaften und des Schadstoffgehalts von Restmüll einher. Insbesondere gesetzliche Verpflichtungen (z. B. Produktverantwortung laut Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz [20], Batterieverordnung [21], Chemikalien-Verbotsverordnung [22]) haben zum Ziel, eine langfristige Schadstoffentfrachtung des Restmülls zu erreichen. Andererseits bewirkt die fortlaufende Getrennthaltung von beispielsweise Verpackungsabfällen gemäß Verpackungsverordnung [1] masseanteilig eine Erhöhung langlebiger und damit häufig schadstoffhaltiger Bestandteile im Restmüll. Ebenso uneinheitlich ist die Veränderung von physikalisch-chemischen Parametern wie z. B. dem Heizwert: der Entzug von heizwertreichen Fraktionen (z. B. Leichtstoffverpackungen) durch Wertstoffsammelsysteme vermindert auch den Gesamtheizwert des Restmülls [23, 24].

Untersuchungen zu Schadstoffgehalten und Inhaltsstoffen von Restabfällen werden i. d. R. nur sehr vereinzelt durchgeführt. Aktuelle Veröffentlichungen sind – von Ausnahmen abgesehen [25, 26, 27, 28] – zum Großteil Literaturdatenvergleiche [29, 30, 31]. Hauptaugenmerk liegt dabei auf den Schwermetallen, da diese mit relativ einfachen Verfahren (z. B. Röntgenfluoreszenzanalyse; Königswasseraufschluss und Atomabsorptionsspektrometrie) auch in verhältnismäßig geringen Konzentrationen bestimmt und zudem für alle Umweltmedien in Form von Richt- und Grenzwerten beurteilt werden können – vgl. z. B. [15, 32]. Der Gehalt organischer Schadkomponenten wird dagegen routinemäßig seltener bestimmt, da die Probenaufbereitung weitaus aufwändiger ist und die zu bestimmenden Gehalte im Ultraspurenbereich liegen. Zudem sind aufgrund der Vielzahl organischer Verbindungen eine Auswahl und Vergleichbarkeit nur bei spezifischen Fragestellungen möglich. Die Auswahl der Stoffgruppen und die jeweils untersuchte Probenanzahl schränken oftmals die Vergleichbarkeit und die Signifikanz der Literaturwerte ein.

Aufgrund der Heterogenität auch von sortierten Haus- oder Restmüllfraktionen und fehlenden allgemein gültigen Definitionen von Stoffgruppen ist es schwierig, die Vorgehensweise in allgemein gültige Vorschriften zu fassen und so die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicher zu stellen. Entsprechend der TA Siedlungsabfall [15] ist für die Untersuchung von Abfällen nach der „Richtlinie zur Entnahme und Vorbereitung von Proben aus festen, schlammigen und flüssigen Abfällen“ (PN 2/78 K [33]) vorzugehen.

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

Im Jahr 2002 wurde die PN 2/78 K von der LAGA PN 98 „Grundregeln für die Entnahme von Proben aus festen und stichfesten Abfällen sowie abgelagerten Materialien“ [34] abgelöst. Aus Gründen der Praktikabilität bei der Probenahme wird dort an Stelle der Masse das Volumen zur Festlegung des Probenahmeumfangs herangezogen (vgl. Tab. 2).

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

Vorschrift	Anzahl	Mindestumfang
TASi [15]	1 Probe je angefangene 5 Mg bzw. 5 m ³	1.000 g bzw. 1.000 ml
PN 2/78 K [33]	5 Proben je 50 Mg	Bei Einzelproben: näherungsweise $G \text{ [kg]} = 0,06 \text{ [kg/mm]} \cdot d_p \text{ [mm]}$ mit $d_p \leq 30 \text{ mm}$: 1,8 kg mit $d_p \leq 120 \text{ mm}$: 7,2 kg bei Sammelproben: mit $d_p \leq 30 \text{ mm}$: 10 – 30 kg mit $d_p \leq 120 \text{ mm}$: 50 – 200 kg
PN 98 [34]	bis 30 m ³ : 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

Wie bei der Durchführung von Sortieranalysen sind bei der Bestimmung von physikalisch-chemischen Parametern entsprechend der Fragestellung grundsätzlich diverse Aufschluss- und Analysemethoden möglich (z. B. Betrachtung des Elutionsverhaltens oder des Absolutgehalts eines Parameters). Daneben können zur eigentlichen Bestimmung unterschiedliche Analysemethoden (z. B. für anorganische Schadstoffe: Königswasseraufschluss mit anschließender Atomabsorptionsspektrometrie oder Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma, Röntgenfluoreszenzanalytik aus der Feststoffprobe) Anwendung finden, was bei einem Ergebnisvergleich zu berücksichtigen ist [35].

2.3 Phasing-Out-Gebiete (EU Ziel-2-Programm Bayern)

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

- Ergänzung von Infrastrukturen
- Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit kleiner und mittelständischer Unternehmen
- Entwicklungsmaßnahmen im Bereich Forschung, Technologie, Information und Kompetenzentwicklung
 - Maßnahme 3.2 Bodenschutz, Altlasten und Abfallwirtschaft beinhaltet unter anderem die Vervollständigung der für die wirtschaftliche Aktivität notwendige Infrastruktur durch leistungsfähige und kostengünstige Abfallentsorgungssysteme
- Förderung des Tourismus
- Schaffung lebenswerter Stadtstrukturen und leistungsfähiger ländlicher Räume.

Dem Phasing-Out-Gebiet Bayerns sind 36 Landkreise aller sieben Regierungsbezirke ganz oder teilweise zugeordnet (mit Ausnahme einiger Gemeinden bzw. reiner Wohngebiete einiger Städte, siehe Fördergebietskarte [10, S. 10]).

3 Vorgehensweise

Die Durchführung der Abfallsortieranaysen beruht auf der „Richtlinie für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle im Land Brandenburg“ [9]. Abweichend von dieser Richtlinie wurden zur Erfassung jahreszeitlich bedingter Schwankungen pro untersuchter Gebietskörperschaft zwei fünftägige Restmüllsortierkampagnen anstatt der empfohlenen vier durchgeführt.

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

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

3.1 Planung und Durchführung der Restmüllsortierungen

3.1.1 Stichprobenplanung

Die Untersuchung des Restmülls aus Haushalten erfolgte anhand repräsentativer Stichproben. Der Stichprobenumfang der fünftägigen Sortierkampagnen umfasste nach [9] mindestens 20 Stichproben; dabei entsprach eine Stichprobeneinheit (SPE) jeweils dem Inhalt eines 1.100 l-Containers.

Wegen der inhomogenen Zusammensetzung des Restmülls wurde eine Schichtung vorgenommen, damit sich der Einfluss der Merkmale, wie beispielsweise die Gebietsstruktur, die Behältergröße und das Wertstofffassungssystem, in homogener zusammengesetzten SPE widerspiegelt. Das wichtigste Schichtungsmerkmal ist die Gebietsstruktur. Die festgelegten Gebietsstrukturen „ländlich“/„Stadttrand“, „städtisch“, „innerstädtisch“ (siehe Tab. 3) wurden zur statistischen Absicherung der Werte mit mind. sechs SPE beprobt.

Tab. 3: Definitionskriterien der Gebietsstrukturen

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

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

3.1.2 Sortierung

Jede gesammelte Stichprobeneinheit wurde separat mit Hilfe der Mobilen Abfallsortieranlage (siehe Abschnitt 3.1.3) mechanisch klassiert. Analog zur Brandenburg-Richtlinie [9] erfolgte die Abtrennung der Feinfraktion bei einem Siebschnitt von 10 mm ($d_p \leq 10$ mm) und der Mittelfraktion bei 40 mm ($10 < d_p \leq 40$ mm).

Der Siebüberlauf stellt die Grobfraktion ($d_p > 40$ mm) dar, die händisch in 47 Sortierfraktionen separiert wurde. Entsprechend Tab. 4 wurden die Sortierfraktionen zu 12 Obergruppen zusammengefasst. Die Fein- und Mittelfraktion gelten dabei als jeweils eigene Sortier- bzw. Obergruppe. Eine Besonderheit des Sortierkataloges ist die Unterteilung der Verpackungsabfälle in Abfälle mit und ohne Grünem Punkt. In praxi ist diese Unterscheidung beispielsweise durch zerkleinert vorliegende oder verschmutzte Verpackungen nicht immer eindeutig, wodurch es zu einer gewissen Über- bzw. Unterschätzung des realen DSD-Anteils kommen kann.

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

Tab. 4: Stoffgruppenkatalog mit Obergruppen und Beispielen

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

Tab. 4 (Forts.): Stoffgruppenkatalog mit Obergruppen und Beispielen

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

3.1.3 Mobile Abfallsortieranlage

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

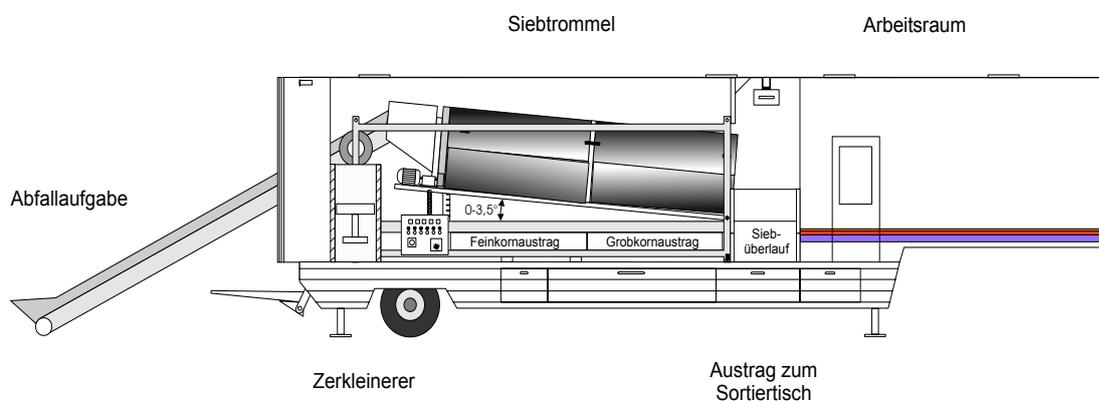


Abb. 1: Mobile Abfallsortieranlage, schematische Darstellung

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

Für die mechanische Klassierung wird der Restmüll über das Aufgabebänder der Siebtrommel, dem Kernstück der Anlage, zugeführt. In zwei Siebabschnitten werden die Fein- und Mittelfraktion abgetrennt und über Trichter und seitlich auslaufende Transportbänder in 240 l-Tonnen ausgetragen. Für die anschließende händische Sortierung gelangt der Siebüberlauf über einen Trichter und ein seitlich auslaufendes Transportband auf den Sortiertisch. Die Durchsatzleistung der Anlage beträgt bei den für die Sortierung festgelegten Geräteeinstellungen (Neigung und Umdrehungsgeschwindigkeit der Siebtrommel, Geschwindigkeit der Förderbänder) ca. 150 kg/h.

Ein weiterer Bestandteil der Sortieranlage ist ein Zweiwellenzerkleinerer (Abb. 1), der für die Vorzer-

kleinerung von Proben für die physikalisch-chemische Analytik benötigt wird. Im Arbeitsraum der Anlage befindet sich eine Werkbank, die für kleinere Reparaturarbeiten und als Arbeitsplatte zur Probenvorbereitung dient.

3.2 Auswertung und Hochrechnung

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

- *Füllgrad [Vol.-%]*

Verhältnis des gefüllten zum gesamten Behältervolumen.

Wird vor Ort in 10 % - Schritten geschätzt.

- *Raumgewicht [kg/l]*

Quotient aus der Masse einer SPE und dem Gesamtbehältervolumen.

- *Schüttgewicht [kg/l]*

Quotient aus der Masse einer SPE und dem gefüllten Behältervolumen.

Hohe Schüttgewichte weisen auf schwere Abfallbestandteile (z. B. Organik) oder auf Verdichtung des Restmülls hin, während geringe Schüttgewichte ein Anzeichen für sperrige oder voluminöse (meist Verpackungen) Abfälle sind.

- *Spezifisches bereitgestelltes Behältervolumen [l/(E · Wo)]*

Jedem Einwohner pro Woche zur Verfügung stehendes Abfallbehältervolumen.

Die Gebietskörperschaften legen i. d. R. in der Abfallwirtschaftssatzung ein Mindestbehältervolumen fest.

- *Spezifisches genutztes Behältervolumen [l/(E · Wo)]*

Produkt von Füllgrad und beprobter Behältergröße mit Bezug auf die angeschlossenen Einwohner und das Leerungsintervall.

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

- *Spezifisches Abfallaufkommen [kg/(E · Wo), kg/(E · a)]*

Angefallene Restmüllmasse je Einwohner und Zeitraum.

Ermöglicht den direkten Vergleich zwischen den Gebietskörperschaften.

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

- *Berechnung des einwohnerspezifischen Abfallaufkommens je Gebietsstruktur*

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

Verfahren 1

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

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

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

Verfahren 2

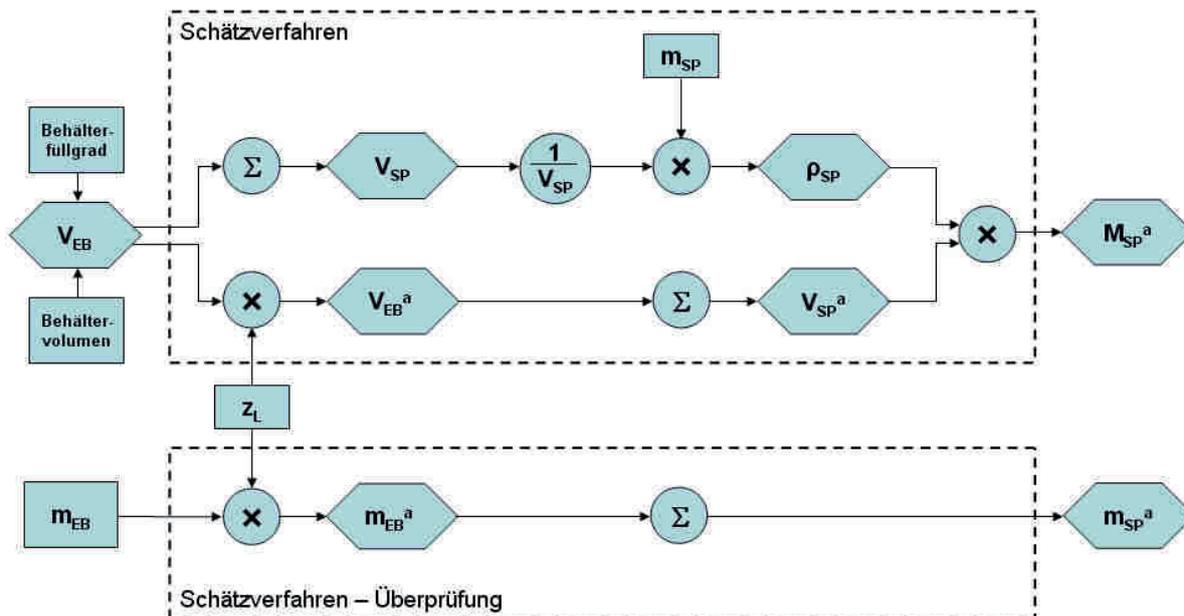
$$m_i^a = \frac{m_{SP}}{\sum V_{EB}} \cdot \frac{\sum (V_{EB} \cdot z_L)}{EW_i^{bepr}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{E} \cdot \text{a}} \right] \quad (2)^*$$

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

*) Symbole:

Indizes:

a	Jahr	a	pro Jahr
EW	Einwohner	bepr	beprobte Einwohner
m	Masse	EB	Einzelbehälter
\bar{t}	mittlere Standzeit	i	Schicht
V	Volumen	L	Leerung
z	Häufigkeit	SP	Stichprobe

**Erläuterung:**

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

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

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

- b) *Überprüfung des Schätzverfahrens:*

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

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

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

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

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

- *Hochrechnung auf die Gebietskörperschaft*

Die Hochrechnung der Ergebnisse auf die Gebietskörperschaft GK erfolgt durch eine gewichtete Mittelwertbildung anhand der Einwohnerzahl in den n_{GS} Gebietsstrukturen GS.

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

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

Die Ergebnisse werden einer statistischen Auswertung und Fehlerrechnung unterzogen.

*) Symbole:

Indizes:

a	Jahr	a	pro Jahr
EW	Einwohner	bepr	beprobte Einwohner
m	Masse	GK	Gebietskörperschaft
n	Anzahl	GS	Gebietsstruktur
		i	Schicht

3.3 Auswahl der Gebietskörperschaften

In Bayern gibt es 96 entsorgungspflichtige Gebietskörperschaften (71 Landkreise, 25 kreisfreie Städte), die sich auf 7 Regierungsbezirke verteilen. Das Phasing-Out-Gebiet umfasst, verteilt auf alle 7 Regierungsbezirke, ganz (mit Ausnahme einiger Gemeinden bzw. reiner Wohngebiete einiger Städte) oder teilweise 36 Gebietskörperschaften (alles Landkreise).

Im Rahmen des Projekts wurden aus den 36 Landkreisen des Phasing-Out-Gebietes 6 Gebietskörperschaften aus 5 Regierungsbezirken für die Durchführung der Restmüllsortierungen ausgewählt.

Bei der Auswahl der Gebietskörperschaften wurden entsprechend der Bayerischen Abfallbilanz [5] folgende Kriterien berücksichtigt, die die spezifische Restmüllmasse und -zusammensetzung beeinflussen:

- Einwohnerdichte
- Wertstofffassungssysteme für Bioabfall, Papier, Pappe, Kartonagen, Leichtverpackungen
- Gebührenerreize zur Reduzierung des Abfallaufkommens durch gewichts- oder volumenbezogene Leistungsgebührenanteile

Die ausgewählten Gebietskörperschaften sollen dabei die Gegebenheiten im Phasing-Out-Gebiet Bayerns repräsentativ widerspiegeln.

Ein weiteres Kriterium war die Erweiterung der Gesamtstichprobe der in den Jahren 1998 – 2003 [8] und 2004/05 [36] vom LfU durchgeführten 18 Analysen in 15 Gebietskörperschaften; sieben zählen davon zum Phasing-Out-Gebiet. Eine der bereits früher untersuchten sieben Gebietskörperschaften des Phasing-Out-Gebietes wurde in der aktuellen Untersuchung nochmals beprobt, da in der Zwischenzeit eine Systemumstellung stattgefunden hatte.

Einwohnerdichte

Das Abfallaufkommen und die Restmüllzusammensetzung sind stark vom Konsum- und Trennverhalten der Bürger abhängig, das vor allem durch die Größe des Haushalts beeinflusst wird. Je höher die Besiedlungsdichte ist, desto größer ist die Anzahl der Single-Haushalte, die oft ein höheres spezifisches Abfallaufkommen und ein schlechteres Trennverhalten begünstigen.

Die Bayerische Abfallbilanz 2005 [6, 37] unterteilt zur Beschreibung der abfallwirtschaftlichen Situation die entsorgungspflichtigen Gebietskörperschaften (GK) in Einwohner-Strukturklassen; in Abhängigkeit von der Einwohnerstruktur wird zwischen ländlichen („l“, $\leq 125 \text{ E/km}^2$), ländlich dichten („ld“, $> 125 - 500 \text{ E/km}^2$), städtischen („s“, $> 500 - 1.750 \text{ E/km}^2$) und großstädtischen („gs“, $> 1.750 \text{ E/km}^2$) Gebietsstrukturen unterschieden. Die Tab. 5 zeigt die Verteilung der Einwohnerstrukturklassen für Bayern, die Phasing-Out-Gebiete Bayerns sowie für die ausgewählten Gebietskörperschaften.

