

# Erhebung repräsentativer Planungsdaten für die Restabfallbehandlung eines Entsorgungsgebietes

Uwe Büll, Dr. Bertram Zwisele, Dr. Margarida Nogueira und Jens Niestroj

## Dipl.-Ing. Uwe Büll

Studium des Technischen Umweltschutzes an der Technischen Universität Berlin mit dem Schwerpunkt Abfallwirtschaft, seit 1991 bei ARGUS e. V. an der TU Berlin, seit 1999 Gesellschafter und Projektleiter bei ARGUS GmbH

## Dr.-Ing. Bertram Zwisele

Studium des Technischen Umweltschutzes an der Technischen Universität Berlin mit dem Schwerpunkt Abfallwirtschaft, seit 1991 bei ARGUS an der TU Berlin, seit 1999 Geschäftsführer der ARGUS GmbH

## Dr.-Ing. Margarida Nogueira

Studium des Technischen Umweltschutzes an der Neuen Universität Lissabon, Promotion an der TU Berlin. Seit 1996 bei den Berliner Stadtreinigungsbetrieben (BSR), derzeit in der Geschäftseinheit Abfallverwertung/-beseitigung. Arbeitsschwerpunkte Stoffstrommonitoring und Grundlagenentwicklung

## Dipl.-Ing. Jens Niestroj

Studium der Chemietechnik, seit 1990 bei INTECUS GmbH, Projektleiter im Bereich Anlagenplanung / Anlagenkonzepte für die Behandlung von Siedlungsabfällen. 2001–2003 Berater der Berliner Stadtreinigungsbetriebe (BSR) bei der Entwicklung der Berliner Entsorgungskonzeption 2005

## 1. Abstract

**Die Abfallwirtschaft in Deutschland ist durch das zum 01. 06. 2005 wirksame Ablagerungsverbot nicht vorbehandelter Siedlungsabfälle im Umbruch. Um eine entsorgungssichere Behandlung der Berliner Restabfälle auch nach Mitte 2005 zu ermöglichen, muss die Abfallentsorgung in bestehenden bzw. in neu zu errichtenden Anlagen optimiert werden. Vor diesem Hintergrund wurde eine repräsentative Untersuchung der Berliner Restabfälle zur Erstellung einer Beurteilungsgrundlage für verfahrenstechnische Entsorgungsalternativen durchgeführt. In einer umfangreichen Untersuchung konnten belastbare Daten zur Teilchengrößenverteilung, zur stofflichen Zusammensetzung und zu chemisch-physikalischen Eigenschaften ermittelt werden. Insbesondere auf Grundlage der Daten zu den Wassergehalten, den Heizwerten und den Schadstoffgehalten und deren Zuordnung zu Teilchengrößenklassen und Gebietsstrukturen können optimierte Konzepte der Stoffstromtrennung entwickelt und geeignete Entsorgungstechnologien vorgeschlagen werden.**

**As of 1 June 2004 untreated municipal waste will be banned from landfilling in Germany, and thus waste management is subject of significant changes. In order to provide for waste management operations in compliance with applicable law as of mid 2005, existing treatment facilities will have to be optimised or newly erected respectively. In this context a representative survey of the Berlin residual waste has been conducted to provide the basis for the selection of several waste treatment options. This comprehensive investigation produced reliable data regarding waste composition, distribution according to particle size, and physico-chemical waste properties. Especially the results on water content, calorific value, and the content of harmful substances according to sieve classes and residential structures allow to develop optimum concepts for a waste stream separation and to propose appropriate waste treatment operations.**

## 2. Veranlassung und Zielsetzung

Die Berliner Stadtreinigungsbetriebe BSR haben 2002/03 eine umfangreiche Untersuchung des Berliner Restabfalls aus der Systemabfuhr<sup>1</sup> veranlasst mit dem Ziel, grundlegende Informationen über die Qualität

<sup>1</sup> Der Restabfall aus der Systemabfuhr entspricht weitgehend dem Berliner Haus- und Geschäftsmüll. Es ist zu berücksichtigen, dass ein nicht weiter quantifizierbarer Anteil gewerblicher Abfälle von privaten Entsorgungsunternehmen ebenfalls im Umleerverfahren abgefahren wird, der aber aufgrund der spezifischen Berliner Verhältnisse dem haushälterischen Gewerbeabfall zugeordnet wird.

der Abfälle für die Planung und den Betrieb von Abfallbehandlungsanlagen zu erhalten. Die Untersuchung der Abfalleigenschaften wurde verfahrensunabhängig konzipiert, d. h. die ermittelten Untersuchungsergebnisse wurden nicht für bestimmte vorgegebene verfahrenstechnische Lösungen ermittelt, sondern sollten unabhängig von der einzusetzenden Verfahrenstechnik anwendbar sein.

Die Eigenschaften des Berliner Restabfalls aus der Systemabfuhr wurden durch eine repräsentative Untersuchung auf Stichprobenbasis ermittelt, die von ARGUS GmbH geplant und durchgeführt wurde. Die Untersuchung beinhaltete vier jahreszeitlich versetzte Kampagnen (Sommer 2002 bis Frühjahr 2003) und umfasste die repräsentative Probenahme, die Siebklassierung, die Sortierung, die Analytik sowie die Auswertung und Qualitätssicherung.

Folgende Eigenschaften des Berliner Restabfalls aus der Systemabfuhr wurden ermittelt:

- ◆ Bestimmung der Teilchengrößenverteilung des Berliner Restabfalls durch eine Siebklassieren nach fünf Teilchengrößenklassen (Siebfractionen),
- ◆ Bestimmung der Zusammensetzung des Berliner Restabfalls nach Stoffgruppen durch eine Sortieranalyse (separat für jede Siebfraction),
- ◆ Bestimmung der relevanten chemisch-physikalischen Eigenschaften des Berliner Restabfalls (Wassergehalt, Heizwert, Aschegehalt, oTS (Glühverlust), oTS<sub>bio</sub>, Gasbildungsrate GB 21, Chlorgehalt, EOX sowie die Schwermetalle As, Pb, Cd, Sn, Sb, Cr, Cu, Ni, Hg und Zn)

Die Eigenschaften des Berliner Restabfalls aus der Systemabfuhr sollten eine zuverlässige und belastbare Datengrundlage für die Auswahl geeigneter Abfallbehandlungsanlagen, geeigneter Aggregate und deren Anordnung schaffen. Die Untersuchungsergebnisse sollten u. a. Aufschluss über die Eignung des hochkalorischen Anteils des Berliner Restabfalls für den Einsatz als Sekundärbrennstoff oder den Einsatz des niederkalorischen Anteils in einer biologischen Behandlungsanlage geben. Zudem sollten Daten zur Beurteilung von erforderlichen aufbereitungstechnischen Maßnahmen wie Zerkleinern, Klassieren, Sortieren, Homogenisieren usw. bereitgestellt werden.

Die verfahrensunabhängigen Ergebnisse der Abfalluntersuchung wurden den Bieter bei den Ausschreibungsverfahren der BSR zur Restabfallentsorgung zur Verfügung gestellt.

## 3. Methodische Vorgehensweise

Die Teilchengrößenverteilung, die Zusammensetzung und die chemisch-physikalischen Eigenschaften des Berliner Restabfalls aus der Systemabfuhr konnten nur durch eine repräsentative Untersuchung auf Stichprobenbasis ermittelt werden. Eine grundlegende Vorgehensweise zur Durchführung von Abfalluntersuchungen ist in der „Brandenburger Richtlinie“ [2] beschrieben. Die methodische Vorgehensweise für die Untersuchung des Berliner Restabfalls aus der Systemabfuhr orientierte sich an den Vorgaben dieser Richtlinie.

Um möglichst praxisnahe Daten für die Planung bzw. den Betrieb von Abfallbehandlungsanlagen zu gewinnen, wurde bei der Probenahme der Restabfälle

von den Vorgaben der „Brandenburger Richtlinie“ in einigen Punkten abgewichen. Während gemäß „Brandenburger Richtlinie“ die Abfallproben im „Ausgangszustand“ beprobt und sortiert werden, wurde bei der aktuellen Beprobung angestrebt, weitgehend die gleichen Bedingungen wie bei einer regulären Abfallsammlung durch die BSR (Sammlung im Pressmüllfahrzeug, Zwischenlagerung in einem Abfallbunker sowie ggf. mechanische Vorbehandlung) einzuhalten. Die für das Untersuchungsziel auf diese Weise modifizierte Probenahme mit anschließender Zwischenlagerung und großtechnischer Siebklassierung führte zu Veränderungen in der stofflichen Abfallzusammensetzung aufgrund von Abbauprozessen der organischen Bestandteile und von Feuchtigkeitsübergängen vor allem zwischen Organik und Papier. Bei Vergleichen der Stoffzusammensetzung mit herkömmlichen Abfalluntersuchungen ist dies zu berücksichtigen.

Nachfolgend wird die methodische Vorgehensweise für die repräsentative Probenahme, die Analytik und die Hochrechnung und Auswertung beschrieben.

