



## **Kostenanalyse für ein Monitoring von NiCd-Batterien in festen Siedlungsabfällen**

**Methodischer Ansatz und Lösungsstrategie für ein zuverlässiges Monitoring einschließlich der zu erwartenden Kosten**

erarbeitet für das

**Umweltbundesamt  
Bismarckplatz 1  
14193 Berlin**

von

**ARGUS – Statistik und Informationssysteme  
in Umwelt und Gesundheit GmbH  
Franklinstr. 1  
10587 Berlin**

Berlin, Oktober 2004

## Inhalt

<b>1 Hintergrund und Ziel der Studie.....</b>	<b>2</b>
<b>2 Identifizierung der NiCd-relevanten Stoffströme .....</b>	<b>3</b>
<b>3 Auswahl einer geeigneten Probenahmemethode für Abfallströme mit NiCd-Batterien .....</b>	<b>7</b>
<b>4 Ermittlung der kostenbeeinflussenden Parameter für die Probenahme .....</b>	<b>12</b>
<b>5 Untersuchungsplan für NiCd-relevante Abfallströme .....</b>	<b>16</b>
<b>6 Ermittlung der Kosten für das Monitoring .....</b>	<b>20</b>
<b>7 Zusammenfassung.....</b>	<b>23</b>

## 1 Hintergrund und Ziel der Studie

Der Vorschlag der Europäischen Kommission für eine Batterierichtlinie<sup>1</sup> sieht für Nickel-Cadmium-Altbatterien und –Altakkumulatoren (im Weiteren NiCd-Batterien) einen Erfassungsgrad von 80 % vor. Gemäß Artikel 6 des Richtlinienentwurfs soll zur Ermittlung des Erfassungsgrades jährlich die Menge der über den Strom der festen Siedlungsabfälle beseitigten NiCd-Batterien ermittelt werden. Die vorgeschlagene Erfassungsquote berechnet sich daher wie folgt:

$$\text{Erfassungsgrad in \%} = \frac{\text{Erfasste Menge}}{\text{Erfasste Menge} + \text{Menge in Siedlungsabfällen}} \cdot 100$$

Die getrennt erfassten oder an Aufbereitungsanlagen aussortierten Mengen an NiCd-Batterien können über eine Abfrage bei den Entsorgern ermittelt werden. Die in den festen Siedlungsabfällen enthaltenen Mengen an NiCd-Batterien sind über ein Monitoring der NiCd-relevanten Abfallströme zu ermitteln. Ziel dieser Studie ist es, den Aufwand für das Monitoring der NiCd-Batterien in festen Siedlungsabfällen abzuschätzen. Zum Aufbau des Monitoring von NiCd-Batterien werden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

1. Identifizierung der Abfallströme mit relevanten Anteilen an NiCd-Batterien
2. Auswahl einer geeigneten Probenahmemethode für Abfallströme mit NiCd-Batterien
3. Ermittlung der kostenbeeinflussenden Parameter für die Probenahme
4. Entwicklung eines Untersuchungsplans für Abfallströme mit relevanten Anteilen an NiCd-Batterien
5. Ermittlung der Kosten für das Monitoring von NiCd-Batterien in festen Siedlungsabfällen

Im Rahmen des Monitoring sind die gesamten festen Siedlungsabfälle hinsichtlich ihres Gehaltes an NiCd-Batterien zu berücksichtigen. Der Begriff der festen Siedlungsabfälle ist in Deutschland nicht einheitlich definiert. Ein Blick auf die Definitionen in der Abfallstatistik des Bundes und der Abfallbilanzen der Bundesländer zeigt die Unterschiede in der Zuordnung der einzelnen Abfallarten zu den festen Siedlungsabfällen. So werden Bauabfälle, Klärschlämme und einzelne Industrieabfälle wahlweise den festen Siedlungsabfällen zugeordnet. Nach ihrer Herkunft lassen sich die festen Siedlungsabfälle den Bereichen „private Haushalte“, „Gewerbe“ und „von öffentlichen Flächen“ (sogenannte Infrastrukturabfälle) zuordnen. Ausführliche Definitionen und Abgrenzungen zu festen Siedlungsabfällen finden sich z. B. in der Brandenburger Richtlinie zur Durchführung von Abfallanalysen<sup>2</sup> und der „Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen“<sup>3</sup>. In der vorliegenden Studie erfolgte die Einteilung nach Abfallarten gemäß den Hauptkategorien der Abfallbilanzen, für die ein belastbares Mengengerüst aufgebaut werden konnte.

<sup>1</sup> Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Akkumulatoren sowie Altbatterien und Altakkumulatoren (KOM(2003)723) vom 21.11.2003.