Tab. 5: Strukturelle Aufteilung nach der Bayerischen Abfallbilanz 2005 [37] für die Gebietskörperschaften (GK) Bayerns, der Phasing-Out-Gebiete und der für das Projekt ausgewählten 6 Gebietskörperschaften

Strukturklasse	Bayern			Phasing-Out-Gebiet					
	Anzahl GK	Einwohnerzahl	Anteil [%]	zugeordneten GK ^{*)} insgesamt			ausgewählte GK ^{*)}		
				Anzahl GK	Einwohnerzahl	Anteil [%]	Anzahl GK	Einwohnerzahl	Anteil [%]
l	39	4.313.201	35	25	3.876.393	73	3	358.531	50
ld	36	4.851.178	39	11	1.428.947	27	3	355.165	50
s	17	1.165.809	9	0	0	0	0	0	0
gs	4	2.126.770	17	0	0	0	0	0	0
gesamt	96	12.456.958	100	36	5.305.340	100	6	713.696	100

^{*)} jeweils Einwohnerzahlen der gesamten GK; davon zählen einige GK (wie z. B. die Landkreise Cham, Kelheim, Straubing-Bogen, Neustadt a. d. Waldnaab) nur zu einem geringen Teil zum Phasing-Out-Gebiet [10]

Die Stichproben des Restmülls in den für das Projekt ausgewählten Gebietskörperschaften repräsentieren den Restmüll von nahezu 0,7 Mio. Einwohnern (entspricht 13,5 % der Bevölkerung der Phasing-Out-Gebiete Bayerns).

Wertstofffassungssysteme für Bioabfall, Papier, Pappe, Kartonagen, Leichtverpackungen

Bei der Auswahl der Gebietskörperschaften wurden die vielfältigen Möglichkeiten der Wertstofffassung berücksichtigt (Tab. 6).

Tab. 6: Übersicht über die Wertstofffassung im Holsystem im Vergleich: Bayern, Phasing-Out-Gebiete Bayerns, sowie für das Projekt ausgewählte 6 Gebietskörperschaften, Daten aus [37]

Holsystem	Bayern		Phasing-Out-Gebiet			
	Anzahl Körperschaften	angeschlossene Einwohner [%]	Anzahl Körperschaften	angeschlossene Einwohner [%]	Anzahl Körperschaften	angeschlossene Einwohner [%]
Biotonne	78	78	28	72	5	55
Papiertonne	60	64	26	71	3	50
Gelbe Tonne/ Gelber Sack	64	56	19	41	3	53
Gesamtanzahl Körperschaften	96	–	36	–	6	–

^{*)} jeweils Einwohnerzahlen der gesamten GK; davon zählen einige GK (wie z. B. die Landkreise Cham, Kelheim, Straubing-Bogen, Neustadt a. d. Waldnaab) nur zu einem geringen Teil zum Phasing-Out-Gebiet [10]

Mit den Landkreisen L15 bis L20 – alphanumerische Bezeichnung der Gebietskörperschaften in Weiterführung vormaliger LfU-Sortieranaysen [8] – (vgl. Tab. 7 und 8) wurden Gebietskörperschaften ausgewählt, die weitestgehend sowohl die Einwohner-Strukturklassen als auch die vielfältigen Möglichkeiten der im Phasing-Out-Gebiet Bayerns etablierten Wertstofffassung (Hol-, Bringsystem) repräsentieren.

Grundsätzlich unterteilt man die Wertstoffsammlung in Bring- und Holsysteme. Die Holsysteme der untersuchten Körperschaften sind in Tab. 7 dargestellt. Beispiele für Bringsysteme sind u. a. die Abgabe von unterschiedlichen Wertstofffraktionen (Behälterglas, Papier, Pappe, Kartonagen, Leichtverpackungen, Metalle, Grüngut ect.) am Wertstoffhof und/oder an frei zugänglichen Depotcontainern. Die in Tab. 8 dargestellte Dichte der Standorte zur Wertstoffabgabe variiert zwischen den einzelnen Gebietskörperschaften z. T. erheblich.

Tab. 7: Untersuchte Gebietskörperschaften und jeweilige Wertstofffassung im Holsystem

Untersuchungsgebiete	Biotonne	Papiertonne	Gelber Sack/ Gelbe Tonne	1. Kampagne	2. Kampagne
L15	(X) ^{*)}	X	X	3/06 (Winter)	6/06 (Sommer)
L16	X	–	–	3/06 (Winter)	6/06 (Sommer)
L17	(X) ^{**)}	–	–	4/06 (Winter)	7/06 (Sommer)
L18	X	X	–	10/06 (Sommer)	11/06 (Winter)
L19	–	X	X	2/07 (Winter)	6/07 (Sommer)
L20	X	–	X	3/07 (Winter)	7/07 (Sommer)

^{*)} nur in einzelnen Gemeinden (entspricht etwa 10 % der Einwohner)

^{**)} nur in einzelnen Gemeinden (entspricht etwa 30 % der Einwohner)

Tab. 8: Untersuchte Gebietskörperschaften und jeweilige Wertstofffassung im Bringsystem, Daten aus [37]

Untersuchungs- gebiete	Bezug	Wertstoff- höfe	Behälter- glas	Container-Standorte		
				Altpapier, Kartonagen	DSD – Gemischte Verpackungen	Altm Metall/ Grobschrott
L15	pro 100 km ²	2,9	16,5	1,0	1,0	2,9
	pro 10.000 E	3,1	17,6	1,1	1,1	3,1
L16	pro 100 km ²	3,9	21,1	3,9	–	3,9
	pro 10.000 E	2,4	12,7	2,4	–	2,4
L17	pro 100 km ²	6,8	14,8	14,8	14,8	7,1
	pro 10.000 E	4,9	10,7	10,7	10,7	5,1
L18	pro 100 km ²	3,1	31,7	1,1	–	1,0
	pro 10.000 E	3,9	40,2	1,4	–	1,3
L19	pro 100 km ²	2,8	21,5	0,8	–	2,8
	pro 10.000 E	2,4	18,9	0,7	–	2,4
L20	pro 100 km ²	0,2	19,6	19,4	0,1	0,2
	pro 10.000 E	0,2	14,2	14,0	0,1	0,2

Unter der Annahme, dass mit einem sinkenden Systemkomfort auch eine sinkende Erfassungsmenge einhergeht, beeinflusst sowohl die Wertstofffassung im bequemeren Holsystem als auch der Weg zum nächstgelegenen Standort der Wertstofffassung im Bringsystem die Restmüllzusammensetzung und das Abfallaufkommen.

Gebührenanreize zur Reduzierung des Abfallaufkommens durch gewichts- oder volumenbezogene Leistungsgebührenanteile

Da die Umsetzung abfallwirtschaftlicher Fragestellungen und deren Festlegung in Abfallwirtschaftsentscheidungen entsprechend [3, 38] den entsorgungspflichtigen Gemeinden und Körperschaften übertragen ist, unterscheiden sich die einzelnen Gebietskörperschaften sowohl hinsichtlich Wertstofffassung- als auch Gebührensystemen (Tab. 9). Dabei können vor allem gewichts- oder volumenbezogene Leistungsgebühren das Verhalten der Bürger bei der Entsorgung des im Haushalt anfallenden Restmülls beeinflussen. Diese Unterschiede sind bei der Betrachtung der im Abschnitt 4.1 dargestellten Untersuchungsergebnisse zur Restmüllmasse und -zusammensetzung der ausgewählten Gebietsstrukturen zu berücksichtigen.

Tab. 9: Gebührensystem der untersuchten Gebietskörperschaften

Unter- suchungs- gebiete	Sammelsystem	Grundgebühr, abhängig von:	Leistungsgebühr, abhängig von:
L15	Identsystem	Zahl der Grundstücksbewohner	Zahl der Leerungen, Behältergröße
L16	Regelabfuhr	Behältergröße, Abfuhrhäufigkeit	–
L17	Identsystem mit Verwiegung	Behältergröße	Zahl der Leerungen, Restmüllmasse
L18	Identsystem	Behältergröße	Zahl der Leerungen
L19	Regelabfuhr	Zahl der Grundstücksbewohner	Behältergröße
L20	Identsystem mit Verwiegung	Behältergröße, Abfuhrhäufigkeit, Zahl der Grundstücksbewohner	Zahl der Leerungen, Restmüllmasse

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 12 Restmüllsortierkampagnen in den 6 ausgewählten Gebietskörperschaften Proben für die Analytik gezogen. Unter Berücksichtigung stofflicher Ähnlichkeiten wurden ausgehend von den 49 Sortierfraktionen 18 Analysestoffgruppen gemäß Tab. 10 festgelegt. Die Analysestoffgruppen setzen sich zum Teil aus mehreren Sortierfraktionen mit „stofflichen“ Ähnlichkeiten zusammen (siehe zweite Tabellenspalte). Üblicherweise wurden bei einer Sortierkampagne nicht alle Analysestoffgruppen beprobt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass zwischen physikalisch-chemischer Zusammensetzung einer Analysestoffgruppe und dem beprobten Gebiet kein direkter funktionaler Zusammenhang besteht. Im Durchschnitt wurden je Sortierkampagne sechs bis acht Analysestoffgruppen beprobt. Entsprechend den Anteilen der Analysestoffgruppen am Restmüll wurden ca. 96 Mass.-% des Restmülls beprobt. Die verbleibenden 4 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 repräsentative Stichprobe (z. B. Fahrzeugteile) oder eingeschränkten Aufbereitungstechniken für die physikalisch-chemische Analyse (z. B. Metalle) [25, 39].

Tab. 10: Zusammenfassung der Sortierfraktionen zu Analysestoffgruppen (Auflistung in alphabetischer Reihenfolge) und Stichprobenzahl

Analysestoffgruppe	Abfallsortierfraktion	Anzahl Proben
Elektronikschrott	Elektronikschrott	4
Feinfraktion	Feinfraktion	7
Glas	Behälterglas mit / ohne GP	4
Holz	Holzverpackungen mit / ohne GP	4
	Sonstiges Holz	4
Hygieneprodukte	Windeln	4
	Hygienepapiere	4
Inertes	Inertes	4
	Inert-Verpackungen	4
Kunststoffverpackung inkl. Folien	Kunststoffverpackungen mit / ohne GP	4
	Kunststofffolien (Verpackungen mit / ohne GP)	4
	Folien (keine Verpackungen)	4
Leder, Gummi, Kork	Leder	4
	Gummi	4
	Kork	4
Mittelfraktion	Mittelfraktion	7
Organik	Küchenabfälle	4
	Gartenabfälle	4
	Sonstige organische Stoffe	4
Papier, Pappe, Kartonagen	PPK-Verpackungen mit / ohne GP	4
	PPK-Druckerzeugnisse mit / ohne GP	4
	Sonstige PPK	4
Renovierungsabfälle	Renovierungsabfälle	5
Schuhe	Schuhe	4
Sonstige Kunststoffe	Sonstige Kunststoffe	4
Sonstige Verbunde	Sonstige Verbunde	4
Staubsaugerbeutel	Staubsaugerbeutel	4
Textilien	Bekleidungstextilien	4
	Sonstige Textilien	4
Verbundverpackungen	Verbundverpackungen mit / ohne GP	4
Summe		79

Über den gesamten Projektzeitraum wurden 79 Einzelstichproben für die Analytik gezogen. Für die Auswertung standen je Analysestoffgruppe mindestens 4 Einzelwerte zur Verfügung.

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

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“ (\equiv Analysestoffgruppe) unter erhöhtem personellen und zeitlichen Mehraufwand gelöst werden [40].

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 Analysestoffgruppe eine Teilprobe von bis zu 7 l gezogen und in verschließbaren Kunststoffsäcken aufbewahrt. Die wöchentliche Mischprobe einer Analysestoffgruppe umfasste ein Volumen von maximal 120 l. Bei Stoffgruppen, die im Mittel mit nur geringen Anteilen im Restmüll zu finden sind, in der einzelnen SPE jedoch in vergleichsweise großen Massen vorhanden waren, wurde die Stoffgruppe i. d. R. nicht oder nur anteilig beprobt, um eine zu hohe Gewichtung zu vermeiden.

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

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

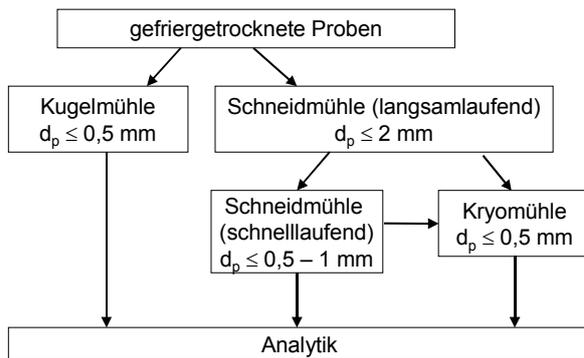


Abb. 3: Vorgehensweise bei der Probenzerkleinerung

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

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

Soweit das rheologische Verhalten der Stoffe es zuließ, konnten die Proben anschließend mit einer schnellaufenden 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 Analysekorngöße $d_p \leq 0,5$ mm gebracht.

Problematisch bei der Zerkleinerung ist neben der Erwärmung des Mahlgutes der Verschleiß der Mahlwerkzeuge [41, 42, 43]. Der Abrieb an den Mahlwerkzeugen sowie die dadurch eventuelle Beeinflussung der Untersuchungsergebnisse wurde im Rahmen des Vorhabens nicht untersucht. Bei der Interpretation der Analysedaten sind diese Aspekte jedoch zu berücksichtigen.

3.4.3 Analysemethoden

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

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

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

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

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

Physikalisch-chemische Summenparameter

Der *Wassergehalt* der Analyseproben wurde vor der Zerkleinerung auf Analysekorngöße nach DIN 38 414 – 22 mittels Gefriertrocknung ermittelt [44]. 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 [45]. Der Glühverlust bezeichnet dabei den beim Glühen als Gas entweichenden Massenanteil einer Stoffprobe.

Entsprechend DIN 51 900 wurde der *Heizwert* der gezogenen Proben ermittelt [46]. Mit Hilfe eines Kalorimeters wird zunächst der Brennwert der Probe bestimmt. Der Heizwert errechnet sich aus dem Brennwert, der berechneten Kondensationswärme (aus dem Elementgehalt von Wasserstoff) und den berechneten Lösungswärmen der gebildeten Schwefel- und Salpetersäure (aus den Elementgehalten von Schwefel und Stickstoff).

Anorganische Parameter

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

Kohlenstoff und *Schwefel* wurden mittels eines Kohlenstoff-/Schwefel-Analysators bestimmt. Das eingesetzte Analysesystem ermöglicht die Simultanbestimmung von Schwefel und 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 Kohlenstoffdioxid ausgetrieben und ebenfalls mittels Infrarotabsorption quantifiziert. Die Differenz zwischen Gesamt- und anorganisch gebundenem Kohlenstoff ergibt den organisch gebundenen Kohlenstoff (TOC).

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

dieser Methode mit einem Sequenz-Röntgenspektrometer untersucht.

Für die *Quecksilberbestimmung* gemäß DIN 38406 [47] wurde die Kaltdampf-Atomabsorptionsspektroskopie herangezogen. Nach Aufschluss der Proben mit Königswasser entsprechend DIN 38 414 – 7 [48] erfolgte die Quantifizierung mit einem Quecksilber-Analysator.

Organische Parameter

Aus der Substanzklasse der *polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe* (PAK) wurden die 16 Einzelverbindungen nach EPA [49] 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 [32, 50].

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

3.4.4 Auswertung

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

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

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

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

mit

$$\begin{aligned} \Phi_i &: \text{Fracht der Substanz } i \text{ in Analysestoffgruppe [M/M}^{\text{OS}}\text{]} \\ C_i &: \text{Konzentration der Substanz } i \text{ in Analysestoffgruppe [M/M}^{\text{TS}}\text{]} \\ \theta_i &: \text{Wassergehalt der Analysestoffgruppe [M}^{\text{Wasser}}\text{/M}^{\text{OS}}\text{]} \end{aligned}$$

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

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

mit

$$\begin{aligned} \Phi_i^{\text{tot}} &: \text{Gesamtfracht der Substanz } i \text{ im Restmüll [M/M}^{\text{OS}}_{\text{Restmüll}}\text{]} \\ n &: \text{Anzahl der Analysestoffgruppen[---]} \\ f_i &: \text{Masseanteil der Analysestoffgruppe am Restmüll [M}_{\text{Stoffgruppe}}\text{/M}^{\text{OS}}_{\text{Restmüll}}\text{]} \end{aligned}$$

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Datenbestand

Bei dem Vorhaben wurden in sechs verschiedenen Landkreisen in Phasing-Out-Gebieten der Regierungsbezirke Unterfranken, Oberfranken, Mittelfranken, Schwaben und Oberbayern jeweils 2 Wochen lang Sortierungen durchgeführt. Dabei wurde der Restmüll von 10.088 Einwohnern beprobt. Der gesammelte Restmüll beläuft sich auf 40,2 Mg bzw. 241,7 m³ (Summe der aus dem Füllgrad abgeleiteten Restmüllvolumina der Einzelbehälter V_{EB} , vgl. Abschnitt 3.2).

4.1.1 Restmüllaufkommen

In Abb. 4 ist das in den Landkreisen L15 bis L20 in den Phasing-Out-Gebieten ermittelte spezifische Restmüllaufkommen unterteilt in organisches Potenzial, restliches verwertbares Potenzial und nicht verwertbaren Rest im Vergleich zu den in [8, 36] untersuchten Gebietskörperschaften L1 bis L13 (Landkreise) und S1 bis S5 (Städte) dargestellt; im Landkreis L14 wurde nur eine Sortierkampagne durchgeführt, wodurch die Datenbasis nicht vergleichbar ist und auf eine Ergebnisdarstellung verzichtet wird. Das restliche verwertbare Potenzial besteht aus Verpackungen und sonstigen Wertstoffen wie Kunststoffen, Metall, Holz, Textilien und Kork. Das organische Potenzial setzt sich aus den Stoffgruppen Garten- und Küchenabfall zusammen, wobei die Stoffgruppe Küchenabfälle sowohl Abfälle pflanzlichen als auch tierischen Ursprungs umfasst. Die angegebenen Wertstoffmassen stellen eine Obergrenze des tatsächlich verwertbaren Materials dar, da eine trennscharfe Unterscheidung zwischen verwertbarem und nicht verwertbarem Wertstoff (z. B. Nutzung einer Einkaufstasche als Restmülltüte, verschmutzte Textilien und Papiere) kaum möglich ist.