### 3.1 Probenahme

Die Herausforderung bei der Probenahme des Berliner Restabfalls bestand darin, aus der Gesamtmenge des Entsorgungsgebietes von ca. einer Million Megagramm (Grundgesamtheit) eine Probenmenge von ca. drei bis sechs Megagramm für die Klassier- und Sortieranalyse bzw. etwa einen Kilogramm für die chemisch-physikalische Analyse (Stichprobe für die CP-Analyse) zu entnehmen. Die Lösung konnte nur in einer Probenahmemethode liegen, die in einem mehrstufigen Prozess und unter Einbeziehung umfangreicher Vorkenntnisse über die Grundgesamtheit die gesamte Untersuchungsmenge Schritt für Schritt unterteilt und reduziert. Dabei muss jeder Teilungsschritt repräsentativ und der unvermeidbare Teilungsfehler quantifizierbar sein.

Subjektive Einflüsse durch den Probennehmer müssen so weit wie möglich ausgeschlossen werden. Dies wird u. a. dadurch erreicht, dass die Probenahme der Abfälle am Grundstück durch Entleerung oder Austausch der Abfallbehälter erfolgt. Damit wird eine Teilung der heterogenen Abfallmenge, die z. B. bei der Beprobung einer Fahrzeugladung unumgänglich ist, vermieden. Im weiteren Verlauf der Probenreduzierung muss strengstens darauf geachtet werden, dass Unterstichproben nur von Teilfraktionen < 40 mm Teilchendurchmesser (möglichst vom Band und nicht aus dem Haufwerk) gezogen werden. Heterogene Grobgemische mit einem Teilchendurchmesser > 40 mm müssen vor einer weiteren Probenteilung zwingend zerkleinert und homogenisiert werden.

Für die Gewinnung von Laborproben<sup>2</sup> hat sich die Sortierung einer Abfallprobe nach Stoffgruppen, die Zerkleinerung der einzelnen Stoffgruppen auf eine Teilchengröße < 2 mm und die Herstellung einer Mischprobe aus den zerkleinerten Stoffgruppen gemäß der Stoffgruppenzusammensetzung der Aus-

gangsprobe bewährt. Eine subjektive Probenahme aus einem ruhenden Haufwerk mit Teilchengrößen von bis zu 1000 mm zur Erstellung einer „handverlesenen“ Mischprobe, wie sie von Winterstein et. al. in [1] vorgeschlagen wird, ist aus methodischen Gründen äußerst kritisch zu betrachten. Eine Zufallsauswahl in diesem Fall liegt nicht mehr vor. Die durchgeführte Fehleranalyse sagt dann nichts über die tatsächliche Messwert-schwankung aus, sondern gibt lediglich Auskunft darüber, wie gut eine „handverlesene“ Mischprobe reproduziert werden kann.

#### 3.1.1 Probenahme für die Klassier- und Sortieranalyse

Ein geeignetes Verfahren zur Untersuchung von Restabfall ist die mehrstufige geschichtete Zufallsauswahl. Hierbei werden mehrere Probenahmeprozesse (Unterstichproben) nacheinander ausgeführt. Die mehrstufige geschichtete Zufallsauswahl zur Bestimmung von Menge und Zusammensetzung von Siedlungsabfällen wurde von ARGUS bislang mit großem Erfolg angewandt [3, 4, 5]. Anzahl und Größe der Probeneinheiten wurden empirisch auf Basis von vorangegangenen Abfalluntersuchungen festgelegt [6].

Bei der mehrstufigen geschichteten Zufallsauswahl wird zunächst das gesamte Untersuchungsgebiet in sogenannte Schichten nach Nutzungs- und Baustruktur, Abfallerfassungssystem und z. B. sozio-ökonomischen Faktoren gruppiert. Die Zuordnung zu Schichten ergibt sich aus Informationen und Ergebnissen von Voruntersuchungen zum jeweiligen Untersuchungsgebiet. Nach der Gruppierung in Schichten werden im ersten Auswahlschritt aus jeder Schicht lokale Gebiete (statistische Gebiete, Ortsteile oder Bezirke) mit verfügbaren Informationen zur Entsorgungs- und sozio-ökonomischen Struktur ausgewählt. Im zweiten Auswahlschritt werden aus den ausgewählten lokalen Gebieten zufällig Untereinheiten der lokalen Gebiete (Wohnblocks, Straßenzüge, o. ä.) gezogen. Im dritten Auswahlschritt werden für die lokalen Untereinheiten in der Stichprobe die Abfallbehälter durch Zufallsauswahl bestimmt. Um eine repräsentative Beprobung zu gewährleisten, sind innerhalb jeder Auswahlstufe gleiche Auswahlwahrscheinlichkeiten zu gewährleisten.

Die mehrstufige Vorgehensweise ermöglicht es, den Planungsaufwand für die Stichprobe ökonomisch zu bewältigen. Behälterverzeichnisse für die Auswahl der Abfallbehälter müssen nur für lokale Untereinheiten (z. B. Wohnblöcke) bereitgestellt werden. Mit dieser bereits mehrfach erprobten Methode kann das Abfallauf-

<sup>2</sup> Gemäß der Definition des Entwurfs LAGA PN98 vom März 2001 zur Probenahme ist eine Laborprobe eine für die Untersuchung im Labor aus einer Misch- oder Sammelprobe ggf. Einzelprobe hergestellte Teilprobe. Im Normalfall muss aus der Laborprobe eine weitere Teilprobe (die Analysenprobe) zur Bestimmung der stofflichen Eigenschaften entnommen werden.

Beschreibung der Gebietsstruktur	Kürzel	Stichprobenumfang [m <sup>3</sup> ]
Gartenreiche Außenbezirke	AB	35
City ohne Gewebe (Blockbebauung ohne wesentliche Geschäftsmüllanteile)	COG	35
City mit Gewerbe (Blockbebauung mit wesentlichen Geschäftsmüllanteile)	CMG	80
Gesamt		150

Tabelle 1: Verteilung des Stichprobenumfangs nach Gebietsstrukturen (Schichten) pro Untersuchungskampagne eliminiert

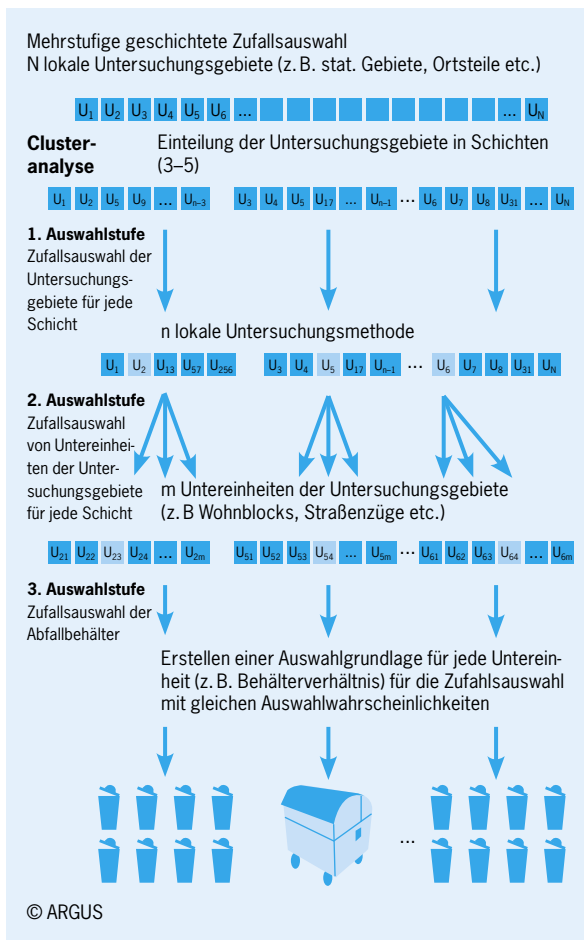


Abbildung 1: Schematische Vorgehensweise der mehrstufigen Zufallsauswahl

kommen und die Abfallzusammensetzung nach Stoffgruppen sowie die Teilchengrößenverteilung mit zuverlässiger Genauigkeit bestimmt werden.

Der erforderliche Untersuchungsumfang ergibt sich aus der Streubreite für die Stoffgruppen des Abfallstroms. Um die Gesamtmenge und die wichtigsten Stoffgruppen mit einer Genauigkeit von  $\pm 10\%$  und einer Sicherheit von 95% vorhersagen zu können, wird die erforderliche Anzahl an Stichprobeneinheiten bestimmt. Der notwendige Stichprobenumfang berechnet sich nach Gleichung 1. Für die Berechnung muss die Streubreite (natürlicher Variationskoeffizient) des Abfalls aus vorherigen Untersuchungen bekannt sein oder abgeschätzt werden. Übliche Streubreiten für Siedlungsabfälle liegen je nach Abfallart zwischen 0,3 und 0,6. [6]

$$n = \left( \frac{\text{varkoeff}(x) \cdot u_{1-\alpha}}{\epsilon_{\text{zul.}}} \right)^2 \quad \text{Gleichung 1}$$

n: notwendiger Stichprobenumfang  
 varkoeff(x): natürlicher Variationskoeffizient  
 $u_{1-\alpha}$ : Konfidenzkoeffizient für 95%-ige Sicherheit  
 $\epsilon_{\text{zul.}}$ : zulässige relative Genauigkeitsabweichung

Basierend auf den Erfahrungen von zurückliegenden Berliner Abfallanalysen wurden die Abfälle bei der aktuellen Untersuchung aus drei verschiedenen Gebietsstrukturen separat beprobt und untersucht (siehe Tabelle 1).