<sup>2</sup> Richtlinie für die Durchführung von Untersuchungen zur Bestimmung der Menge und Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle im Land Brandenburg; Landesumweltamt Brandenburg; Müll und Abfall, Kapitel 1705; Berlin; 1999.

<sup>3</sup> Richtlinie zur einheitlichen Abfallanalytik in Sachsen, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Hrsg.), Dresden 1998.

## 2 Identifizierung der NiCd-relevanten Stoffströme

Zur Identifizierung der NiCd-relevanten Abfallströme wurde zunächst die gesamte in festen Siedlungsabfällen zu erwartende Menge an NiCd-Batterien abgeschätzt. Dies erfolgte auf Grundlage der in Verkehr gebrachten und getrennt erfassten Batteriemengen. In einem zweiten Schritt wurden dann die Anteile an NiCd-Batterien der einzelnen Abfallarten geschätzt und eine wahrscheinliche Frachtnutzung ermittelt.

Nach Angaben der wichtigsten beiden Rücknahmesysteme für NiCd-Batterien, der Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem (GRS) Batterien und dem Rücknahmesystem der Bosch GmbH, wurden 2003 3.185 Mg NiCd-Batterien in Verkehr gebracht. Die Menge an getrennt erfassten NiCd-Batterien beläuft sich für den selben Betrachtungszeitraum auf 1.179 Mg<sup>4</sup>. Damit ergibt sich rechnerisch eine Menge von 2.007 Mg an NiCd-Batterien, die zum Großteil in den verschiedenen Siedlungsabfallströmen enthalten sein müssen. Die Entwicklung der in Verkehr gebrachten und davon getrennt erfassten NiCd-Batterien ist Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: In Verkehr gebrachte und getrennt erfasste NiCd-Batterien

Sammel-system	In Verkehr gebracht [Mg]			Zurückgenommen [Mg]			Verbleibende Menge [Mg]			Erfassungsquote [%]		
	2001	2002	2003	2001	2002	2003	2001	2002	2003	2001	2002	2003
GRS Batterien	1.591	1.593	1.968	1.110	992	1.082	481	601	886	69,8%	62,3%	55,0%
Bosch	1.198	1.016	1.217	41	110	97	1.157	906	1.120	3,5%	10,8%	7,9%
Vfw-Rebat	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
<b>Gesamt*</b>	<b>2.789</b>	<b>2.609</b>	<b>3.185</b>	<b>1.151</b>	<b>1.102</b>	<b>1.179</b>	<b>1.638</b>	<b>1.507</b>	<b>2.007</b>	<b>41,3%</b>	<b>42,2%</b>	<b>37,0%</b>

\* Die Summen beinhalten nicht diejenigen Mengen, die von Mitgliedern des Rücknahmesystems Vfw-Rebat auf den Markt gebracht und von der Vfw-Rebat gesammelt werden.

Der Großteil beseitigter Altbatterien wird vermutlich über den Restmüll aus Haushalten entsorgt. Relevante Altbatteriemengen sind jedoch auch in anderen festen Siedlungsabfallarten zu vermuten. In der weiteren Vorgehensweise wurden daher die Siedlungsabfallarten Sperrmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, getrennt erfasste Wertstoffe Papier/Pappe, Glas, Leichtverpackungen und Bioabfälle, getrennt erfasste Elektro- und Elektronikgeräte (Batterien in den Geräten), Baumischabfälle, produktionsspezifische Abfälle und Infrastrukturabfälle (Marktabfälle, Papierkorbabfälle usw.) auf relevante Batterieanteile geprüft.

Belastbare Daten zu den Anteilen und Schwankungsbreiten (Variationskoeffizienten) an Batterien in den Siedlungsabfallströmen wurden eigenen Untersuchungsergebnissen entnommen und über Recherchen bei Betreibern von Aufbereitungsanlagen und weiteren Experten erfragt (Liste der Experteninterviews ist im Anhang). Insgesamt hat sich gezeigt, dass nur wenige gezielte Untersuchungen zu Altbatterien in den diversen Abfallströmen zur Verfügung stehen. Untersuchungsergebnisse zu Batterieanteilen und Elektroschrottanteilen liegen nur für die Abfallart Hausmüll vor. Batterieanteile in Elektroschrott wurden in einer Studie der

<sup>4</sup> In diesen Zahlen nicht enthalten sind die Mengen, die von den Mitgliedern des Rücknahmesystems Vfw-Rebat auf den Markt gebracht und zurückgenommen werden