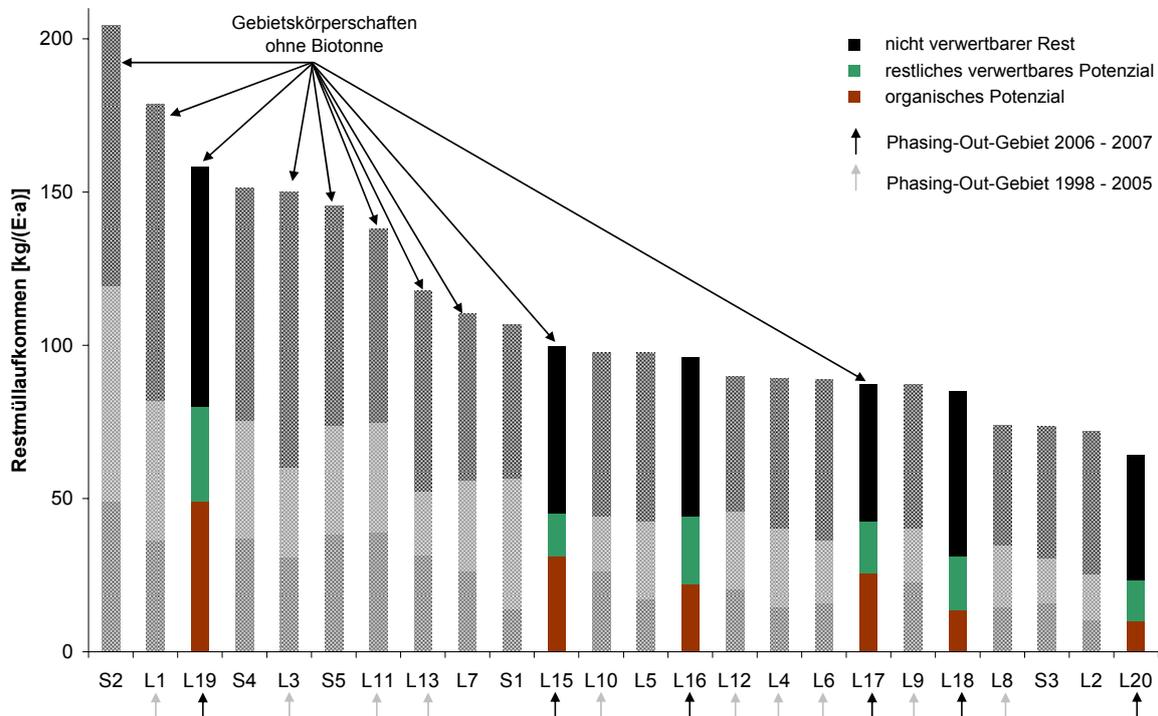


Abb. 4: Restmüllaufkommen in den untersuchten Gebietskörperschaften unterteilt in nicht verwertbaren Rest, organisches und restliches maximal verwertbares Potenzial im Vergleich, zu den in den Jahren 1998 – 2003 [8] und 2004/05 [36] untersuchten Gebietskörperschaften

Das spezifische Restmüllaufkommen betrug in den untersuchten Phasing-Out-Gebieten zwischen 64,0 kg/(E·a) und 158,2 kg/(E·a). Das mittlere spezifische Restmüllaufkommen liegt mit 98,3 kg/(E·a) deutlich unter dem in [8] ermittelten Wert von 112,5 kg/(E·a). Diese Differenz kann zum Teil in zeitlichen Veränderungen des Restmüllaufkommens begründet sein. Neben dem Zeitraum der Durchführung unterscheiden sich die Untersuchungen auch hinsichtlich der Abfallwirtschaftssysteme. Während von 1998 bis 2003 ausschließlich Gebietskörperschaften mit Regelabfuhr untersucht wurden, verfügten in den aktuellen Restmüllanalysen 4 von 6 Gebietskörperschaften über Abfallwirtschaftssysteme mit Bedarfsabfuhr, dessen quantitativer Einfluss auf das Restmüllaufkommen in Tab. 11 dargestellt ist.

Tab. 11: Spezifisches Restmüllaufkommen in Abhängigkeit vom Gebührensystem [kg/(E·a)]

Sammelsystem	Anzahl Gebietskörperschaften	Mittelwert	Schwankungsbreite	
Regelabfuhr	2	127,1	96,0	158,2
Identsystem	2	92,3	85,0	99,5
Identsystem mit Verwiegung	2	75,6	64,0	87,3
gesamt	6	98,3	64,0	158,2

Das über die Restmülltonne entsorgte mittlere spezifische Abfallaufkommen ist in Gebietskörperschaften mit Bedarfsabfuhr geringer als bei solchen mit Regelabfuhr. Die z. T. hohe Schwankungsbreite resultiert aus weiteren Unterschieden der in den Gebietskörperschaften etablierten Abfallwirtschaftssysteme. Der Einfluss des Erfassungssystems für Bioabfälle der aufgrund des hohen Wassergehalts schweren Abfallfraktion Organik im Restmüll zeigt Tab. 12.

Tab. 12: Spezifisches Restmüllaufkommen in Abhängigkeit vom Bioabfallerfassungssystem [kg/(E·a)]

Sammelsystem	Anzahl Gebietskörperschaften	Mittelwert	Schwankungsbreite	
mit Biotonne	3	81,7	64,0	96,0
ohne Biotonne	3	115,0	87,3	158,2

Die Daten belegen, dass neben dem Gebührensystem die Art der Wertstofffassung einen signifikanten Einfluss auf das über die Restmülltonne entsorgte spezifische Abfallaufkommen ausübt. Da die Abfallwirtschaftssysteme der in die Untersuchung einbezogenen Gebietskörperschaften sehr unterschiedlich gestaltet sind (siehe Abschnitt 3.3), ist der Einfluss eines einzelnen Kriteriums auf das Restabfallaufkommen, wie des Erfassungssystems für Bioabfälle, nicht getrennt zu ermitteln.

Als unabhängiger Vergleichsdatensatz steht die jährlich veröffentlichte Abfallbilanz für Hausmüll in Bayern [6] zur Verfügung. Für die von 1998 bis 2003 [8] ermittelten Werte wurde der Wert des Jahres 2001 von 149,2 kg/(E·a) [51, S. 45] herangezogen, während für die aktuelle Untersuchung der Wert des Jahres 2005 mit 146,7 kg/(E·a) [6, S. 46] als Vergleichswert verwendet wird. Das in der Abfallbilanz genannte Restmüllaufkommen enthält sowohl den Hausmüll- als auch den Geschäftsmüllanteil, der laut [52, 53, 54] zwischen 15 und 45 Mass.-% liegt und je nach Erfassungssystem erheblich variieren kann. In Tab. 13 sind die spezifischen Restmüllmassen der untersuchten Gebietskörperschaften im Vergleich zu den jeweiligen Abweichungen zur Abfallbilanz 2005 dargestellt. Die Unterschiede im ein- bis zweistelligen Prozentbereich sind in dem bei der Untersuchung nicht berücksichtigten Geschäftsmüllanteil und dem für Restmülluntersuchungen üblichen Schwankungsbereich begründet.

Die Abweichungen von den Daten der Bayerischen Abfallbilanz sind bei Identsystemen mit Verwiegung am geringsten. Dies kann z. B. von einem niedrigeren Geschäftsmüllanteil durch besseres Trennverhalten der Gewerbetreibenden und einem geringeren Anteil des hausmüllähnlichem Gewerbeabfalls, der gemeinsam mit dem Hausmüll gesammelt und entsorgt wird, her rühren. Des Weiteren

Tab. 13: Abweichung des spezifischen Restmüllaufkommens gegenüber der Bayerischen Abfallbilanz 2005 [37]

Gebietskörperschaft	Abfallwirtschaftliches System	Restmüllaufkommen [kg/(E·a)]	Abweichung zur Abfallbilanz 2005 [%]
L18	Identsystem	85,01	-25,6
L19	Regelabfuhr	158,2	-23,9
L15	Identsystem	99,5	-18,4
L16	Regelabfuhr	96,1	-18,2
L20	Identsystem mit Verwiegung	64,0	-11,8
L17	Identsystem mit Verwiegung	87,3	-8,3

ist zu berücksichtigen, dass jede Restmüllanalyse eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der Probenahmen (Sommer-, Winteranalyse) darstellt. In Gebietskörperschaften mit Identsystem ergibt sich daraus das Problem, dass Restabfallbehälter von Haushaltungen mit einem höherem Abfallaufkommen, die öfter zur Leerung bereitgestellt werden, z. T. überproportional beprobt werden.

4.1.2 Restmüllzusammensetzung

Die aus den Ergebnissen der untersuchten Gebietskörperschaften ermittelte durchschnittliche Restmüllzusammensetzung nach Obergruppen ist in Abb. 5 dargestellt. Die Hauptmasse mit insgesamt 69 Mass.-% bilden die Obergruppen Fein-, Mittelfraktion, Organik und Hygieneprodukte.

Die in Abb. 6 dargestellte Zusammensetzung der Mittelfraktion wurde durch Sortierung von Stichproben nach Obergruppen ermittelt. Sie besteht, v. a. in Gebietskörperschaften ohne Biotonne, zum Großteil aus organischen Materialien (57 – 82 Mass.-%). Eine Sortierung der Feinfraktion ist wegen des erheblichen Aufwands (Partikelgröße meist < 10 mm) nicht möglich; sie setzt sich vor allem aus Straßenkehricht, Erde, Katzen- und Kleintierstreu zusammen.

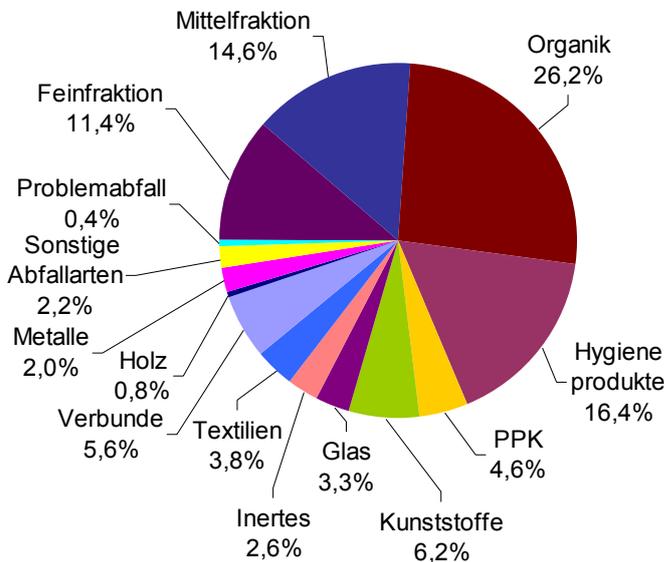


Abb. 5: Restmüllzusammensetzung nach Obergruppen in Mass.-%

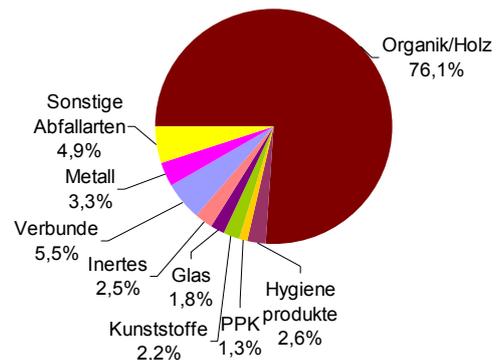


Abb. 6: Zusammensetzung der Mittelfraktion in Mass.-%

In Tab. 14 sind die einzelnen Stoffgruppen detailliert aufgelistet. Die Obergruppe Hygieneprodukte wird mit 65 Mass.-% von der Stoffgruppe Windeln dominiert. Papier, Pappe, Kartonagen (PPK) werden hauptsächlich (49 Mass.-%) durch Druckerzeugnisse bestimmt. Die Obergruppe Verbunde besteht zu ca. zwei Dritteln aus den Stoffgruppen Sonstige Verbunde (36 Mass.-%) und Verbundverpackungen (insgesamt 26,2 Mass.-%).

Tab. 14: Spezifische Restmüllzusammensetzung nach sortierten Stoffgruppen [kg/(E-a)]

Obergruppe	Stoffgruppe	Kat. ^{*)}	spezifische Restmüllmasse
Feinfraktion	Feinfraktion	R	11,3
Mittelfraktion	Mittelfraktion	R	14,3
Organik	Küchenabfälle	W	23,1
	Gartenabfälle	W	2,2
	Tierkadaver	R	0,2
	Sonstige organische Stoffe	R	0,3
Hygieneprodukte	Windeln	R	10,4
	Hygienepapiere	R	5,7
PPK	PPK-Verpackungen	V	1,2
	PPK-Verpackungen (DSD)	V	0,8
	PPK-Druckerzeugnisse	W	2,2
	Sonstige PPK	R	0,3
Kunststoffe	Kunststoffverpackungen	V	0,6
	Kunststoffverpackungen (DSD)	V	2,0
	Kunststofffolien	V	0,4
	Kunststofffolien (DSD)	V	0,5
	Sonstige Folien	W	1,3
	Styropor	W	0,1
	Sonstige Kunststoffartikel	W	1,2
Glas	Behälterglas	V	0,6
	Behälterglas (DSD)	V	1,8
	Sonstiges Glas	R	0,8
Metalle	Fe-Metallverpackungen	V	0,1
	Fe-Metallverpackungen (DSD)	V	0,7
	NE-Metallverpackungen	V	0,3
	NE-Metallverpackungen (DSD)	V	0,2
	Sonstige Metallteile	W	0,6
Inertes	Inertes außer Glas	R	2,5
	Inertes Verpackungen	R	« 0,1
Textilien	Bekleidungstextilien	W	1,4
	Sonstige Textilien	R	1,5
	Schuhe	W	0,9
Verbunde	Verbundverpackungen	V	0,3
	Verbundverpackungen (DSD)	V	1,2
	Elektronikschrott	W	0,7
	Renovierungsabfälle	R	0,8
	Fahrzeugteile	R	0,1
	Staubsaugerbeutel	R	0,5
	Sonstige Verbunde	R	2,0

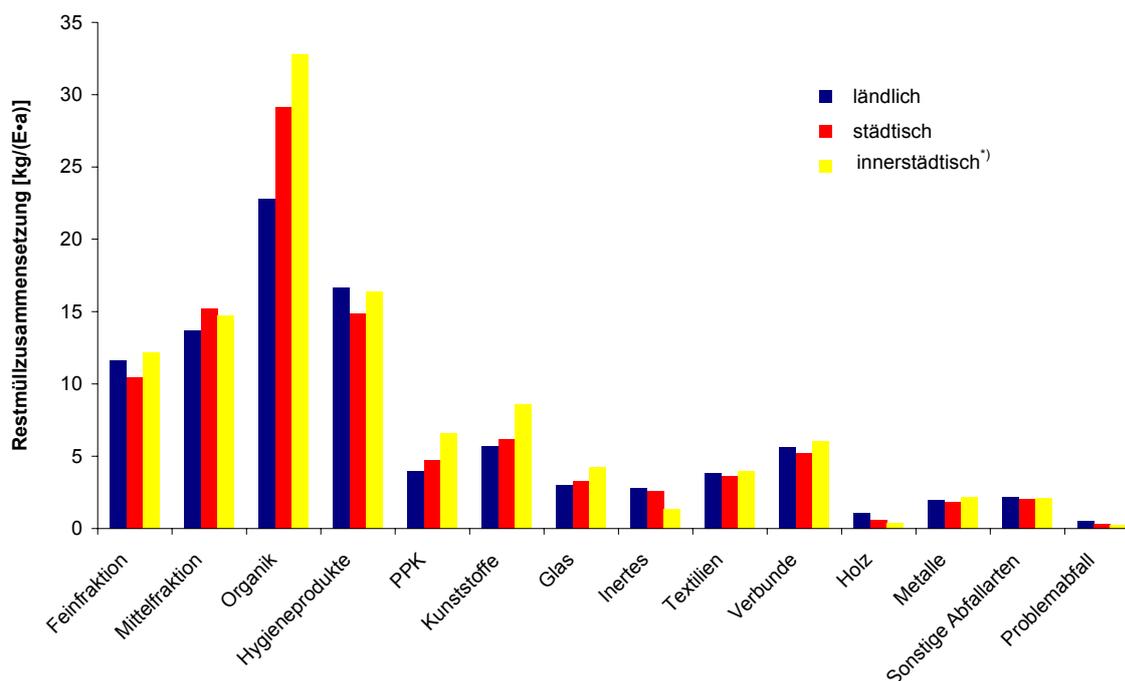
^{*)} Verwendete Kategorien der Abfälle: R Restmüll, W Wertstoff, V Verpackungen (Wertstoffe), P Problemabfall

Tab. 14 (Forts.): Spezifische Restmüllzusammensetzung nach sortierten Stoffgruppen [kg/(E·a)]

Obergruppe	Stoffgruppe	Kat.	spezifische Restmüllmasse
Holz	Holzverpackungen	V	« 0,1
	Holzverpackungen (DSD)	V	« 0,1
	Sonstiges Holz	R	0,8
Sonstige Abfallarten	Leder	R	0,1
	Gummi	R	0,2
	Kork	W	« 0,1
	Sonstige Stoffe	R	1,8
	Sonderabfall außer Batt/Med	P	0,2
Problemabfall	Batterien	P	0,1
	Medikamente	R	0,1
	Summe Restmüll		98,3

^{*)} Verwendete Kategorien der Abfälle: R Restmüll, W Wertstoff, V Verpackungen (Wertstoffe), P Problemabfall

Wie im Abschnitt 3.1.1 erläutert, wurde für die einzelnen Sortierungen eine Schichtung des Untersuchungsgebiets entsprechend dem Sichtungsmerkmal Gebietsstruktur vorgenommen, was letztlich die Wohnbebauungsdichte widerspiegelt. In Abb. 7 sind die mittleren spezifischen Restabfallmassen der Obergruppen in Abhängigkeit von den Gebietsstrukturen ländlich, städtisch, innerstädtisch dargestellt.



^{*)} Mittelwert aus 4 Gebietskörperschaften, da L19 und L20 keine innerstädtischen Gebietsstrukturen entsprechend Definition in Tab. 3 aufweisen

Abb. 7: Spezifische Restmüllzusammensetzung nach Sortier-Obergruppen in Abhängigkeit der verschiedenen Gebietsstrukturen in kg/(E·a)

Insgesamt errechnet sich für das ländliche Gebiet ein Restmüllaufkommen von 95,3 kg/(E·a), für das städtische von 100,0 kg/(E·a) und für das innerstädtische von 111,6 kg/(E·a), wobei der Mittelwert der innerstädtischen Gebietsstruktur die Ergebnisse der Gebietskörperschaften L19 und L20 nicht berücksichtigt; diese besitzen entsprechend der Definition in Tab. 3 keine innerstädtische Struktur. Betrachtet

man die einzelnen Obergruppen, ist das spezifische Abfallaufkommen an Hygieneprodukten und Internem im ländlichen Bereich am höchsten, während insbesondere das Organikaufkommen sowie der Papier-, Kunststoff- und Glasanteil mit der Bebauungsdichte zunehmen.

Maximales Wertstoffpotenzial

Das maximal nutzbare Wertstoffpotenzial (Obergrenze des tatsächlich verwertbaren Materials) im Restmüll der untersuchten Gebietskörperschaften in Phasing-Out-Gebieten Bayerns beträgt 44,4 kg/(E·a) bzw. 45,1 Mass.-%, wobei die Organik mit 25,3 kg/(E·a) über die Hälfte des Wertstoffpotenzials ausmacht (Tab. 15).

Tab. 15: Maximale, potenzielle spezifische Wertstoffmasse im Restmüll einschließlich Schwankungsbreiten sowie Sammelmengen in Bayern [37]; alle Werte in kg/(E·a); k. A.: keine Angabe

Wertstofffraktion	Mittelwert	Schwankungsbreite		Abfallbilanz 2005
Organik	25,3	13,7	49,1	60,4
PPK	4,2	2,7	5,8	81,9
Leichtverpackungen (Kunststoff, Verbund, Metall)	6,4	4,1	10,4	17,7
Behälterglas	2,4	1,3	5,6	25,7
Textilien inkl. Schuhe	2,3	1,7	3,3	2,8
Metalle	2,0	1,2	4,1	13,1
Holzverpackungen	« 0,1	« 0,1	« 0,1	16,4
Elektronikschrott	0,7	0,4	1,1	3,1
Kunststoff-Nichtverpackung	2,5	2,1	3,3	2,6
Kork	« 0,1	« 0,1	« 0,1	k. A.
Summe Wertstoffe	44,4	26,3	80,0	k. A.