Bei den vier jahreszeitlich versetzten Untersuchun-

gen wurde ein Gesamtvolumen von 600 m<sup>3</sup> beprobt und anschließend untersucht.

Die Abfälle wurden am üblichen Leerungstag noch vor Eintreffen der regulären Sammelfahrzeuge beprobt. Die Stichprobenbehälter wurden, nachdem der Füllgrad protokolliert war, in ein Umleerfahrzeug der BSR entleert. Falls mehrere Restmüllbehälter an einer Stichprobenadresse vorhanden waren, wurde pro Adresse maximal 1 m<sup>3</sup> Behältervolumen beprobt. Für nicht beprobte Restabfall-Behälter wurde Behältervolumen und Füllgrad aufgenommen.

Nach Abschluss der Probenahme wurden die Abfallproben zu einer Umladeanlage transportiert, verworfen, in Deckelcontainer à 27 m<sup>3</sup> umgefüllt und bis zur anschließenden Siebanalyse zwischengelagert.

Der Probenahmeplan für die mehrstufige geschichtete Zufallsauswahl ist beispielhaft in Abbildung 1 dargestellt.

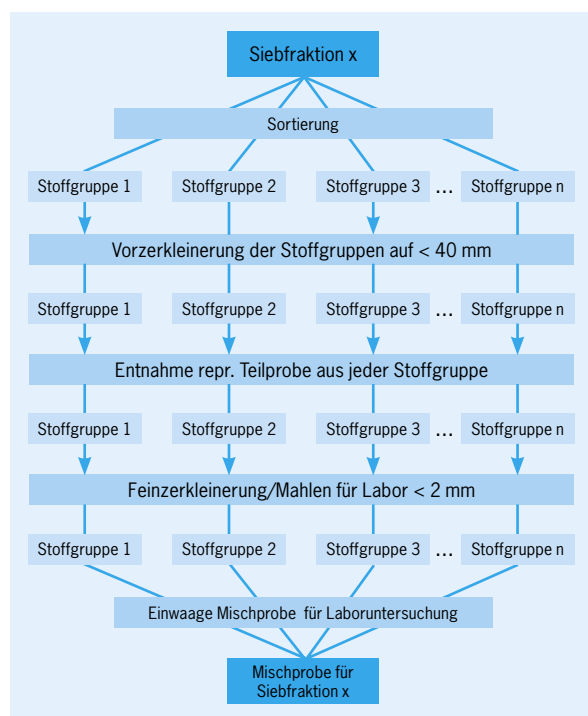
### 3.1.2 Probenahme für die Erstellung von Laborproben

Die repräsentative Beprobung des heterogenen Stoffgemisches Abfall mit dem Ziel der labortechnischen Untersuchung stellt eine besondere Herausforderung dar. Wenn man sich vergegenwärtigt, dass für die chemisch-physikalischen Analysen fein gemahlene, repräsentative Proben im Gramm-Bereich benötigt werden, wird deutlich, dass sowohl an die Probenahme als auch an die Aufbereitung der Proben besondere Anforderungen zu stellen sind.

Ausgangspunkt für die Probenahme waren die sortierten Stoffgruppen, die nach der großtechnischen Siebklassierung und der anschließenden händischen Sortierung separat für jede Siebfraktion und Gebietsstruktur vorlagen (siehe auch Kapitel 3.2.1 und 3.2.2).

Die separate Weiterbehandlung der einzelnen Stoff-

Abbildung 2: Schematische Darstellung der Probenahme und Probenaufbereitung für die chemisch-physikalischen Abfalluntersuchungen



gruppen bietet verschiedene Vorteile: Sie bewirkt einerseits eine Homogenisierung des heterogenen Abfallgemisches und erleichtert dadurch die Entnahme repräsentativer Teilproben, andererseits wird die erforderliche weitere Zerkleinerung, die jetzt gezielt in Abhängigkeit der Materialeigenschaften durchgeführt werden kann, begünstigt.

Bei der aktuellen Berliner Untersuchung wurden die einzelnen Stoffgruppen zunächst mit einer Schneidscherwalze auf etwa 40 mm vorzerkleinert. Im Anschluss wurde eine repräsentative Teilprobe entnommen. Diese Teilprobe wurde bei gleichzeitiger Wassergehaltsbestimmung getrocknet und anschließend stoffgruppenspezifisch weiter zerkleinert. Je nach Materialeigenschaft mussten hierbei für die verschiedenen Stoffgruppen unterschiedliche Zerkleinerungsaggregate (Schneidmühle bzw. Kugelmühle) eingesetzt werden. Aus den analysefein gemahlene Stoffgruppen wurden schließlich drei Mischproben erstellt, die der stofflichen Zusammensetzung der Ausgangsprobe entsprachen. Zwei der Proben wurden anschließend im Labor jeweils separat analysiert, die dritte Probe wurde als Rückstellprobe archiviert. Der Ablauf der Probenahme und -aufbereitung für die chemisch-physikalische Analyse ist in Abbildung 2 veranschaulicht.

### 3.2 Analyse

#### 3.2.1 Siebklassierung

Zwischen Probenahme und Siebklassierung wurden die Abfallproben maximal fünf Tage in verschlossenen Großcontainern (27 m<sup>3</sup> Deckelcontainer) zwischengelagert. Die Siebanalyse der beprobten Abfälle wurde in der Baumischabfall-Sortieranlage der Firma BSV GmbH + Co Berlin durchgeführt. Die installierten Siebschnitte betragen 8 mm, 45 mm, 100 mm und 180 mm.

Vor der Beschickung der Siebanlage wurden sämtliche Müllbeutel und -säcke entleert. Große Beutel und Säcke sowie sperrige Materialien wurden aussortiert und direkt der Fraktion > 180 mm zugeordnet. Die Aufgabe der Abfälle erfolgte durch einen Bagger und wurde so dosiert, dass eine ausreichende Kontaktzeit der Abfallbestandteile mit den Sieben gewährleistet war und dadurch eine zufriedenstellende Aufteilung des Abfalls nach Siebfraktionen erzielt werden konnte.

Die Abfallproben aus den drei verschiedenen Gebietsstrukturen (AB, COG und CMG) wurden jeweils separat auf die Anlage gegeben und hinsichtlich ihrer Aufteilung auf die fünf verschiedenen Siebklassen vollständig bilanziert.

#### 3.2.2 Sortierung

Da der Feinmüll (< 8 mm) nicht sortiert wurde, standen nach der Siebklassierung der Abfallproben pro Untersuchungskampagne jeweils 12 Teilmengen zur Sortierung bereit (Abfall aus drei Gebietsstrukturen mit jeweils vier Siebfraktionen). Die Siebfraktionen > 45 mm wurden jeweils vollständig sortiert. Aus der homogeneren Siebfraktion 8–45 mm wurden vor der Sortierung repräsentative Teilmengen durch eine systematische Zufallsauswahl entnommen und anschließend sortiert (8–45 mm: ca. 1/20 der Ausgangsmenge). Die Sortierung erfolgte gemäß der 1. Differenzierungs-

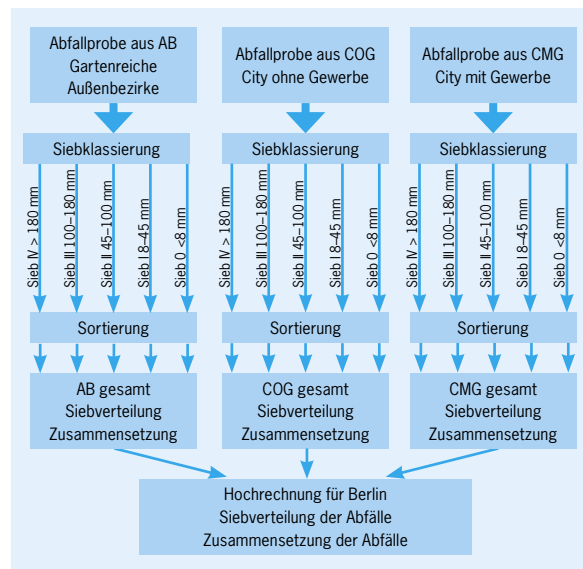


Abbildung 3: Schematische Darstellung zum Vorgehen bei der Berliner Restabfallanalyse 2002/2003

bene des Sortierkatalogs der „Brandenburger Richtlinie“ [2]. Dabei wurden die Massenanteile der Stoffgruppen bestimmt.

Das Vorgehen zur Untersuchung des Berliner Restabfalls 2002/2003 ist in Abbildung 3 nochmals veranschaulicht.

#### 3.2.3 Chemisch-physikalische Abfallanalyse

Neben der Sieb- und der Sortieranalyse wurden umfangreiche Untersuchungen zu chemisch-physikalischen Parametern des Berliner Restabfalls durchgeführt. Auch hierbei wurde das Ziel verfolgt, grundlegende Informationen über die Eigenschaften und die Qualität des künftig zu behandelnden Restabfalls zu gewinnen. Das entsprechende Probenahme-Verfahren wurde bereits unter Kapitel 3.1.2 beschrieben. Das Untersuchungsprogramm umfasste die Parameter Wassergehalt, Heizwert, Aschegehalt, oTS (Glühverlust), oTS<sub>bio</sub>, Gasbildungsrate GB 21, Chlorgehalt, EOX sowie die Schwermetalle As, Pb, Cd, Sn, Sb, Cr, Cu, Ni, Hg und Zn. Die chemisch-physikalischen Analysen wurden durch ein akkreditiertes Prüflaboratorium (GUT-Analytik GmbH, Berlin) durchgeführt.

#### 3.3 Hochrechnung und Auswertung

Auf der Grundlage einer gesicherten Probenahme erfolgte die Auswertung der vorgegebenen Untersuchungsparameter. Die Teilergebnisse wurden über eine mehrstufige geschichtete Verhältnisschätzung auf die Grundgesamtheit (gesamter Restabfall aus der Systemabfuhr) hochgerechnet und bezüglich ihrer Genauigkeit bewertet.

Als geeigneter Schätzwert für die Hochrechnung wird das Verhältnis aus Abfallmenge und verursachendem Einwohner (alternativ das bereitgestellte Behältervolumen) verwendet. Die Ergebnisse der Hochrechnung werden für die gewünschten Aggregationsebenen nach Untersuchungskampagnen, Schichten und Siebfraktionen ausgewiesen. Der Probenahmefehler wird quantifiziert und mit dem im Untersuchungsziel definierten maximal zulässigen Fehler abgeglichen.

Die Berechnungsalgorithmen für die Mittelwerte



	Bezeichnung der Schichten			Berlin 2002/03
	AB (Außenbezirke)	COG (City ohne Gewerbe)	CMG (City mit Gewerbe)	
Zahl der Einwohner*	800.735	1.431.240	1.098.133	3.330.108
Abfallaufkommen [kg/E, Wo]	4,48	4,02	7,24	5,19
Abfallaufkommen [Mg/a]	186.740	299.220	413.540	899.500
Massenanteil [%]	21 %	33 %	46 %	100 %

\*) Statistisches Landesamt Berlin, Stand 31. 12. 2001 (melderechtlich registrierte Einwohner am Ort der Hauptwohnung)

Tabelle 2:  
**Abfallaufkommen in  
Berlin 2002/03**

und Varianzen der geschichteten mehrstufigen Zufallsauswahl sind nicht trivial und werden im Rahmen dieses Beitrags allgemein für den Fall mit Q- Auswahlstufen dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird in den Formeln auf die Gewichtung durch unterschiedliche Schichtgrößen, Untersuchungsgebiete Siebklassen usw. verzichtet.

Schätzwert für den Mittelwert:

$$\mu \approx \hat{\mu} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{g=1}^Z \left[ \sum_{h=1}^L \left( \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \left( \sum_{p=1}^S \sum_{k=1}^{n_3} \sum_{l=1}^{n_4} \dots \sum_{q=1}^{n_Q} ghij\dots q \right) \right) \right] \quad \text{Gleichung 2}$$

Schätzwert für die Varianz:

$$\text{var}(\hat{\mu}) = \text{var} \left[ \frac{1}{n} \cdot \sum_{g=1}^Z \left( \sum_{h=1}^L \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{p=1}^S \sum_{k=1}^{n_3} \sum_{l=1}^{n_4} \dots \sum_{q=1}^{n_Q} ghij\dots q \right) \right] \quad \text{Gleichung 3}$$

Die Fehleranteile der einzelnen Schichten und Auswahlstufen werden mithilfe eines varianzanalytischen Modells mit zufälligen Effekten geschätzt. Der Mittelwert ist in diesem Modell mit folgendem Fehler behaftet:

$$\chi_{ij\dots q} = \mu + \varepsilon_{i,i} + \varepsilon_{II,ij} + \dots + \varepsilon_{Q,ij\dots q} \quad \text{Gleichung 4}$$

Ein geeignetes Fehlermaß für den zufälligen Gesamtfehler  $\varepsilon_{\text{Gesamt}}$  ist die Varianz:

$$\text{var}(\varepsilon_{\text{Gesamt}}) = \text{var}(\varepsilon_{i,i}) + \text{var}(\varepsilon_{II,ij}) + \dots + \text{var}(\varepsilon_{Q,ij\dots q}) \quad \text{Gleichung 5}$$

Die Varianzeffekte bzw. die Fehler, die durch die einzelnen Teilungs- und Auswahlsschritte begangen werden, lassen sich dann wie folgt berechnen:

$$\text{var}(\varepsilon_{Q,ij\dots q}) = \frac{\sum_i \sum_j \dots \sum_q (x_{ij\dots q} - \bar{x}_{ij\dots q-1})^2}{n_1 \cdot n_2 \cdot \dots \cdot (n_Q - 1)} \quad \text{Gleichung 6}$$

wobei:

- $\mu$ : Gesamtmittelwert des gesuchten Merkmals – wahrer Wert –
- $\hat{\mu}$ : geschätzter Gesamtmittelwert des gesuchten Merkmals
- $x_{ij\dots q}$ : Stichprobenmerkmal der q-ten Untereinheit
- Q: Anzahl der Stufen des mehrstufigen Verfahrens
- i,j,...,q: Laufindices für die Stufen
- Z: Anzahl der Kampagnen

- g: Laufindex für die Kampagnen
- L: Anzahl der Schichten
- h: Laufindex für die Schicht
- S: Anzahl der Siebklassen
- p: Laufindex für die Siebklassen
- $n_1$ : Stichprobenanzahl der Primäreinheiten (z. B. Untersuchungsgebiete)
- $n_2$ : Stichprobenanzahl der Sekundäreinheiten pro Primäreinheit (z. B. Restabfallbehälter)
- $n_3$ : Stichprobenanzahl der Tertiäreinheiten pro Sekundäreinheit (z. B. Teilprobe der Laborprobenaufbereitung < 40 mm)
- $n_4$ : Stichprobenanzahl der Quartäreinheiten pro Tertiäreinheit (z. B. Teilprobe der Laborprobenaufbereitung < 2 mm)
- $n_Q$ : Anzahl der Stichprobeneinheiten der untersten Stufe (Analysenprobe)
- n: Anzahl aller Einheiten der untersten Stufe in der Stichprobe  
 $n = Z \cdot L \cdot n_1 \cdot n_2 \cdot S \cdot n_3 \cdot n_4 \cdot \dots \cdot n_Q$
- $\varepsilon_{i,i}$ : zufällige (angenähert normalverteilte) Abweichung des Mittelwertes  $\mu_i$ , erste Stufe, i-te Einheit vom Gesamtmittelwert
- $\varepsilon_{II,ij}$ : zufällige (angenähert normalverteilte) Abweichung des Mittelwertes  $\mu_{ij}$ , zweite Stufe, j-te Einheit aus der i-ten Einheit erster Stufe von deren Mittelwert  $\bar{X}_i$
- $\varepsilon_{Q,ij\dots q}$ : zufällige (angenähert normalverteilte) Abweichung des Einzelwertes  $x_{ij\dots q}$  der Analysenprobe vom Mittelwert  $\mu_{ij\dots q-1}$  der vorletzten Stufe, q-te Einheit aus der die Analysenprobe stammt

#### 4. Ergebnisse der Abfalluntersuchung

Die Ergebnisse der Abfalluntersuchungen werden in zwei Kapiteln dargestellt. Kapitel 4.1 beinhaltet die Ergebnisse der Sieb- und Sortieranalyse, Kapitel 4.2 befasst sich mit den Ergebnissen der chemisch-physikalischen Untersuchungen.

##### 4.1 Ergebnisse der Sieb- und Sortieranalyse

###### 4.1.1 Abfallaufkommen

Das Pro-Kopf Abfallaufkommen in Berlin beträgt im Jahresdurchschnitt 5,19 kg/E, Wo. Die Abfälle stammen überwiegend aus der Gebietsstruktur CMG – City mit Gewerbe (46%). Aus den innerstädtischen Gebieten ohne Gewerbe stammen 33% des Berliner Restabfalls. Die Bewohner der gartenreichen Außenbezirke steuern lediglich 21% zum Berliner Abfallaufkommen bei. Der rechnerisch ermittelte Massenanteil für Geschäftsmüll am gesamten Berliner Restabfall, bestimmt durch den Abgleich der spezifischen Abfallmengen aus COG und CMG, beträgt ca. 20%.

###### 4.1.2 Abfallverteilung nach Siebschnitten

Abbildung 4 zeigt, wie sich der Restabfall aus den verschiedenen Gebietsstrukturen auf die einzelnen Siebschnitte verteilt. Dabei wird deutlich, dass der Abfall aus den gartenreichen Außenbezirken (AB) einen hohen Anteil an Abfallbestandteilen < 45 mm aufweist. Es handelt sich hierbei vorwiegend um niederkalorische Bestandteile wie Organik und Inertes. Bei den Abfällen aus Innenstadtgebieten mit hohem Gewerbean-

teil (CMG) weisen hingegen die Abfallbestandteile > 100 mm einen hohen Massenanteil von fast 50 % auf. Hierbei handelt es sich hauptsächlich um heizwertreiche Materialien wie Papier/Pappe und Kunststoff. Die Verteilung nach Siebschnitten zeigt einen durchaus typischen Verlauf für Restabfall. Auf Grundlage dieser Ergebnisse kann eine Mengenzuordnung für definierte Siebklassen (einschließlich ihrer stofflichen Eigenschaften) abgeleitet werden.