Die einzelnen Wertstofffraktionen zeigen wie das Gesamtaufkommen auffällige Schwankungsbreiten. Vergleicht man die noch im Restmüll vorhandene Wertstoffmasse mit der in Bayern erfassten [6], belegen Wertstofffraktionen wie PPK, Glas oder Holz einen hohen Abschöpfungsgrad durch die etablierten Erfassungssysteme. Bei anderen Wertstoffen wie Elektronikschrott und Kunststoff-Nichtverpackungen verbleiben vergleichsweise große Wertstoffpotenziale im Restmüll. Bei „saugfähigen“ Fraktionen wie PPK, Textilien und Verbundverpackungen ist der z. T. hohe Wassergehalt von bis zu 35,3 Mass.-% zu berücksichtigen, der in den einzelnen Gebietskörperschaften je nach Organikanteil des Restmülls sehr unterschiedlich ausfallen kann. Bei den als Wertstoff eingestuftten Stoffgruppen Bekleidungstextilien und Schuhe ist eine trennscharfe Unterscheidung zwischen verwert- und nicht verwertbarem Wertstoff (verschmutzt, abgetragen) bei einer Restmüllsortierung kaum möglich. Die Einstufung erfolgte auch unabhängig davon, ob in der jeweiligen Gebietskörperschaft eine getrennte Erfassung für diese „Wertstoffe“ angeboten wird.

Bei den Sortierungen wurde der Masseanteil von Batterien ermittelt, indem die Mittelfraktion (10 - 40 mm) vollständig danach durchsucht wurde. Die Batterien wurden separat gewogen und ein Wert von 0,09 kg/(E·a) ermittelt.

Verpackungen

Die im Restmüll verbleibenden Verpackungen wurden einer differenzierten Betrachtung unterzogen. Der Anteil an Verpackungen im Restmüll beträgt insgesamt 10,7 kg/(E·a) bzw. 10,8 Mass.-% und setzt sich aus PPK-, Kunststoff-, Glas-, Holz-, Metall- und Verbundverpackungen zusammen. Der in [8] ermittelte Anteil an Verpackungen liegt mit 16,8 kg/(E·a) bzw. 14,9 Mass.-% etwas höher, was vor allem durch die unterschiedlichen Abfallwirtschaftssysteme der untersuchten Gebietskörperschaften begründet ist.

Tab. 16: Aufkommen und Anteil von Verpackungen mit und ohne Grünem Punkt (GP) im Restmüll [kg/(E-a)]

Verpackungsart	mit GP	ohne GP	Summe	Anteil mit GP [Mass.-%]
Kunststoffverpackungen	2,0	0,6	2,6	76,4
Behälterglas	1,8	0,6	2,4	74,7
PPK-Verpackungen	0,8	1,2	2,0	40,6
Verbundverpackungen	1,2	0,3	1,4	82,0
Kunststofffolien (Verpackungen)	0,5	0,4	0,9	53,8
Fe-Metallverpackungen	0,7	0,1	0,8	89,6
NE-Metallverpackungen	0,2	0,3	0,6	44,0
Holzverpackungen	« 0,1	« 0,1	« 0,1	39,3
Inertverpackungen	–	« 0,1	« 0,1	–
Summe	7,2	3,5	10,7	–
Anteil am Restmüll [Mass.-%]	7,3	3,5	10,8	67,6

Trotz des niedrigen spezifischen Gewichts macht die Verpackungsart Kunststoffverpackungen mit 2,6 kg/(E-a) den größten Anteil (24,7 Mass.-%) der Verpackungen aus, inkl. den Kunststofffolienverpackungen sogar 32,5 Mass.-%. Weiterhin haben Behälterglas mit 22,5 Mass.-%, PPK- mit 18,5 Mass.-% und Verbundverpackungen mit 13,6 Mass.-% einen signifikanten Anteil an den Verpackungen im Restmüll. Bei über zwei Drittel der Verpackungsmasse handelt es sich um Verpackungen mit Grünem Punkt, wobei die höchsten Anteile für Eisenmetall-, Verbund-, Kunststoff- und Glasverpackungen (Reihenfolge nach absteigendem Anteil GP) ermittelt wurden.

In Abb. 8 sind die Schwankungsbreiten des Verpackungsaufkommens im Restmüll der Untersuchungsgebiete dargestellt. Die z. T. erhebliche Abweichung vom Mittelwert zeigt eine starke Abhängigkeit der Verpackungsanteile von den lokalen abfallwirtschaftlichen Gegebenheiten.

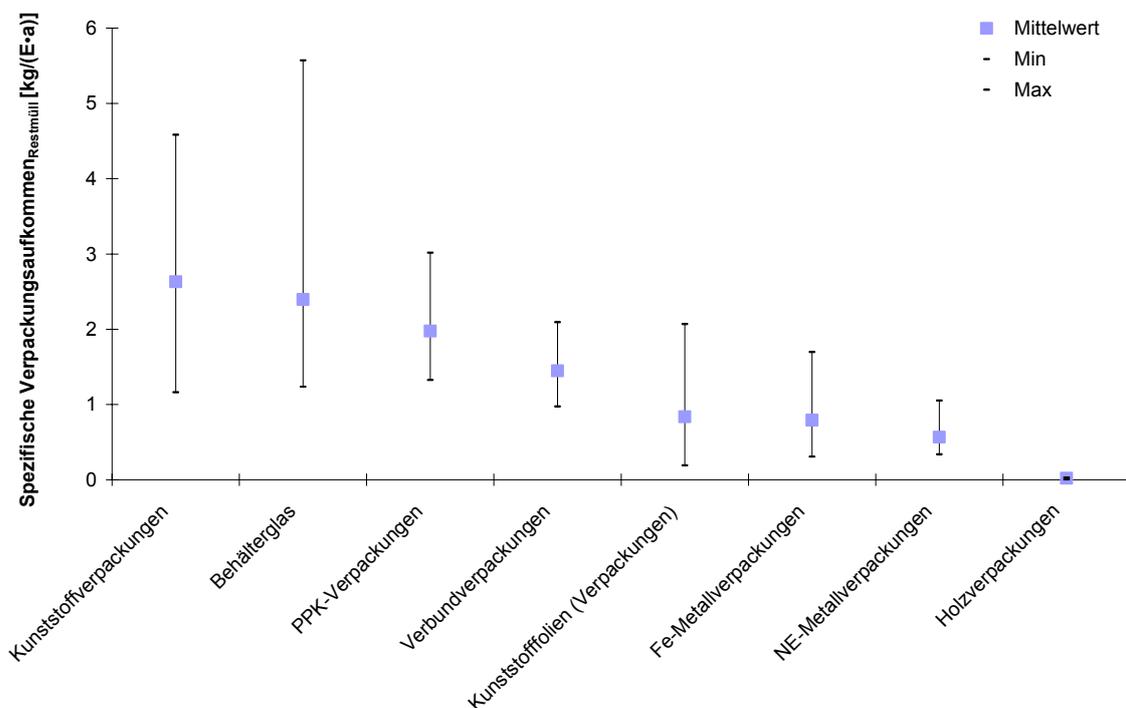


Abb. 8: Spezifisches Verpackungsaufkommen im Restmüll einschließlich Angabe der Schwankungsbreite

Tab. 17: Aufkommen von Verpackungen in den verschiedenen Strukturgebieten

Verpackungsart	innerstädtisch ^{*)}		städtisch		ländlich	
	[kg/(E·a)]	davon GP [Mass.-%]	[kg/(E·a)]	davon GP [Mass.-%]	[kg/(E·a)]	davon GP [Mass.-%]
Kunststoffverpackungen	4,2	81,0	2,8	77,5	2,3	60,7
Verbundverpackungen	2,2	90,7	1,6	87,9	1,3	67,0
Kunststofffolien (Verpackungen)	1,4	63,2	1,0	54,9	0,7	39,4
Fe-Metallverpackungen	1,0	93,2	0,7	96,2	0,8	99,1
NE-Metallverpackungen	0,5	39,7	0,6	72,7	0,5	72,5
Summe	9,3	79,7	6,6	73,3	5,5	71,7
Leichtverpackungen						
Behälterglas	3,6	75,6	2,5	75,4	2,1	63,6
PPK-Verpackungen	2,6	50,3	2,0	49,1	1,8	37,6
Holzverpackungen	« 0,1	2,9	« 0,1	44,1	« 0,1	18,7
Inertverpackungen	« 0,1	–	« 0,1	–	« 0,1	–
Summe	15,6	73,6	11,2	67,7	9,4	65,7

^{*)} Mittelwert aus 4 Gebietskörperschaften, da L19 und L20 keine innerstädtischen Gebietsstrukturen entsprechend Definition in Tab. 3 aufweisen

In Tab. 17 ist der Einfluss der Struktur der Untersuchungsgebiete auf das spezifische Verpackungsaufkommen und den Anteil mit Grünem Punkt aufgeführt.

Generell verbleiben in ländlichen Gebieten weniger Verpackungen im Restmüll als in städtischen und innerstädtischen. D. h., die Bereitschaft zur Mülltrennung ist im ländlichen Bereich am größten; u. a. kommt es in innerstädtischen Bereichen durch vorwiegend kleinere Haushalte und dem damit verbundenen Konsumverhalten zu höheren Verpackungsanteilen. Auch der Masseanteil an Verpackungen mit Grünem Punkt ist in innerstädtischen Gebieten am höchsten.

4.1.3 Wertstoffaufkommen in Abhängigkeit des Abfallwirtschaftssystems

In den untersuchten Gebietskörperschaften existieren unterschiedliche Abfallwirtschafts- und damit Wertstofffassungssysteme. Die Stoffgruppen Organik, Papier, Pappe, Kartonagen und Leichtverpackungen (Kunststoff-, Verbund-, Metallverpackungen) stellen die im Restmüll masserelevanten Wertstoffe dar und wurden in Abhängigkeit vom Erfassungssystem einer differenzierteren Betrachtung unterzogen.

Erfassung von Bioabfällen

In drei von sechs beprobten Gebietskörperschaften werden Bioabfälle im Holsystem erfasst. Das mittlere spezifische Organikaufkommen beträgt dabei für die drei Gebietskörperschaften mit Holsystem 15,2 kg/(E·a), für die ohne Biotonne 35,4 kg/(E·a) und für alle beprobten Landkreise 25,3 kg/(E·a).

Die Abb. 9 zeigt das Organikaufkommen im Restmüll der vom LfU seit 1998 untersuchten Gebietskörperschaften in Abhängigkeit vom Erfassungssystem. In den Gebietskörperschaften mit Biotonne (Holsystem) liegt die verbleibende Organikmasse im Restmüll unter der ohne Biotonne. Die hohe Schwankungsbreite des Organikaufkommens von Gebietskörperschaften mit gleichem Erfassungssystem für Bioabfälle belegt, dass neben dem Erfassungssystem eine Vielzahl weiterer Faktoren das Abfallaufkommen beeinflusst. Wenn man das spezifische Organikaufkommen im Restmüll auf Werte unter 15 kg/(E·a) senken will, sind neben der Einführung der Biotonne weitere flankierende Maßnahmen {z. B. Gebührenmodell (personen-, volumen-, masse-, leerungsabhängig) oder der Grad bzw. die Förderung der Eigenkompostierung} notwendig.

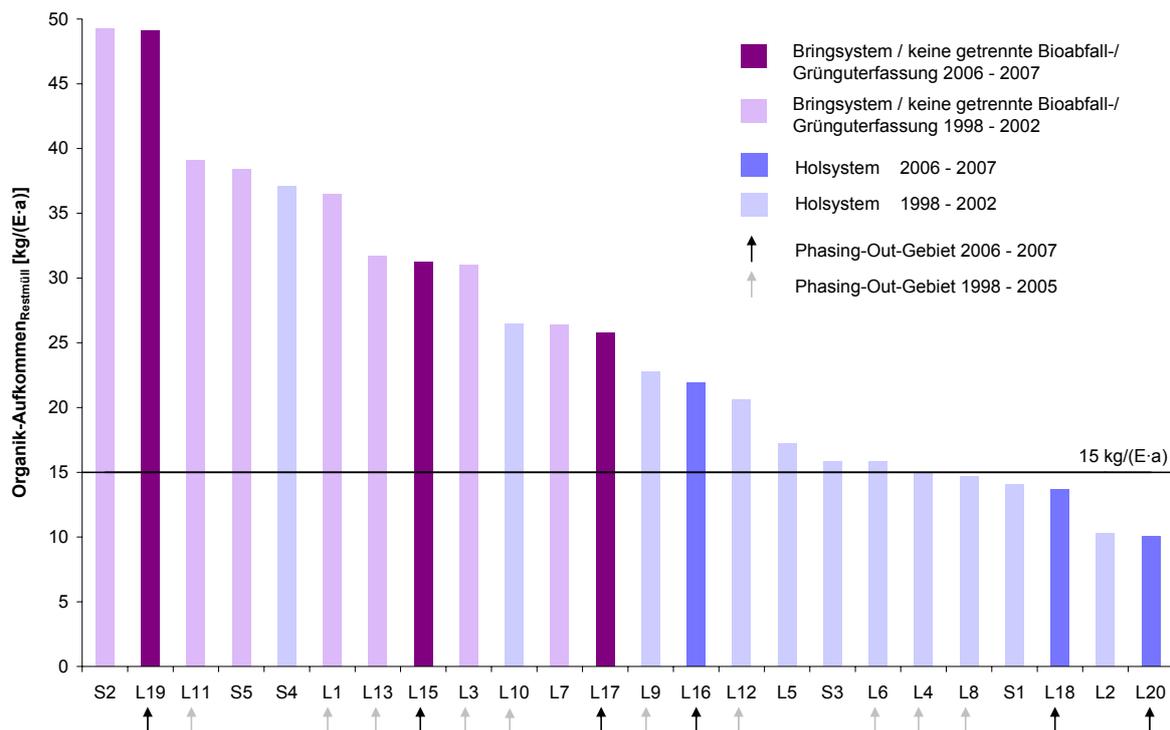


Abb. 9: Vergleich des spezifischen Organikaufkommens im Restmüll in Abhängigkeit des Erfassungssystems mit den in [8,] untersuchten Gebietskörperschaften

Erfassung von Papier, Pappe, Kartonagen

Drei der sechs beprobten Gebietskörperschaften verfügen über Holsysteme für Papier, Pappe, Kartonagen (PPK) mit maximal 4-wöchigem Abfuhrturnus. Die Abb. 10 zeigt die ermittelte Masse an PPK im Restmüll der aktuell untersuchten Gebietskörperschaften im Vergleich zu früheren LfU-Untersuchungen. Das mittlere spezifische Aufkommen beträgt für die Landkreise mit Papiertonne 3,7 kg/(E·a), für die mit Bringsystem 4,6 kg/(E·a) und über alle sechs Gebietskörperschaften gemittelt 4,2 kg/(E·a).

Dabei liegt das Aufkommen an Papier, Pappe, Kartonagen im Restmüll in Gebietskörperschaften mit Holsystem mit Ausnahme Landkreis L19 unter dem der Gebietskörperschaften mit Bringsystem. Damit überwiegt im Landkreis L19 der Einfluss weiterer abfallwirtschaftlicher Faktoren (Regelabfuhr, großes Restmüllbehältervolumen) gegenüber dem des Erfassungssystems. Das PPK-Aufkommen konnte unabhängig von dem Vorhandensein einer Papiertonne in den vier Gebietskörperschaften mit bedarfsgerechtem Gebührensystem (Identsystem) unter 5 kg/(E·a) gesenkt werden.

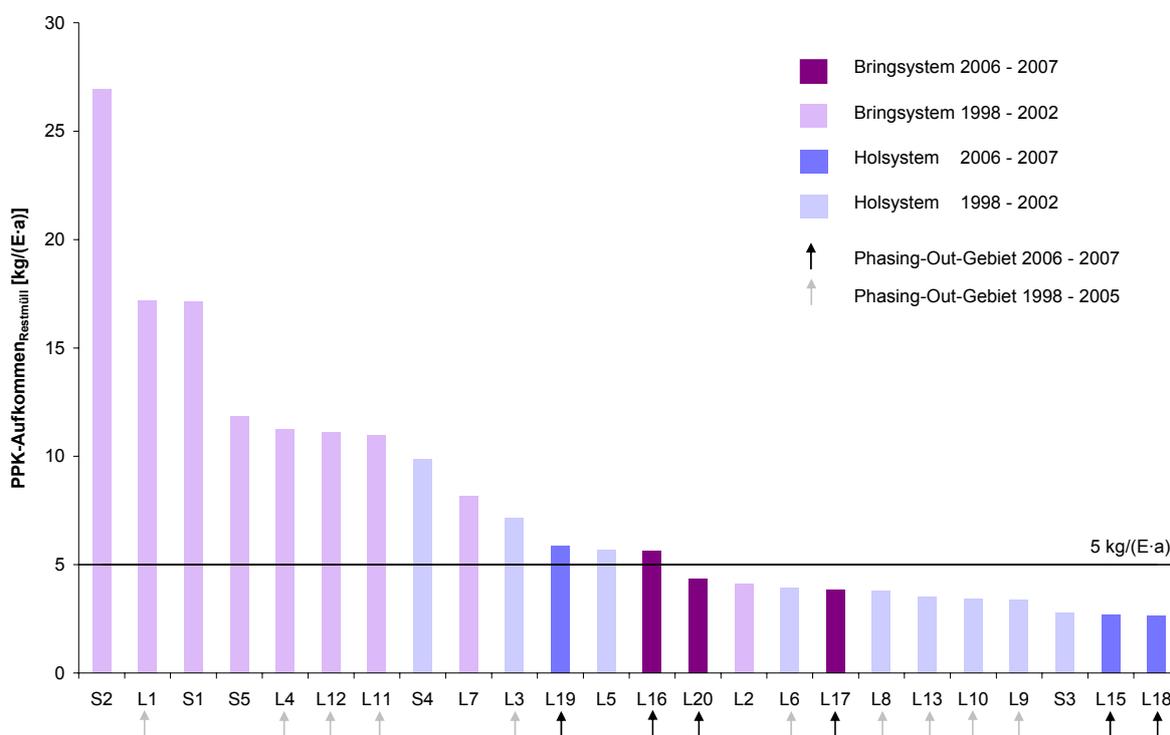


Abb. 10: Vergleich des spezifischen Aufkommens an Papier, Pappe, Kartonagen (PPK) im Restmüll in Abhängigkeit des Erfassungssystems mit den in [8,] untersuchten Gebietskörperschaften

Erfassung von Leichtverpackungen

Unter Leichtverpackungen (LVP) werden Kunststoff-, Verbund- und Metallverpackungen zusammengefasst. Von den sechs beprobten Gebietskörperschaften verfügten drei über ein Holsystem (Gelbe Säcke/Gelbe Tonne). Das mittlere Aufkommen beträgt für Gebietskörperschaften ohne Holsystem 6,9 kg/(E·a), mit Holsystem 5,9 kg/(E·a) und für alle sechs untersuchten Landkreise 6,4 kg/(E·a).

Bis auf den Landkreis L19 liegt das LVP-Aufkommen im Restmüll in Gebietskörperschaften mit Holsystem unter denen mit Bringsystem.