4.1.3 Abfallzusammensetzung

Tabelle 3 zeigt die stoffliche Zusammensetzung des Berliner Restabfalls, differenziert nach den verschiedenen Gebietsstrukturen.

Bei Betrachtung der Gesamt-Abfallzusammensetzung fallen im Vergleich zu früheren Berliner Untersuchungen die hohen Anteile an Papier/Pappe und an Kunststoffen sowie die geringen Anteile an organischen Abfällen, insbesondere an Küchenabfällen, auf. Ursache ist die Art der Probensammlung (Pressfahrzeug) und die vorgeschaltete großtechnische Siebklassierung der Abfallproben, bei denen jeweils eine starke Durchmischung der Abfallkomponenten und damit eine Homogenisierung eingetreten ist. Feuchte und matschige Küchenabfälle hafteten z. B. an trockenen und flächigen Abfallbestandteilen wie Papier/Pappe und Kunststofffolien an. Zudem fand eine generelle Feuchtigkeitsübertragung von feuchten zu trockenen Materialien statt.

Weiterhin fällt auf, dass sich der Abfall aus den gartenreichen Außenbezirken (AB) deutlich von den Abfällen aus den innerstädtischen Bereichen unterscheidet. Er weist weniger Fe-Metall, Glas, Kunststoff und Küchenabfälle auf als der Abfall der beiden städtischen Gebietsstrukturen. Der Anteil an Gartenabfall ist hingegen deutlich erhöht. Der Abfall aus den gewerblichen Innenstadtbereichen (CMG) weist einen sehr hohen Anteil an Papier/Pappe auf.

Interessant ist ein Blick auf die stoffliche Zusammensetzung der einzelnen Siebfractionen, wie sie in Tabelle 4 dargestellt ist. Wie erwartet, ist die Abfallzusammensetzung sehr stark von der Teilchengröße abhängig. So besteht die Siebfraction 8–45 mm (Sieb I) überwiegend aus Organik und aus Glas. Die Siebfraction Sieb II (45–100 mm) zeigt keine Besonderheiten. In den Sieben III (100–180 mm) und IV (> 180 mm) dominieren Papier/Pappe, Kunststoff und Textilien.

Für eine anlagentechnische Planung oder für den Anlagenbetrieb sind vor allem die Materialeigenschaften der Abfälle von Bedeutung. Für eine entsprechende Bewertung wurden die einzelnen Stoffgruppen den Obergruppen inert, biogen, hochkalorisch, Metall und Rest zugeordnet. Im Einzelnen wurden folgende Zuordnungen getroffen:

- ◆ Inert: Glas, Mineralstoffe, Feinmüll < 8 mm zu 40 %,
- ◆ Biogen: Organik, Feinmüll < 8 mm zu 60 %,
- ◆ Hochkalorik: Papier/Pappe, Kunststoffe, Holz, Textilien, Verbundverpackungen,
- ◆ Metall: Fe- und NE-Metalle,
- ◆ Reste (thermisch behandelbar): sonstige Verbunde, Problemstoffe, Altschuhe, Reststoffe.

Die resultierende Zusammensetzung der einzelnen Siebfractionen ist in Abbildung 5 dargestellt.

Die einzelnen Siebfractionen unterscheiden sich er-

Nr.	Stoffgruppen	Schichtbezeichnung			Berlin 2002/03
		AB (Außenbezirke)	COG (City ohne Gewerbe)	CMG (City mit Gewerbe)	
1	Fe-Metalle	1,7%	3,2%	3,4%	3,0%
2	NE-Metalle	0,5%	0,9%	0,8%	0,8%
3	Papier/Pappe	14,3%	14,4%	19,9%	16,9%
4	Glas	6,4%	10,9%	10,2%	9,6%
5	Kunststoffe	5,5%	9,8%	9,6%	8,8%
6.1	Organik Küche	9,7%	15,0%	13,9%	13,4%
6.2	Organik Garten	22,0%	4,1%	3,5%	7,5%
6.3	sonstige Organik	4,9%	5,0%	6,1%	5,5%
7	Holz	0,9%	1,1%	1,8%	1,4%
8.1	Textilien	2,6%	4,9%	3,6%	3,8%
8.2	Altschuhe	0,5%	0,8%	0,4%	0,5%
9	Mineralstoffe	6,1%	3,3%	4,0%	4,2%
10.1	Verbundverpackungen	0,9%	2,4%	2,0%	1,9%
10.2	sonstige Verbunde	1,6%	2,9%	4,0%	3,1%
11	Problemstoffe	0,3%	0,5%	0,3%	0,4%
12	Rest	5,9%	7,9%	6,5%	6,8%
0	Feinmüll < 8 mm	16,2%	12,8%	10,0%	12,2%
Gesamt		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Tabelle 3: Zusammensetzung des Berliner Restabfalls nach Gebietsstrukturen, Massenanteile in %

heblich voneinander. Deutlich ist zu erkennen, dass der Abfall < 45 mm überwiegend aus biogenem und inertem Material besteht. Mit zunehmender Siebgröße nehmen diese Gehalte kontinuierlich ab. Entgegengesetzt verhält es sich mit den heizwertreichen Materialien, deren Anteil mit zunehmender Siebgröße deutlich ansteigt. Die Siebfraction 100–180 mm besteht bereits zu etwa 40 % aus heizwertreichen Abfallbestandteilen, die Fraktion > 180 mm sogar zu fast 70 %. Die Fraktion 45–100 mm verhält sich dagegen uneinheitlich.

Bei einer Stoffstromtrennanlage mit einem üblichen Siebschnitt von etwa 60 bis 80 mm kann beispielhaft angenommen werden, dass der Abfall sich jeweils etwa zur Hälfte auf die Grob- und Feinfraktion verteilt. Bei der Feinfraktion ist eine klare Anreicherung der In-

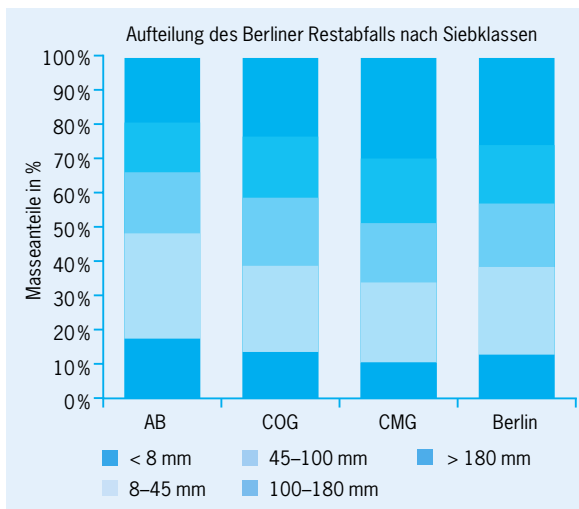


Abbildung 4: Anteile der Siebklassen in den verschiedenen Gebietsstrukturen sowie im Berliner Durchschnitt

Tabelle 4:  
Stoffliche  
Zusammensetzung  
der Siebschnitte  
(Restabfall gesamt)  
Berlin 2002/03,  
Masseanteile in %

Restabfall Berlin, gesamt		Siebschnitte					Berlin 2002/03
Nr.	Stoffgruppen	Sieb 0 (0–8 mm)	Sieb I (8–45 mm)	Sieb II (45–100 mm)	Sieb III (100–180 mm)	Sieb IV (> 180 mm)	
1	Fe-Metalle		1,1%	4,2%	4,9%	4,2%	3,0%
2	NE-Metalle		0,8%	1,4%	0,9%	0,6%	0,8%
3	Papier/Pappe		6,1%	14,7%	21,9%	34,1%	16,9%
4	Glas		19,3%	11,8%	11,5%	1,6%	9,6%
5	Kunststoffe		2,8%	9,7%	11,7%	16,4%	8,8%
6.1	Organik Küche		26,1%	18,7%	12,5%	3,7%	13,4%
6.2	Organik Garten		19,6%	5,1%	3,0%	3,8%	7,5%
6.3	Sonst. Organik		10,1%	9,5%	4,0%	1,6%	5,5%
7	Holz		0,3%	0,9%	1,4%	3,5%	1,4%
8.1	Textilien		0,3%	2,4%	3,2%	10,5%	3,8%
8.2	Altschuhe			0,1%	1,8%	0,8%	0,5%
9	Mineralstoffe		5,6%	6,7%	6,2%	1,7%	4,2%
10.1	Verbundverpackungen		0,7%	2,5%	3,4%	2,6%	1,9%
10.2	sonst. Verbunde		0,4%	1,3%	2,1%	9,5%	3,1%
11	Problemstoffe		0,2%	0,3%	0,4%	0,7%	0,4%
12	Rest		6,4%	10,9%	11,3%	4,6%	6,8%
Sieb 0	Feinmüll < 8 mm	100,0%					12,2%
Summe der Stoffgruppen		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Anteile der Siebschnitte		12,2%	26,0%	18,4%	17,8%	25,6%	100,0%

erten und der biogenen Bestandteile und bei der Grobfraction eine eindeutige Anreicherung der Hochkalorik gegeben.

4.1.4 Regionale Besonderheiten bei der Abfallzusammensetzung

Der Abfall aus Außenbezirken (AB) ist signifikant anders zusammengesetzt, als Abfall aus der Innenstadt (COG und CMG). Dies wird besonders im erhöhten Anteil an Organik und Inertien im Abfall aus den Außenbezirken deutlich und dem gleichzeitig geringen

Anteil an heizwertreichen Materialien (siehe Abbildung 6).

Nimmt man eine direkte Zuordnung des Abfalls zu Behandlungsverfahren nach rein regionalen Gesichtspunkten vor, ist es nicht empfehlenswert, den Abfall aus den Außenbezirken in großem Maße thermisch zu behandeln. Falls eine thermische Behandlung unumgänglich ist, sollte der Abfall aus den Außenbezirken ausreichend mit Innenstadtabfall bzw. Gewerbeabfall vermischt werden.

Dagegen ist der Abfall aus Außenbezirken für Stoffstromtrennanlagen mit anschließender biologischer Behandlung der Feinfraktion gut geeignet.

Innenstadtabfall mit wesentlichen Geschäftsmüllanteilen (CMG) ist hingegen eher für eine thermische Behandlung bzw. – nach einer entsprechenden Aufbereitung – für eine energetische Verwertung geeignet.

Jahreszeitliche Einflüsse sind beim Abfall aus den innerstädtischen Gebieten (COG und CMG), der fast 80 % des Berliner Restabfalls ausmacht, von untergeordneter Bedeutung.

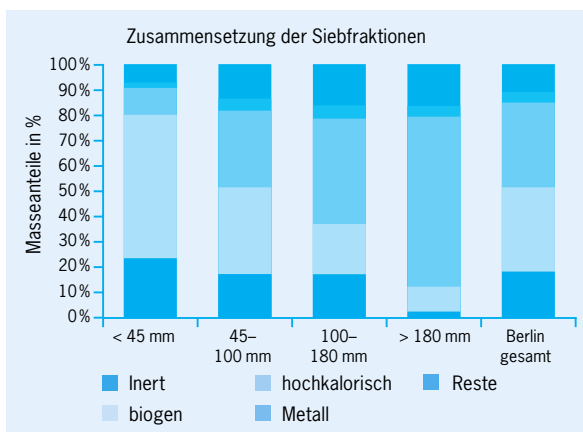


Abbildung 5:  
Zusammensetzung  
der verschiedenen  
Siebsfraktionen nach  
Materialeigenschaften

4.2 Ergebnisse der chemisch-physikalischen Abfalluntersuchungen

Nachfolgend sind ausgewählte Ergebnisse der chemisch-physikalischen Untersuchungen dargestellt.

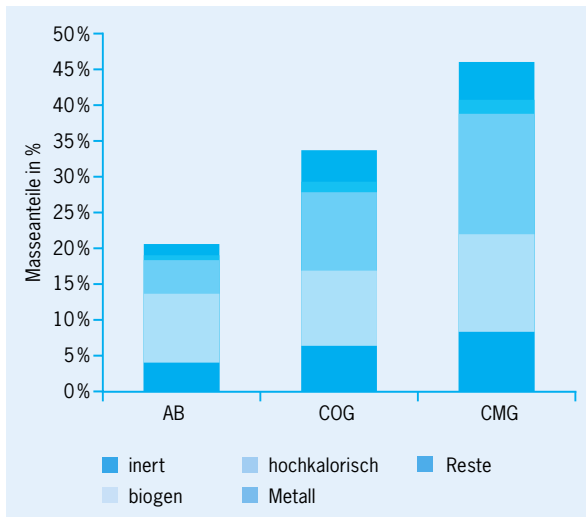


Abbildung 6: Beschaffenheit des Berliner Restabfalls aus der Systemabfuhr in Abhängigkeit der Herkunft

Grundsätzlich sollte beachtet werden, dass die ermittelten Werte wegen der Heterogenität der beprobten Abfälle mit unvermeidbaren Unsicherheiten behaftet sind. Insgesamt liegt wegen der zahlreichen Einzelbestimmungen jedoch eine große Anzahl an Messwerten vor, so dass man davon ausgehen kann, dass die ausgewiesenen Gesamt-Durchschnittswerte stabil sind.

#### 4.2.1 Wassergehalt und Heizwert

Der ermittelte durchschnittliche Wassergehalt des Berliner Restabfalls beträgt lediglich 32,4 %. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass bei der vorgeschalteten Siebklassierung Masseverluste durch Verdunstung aufgetreten sind, so dass der Wassergehalt der rohen Abfallproben höher liegen dürfte. Rechnerisch ergibt sich für die rohen Abfallproben ein theoretischer Wassergehalt von knapp 38 %, der jedoch unter praktischen Bedingungen (Verdunstung während Transport, Lagerung, Aufbereitung etc.) nicht vorliegen wird.

Der Abfall aus den gartenreichen Außenbezirken (AB) ist im Jahresdurchschnitt feuchter als der Abfall aus den innerstädtischen Gebieten (COG und CMG).

Der durchschnittliche Heizwert (Hu<sub>roh</sub>) wurde mit 7.600 kJ/kg ermittelt. Auch hier muss berücksichtigt werden, dass wegen des Wasserverlusts während der Siebklassierung der Heizwert der rohen Abfallproben etwas niedriger sein dürfte. Der heizwertreichste Abfall stammt aus den gewerbereichen Innenstadtgebiete-

ten. Der Restabfall aus den gartenreichen Außenbezirken hat hingegen den geringsten Heizwert. Bei den verschiedenen Siebfraktionen besitzt die höchste Siebklasse (> 180 mm) erwartungsgemäß auch den höchsten Heizwert.

Die nachfolgende Abbildung 7 zeigt deutlich den Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Heizwert für den durchschnittlichen Berliner Abfall: mit zunehmender Teilchengröße steigt der Heizwert und sinkt der Wassergehalt. Eine Ausnahme stellte der Wassergehalt des Feinmülls < 8 mm dar, der durchweg niedriger als der Wassergehalt der Fraktion 8 bis 45 mm ist.

#### 4.2.2 Schwermetallgehalte

Auf eine vollständige Darstellung der Ergebnisse zur Schwermetalluntersuchung wird auf Grund der Vielzahl der ermittelten Daten an dieser Stelle verzichtet.

Schwermetalle reichern sich vor allem in der Feinfraktion < 8 mm an. Sämtliche der untersuchten Schwermetalle weisen im Feinanteil (< 8 mm) die jeweils höchsten Konzentrationen auf. Diesen Sachverhalt verdeutlicht die nachfolgende Abbildung 8 beispielhaft für Chrom, Zink, Nickel, Kupfer und Blei.

Insbesondere bei der Bestimmung der Bleikonzentrationen, teilweise auch bei Zink, wurden vereinzelt erhebliche Messwertschwankungen ermittelt. Dieses Phänomen wurde bereits verschiedentlich in der abfallwirtschaftlichen Literatur beschrieben und vermutlich durch das Vorliegen der Schwermetalle in metallischer Form verursacht [7]. Obwohl die Vielzahl der Messwerte, die im Verlauf der vier jahreszeitlich versetzten Untersuchungskampagnen gewonnen worden sind, stabile Mittelwerte lieferten, zeigen die Schwankungen, dass die chemische Analytik bei Abfallproben trotz sorgfältigster Probenahme und Probenaufbereitung problematisch ist.

Insgesamt lässt sich kein jahreszeitlicher Einfluss auf die Schwermetallgehalte und kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Gebietsstruktur und Schwermetallgehalt erkennen.

Die Grobfraktion > 100 mm enthält insgesamt geringe Schwermetallgehalte. Eine Ausnahme stellt Zinn dar, für das in der Grobfraktion mit ca. 200 mg/kg hohe Gehalte ermittelt worden sind. Abgesehen von dieser Ausnahme werden alle Parameter der Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe bereits ohne eine weitere Aufbereitung eingehalten.