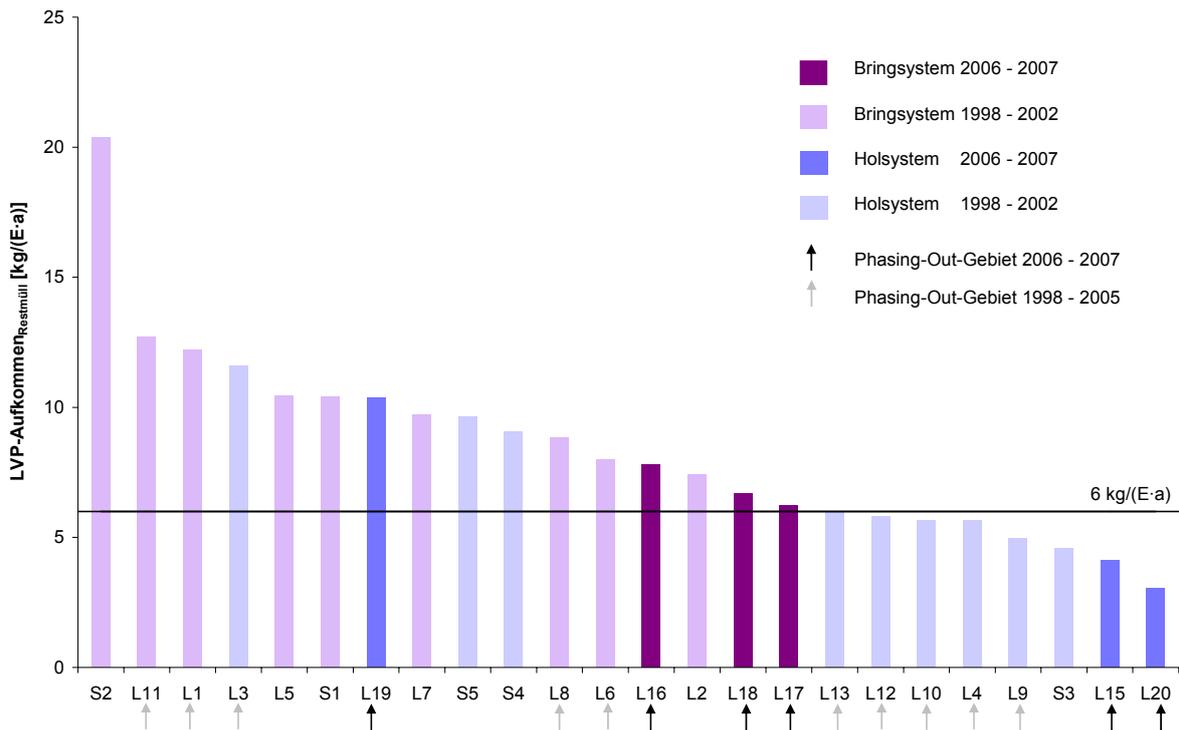


Abb. 11: Vergleich des spezifischen Aufkommens an Leichtverpackungen (LVP) im Restmüll in Abhängigkeit des Erfassungsystems im Vgl. zu den in [8, 36] untersuchten Gebietskörperschaften

4.1.4 Behälterspezifische Daten

Behälterspezifische Daten wie bereitgestelltes, genutztes Behältervolumen und Schüttgewicht werden durch das Abfallwirtschaftssystem (entsprechend der Abfallwirtschaftsatzung) und das individuelle Verbraucherverhalten bestimmt. Durch die Protokollierung des Restabfallbehältervolumens und dessen Füllgrad werden bei der Probenahme das bereitgestellte und genutzte Behältervolumen ermittelt. Durch Verrechnung mit der Restmüllmasse ergeben sich Raum- und Schüttgewicht des Restmülls.

In Tab. 18 sind die behälterspezifischen Daten in Abhängigkeit der Gebietsstrukturen dargestellt.

Tab. 18: Behälterspezifische Daten in den verschiedenen Gebietsstrukturen

Gebietsstruktur	bereitgestelltes Behältervolumen	genutztes Behäl- tervolumen	Schüttgewicht
	[l/(E·Wo)]	[l/(E·Wo)]	[kg/l]
ländlich	11,2	9,5	0,178
städtisch	12,6	10,3	0,172
Innerstädtisch ^{*)}	11,0	10,4	0,162
gesamt	11,7	9,9	0,174

^{*)} Mittelwert aus 4 Gebietskörperschaften, da L19 und L20 keine innerstädtischen Gebietsstrukturen entsprechend Definition in Tab. 3 aufweisen

Das Schüttgewicht erlaubt eine Aussage über die Dichte und Verdichtung des Abfalls in dem Restmüllgefäß. Die geringsten Schüttgewichte findet man im innerstädtischen Bereich, was sich mit einem erhöhten Aufkommen an Leichtverpackungen deckt; zudem können u. a. durch größere Abfallbehälter (i. d. R. 1.100 l-Container) in dieser Gebietsstruktur sperrige Abfälle unzerkleinert/unverdichtet eingefüllt werden. Innerhalb der Gebietskörperschaften liegen die Schüttgewichte zwischen 0,134 kg/l und 0,221 kg/l. Das niedrigste Schüttgewicht weist dabei eine Gebietskörperschaft auf, in der die Restabfallgebühr maßgeblich von der Gewichtsgebühr bestimmt wird (Identsystem mit Verwiegung). Der höchste Wert wurde in einer Gebietskörperschaft ermittelt, in der die Gebühr neben der Zahl und dem Fassungsvermögen der Restabfallgefäße von der Anzahl der Leerungen bestimmt wird (Identsystem ohne Verwiegung).

Das bereitgestellte Behältervolumen beträgt in den untersuchten Gebietskörperschaften im Mittel 11,7 l/(E·Wo), der niedrige Mittelwert im innerstädtischen Bereich ist dabei durch die fehlenden Einzelwerte der Landkreise L19 und L20 beeinflusst. Das genutzte Behältervolumen beträgt im Mittel 9,9 l/(E·Wo), woraus sich ein Behälterüberangebot von 1,8 l/(E·Wo) ergibt. Der niedrigste Wert tritt im ländlichen Bereich auf.

Die Schwankungsbreite des bereitgestellten und genutzten Behältervolumens der untersuchten Gebietsstrukturen im Vergleich zum satzungsgemäßen Mindestbehältervolumen entspricht dem pro Einwohner und Woche mindestens zur Verfügung stehenden Restabfallbehältervolumen, das in Abb. 12 dargestellt ist.

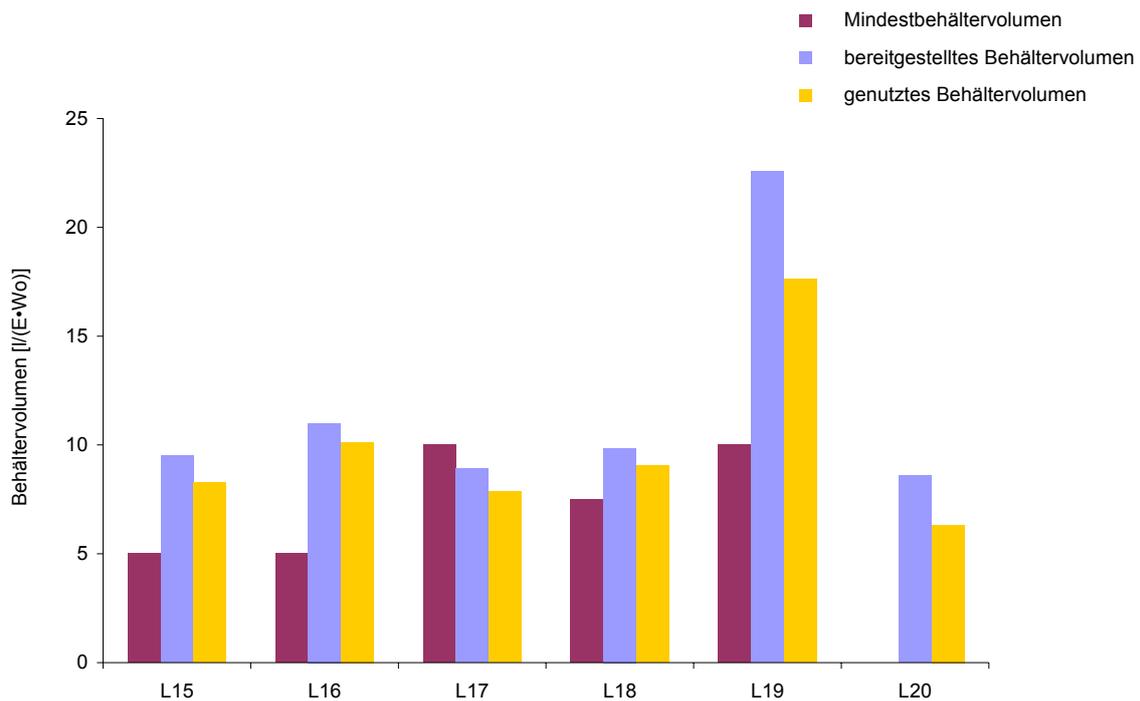


Abb. 12: Vergleich von Mindestbehältervolumen, bereitgestelltem und genutztem Behältervolumen in den untersuchten Gebietskörperschaften

Das Behälterüberangebot variiert von 0,8 $l/(E \cdot Wo)$ bis 4,9 $l/(E \cdot Wo)$. Das bereitgestellte Behältervolumen liegt mit Ausnahme der Gebietskörperschaft L17 deutlich über dem satzungsgemäßen Mindestbehältervolumen. Durch eine geringe Leerungshäufigkeit (bei Identssystemen) kann sich gegenüber dem Mindestbehältervolumen ein niedrigeres bereitgestelltes Behältervolumen ergeben. In der Gebietskörperschaft L20 ist kein Mindestbehältervolumen vorgeschrieben; die kleinste Restabfallbehältergröße beträgt hier 120 l bei einer Berechnung von mind. sieben Entleerungen pro Jahr. Das im Vergleich zum bereitgestellten erheblich niedrigere genutzte Behältervolumen resultiert aus niedrigeren Füllgraden der Restabfallbehälter.

4.2 Physikalisch-chemische Eigenschaften und Inhaltsstoffe

Während der Sortierkampagnen wurden von 18 Analysestoffgruppen jeweils mindestens 4, insgesamt 79 Einzelproben gezogen und auf diverse physikalisch-chemische Parameter und Inhaltsstoffe untersucht (vgl. Abschnitt 3.4). In den folgenden Abschnitten werden die Analyseergebnisse für die jeweiligen Analysestoffgruppen (Durchschnittswerte aus Einzelbestimmungen) sowie die damit im Restmüll enthaltene Fracht dargestellt.

Für die Berechnung der Frachten von Schad- und sonstigen Inhaltsstoffen, die die einzelnen Analysestoffgruppen zum Restmüll beitragen, wurden die in den Sortierkampagnen ermittelten und in Tab. 19 aufgelisteten Masseanteile herangezogen (siehe Abschnitt 3.4.4). Nach der Fein- und Mittelfraktion (Klassierung) sind in den folgenden Tabellen und Abbildungen die Analysestoffgruppen der Grobfraktion in der Reihenfolge abnehmender Masseanteile aufgelistet. Der nicht analysierte, verbleibende Rest von 5,9 Mass.-% beinhaltet die Stoffgruppen Fahrzeugteile, Flachglas, Metalle, Problemstoffe, Styropor und Sonstige Stoffe.

Tab. 19: Masseanteile der Analysestoffgruppen am Restmüll; alle Angaben in Mass.-%

Analysestoffgruppe	Masseanteil Restmüll (feucht)
Feinmüll	11,4
Mittelmüll	14,6
Organik	26,2
Hygieneprodukte	16,4
PPK	4,6
Kunststoffverpackungen inkl. Folien	3,5
Glas	3,3
Textilien	2,9
Inertes	2,6
Sonstige Verbunde	2,0
Verbundverpackungen	1,5
Sonstige Kunststoffe	1,2
Schuhe	0,9
Holz	0,8
Renovierung	0,8
Elektronikschrott	0,7
Staubsaugerbeutel	0,6
Leder, Gummi, Kork	0,3
Summe	94,1

4.2.1 Physikalisch-chemische Eigenschaften

4.2.1.1 Wassergehalt

Der Gesamtwassergehalt des untersuchten Restmülls beträgt 35,3 Mass.-%. Hauptmassträger sind die Analysestoffgruppen Organik, Hygieneprodukte und die Mittelfraktion, die zu hohen Anteilen aus Organik besteht (vgl. Abb. 13). In Korrelation zum Abholturnus der Restmülltonne (wöchentlich, 14-tägig oder länger) werden hydrophile Bestandteile des Restmülls (z. B. Papier, Pappe, Kartonaugen) von stark wasserhaltigen Fraktionen (v. a. Organik, nicht vollständig entleerte Gebinde) teilweise infiltriert.

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

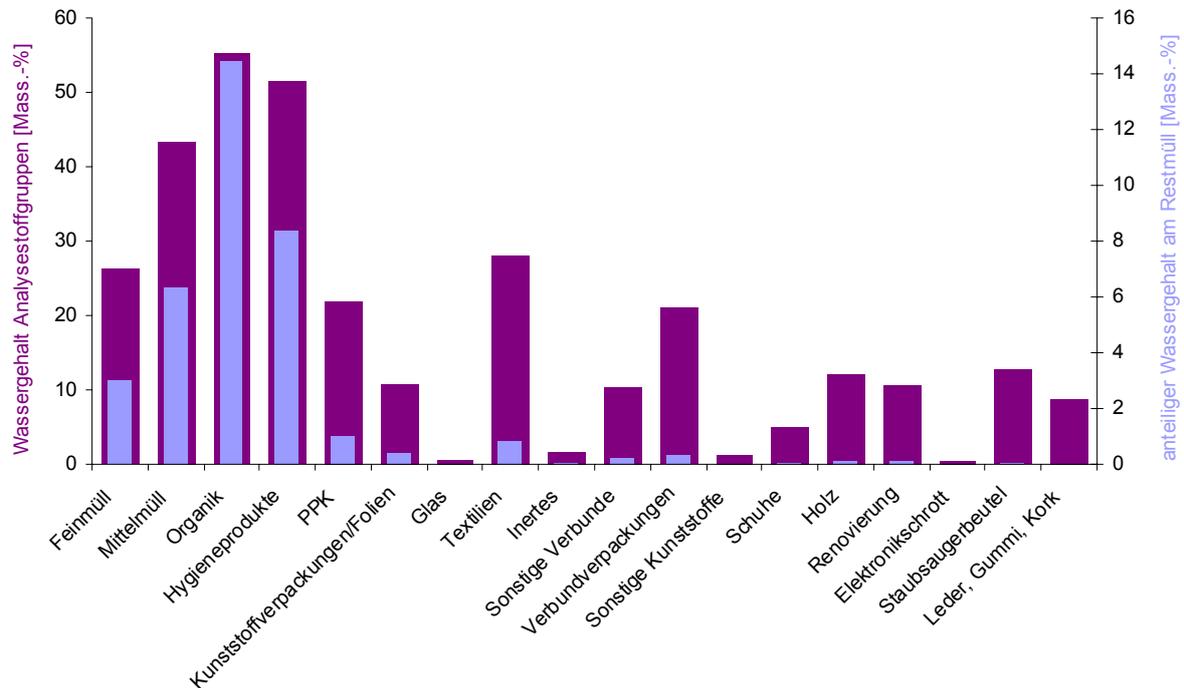


Abb. 13: Wassergehalte der einzelnen Analysestoffgruppen (linke Ordinate) und deren Beitrag zum Gesamtwassergehalt des Restmülls (rechte Ordinate)

4.2.1.2 Glühverlust

Der Glühverlust der Analysestoffgruppen liegt – abgesehen von Feinfraktion, Glas und Inertes – jeweils über 60 Mass.-% (siehe Abb. 14); im gesamten Restmüll beträgt er 69,2 Mass.-%.

D. h., bei der Verbrennung von 1 kg Restmüll (trocken) bleiben noch ca. 0,3 kg als nichtbrennbarer Rückstand zurück. Dieser Wert liegt in der Größenordnung von Rohschlackeanteilen (bezogen auf den Abfallinput) bei der thermischen Abfallbehandlung [55]. Ohne weitere Behandlung hält keine der untersuchten Fraktionen (mit Ausnahme von Feinfraktion, Glas und Inertes) das Zuordnungskriterium der AbfAbIV [56] für den Glühverlust von max. 5 Mass.-% ein.

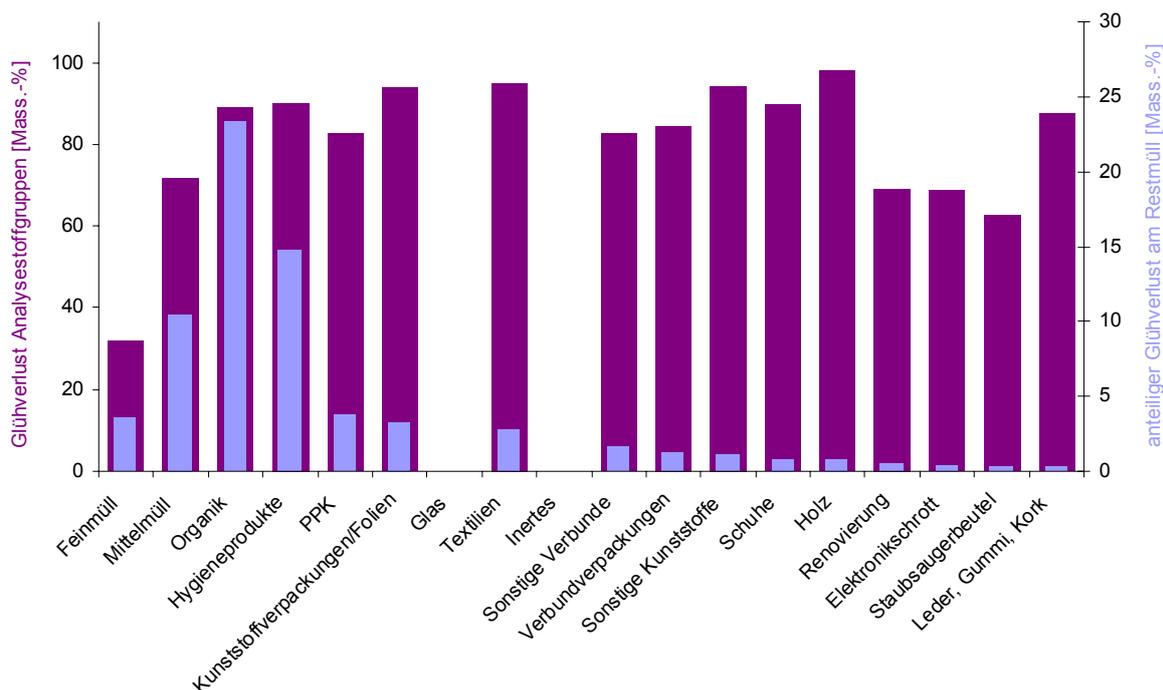


Abb. 14: Glühverluste der einzelnen Analysestoffgruppen (linke Ordinate) und deren Beitrag zum Gesamtglühverlust des Restmülls (rechte Ordinate)

4.2.1.3 Heizwert

Bei den in Abb. 15 dargestellten Heizwerten der Analysestoffgruppen ist der jeweilige Wassergehalt berücksichtigt. Der Restmüll aus Haushalten weist im Mittel einen Heizwert von 8,3 MJ/kg auf, was dem Heizwert von Rohbraunkohle [57], einem niederkalorischen Brennstoff, entspricht.

Nur die Analysestoffgruppen, deren Masseanteil am Restmüll unter 5 Mass.-% liegt, weisen Heizwerte über 10 MJ/kg auf. Die höchsten Heizwerte wurden mit über 30 MJ/kg für Sonstige Kunststoffe und Kunststoffverpackungen ermittelt. Neben diesen bestimmen aufgrund ihrer hohen Masseanteile auch die organische Fraktion, die Mittelfraktion und die Hygieneprodukte maßgeblich den Energiegehalt des Restmülls.