#### 4.2.3 Chlorgehalt

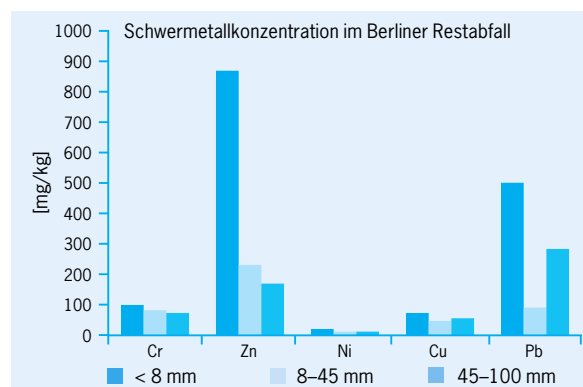
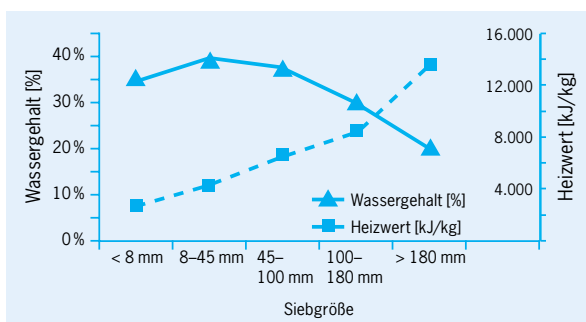
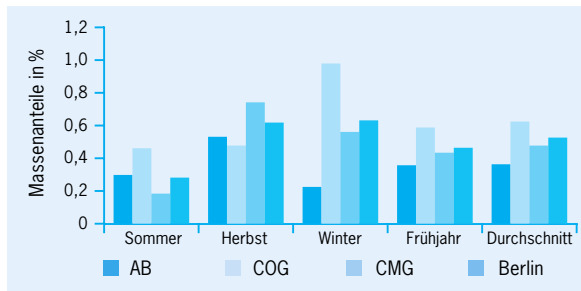


Abbildung 7 (links): Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Heizwert bei unterschiedlicher Korngröße für durchschnittlichen Berliner Abfall (schematische Darstellung)

Abbildung 8 (rechts): Durchschnittliche Schwermetallgehalte in Abhängigkeit vom Siebschnitt



Abbildung 9:  
Chlorgehalt der Grobfraction > 100 mm, nach einer Metallabtrennung in der mechanischen Vorbehandlung (Metallanteil wurde rechnerisch eliminiert)



Im Hinblick auf eine thermische Abfallbehandlung bzw. energetischen Verwertung ist besonders Chlor von Interesse. Der Chlorgehalt des Restabfalls ist im Sommer niedriger als in den übrigen Jahreszeiten. Der Chlorgehalt nimmt mit zunehmender Siebgröße zu, vermutlich verursacht durch Kunststoffe. Insgesamt liegt der ermittelte Chlorgehalt des Berliner Restabfalls (0,3%) niedriger als im durchschnittlichen Siedlungsabfall der letzten Jahre (0,7 bis 0,8 %) [9] sowie bei aktuellen Messungen in Bayern (0,4 %) [8].

Abbildung 9 zeigt die Chlorgehalte der für die energetische Verwertung bedeutsamen Grobfraction > 100 mm über die Gebietsstrukturen und Jahreszeiten. Der Chlorgehalt in den einzelnen Gebietsstrukturen ist im Jahresverlauf relativ stark schwankend und in den Außenbezirken (AB) etwas geringer als im Abfall der städtischen Bereiche. Im Jahresdurchschnitt liegt der Chlorgehalt der Grobfraction > 100 mm bei etwa 0,5 %.

#### 4.2.4 Organische Trockensubstanz oTS

Der Gehalt an organischer Trockensubstanz (oTS) im Restabfall ist ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der biologischen Abbaubarkeit.

Die Bestimmung von oTS wurde nur für die kleinen und mittleren Abfallbestandteile durchgeführt (Sieb 0 – Sieb II), weil dieser Wert für die Auslegung von biologischen Behandlungsanlagen bedeutsam sein kann. Die ermittelten Werte sind im Jahresverlauf und innerhalb der jeweiligen Siebklasse relativ homogen: Sieb 0 (< 8 mm): 32,5 %; Sieb I (8–45 mm): 42,8 %; Sieb II (45–100 mm): 52 %. Insgesamt liegt der oTS-Wert im unteren Bereich vergleichbarer Messungen [10], was auf gute Eingangsvoraussetzungen für eine biologische Behandlung schließen lässt.

### 5. Qualitätssicherung

Die Qualität der Abfalluntersuchung wird am Beispiel von vier Untersuchungsmerkmalen aufgezeigt. Es wurden die Mittelwerte und Varianzen der mehrstufigen geschichteten Zufallsauswahl nach den in Kapitel 3.3 beschriebenen Gleichungen berechnet. Ausgehend von einer Stichprobenanzahl von 600 Einzelproben zu je 1 m<sup>3</sup> wurden 60 Mischproben für die Untersuchung der stofflichen Zusammensetzung (z. B. Papier) mit einem durchschnittlichen Volumen von 5 m<sup>3</sup> und 120 Mischproben für die Untersuchung der chemisch-physikalischen Eigenschaften mit einem durchschnittlichen Volumen von 1 Liter analysiert. Den Analysewerten konnten jeweils zwei Laborproben (außer Papier, das pro Siebklasse vollständig händisch analysiert wurde), fünf Siebklassen, drei Schichten und vier Kampagnen zugeordnet werden.

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse der Qualitätssicherung. Das 95 %-Konfidenzintervall beträgt für Papier +/- 11 %, für Blei +/- 35 %, für Cadmium +/- 23 %, und für den oberen Heizwert +/- 5 %. Das Qualitätsziel der Untersuchung, eine Abweichung von +/- 10 % für die wichtigsten Stoffgruppen nicht wesentlich zu überschreiten, wurde für Papier erreicht. Für die Schwermetalle Blei und Cadmium konnte diese Genauigkeit erwartungsgemäß nicht erreicht werden. Die große Streubreite für Blei ist durch die punktuelle Verteilung dieses Schwermetalls in Siedlungsabfall begründet. Untersuchungsmerkmale in Siedlungsabfällen mit Stoffanteilen im ppm-Bereich und mit punktueller Verteilung können mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nur mit eingeschränkter Genauigkeit untersucht werden. Für die Schadstoffe Blei und Cadmium muss selbst bei einem Stichprobenvolumen von 600 m<sup>3</sup> und bei 95 %-tiger Sicherheit mit Abweichungen von 20 bis 35 % vom geschätzten Mittel gerechnet werden. Der Heizwert Ho konnte dagegen sehr genau bestimmt werden. Dies ist auf die gleichmäßige Verteilung des Heizwertes Ho (Summenparameter aus den verschiedenen Stoffgruppen) zurückzuführen.

Über das in Kapitel 3.3 beschriebene varianzanalytische Modell mit zufälligen Effekten können die Einflüsse der Kampagnen, Schichten, Siebklassen und der Stichprobenauswahl bis zur Laborprobe beschrieben werden. In Tabelle 5 sind die absoluten Fehleranteile (Varianzen), die relativen Fehleranteile (Variationskoeffizienten) und die Fehleranteile, bezogen auf den Gesamtfehler, dargestellt. Der größte Fehleranteil wird durch die Auswahl der Stichprobeneinheiten aus den Schichten verursacht. Bei Cadmium trägt die Aufbereitung und Auswahl der Laborproben zum wesentlichen Fehleranteil bei.

Die Aufteilung in Kampagnen, Schichten und Siebklassen wirkt varianzreduzierend, da diese Einheiten vollständig untersucht werden und die Varianz zwischen diesen Einheiten für die Berechnung der Varianz des Mittelwertes entfällt. Wünschenswert aus Sicht des Stichprobenplaners wäre es gewesen, für die Stufen (2) bis (4) mehr Detailtiefe für das Varianzanalytische Modell zu haben. Die Aufteilung der Varianzanteile auf Stufe (2) und (3), verursacht durch die mehrstufige Auswahl und die Aufteilung nach Siebschnitten, konnte nur auf Basis von Erfahrungswerten abgeschätzt werden.

Für die Probenahme fester Siedlungsabfälle und die Untersuchung der relevanten Eigenschaften lassen sich aus der Qualitätssicherung folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- ◆ Die entwickelte Probenahmekonzeption hat sich für die Untersuchung der betrachteten Abfalleigenschaften bewährt und liefert zuverlässige Werte für die Teilchengrößenverteilung und die stoffliche Zusammensetzung.
- ◆ Durch die Behälterbeprobung (600 Einheiten) wird eine breite Streuung der Stichprobeneinheiten über das gesamte Untersuchungsgebiet erreicht. Gebietspezifische Einflüsse können optimal berücksichtigt werden. Eine Probeentteilung des heterogenen Materials wird vermieden (Problem der Probenahme aus Fahrzeugladungen).
- ◆ Für repräsentative Teilungs- und Auswahlvorgänge

Statistische Parameter	Massenanteile			Heizwert H <sub>0</sub>
	Papier	Blei	Cadmium	
Anzahl der Einzelstichproben	600	600	600	600
Probenvolumen	600 m <sup>3</sup>	600 m <sup>3</sup>	600 m <sup>3</sup>	600 m <sup>3</sup>
Anzahl der Laborproben	60	120	120	120
Probenvolumen (Sortierort/Labor)	400 m <sup>3</sup>	0,12 m <sup>3</sup>	0,12 m <sup>3</sup>	0,12 m <sup>3</sup>
Mittelwert (MW)	0,169 kg/kg	164 mg/kg	0,384 mg/kg	12,08 MJ/kg
Varianz (MW)	0,00009	808,60	0,0019	0,1015
Standardabweichung (MW)	0,00973	28,44	0,0438	0,3187
Variationskoeffizient (MW)	5,7%	17,3%	11,4%	2,6%
Varianz der Einzelwerte	0,01069	161.227	0,2957	17,92
Varkoeff der Einzelwerte	61,1%	244,8%	141,5%	35,0%
95%-Konfidenzintervall	0,169 ± 0,02	164 ± 59	0,384 ± 0,09	12,08 ± 0,66
notwendiger Stichprobenumfang (Probenvolumen) 1 - α = 0,95; ε = 0,1	843 m <sup>3</sup>	7.681 m <sup>3</sup>	3.313 m <sup>3</sup>	178 m <sup>3</sup>
Fehleranteile der Stufen	Varianzen			
(1) Kampagnen und Schichten	0,00059	4.568	0,0110	0,0
(2) Auswahl der Stichprobenbehälter	0,00598	93.363	0,0914	10,71
(3) Siebklassen	0,00399	62.242	0,0609	7,14
(4) Auswahl der Laborproben und Analysefehler		1.707	0,1344	0,08
	Variationskoeffizienten			
(1) Kampagnen und Schichten	14,4%	41,2%	27,2%	0,0%
(2) Auswahl der Stichprobenbehälter	45,7%	186,3%	78,6%	27,1%
(3) Siebklassen	37,3%	152,1%	64,2%	22,1%
(4) Auswahl der Laborproben und Analysefehler		25,2%	95,4%	2,3%
	Prozentanteile am Gesamtfehler			
(1) Kampagnen und Schichten	5,5%	2,8%	3,7%	0,0%
(2) Auswahl der Stichprobenbehälter	56,0%	57,9%	30,9	59,7%
(3) Siebklassen	37,3%	38,6%	20,6%	39,8%
(4) Auswahl der Laborproben und Analysefehler		1,1%	45,5%	0,4%