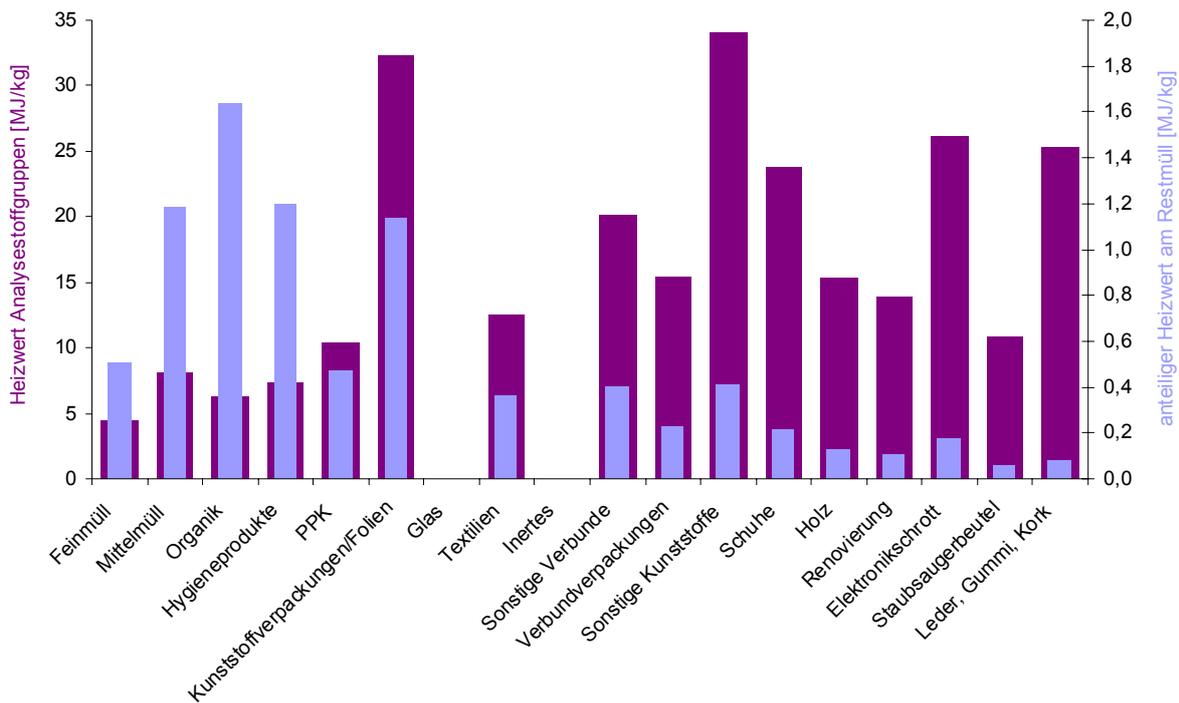


Abb. 15: Heizwerte der einzelnen Analysestoffgruppen (linke Ordinate) und deren Beitrag (rechte Ordinate) zum Gesamtheizwert des Restmülls

4.2.2 Anorganische Inhaltsstoffe

4.2.2.1 Kohlenstoff

Jedes Kilogramm Restmüll enthält 215 g vorwiegend organisch gebundenen Kohlenstoff. Mit die größten Anteile sowohl der Trockenmasse als auch im Restmüll nehmen dabei die Kunststoffverpackungen und Sonstigen Kunststoffe ein (siehe Tab. 20).

Das Ablagerungskriterium der AbfAbIV [56] von maximal 3 Mass.-% organisch gebundenem Kohlenstoffgehalt (TOC) halten ohne weitere Behandlung lediglich die Stoffgruppen Glas und Inertes ein.

Tab. 20: Kohlenstoffgehalte (anorganisch und organisch gebunden, gesamt) der Analysestoffgruppen und von Restmüll (feucht); alle Werte in Mass.-%

Analysestoffgruppe	Trockenmasse			Restmüll (feucht)
	C _{anorganisch}	C _{organisch}	C _{gesamt}	C _{gesamt}
Feinmüll	0,4	15,2	15,6	1,3
Mittelmüll	0,1	36,4	36,5	3,0
Organik	« 0,1	41,9	41,9	4,9
Hygieneprodukte	« 0,1	43,1	43,1	3,4
PPK	0,5	37,4	37,8	1,3
Kunststoffverpackungen/Folien	« 0,1	72,8	72,9	2,3
Glas	« 0,1	0,5	0,5	« 0,1
Textilien	« 0,1	47,0	47,0	1,0
Inertes	« 0,1	0,9	0,9	« 0,1
Sonstige Verbunde	0,1	53,2	53,3	1,0
Verbundverpackungen	0,1	44,3	44,4	0,5
Sonstige Kunststoffe	« 0,1	70,1	70,2	0,8
Schuhe	« 0,1	56,8	56,8	0,5

Tab. 20 (Forts.): Kohlenstoffgehalte (anorganisch und organisch gebunden, gesamt) der Analysestoffgruppen und von Restmüll (feucht); alle Werte in Mass.-%

Analysestoffgruppe	Trockenmasse			Restmüll (feucht)
	C _{anorganisch}	C _{organisch}	C _{gesamt}	C _{gesamt}
Holz	« 0,1	46,6	46,6	0,3
Renovierung	1,1	38,4	39,5	0,3
Elektronikschrott	« 0,1	59,9	60,0	0,4
Staubsaugerbeutel	0,1	34,6	34,7	0,2
Leder, Gummi, Kork	« 0,1	60,4	60,5	0,2
Restmüll feucht				21,5

4.2.2.2 Chlor, Schwefel, Stickstoff, Phosphor

In jedem Kilogramm Restmüll sind im Mittel 7,3 g Stickstoff, 3,7 g Chlor, 2,1 g Schwefel und 1,0 g Phosphor zu finden.

Mit Blick 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 30 g/(kg TM) in der Stoffgruppe Schuhe bestimmt. Auch die Stoffgruppen Elektronikschrott mit 22,7 g/(kg TM), Leder/Gummi/Kork mit 17,9 g/(kg TM) und Sonstige Kunststoffe mit 16,7 g/(kg TM) tragen maßgeblich zum Gesamtchlorgehalt im Restmüll bei.

Tab. 21: Konzentrationen von Chlor, Phosphor, Schwefel und Stickstoff der Analysestoffgruppen (Trockenmasse) und von Restmüll (feucht); alle Werte in mg/kg

Analysestoffgruppe	Chlor	Phosphor	Schwefel	Stickstoff
Feinmüll	4.263	3.487	7.039	8.227
Mittelmüll	6.871	2.793	5.990	15.354
Organik	9.635	2.735	2.068	23.671
Hygieneprodukte	3.150	842	1.275	6.230
PPK	1.793	265	1.469	3.658
Kunststoffverpackungen/Folien	2.463	320	1.598	3.235
Glas	500	354	546	78
Textilien	1.823	813	2.180	25.035
Inertes	2.518	417	9.805	126
Sonstige Verbunde	13.608	318	4.058	26.590
Verbundverpackungen	3.048	441	1.572	4.065
Sonstige Kunststoffe	16.735	300	912	9.256
Schuhe	30.325	311	3.788	20.340
Holz	543	300	501	12.526
Renovierung	16.528	359	7.560	10.610
Elektronikschrott	22.660	301	1.447	13.543
Staubsaugerbeutel	11.000	1.173	10.485	28.199
Leder, Gummi, Kork	17.918	458	10.228	23.471
Restmüll feucht	3.688	1.003	2.129	7.268

4.2.2.3 Alkali- und Erdalkalimetalle

Von den Alkali- und Erdalkalimetallen wurden die Gehalte von Calcium Kalium, Magnesium und Natrium im Restmüll ermittelt (vgl. Tab. 22). Insgesamt bestimmen diese Elemente 2,9 Mass.-% des Restmülls, wovon der Hauptteil auf Calcium mit 64 Mass.-% entfällt.

Die Haupt„quellen“ für Calcium Kalium, und Magnesium sind die „mineralischen“ Stoffgruppen Feinfraktion, Renovierung (Calcium in gipshaltigen Abfällen), Glas und Inertes. Natrium dagegen liegt in größeren Mengen nur in der Fraktion Glas vor.

Tab. 22: Konzentrationen von Calcium, Kalium, Magnesium und Natrium der Analysestoffgruppen (Trockenmasse) und von Restmüll (feucht); alle Werte in mg/kg

Analysestoffgruppen	Calcium	Kalium	Magnesium	Natrium
Feinmüll	87.046	18.429	11.394	3.011
Mittelmüll	32.980	11.407	2.527	2.687
Organik	12.288	8.133	< 2.000	3.648
Hygieneprodukte	10.710	3.543	< 2.000	4.083
PPK	37.575	1.758	2.198	< 2.000
Kunststoffverpackungen/Folien	8.313	< 1.600	< 2.000	< 2.000
Glas	59.025	5.818	9.170	53.850
Textilien	7.895	< 1.600	< 2.000	< 2.000
Inertes	31.413	14.575	6.268	3.970
Sonstige Verbunde	17.925	1.600	2.095	3.248
Verbundverpackungen	20.628	2.373	< 2.000	< 2.000
Sonstige Kunststoffe	15.510	1.618	< 2.000	2.345
Schuhe	27.850	< 1.600	< 2.000	2.875
Holz	2.458	< 1.600	< 2.000	< 2.000
Renovierung	84.040	1.890	6.700	2.566
Elektronikschrott	16.365	< 1.600	2.505	2.888
Staubsaugerbeutel	40.850	8.263	5.025	6.075
Leder, Gummi, Kork	29.815	7.325	4.650	2.185
Restmüll feucht	18.841	4.625	2.422	3.473

4.2.2.4 Schwermetalle

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 Atomabsorptionsspektrometrie (AAS), die anderen Schwermetalle in der Feststoffprobe mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) bestimmt.

In Tab. 23 (S. 54) 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 [29, 58].

Blei

Blei ist nicht essentiell für den menschlichen Organismus. Toxisch wirken Blei-Ionen u. a. bei Reaktionen mit Enzymen und Proteinen. In der Luft kommt Blei häufig als Blei(II)oxid vor, industriell v. a. in Form von Organobleiverbindungen. In der Natur akkumuliert Blei und adsorbiert leicht an Staub- und Rußpartikeln, weshalb Blei ubiquitär vorliegt [59].

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 [60, 61].

Die Bleigehalte in den untersuchten Stoffgruppen schwanken insgesamt zwischen 12 und 3.180 mg/(kg TM) und belaufen sich auf knapp 225 mg/kg im Restmüll.

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

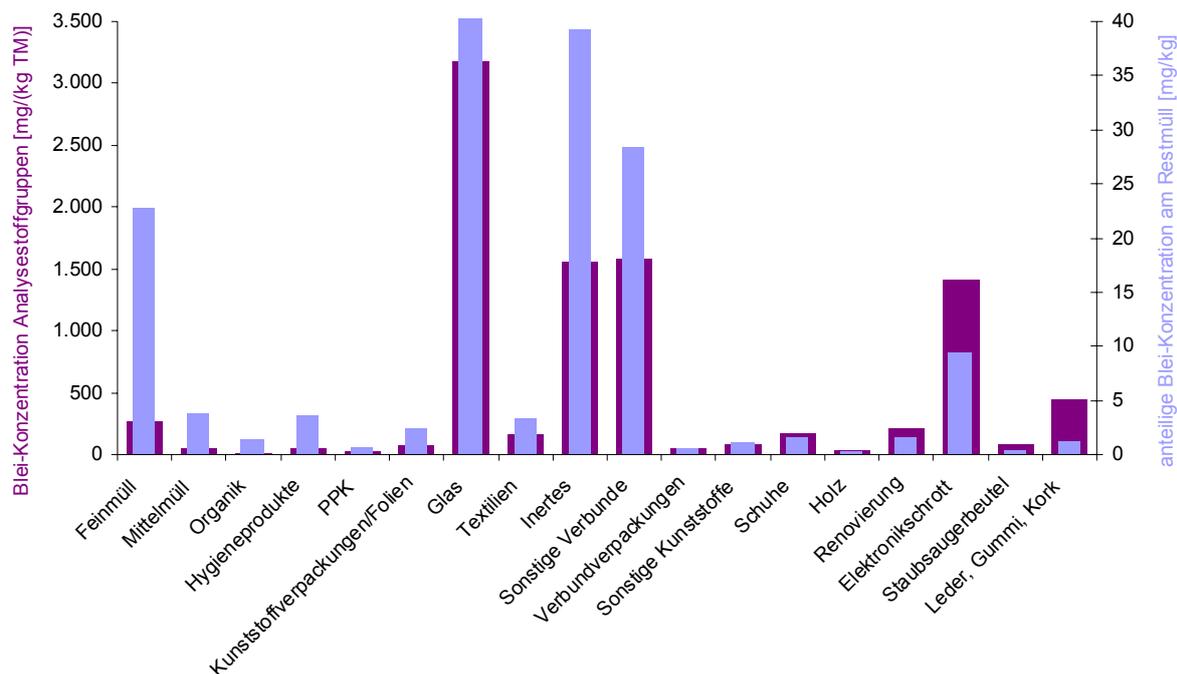


Abb. 16: Bleigehalte der Analysestoffgruppen (linke Ordinate) und deren Beitrag zum Restmüll (rechte Ordinate)

Diese Darstellung zeigt deutlich, dass die Analysestoffgruppen Glas, Inertes, Sonstige Verbunde und Elektronikschrott mit den höchsten Bleigehalten in der Trockenmasse auch den größten Anteil an der Bleifracht des Restmülls ausmachen, obwohl diese eher geringe Masseanteile am Restmüll besitzen.

Cadmium

Wie auch bei dem Element Blei wirken v. a. Cd(II)-Verbindungen toxisch auf den menschlichen Organismus. Eine inhalative 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 [60, 61].

Neben der Analysestoffgruppe Kunststoffverpackungen inkl. Folien {14,0 mg/(kg TM)} tragen auch die Sonstigen Kunststoffe (langlebige Kunststoffartikel) mit 12,0 mg und die Sonstigen Verbunde mit 11,3 mg Cadmium je kg Trockenmasse maßgeblich zum Cadmiumgehalt des Restmülls bei.

Insgesamt wurde ein Cadmiumgehalt von 3,6 mg pro kg Restmüll (feucht) entsprechend 5,5 mg/(kg TM) ermittelt. Andere Autoren nennen für Restmüll Cadmiumgehalte von 1 – 6 mg/(kg TM) [29] und 0,3 mg/(kg TM) [62]. Bei der Bundesweiten Hausmüllanalyse von 1983 wurden noch 10 – 15 mg Cadmium pro kg trockenen Restmüll festgestellt [41].

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 Galvanik-industrie 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 Gesamtgehalt im Restabfall beträgt 146 mg/kg. Die höchsten Gehalte wurden aufgrund des o. g. Einsatzspektrums in den Analysestoffgruppen Leder/Gummi/Kork, Sonstige Verbunde und Schuhe bestimmt.

Im Labor werden chromhaltige Legierungen wegen deren Korrosionsbeständigkeit vielfach verwendet. Dies hat u. a. zur Folge, dass die von uns gezogenen Proben bei der Probenzerkleinerung zwangsläufig mit chromhaltigen Materialien in Berührung kommen. Das Ausmaß einer möglichen Chromkontamination durch die eingesetzten Schneidwerkzeuge konnte quantitativ nicht ermittelt werden; Abrieberscheinungen an den Mahlwerkzeugen der verwendeten Schneidmühlen waren allerdings durchaus sichtbar.

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 [59].

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

Hauptmassträger sind die Feinfraktion und Inertes, was bereits durch geogene Einträge begründet werden kann. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass zum einen stark eisenhaltige Analysestoffgruppen 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 Analysewerten; bei den ermittelten Werten handelt es sich um Mindestgehalte.

Kupfer

Kupfer ist für viele Organismen essentiell. Erst bei zu starker Resorption 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. in Wärmetauschern, eingesetzt. Große Kupfermengen werden für Legierungen (Bronze, Messing, Rotguss, Neusilber, Konstantan usw.) benötigt. Daneben finden Kupfer und seine Verbindungen Anwendung als Legierungsbestandteil rostfreier Stähle, in Akkumulatoren, Katalysatoren sowie als Farbpigmente für Glasuren und Email und beim Vernickeln von Glas, Porzellan, Keramik [63].

Im Restmüll sind pro kg etwa 156 mg Kupfer {241 mg/(kg TM)} enthalten, wovon der Hauptanteil auf die Analysestoffgruppe Elektronikschrott entfällt. Das breite Anwendungsspektrum von Kupfer schlägt sich auch in den Gehalten der Analysestoffgruppen Sonstige Verbunde, Textilien, Mittel- und Feinfraktion sowie Verbundverpackungen nieder. In [29] werden für Restmüll Gehalte von 124 – 795 mg/(kg TM) genannt, die vorliegenden Ergebnisse bewegen sich innerhalb dieser Spanne.

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 270 mg/kg vor. Den größten Beitrag dazu liefert die Analysestoffgruppe Feinfraktion mit fast 2,1 g pro kg Trockenmasse.

Nickel

In geringen Mengen soll Nickel essentiell für den menschlichen Organismus sein; allerdings geht von Nickel auch ein gewisses Allergiepotezial aus, soweit ein dauerhafter Hautkontakt mit nickelhaltigen Gegenständen vorliegt. Daneben werden nickelhaltige Stäube und einige Nickelverbindungen auch als karzinogen eingestuft [59].

Ähnlich wie Kupfer kommt Nickel v. a. in Legierungen in der Analysestoffgruppe Elektronikschrott vor. Wie auch Chrom wird Nickel insbesondere bei hochlegierten Stählen eingesetzt, die u. a. in den im Labor eingesetzten Arbeitsmitteln Verwendung finden und eventuell mit dem Probengut in Berührung kommen. Auf eine Verfälschung der Analysewerte aufgrund von Abrieb bei der Probenaufbereitung – analog zu Chrom – kann jedoch nicht geschlossen werden, da im Vergleich zu [29] keine erhöhten Werte festgestellt wurden.

Der Gesamtgehalt an Nickel im Restmüll beträgt 16 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, in Schaltelementen von 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.

Die höchsten Quecksilbergehalte liegen neben der Analysestoffgruppe Sonstige Verbunde in der Stoffgruppe Sonstige Kunststoffe vor, bei denen jeweils ein hoher Einzelwert vorliegt. Insgesamt wurde für Restmüll aus Haushalten ein Quecksilbergehalt von 0,153 mg/kg bestimmt.

Die Abb. 17 zeigt die Verteilung der Quecksilbergehalte.

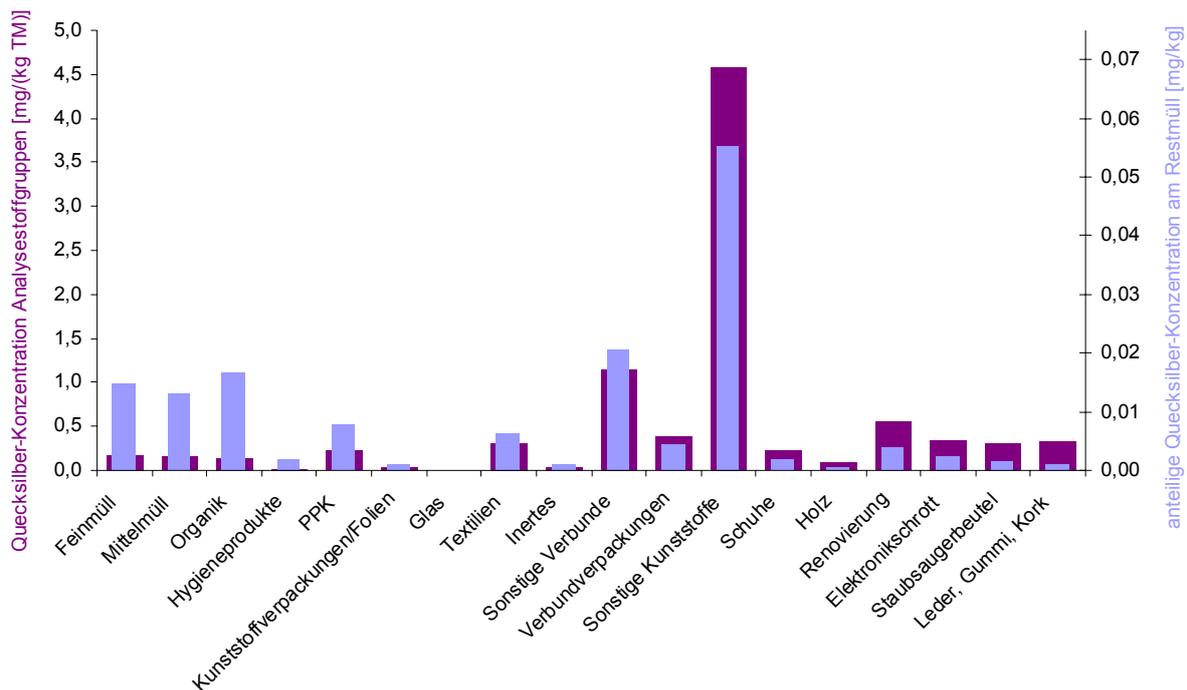


Abb. 17: Quecksilbergehalte der Analysestoffgruppen (linke Ordinate) und deren Beitrag zum Restmüll (rechte Ordinate)

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 [29, 58, 59]. Daneben ist Zink auch in Medikamenten, Kosmetika etc. zu finden.

Im Restmüll tritt Zink vor allem in den Analysestoffgruppen Leder/Gummi/Kork, Inertes, Sonstige Verbunde, Schuhe und Elektronikschrott im Promillebereich auf.

Pro kg Restmüll sind insgesamt 365 mg Zink {564 mg/(kg TM)} enthalten. Im Vergleich zu [29], 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, obwohl v. a. von organischen Zinnverbindungen durchaus eine stark toxische Wirkung ausgehen kann.

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 [29, 58, 59]. Letzteres erklärt die erhöhten Gehalte im Elektronikschrott. Der Gehalt von Zinn in den Analysestoffgruppen beträgt 11,4 mg/kg Restmüll (feucht). Der tatsächliche Zinngehalt im Restmüll liegt aufgrund der nicht beprobten Stoffgruppe der Metalle (z. B. Konservendosen) mit Sicherheit höher.

Tab. 23: Schwermetallgehalte der Analysestoffgruppen (Trockenmasse) und vom Restmüll (feucht); alle Werte in mg/kg

Analysestoffgruppe	Blei	Cadmium	Chrom	Eisen	Kupfer
Feinmüll	269	< 5,0	209	21.430	154
Mittelmüll	47	< 5,0	101	4.981	251
Organik	12	< 5,0	33	< 2.000	18
Hygieneprodukte	46	< 5,0	34	2.613	23
Papier, Pappe, Kartonagen	20	< 5,0	25	2.263	57
Kunststoffverpackungen/Folien	77	14,0	59	2.018	71
Glas	3.176	9,5	109	< 2.000	23
Textilien	165	< 5,0	194	2.305	281
Inertes	1.556	< 5,0	265	11.475	84
Sonstige Verbunde	1.580	11,3	3.218	6.625	313
Verbundverpackungen	49	< 5,0	49	2.363	169
Sonstige Kunststoffe	90	12,0	109	2.185	56
Schuhe	175	5,0	2.436	2.103	31
Holz	41	< 5,0	26	< 2.000	25
Renovierung	211	5,2	106	2.870	124
Elektronikschrott	1.416	< 5,0	154	2.498	14.193
Staubsaugerbeutel	82	< 5,0	168	7.203	112
Leder, Gummi, Kork	442	6,5	4.814	5.923	111
Restmüll feucht	225	3,6	146	3.505	156

Tab. 23 (Forts.): Schwermetallgehalte der Analysestoffgruppen (Trockenmasse) und vom Restmüll (feucht); alle Werte in mg/kg

Analysestoffgruppe	Mangan	Nickel	Quecksilber	Zink	Zinn
Feinmüll	2.052	54,6	0,175	581	13,1
Mittelmüll	301	24,9	0,157	390	12,0
Organik	< 150	< 15,0	0,142	66	< 10,0
Hygieneprodukte	192	< 15,0	0,021	211	< 10,0
Papier, Pappe, Kartonagen	< 150	< 15,0	0,217	47	< 10,0
Kunststoffverpackungen/Folien	179	18,0	0,032	355	12,0
Glas	157	< 15,0	« 0,001	216	14,5
Textilien	< 150	< 15,0	0,304	513	10,3
Inertes	219	23,0	0,038	4.380	63,3
Sonstige Verbunde	< 150	57,0	1,143	3.312	33,5
Verbundverpackungen	< 150	16,3	0,377	110	30,3
Sonstige Kunststoffe	161	16,0	4,587	375	38,8
Schuhe	< 150	< 15,0	0,225	2.005	16,0
Holz	< 150	< 15,0	0,084	63	< 10,0
Renovierung	170	29,8	0,550	766	35,2
Elektronikschrott	262	231,3	0,351	1.652	350,5
Staubsaugerbeutel	330	41,0	0,304	413	17,3
Leder, Gummi, Kork	216	17,8	0,330	5.822	19,8
Restmüll feucht	270	15,7	0,153	365	11,4

Sonstige Metalle

Neben den im vorangegangenen Abschnitt behandelten Schwermetallen wurden noch weitere, mehr oder weniger umweltrelevante Metalle wie Aluminium, Arsen und Titan in den einzelnen Analysestoffgruppen bestimmt; vgl. Tab. 24.

Aluminium ist in dreiwertiger Form für Fische toxisch. Beim Menschen ist keine akut toxische Wirkung bekannt.

Der Aluminiumgehalt von Restmüll beträgt 10,8 g/kg. Hauptsächlich erfolgen Aluminiumeinträge in den Restmüll neben der nicht untersuchten Stoffgruppe NE-Metalle durch Inertes (z. B. in Form von Alumosilikaten), Leder/Gummi/Kork, Verbundverpackungen (metallisch) und die Feinfraktion.

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 7,9 mg/kg. Einsatz findet Arsen in Legierungen, Halbleitern, farbigem Glas und Pigmenten [29, 58, 63]. Dementsprechend wurde der höchste Arsengehalt auch in der Analysestoffgruppe Glas bestimmt. Der frühere Einsatz von Arsen in Pflanzenschutzmitteln [58, 59] 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 vielfältig bei der Herstellung von Kunststoffen, Farben, Gummi, Papier, Keramik und Kosmetika verwendet [59].

Im Restmüll findet man – auf alle Stoffgruppen verteilt, hauptsächlich in der Analysestoffgruppe Kunststoffverpackungen – pro kg 1,2 g Titan.

Tab. 24: Gehalt von Aluminium, Arsen und Titan der Analysestoffgruppen (Trockenmasse) und von Restmüll (feucht); alle Werte in mg/kg

Analysestoffgruppen	Aluminium	Arsen	Titan
Feinmüll	21.871	5,3	2.737
Mittelmüll	15.157	< 5,0	1.433
Organik	< 15.000	< 5,0	< 1.000
Hygieneprodukte	< 15.000	< 5,0	< 1.000
PPK	< 15.150	< 5,0	< 1.000
Kunststoffverpackungen/Folien	< 15.000	5,5	8.095
Glas	< 15.000	149,5	< 1.000
Textilien	< 15.000	< 5,0	1.283
Inertes	67.875	8,0	2.483
Sonstige Verbunde	< 15.000	14,3	3.363
Verbundverpackungen	18.375	< 5,0	1.678
Sonstige Kunststoffe	< 15.000	< 5,0	2.880
Schuhe	< 15.000	< 5,0	2.320
Holz	< 15.000	< 5,0	1.028
Renovierung	< 15.000	< 5,0	4.844
Elektronikschrott	< 15.000	6,5	4.163
Staubsaugerbeutel	< 15.000	5,3	1.293
Leder, Gummi, Kork	26.600	5,3	1.993
Restmüll feucht	10.834	7,9	1.175

4.2.3 Organische Inhaltsstoffe

Mit Ausnahme der Analysestoffgruppen Inertes und Glas wurden die organischen Schadstoffverbindungen an jeweils 1 bis 4 Einzelproben der Analysestoffgruppen bestimmt. Ein größerer Probenumfang war im Projektzeitraum nicht analysierbar, da die Aufbereitung und Extraktion der Abfallfraktionen insbesondere aufgrund der matrixspezifischen Querempfindlichkeiten eine große analytische Herausforderung darstellten. Die Anmerkungen zu den einzelnen organischen Schadstoffverbindungen bez. Herkunft und Vorkommen erfolgen u. a. entsprechend der Angaben nach [59, 73, 64].

4.2.3.1 Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Untersucht wurden die 16 PAK nach EPA. In Abb. 18 sind die PAK-Konzentrationen in den Analysestoffgruppen (trocken) dargestellt.

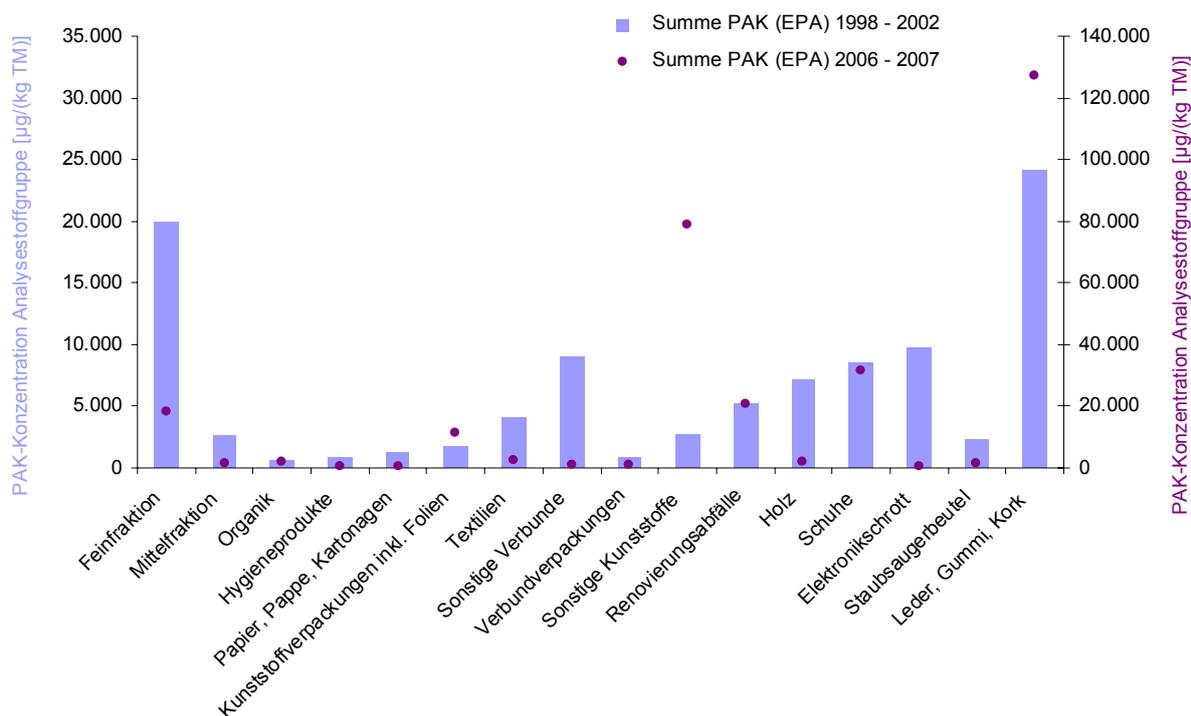


Abb. 18: Konzentration der Summe der PAK in den einzelnen Analysestoffgruppen 2006-2007 (rechte Ordinate) in Vergleich zu den in [8] ermittelten Werten (linke Ordinate)

Die höchste PAK-Konzentration von über $126.968 \mu\text{g}/(\text{kg TM})$ wurde in der Analysestoffgruppe Leder/Gummi/Kork ermittelt. Im Restmüll beträgt der Gesamtgehalt an PAK nach EPA $4.171 \mu\text{g}/\text{kg}$.

In die Umwelt gelangen PAK v. a. über unvollständig ablaufende Verbrennungsprozesse (Anlagerung an Staub- und Rußpartikel); PAK sind aber auch teilweise Bestandteil von Klebstoffen und werden bei der Lederverarbeitung und Gummiproduktion eingesetzt, was die hohen Gehalte in der Stoffgruppe Leder/Gummi/Kork erklärt [65, 66].

4.2.3.2 Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Polychlorierte Biphenyle wurden u. a. als Zusätze in Kunststoffen, Papierbeschichtungen, Klebstoffen, Imprägnier- und Flammschutzmitteln sowie Kondensatoren verwendet [58, 67]. 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 [67, 68]. Diese wurden im Rahmen dieses Vorhabens bestimmt.

Bezogen auf die Indikatorkongenere weist Restmüll pro kg einen PCB-Gehalt von 59 µg {91,3 µg/(kg TM)} auf. Die höchsten Gehalte wurden für die Analysestoffgruppe Renovierungsabfälle {2.350 µg/(kg TM)} und Leder/Gummi/Kork {5.040 µg/(kg TM)} ermittelt (siehe Abb. 19). 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 [67]. Auch bei den PCB scheinen demnach die Verbotsbestimmungen [22] zu greifen.

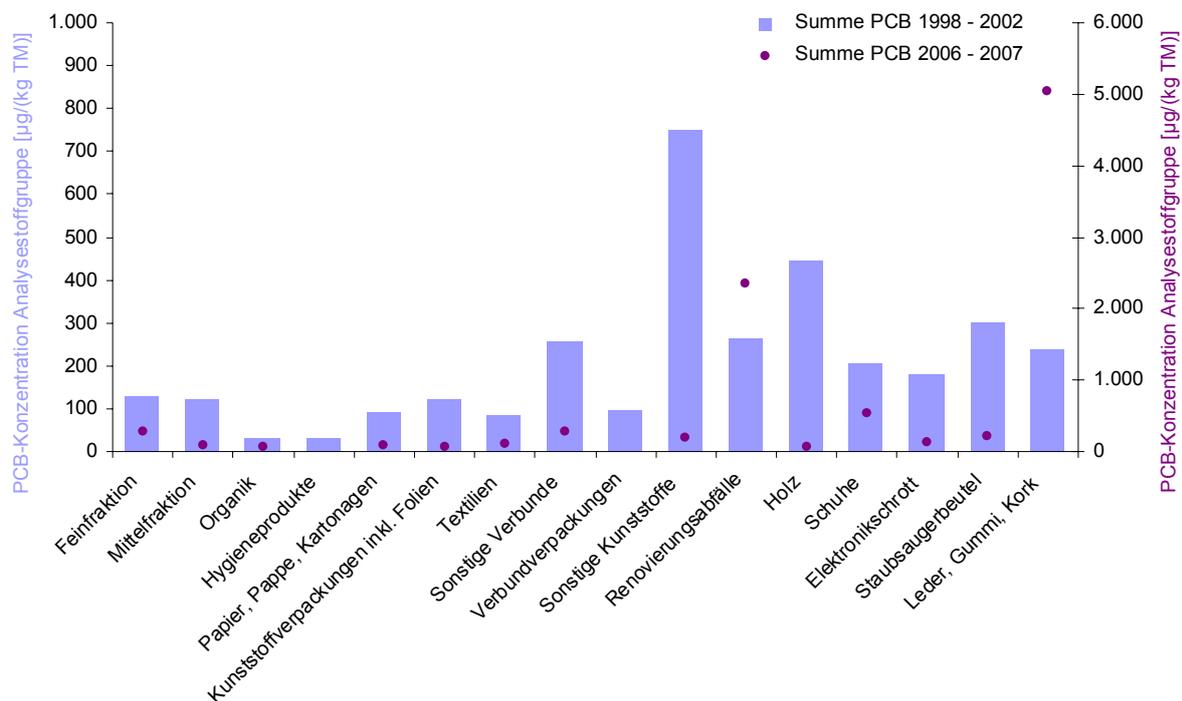


Abb. 19: PCB-Gehalte der einzelnen Analysestoffgruppen 2006 -2007 (rechte Ordinate) im Vergleich zu den in [8] ermittelten Werten (linke Ordinate)

4.2.3.3 Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/F)

Gezielt produziert werden Dioxine/Furane nicht; sie kommen vor allem 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 Persistenz sind sie ubiquitär vorhanden [59].

In den Analysestoffgruppen wurden die polychlorierten Dibenzodioxine und -furane entsprechend der 17. BImSchV [32] analysiert. Bekanntester Vertreter ist das 2,3,7,8-Tetrachlordibenzo-p-dioxin, das Kongener mit der höchsten Toxizität.

Insgesamt weist der feuchte Restmüll eine PCDD/F-Konzentration von 5,9 ng I-TEQ/kg auf. Die höchsten Gehalte wurden in der (trockenen) Analysestoffgruppe Leder/Gummi/Kork mit 134 ng I-TEQ/(kg TM) ermittelt.

Die Literaturangaben für PCDD/F-Gehalte im Restmüll bewegen sich von 10 – 256 ng I-TEQ/(kg) und liegen im Mittel bei 50 ng I-TEQ/kg [57, 69, 70, 71]. Bei diesen Angaben handelt es sich um Untersuchungen aus den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts.

Die Ergebnisse einer aktuellen spanischen Studie [72, 73] aus dem Jahr 2000 korrelieren größtenteils mit unseren Werten: bei der Probenahme aus unsortiertem Restmüll wurden PCDD/F-Gehalte von 2 bis 9 ng I-TEQ/kg, eine Probe mit 64 ng I-TEQ/kg ermittelt. 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.