Tabelle 5:  
**Statistische Parameter für ausgewählte Untersuchungsmerkmale**

sollten Restabfälle mit Äquivalentdurchmessern > 40 mm vor der Entnahme von Teilproben zerkleinert werden. Die Entnahme „handverlesener Proben“ sollte unbedingt unterbleiben.

- ◆ Die Klassierung und Sortierung des heterogenen Probematerials konnte innerhalb des Probenahme-konzeptes zur Homogenisierung des Abfalls genutzt werden. Ausgehend von diesen homogenen

Teilmengen konnten repräsentative Laborproben gewonnen werden.

- ◆ Stoffbestandteile (z. B. Batterien) oder Schadstoffanteile (z. B. Blei, Cadmium usw.) mit geringen Konzentrationen und punktueller Verteilung sind mit vertretbarem wirtschaftlichen Aufwand nur mit eingeschränkter Genauigkeit zu bestimmen.
- ◆ Die Probenahme fester Siedlungsabfälle ist komplex und kann nur mit Kenntnis der Varianzverteilung über alle Auswahlstufen zuverlässig ausgeführt werden.

## 6 Zusammenfassung

Für die Untersuchung des Berliner Restabfalls aus der Systemabfuhr wurde ein mehrstufiges geschichtetes Beprobungskonzept angewandt, mit dem repräsentative Daten für die Beurteilung der Restabfall – Eigenschaften erhoben werden konnten. Die Abfalluntersuchung wurde darüber hinaus so konzipiert, dass sie praxisrelevante Randbedingungen<sup>3</sup> in einem erheblichen Umfang berücksichtigte. Die Ergebnisse beruhen auf einem Stichprobenumfang von 600 m<sup>3</sup> Restabfall für die Bestimmung der Teilchengrößenverteilung und der stofflichen Zusammensetzung. Aus den sortierten Abfällen wurden 120 Mischproben für die chemisch-physikalischen Analysen gewonnen. Der fundierte Stichprobenumfang und die praxisrelevanten

### Die umfangreiche Untersuchung liefert eine sichere Planungsgrundlage

Randbedingungen sind die Grundlage für zuverlässige Untersuchungsergebnisse und lassen belastbare Aussagen über das Abfallverhalten im großtechnischen Maßstab zu.

Die Ergebnisse zeigen, dass der modifizierte praxisnahe Beprobungsansatz die abfallwirtschaftlichen Gegebenheiten gut wiedergibt, insbesondere was die Aspekte Stoffübergang und Homogenisierung bei der Abfallsammlung und Zwischenlagerung angeht. Die ermittelten Daten eignen sich somit für die Auslegung und den Betrieb von Abfallbehandlungsanlagen, insbesondere von Stoffstromtrennanlagen. So konnte beispielsweise aus den vergleichsweise niedrigen Heizwerten des Berliner Restabfalls aus den Außenbezirken und den höheren Heizwerten des Abfalls aus den Innenstadtbereichen eine weitere Optimierung der Stoffstromlenkung nach gebietsspezifischen Gesichtspunkten abgeleitet werden.

Eindeutig ist auch die Abhängigkeit von Teilchengrößenklasse, Wassergehalt und Heizwert. So steigt der Heizwert mit zunehmender Teilchengrößenklasse an, während der Wassergehalt mit steigender Teilchengröße abnimmt. Aus diesen Beziehungen können entsprechende Aufbereitungstechniken entwickelt werden, die heizwertreiche von heizwertarmen Fraktionen trennen.

Für den Schadstoffgehalt der Restabfälle zeigt sich ein eindeutiger Trend. Vor allem Schwermetalle sind offensichtlich vorwiegend in kleinen Bestandteilen enthalten oder dort anhaftend und reichern sich bei einer Trennung nach Teilchengrößenklassen in den

Fraktionen 0 bis 45 mm an. Der niedrige Schadstoffgehalt, insbesondere in der heizwertreichen Grobfraktion, lässt eine relativ hochwertige energetische Verwertung bei Anwendung entsprechender Vorbehandlungstechniken erwarten.

Die Ergebnisse der Abfalluntersuchung wurden im Rahmen der Ausschreibungsverfahren der BSR den Bieter zur Verfügung gestellt. Die Bieter wurden somit in die Lage versetzt, ihre Angebote auf die tatsächlichen Eigenschaften des Berliner Abfalls zuzuschneiden.

## Literatur:

- [1] Winterstein, Michael; Hilbert, Claus; Pflüger, Hubertus; Sabrowski, Rainer; Kahle, Martin:  
Repräsentative Heizwerte von Hausmüll einer Großstadt - Illusion oder Wirklichkeit? Müll und Abfall 4/2004, Seite 166 ff, Berlin 2004.
- [2] Richtlinie für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle im Land Brandenburg, Teil 1, Fachbeiträge des Landesumweltamtes Brandenburg, Titelseite Nr.34, Potsdam 1998
- [3] Bauer, R.K.; Barghoorn, M.; Fuchs, J.; Gössele, P.;  
Stichprobenplanung, Vorlauf, Ergebnisse der Berliner Hausmüllanalyse 1976; Berlin 1977.
- [4] Bauer, R. K.; Barghoorn, M.; Gössele, P.; et. al.:  
Bundesweite Hausmüllanalyse 1979/80, Arbeitsgruppe Umweltstatistik der Technischen Universität Berlin; Berlin 1980.
- [5] Abfallerhebung Berlin;  
ARGUS Arbeitsgruppe Umweltstatistik e. V. an der Technischen Universität Berlin; Berlin 1997.
- [6] Zwisele, B.;  
Statistische Gesichtspunkte bei der Auswahl von Stichprobeneinheiten für Hausmülluntersuchungen; Beitrag 1724 im Müllhandbuch; Berlin 1998.
- [7] Rotter, Kost, Bilitewski, Seeger, Kock, Urban:  
Abfallanalysen – Anwendung, Probleme und neue Wege für die Praxis, Müll und Abfall 9/2003, Seite 442, Berlin 2004.
- [8] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz (Hrsg.):  
Zusammensetzung und Schadstoffgehalt von Siedlungsabfällen, Augsburg 2003
- [9] Heilmann, Andrea:  
Stoffstrommanagement für Abfälle aus Haushalten, Dissertation TU Dresden 2000
- [10] Institut für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik (isah), Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft und Entsorgung (IBA) (Hrsg.):  
Mechanisch-biologische Vorbehandlung von Restabfällen in Niedersachsen: Abschlussbericht der wissenschaftlichen Begleitung der drei MBV-Demonstrationsanlagen, Hannover 2000

## Anschrift der Verfasser

### Dipl.-Ing. Uwe Büll

Gesellschafter und Projektleiter bei ARGUS GmbH,  
Franklinstr.1  
D-10587 Berlin  
Tel. + 49 (0)30/39 80 60-0  
uwe.buell@argus-statistik.de

### Dr.-Ing. Bertram Zwisele

Geschäftsführer und Gesellschafter bei ARGUS GmbH  
Franklinstr.1  
D-10587 Berlin  
Tel. + 49 (0)30/39 80 60-0  
bertram.zwisele@argus-statistik.de

### Dr.-Ing. Margarida Nogueira

Berliner Stadtreinigungsbetriebe (BSR),  
Geschäftseinheit Abfallverwertung/-beseitigung  
Ringbahnstraße 96  
D-12103 Berlin  
Tel. +49 (0)30/75 92 51 80  
margarida.nogueira@bsr.de

### Dipl.-Ing. Jens Niestroj

Projektleiter bei INTECUS GmbH,  
Heinrich-Scheele-Allee 43  
D-27356 Rotenburg/Wümme  
Tel. +49 (0)42 61/28 30  
intecus.rotenburg@t-online.de

<sup>3</sup> gemeinsame Erfassung von Haus- und Geschäftsmüll in Sammelfahrzeugen der BSR (→ Verdichtung und Homogenisierung), Zwischenlagerung der Abfälle und ggf. Siebklassierung