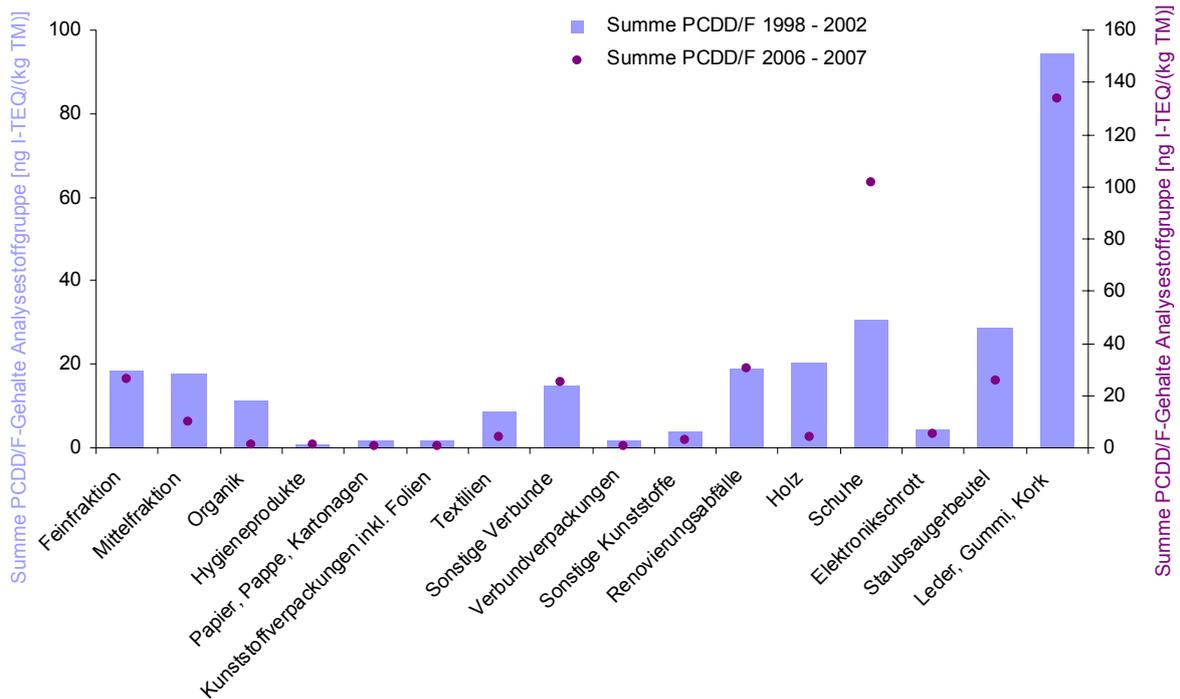


Abb. 20: PCDD/F-Gehalte der einzelnen Analysestoffgruppen 2006-2007 (rechte Ordinate) im Vergleich zu den in [8] ermittelten Werten (linke Ordinate)

5 Öffentlichkeitsarbeit

Pressetermine während der Sortierkampagnen und/oder die Vorstellung der Ergebnisse nach Abschluss der Sortieranalysen wurden vom LfU bei den Gebietskörperschaften angeregt, um den Bürger vor Ort über das EFRE-Vorhaben und die Ergebnisse der Sortieranalyse informieren zu können.

Folgende öffentlichkeitswirksame Termine wurden durchgeführt:

Im Landkreis L15 wurden nach Abschluss der Analyse im Februar 2007 die Ergebnisse der Sortieranalyse vor dem Umweltausschuss des Kreistages vorgestellt und angeregt diskutiert; in dem Pressebericht über die Ausschusssitzung fanden andere Themen mehr Bedeutung.

In der Gebietskörperschaft L16 war ein Pressetermin während der zweiten Sortierwoche im Juni 2006. Journalisten von regionalen Tageszeitungen informierten sich vor Ort über die Durchführung der Sortierung und die im Winterhalbjahr erzielten Ergebnisse. In zwei Artikeln wurde die Öffentlichkeit über den Pressetermin und das Vorhaben unterrichtet. Nach Vorlage der Gesamtergebnisse berichtete die Presse abermals (basierend auf einer Pressemitteilung des Landratsamtes); dabei wurde die Zunahme des Restmüllaufkommens und des maximalen Wertstoffpotenzials in dichter bebauten Gebietsstrukturen thematisiert.

Im Landkreis L18 fand im November 2006 ebenfalls während der zweiten Sortierwoche „vor Ort“ ein Pressetermin mit dem Landrat, den Mitgliedern des Umweltausschusses des Kreistages und Reportern von Tageszeitungen statt. Die bis dato erzielten Ergebnisse wurden eingehend diskutiert. Die Lokalpresse berichtete darüber in zwei Artikeln.

Der Pressetermin im Landkreis L19 wurde im Juni 2007 während der zweiten Sortierwoche gemeinsam mit dem Landrat durchgeführt. Über den Pressetermin und erste Ergebnisse informierte die regionale Tageszeitung den Bürger.

Im Landkreis L20 war während der zweiten Sortierwoche eine Pressemitteilung des Landratsamtes Anlass zu einem Artikel über die Vorgehensweise bei der Restmüllanalyse. Nach Vorliegen der Endergebnisse wurden diese vor dem Umweltausschuss präsentiert und diskutiert; die regionale Tageszeitung berichtete darüber.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Das Forschungsprojekt „Restmüllzusammensetzung in Phasing-Out-Gebieten (EU Ziel-2-Programm Bayern): Abschöpfbares Wertstoffpotenzial als Funktion abfallwirtschaftlicher Rahmenbedingungen“ mit einer Laufzeit von zwei Jahren hat statistisch abgesicherte Erkenntnisse zum durchschnittlichen Restmüllaufkommen und dessen Zusammensetzung in den Phasing-Out-Gebieten Bayerns geliefert. Aufgrund der einheitlichen Vorgehensweise bei der Planung und Durchführung der Restmüllsortieranalysen war ein direkter Vergleich der Ergebnisse der unterschiedlichen Gebietskörperschaften möglich. Zudem konnten somit wesentliche Einflussfaktoren der Restmüllzusammensetzung identifiziert werden.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Sortierungen in den sechs Landkreisen waren das erheblich höhere Restabfallaufkommen und Wertstoffpotenzial in den städtischen und innerstädtischen Gebietsstrukturen besonders auffällig. Daraus lassen sich mögliche Handlungsempfehlungen ableiten, die beispielsweise eine verstärkte Abfallberatung und Öffentlichkeitsarbeit in den betroffenen Gebieten beinhalten und mit den Gebietskörperschaften zu konkretisieren sind.

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 anhand von Sortieranalysen auch nicht beantwortet werden.

Für die genannten Wertstoffe zeigt sich, dass durch die Erfassung im „bequemerem“ Holsystem der verbleibende Anteil im Restmüll deutlich gesenkt werden kann. Die Ausschöpfung der Erfassungsquoten von Wertstoffen hängt jedoch zusätzlich von den sog. „weichen“ Faktoren ab, wie beispielsweise die Art der Gebührenberechnung und deren Akzeptanz in der Bevölkerung, die Entfernung Wohnung – Depotcontainer/Wertstoffhof und die Wohnverhältnisse. Durch das Zusammenspiel der verschiedenen Faktoren ist der jeweilige Einfluss nicht zweifelsfrei bestimmbar.

Um eindeutigere Aussagen zum Einfluss der „weichen“ Faktoren treffen zu können, ist eine genauere Betrachtung des Abfalls aus Privathaushalten insgesamt notwendig. Derzeit werden in einer der im Rahmen des Projektes beprobten Gebietskörperschaft beispielhaft die Entsorgungswege neben der Restmülltonne für Abfälle aus Haushaltungen (Hol-/Bringsysteme für Wertstoffe wie Papier, Verpackungen, Sperrmüll etc.) untersucht, um die lokale Entsorgungssituation möglichst ganzheitlich abzubilden.

7 Literatur

- [1] Anonym:
Vierte Verordnung zur Änderung der Verpackungsverordnung vom 30. Dezember 2005.
BGBl. I (2006) 1, S. 2 – 5
- [2] Anonym:
Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG). Vom 16. März 2005. BGBl. I (2005) 17, S. 762 – 774
<http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/elektrog.pdf>
- [3] Anonym:
Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und sonstigen Entsorgung von Abfällen in Bayern (Bayerisches Abfallwirtschaftsgesetz - BayAbfG). Vom 9. August 1996.
GVBl (1996) 18, S. 396 – 404; zuletzt geändert am 05.04.2006, GVBl (2006) 7, S. 178 – 179
- [4] Baghoorn, M.; Gössele, P.; Kaworski, W.:
Bundesweite Hausmüllanalyse 1983 – 1995. Auftrag des Umweltbundesamtes an die TU Berlin. UBA-Forschungsbericht 103 03 508.
Berlin 1986, 317 S.
- [5] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen:
Abfallwirtschaft – Hausmüll in Bayern – Bilanzen 1988/89 und Ausblick.
München 1991, 66 S.
- [6] Bayerisches Landesamt für Umwelt:
Abfallwirtschaft – Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2005.
Augsburg 2006, 78 S.
- [7] Amann, H.:
Menge und Zusammensetzung von Hausmüll in Bayern in den Jahren 1992 bis 1996.
Diplomarbeit Fachhochschule München, München 1998, 87 S.
- [8] Bayerisches Landesamt für Umwelt:
Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen. Abschlussbericht.
Augsburg 2003, 80 S.
- [9] Landesumweltamt Brandenburg:
Richtlinie für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle im Land Brandenburg. Teil I. In: Müll-Handbuch: Sammlung und Transport, Behandlung und Ablagerung sowie Vermeidung und Verwertung von Abfällen, Band 2. Hrsg.: Hösel, G.; Bilitewski, B.; Schenkel, W.; Schnurer, H..
Erich Schmidt Verlag, Berlin. Kennzahl 1706, Lfg 7/99, 24 S.
- [10] Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie:
EU-Regionalförderung, Ziel-2-Programm Bayern 2000-2006.
http://www.stmwivt.bayern.de/EFRE_2000-2006/Dokumente/EU-Regionalforderung.pdf
- [11] Bilitewski, B.; Härdtle, G.; Marek, K.:
Abfallwirtschaft – Eine Einführung.
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1991, 634 S.
- [12] Eder, G.; Barghoorn, M.; Brey, E.; Doberstein, J.; Fuchs, J.; Gössele, P.:
Einflussgrößen bei häuslichen Abfällen. Auftrag des Umweltbundesamtes an die TU-Berlin.
UBA-Forschungsbericht 103 03 503.
Erich Schmidt Verlag, Berlin 1983, 151 S.

- [13] Abbe, A.; Pohlmann, M.; Schietinger, G.; Stretz, J.; Zachäus, D.:
Zusammenführung und gemeinsame Auswertung von Hausmüllanalysen.
Abfallwirtschaftsjournal (1998) 3, S. 17 – 21
- [14] Nolting, B.:
Restmüllanalyse im Landkreis Schweinfurt. Auftrag des Landkreises Schweinfurt an die ARGUS.
Berlin 1996, 43 S.
- [15] Anonym:
Dritte Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz.
Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen – TA Siedlungsabfall. Vom 14. Mai 1993.
BAnz. 45 (1993), S. 3 – 51
- [16] Verband kommunaler Fuhrparks und Stadtreinigungsbetriebe (VKF), heute: Verband Kommunale Abfallwirtschaft und Stadtreinigung e. V. (VKS):
Merkblatt M1 – M4: Müllanalysen.
Köln 1964
- [17] Thüringer Ministerium für Umwelt und Landesplanung:
Merkblatt zur Durchführung von Hausmüllanalysen.
St. Anz. (1993) 20, S. 767 – 768
- [18] Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie:
Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachen.
Dresden 1998
- [19] Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen:
Leitfaden für die Analyse zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung von Abfällen aus Haushaltungen.
Materialien Nr. 47, Essen 1998, 127 S.
- [20] Anonym:
Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (KrW-/AbfG – Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz). Vom 27. September 1994.
BGBl. I (1994) 66, S. 2705 – 2728; zuletzt geändert am 21.08.2002, BGBl. I (2002) 59, S. 3302 – 3317
- [21] 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 – 1491; zuletzt geändert am 09.09.2001, BGBl. I (2001) 47, S. 2331 – 2339
- [22] Anonym:
Verordnung über Verbote und Beschränkungen des Inverkehrbringens gefährlicher Stoffe, Zubereitungen und Erzeugnisse nach dem Chemikaliengesetz (ChemVerbotsV – Chemikalien-Verbotsverordnung). In der Fassung vom 19. Juli 1996.
BGBl. I (1996) 39, S. 1151 – 1166, 1498; zuletzt geändert am 19.05.2003, BGBl. I (2003) 20, S. 712 – 714
- [23] Thomé-Kozmienzky, K.J.:
Thermische Abfallbehandlung.
EF-Verlag, Berlin 1994, 1081 S.

- [24] Bank, M.:
Basiswissen Umwelttechnik, 3. aktualisierte und erw. Auflage.
Vogel-Verlag, Würzburg 1995, 1429 S.
- [25] Maystre, L.Y.; Viret, F.:
A goal-oriented characterization of urban waste.
Waste Management & Research 13 (1995), S. 207 – 218
- [26] 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
- [27] 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
- [28] Weigand, H.; Marb, C:
Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Restmüll aus Haushaltungen – Teil III: Physikalisch-chemische Eigenschaften und Schadstoffgehalte.
Müll und Abfall 38 (2006) 5, S. 236 – 246.
- [29] Mast, P.-G.; Süßkraut, G.; van den Elsen, H.; Steketee, J.; Duzijin, R.:
Einfluss der Abfallzusammensetzung auf Schadstoffgehalt und -menge der Verbrennungsrückstände. Auftrag des Umweltbundesamtes an die TauUmwelt GmbH. UBA-Forschungsbericht 103 1090.
Berlin 1996
- [30] Blume, J.:
Die optimale Restmüllentsorgungstechnologie: biologisch und/oder thermisch?
Müll und Abfall 28 (1996) 3, S. 157 – 168
- [31] Hessische Landesanstalt für Umwelt (Hrsg.):
Systemvergleich Restabfallbehandlung.
Schriftenreihe der Hessischen Landesanstalt für Umwelt: Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Heft 167.
Wiesbaden 1994
- [32] Anonym:
Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über Verbrennungsanlagen für Abfälle und ähnliche brennbare Stoffe – 17. BImSchV). Vom 23. November 1990.
BGBl. I (1990) 64, S. 2545 –2553, ber. BGBl. I (1990) 70, S. 2832; zuletzt geändert BGBl. I (2001) 40, S. 1950 – 2022

- [33] 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
- [34] 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
- [35] Cuhls, C.; Schöneborn, C.; Kraus, M.; Jaekel, F.; Schnoor, E.:
Untersuchung von Elektro-Kleingeräten im Siedlungsabfall mit RFA, ICP-AES, ICP-MS und AAS – ein Methodenvergleich.
Müll und Abfall 31 (1999) 12, S. 716 – 727
- [36] Bayerisches Landesamt für Umwelt:
Interner Bericht: Restmüllsortieranaysen 1998/99, 2002 und 2004/05.
Augsburg 2005, 30 S.
- [37] Bayerisches Landesamt für Umwelt:
Abfallwirtschaft – Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2005.
<http://www.abfallbilanz.bayern.de/>, aufgerufen am 16.11.2007
- [38] Anonym:
Gemeindeordnung für den Freistaat Bayern (Gemeindeordnung - GO). Fassung vom 22. August 1998.
GVBl (1998) 21, S. 796 – 826; zuletzt geändert am 10.04.2007, GVBl (2007) 8, S. 271 – 275
- [39] 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 Ic, Band 7: Elektronikschrott Projekt Steiermark.
Graz 1998
- [40] 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
- [41] Greiner, B.; Barghoorn, M.; Dobberstein, J.; Eder, G.; Fuchs, J.; Gössele, P.:
Chemisch-physikalische Analyse von Hausmüll. Auftrag des Umweltbundesamtes an die TU Berlin. UBA-Forschungsbericht 83-033.
Berlin 1983, 161 S.
- [42] Bidlingmaier, W.:
Schwermetalle im Hausmüll: Herkunft, Schadwirkung, Analyse.
Erich Schmidt Verlag, Berlin 1990

- [43] Schäfer, M.; Hoffmann, E.:
Schadstoffe in Biomüll.
Entsorgungspraxis (2000) 4, S. 15 – 19
- [44] Anonym:
DIN 38414-22 Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Teil 22: Bestimmung des Gefriertrockenrückstandes und Herstellung der Gefriertrocknungsmasse des Schlammes (S 22).
September 2000
- [45] Anonym:
DIN 38414-3 Schlamm und Sedimente (Gruppe S) – Teil 3: Bestimmung des Glührückstandes und Glühverlustes der Trockenmassen eines Schlammes (S3).
November 1985
- [46] Anonym:
DIN 51900 1-3 Bestimmung des Brennwertes mit dem Bomben-Kalorimeter und Berechnung des Heizwertes.
August 1977, zuletzt geändert April 2000
- [47] Anonym:
DIN 38406-12: Kationen (Gruppe E): Bestimmung von Quecksilber (E12).
Juli 1980
- [48] 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
- [49] Environmental Protection Agency:
Polynuclear Aromatic Hydrocarbons – Method 610.
Federal Register 44 (1979) 233, S. 69514-69517
- [50] 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
- [51] Bayerisches Landesamt für Umwelt:
Abfallwirtschaft – Hausmüll in Bayern – Bilanzen 2001.
Augsburg 2002, 76 S.
- [52] Kranert, M.:
Geschäftsmüll. Abfallwirtschaftliche Bedeutung. Menge, Zusammensetzung und Einflussgrößen.
Rhombos Verlag, Berlin, 2004, 238 S.
- [53] Quicker, P.; Fojtik, F.; Faulstich, M.:
Verfahren zur Quantifizierung von Geschäftsmüll.
Müll und Abfall 38 (2006) 10, S. 512 – 518
- [54] Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen:
Abfallbilanz Nordrhein-Westfalen für Siedlungsabfälle 2005, Kapitel 6: Bruttoabfallaufkommen S. 1
http://www.munlv.nrw.de/umwelt/pdf/abfallbilanz_2005/11__Kapitel_6_Bruttoabfall.pdf

- [55] 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.
- [56] Anonym:
Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallab-
lagerungsverordnung - AbfAbIV). Vom 20. Februar 2001.
BGBl. I (2001) 10, S. 305 – 324; zuletzt geändert BGBl. I (2006) 59, S. 2859 – 2873
- [57] Thomé-Kozmiensky, K.J.:
Verfahren und Stoffe in der Kreislaufwirtschaft.
EF-Verlag, Berlin 1995, 1089 S.
- [58] 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.
- [59] Streit, B.:
Lexikon Ökotoxikologie.
VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim 1992, 731 S.
- [60] Wolf, M.:
Flammschutzmittel und Schwermetalle in Kunststoffen.
In: Tagungsband zur Fachtagung des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutzes (Veran-
stalter): Umweltrelevante Inhaltsstoffe in Elektro(nik)altgeräten am 25.09.2001 in Augsburg.
Augsburg 2001, S. 35 – 40
- [61] Eder, G.:
Umweltbelastungen durch Verpackungen - Schadstoffe in Papier- und Kunststoffverpackun-
gen.
Hrsg. Golding, A., Fußer A.: Verpackungen - Umweltbelastung und Strategien zur Vermei-
dung.
C.F. Müller Verlag, Karlsruhe 1992, S. 17 – 30
- [62] 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
- [63] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz:
Umweltrelevante Inhaltsstoffe in Elektro- und Elektronikaltgeräten.
Augsburg 2002, 56 S.
- [64] Umweltlabor GmbH Arguk:
Info-Reihe: Schadstoffinformation.
<http://www.arguk.de>, aufgerufen am 10.04.2003
- [65] Anonym:
Möglichkeiten zum Ersatz von polyaromatischen Weichmachern.
<http://www.rubber-compounding.com>, aufgerufen am 09.04.2003
- [66] Anonym:
Branchenbezogene Merkblätter Nr. 10 – Lederverarbeitung.
<http://www.umwelt.sachsen.de/lfug/salfaweb-nt/berichte/brabl10-1.4.html>, aufgerufen am
09.04.2003

- [67] 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
- [68] 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
- [69] 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
- [70] Spahl, R.; Dorn, I.H.; Horn, H.C.; Hess, K.:
Katalytische Dioxinzerstörung für Abfallverbrennungsanlagen.
Entsorgungspraxis (1993) 5, Sonderdruck
- [71] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen:
Dioxine und Furane. Erstellt vom Bayerischen Landesamt für Umweltschutz. 1. Auflage.
München 1993
- [72] Abad, E.; Agrados, M.A.; Caixach, J.; Fabrellas, B.; Rivera, J.:
Dioxin mass balance in a municipal waste incinerator.
Chemosphere 40 (2000), S. 1143 – 1147
- [73] Abad, E.; Agrados, 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