Infa-GmbH<sup>5</sup> untersucht. Empirische Daten zu Batterieanteilen bzw. Varianzen in Sperrmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen, Baumischabfällen, produktionsspezifischen Abfällen, getrennt erfassten Wertstoffen (Papier, Glas, Bio und LVP) und Infrastrukturabfällen konnten nicht ermittelt werden und wurden auf Grundlage des in Hausmüll enthaltenen Anteils und einer wahrscheinlichen Frachtverteilung auf die potenziell in Frage kommenden Abfallarten geschätzt. Der Schätzung lagen folgende Überlegungen zugrunde: Der Batterieanteil in den Abfallarten Sperrmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Baumischabfälle, Leichtverpackungen (LVP) und Elektroschrott wurde in den Expertengesprächen übereinstimmend als möglicherweise relevant aber deutlich geringer als der Batterieanteil in Hausmüll eingeschätzt. Alle anderen Abfallarten wurden als nicht relevant eingeschätzt. Die Konzentration an Batterien insgesamt, die als nicht mehr relevant einzustufen ist, wurde auf < 0,005 % (50 ppb) festgelegt. Bei dieser Konzentration wird der effektive Frachtbeitrag einer Abfallart an der gesamten Batteriefracht so gering, dass diese Abfallart nicht mehr in die Untersuchung einzubeziehen ist. Für alle potenziell in Frage kommenden Abfallarten, für die keine empirischen Batterieanteile vorliegen, wurde daher der Batterieanteil mit 0,04 % auf ca. die Hälfte des in Hausmüll enthaltenen Anteils geschätzt. Die Ergebnisse der Recherchen zu Batterieanteilen in den Siedlungsabfallströmen sind Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Batterieanteile in festen Siedlungsabfällen

<b>Untersuchungen zu Batterieanteilen in festen Siedlungsabfällen</b>	<b>Hausmüll</b>		<b>Sperrmüll, LVP, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Baumischabfälle</b>			<b>Elektroschrott (WEEE)</b>	<b>Hausmüll</b>	
	<b>Batterien [%]</b>					<b>Elektroschrott [%]</b>		
	<b>Anteil</b>	<b>Varkoeff.</b>	<b>Anteil</b>	<b>Varkoeff.</b>	<b>Anteil</b>	<b>Anteil</b>	<b>Varkoeff.</b>	
Berlin 2002/03 <sup>1)</sup>	0,07	n.b.				1,0	n.b.	
Berlin 1997 <sup>1)</sup>	0,05	200				0,5	246	
Düsseldorf 1997/98 <sup>1)</sup>	0,11	164				0,5	145	
Mettmann 1998/99 <sup>1)</sup>	0,02	242				0,5	156	
Potsdam 1997 <sup>1)</sup>	0,05	233				0,7	196	
Bayern 1999-2003 <sup>4)</sup>	0,09	n.b.				0,8	n.b.	
TSA Dresden <sup>2)</sup>	0,022	n.b.					n.b.	
Witzenhausen-Institut <sup>3)</sup>	0,065	n.b.					n.b.	
Infa-GmbH Ahlen <sup>6)</sup>					0,1*			
<b>Mittel<sup>5)</sup></b>	<b>0,07</b>	<b>210</b>	<b>0,04**</b>	<b>n.b.</b>		<b>0,7</b>	<b>186</b>	

1) Abfallanalysen ARGUS

2) Herhof Umwelttechnik GmbH: Ermittelt durch händische Sortierung der Batterien in der ferromagnetischen Fraktion, ohne Knopfzellen.

3) Michael Kern: Quantification of the battery content in Municipal Solid Waste, 2004.

4) Abfallanalysen im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umweltschutz.

5) Die Untersuchungsergebnisse für Bayern wurden aufgrund des Untersuchungsumfangs doppelt gewertet

6) Infa-GmbH Ahlen; Telefonische Mitteilung

\* Anteil an NiCd-Batterien

\*\* Batterieanteile geschätzt

n.B.: nicht bestimmt

<sup>5</sup> Infa-GmbH Ahlen; Telefonische Auskunft

Zur Abschätzung des Anteils an NiCd-Batterien können die Batterieanteile insgesamt und die Anteile an Elektronikschatzgut für die einzelnen Mengenströme der Siedlungsabfallarten herangezogen werden. Daten zu Batterieanteilen und Elektroschatzgut-Anteilen in Siedlungsabfällen liegen nur für Hausmüll und Elektroschatzgut (WEEE) vor. Die Batterieanteile insgesamt müssen in Anteile an NiCd-Batterien umgerechnet werden. Zur Schätzung des Anteils an NiCd-Batterien an den Batterien insgesamt wird das Verhältnis der NiCd-Batterien zu den getrennt erfassten Batterien insgesamt herangezogen (10 %)<sup>6</sup>.

In Tabelle 3 werden die Abfallmengen der Abfallbilanzen der Bundesländer nach Abfallarten zusammenfassend dargestellt. Es wird das Aufkommen fester Siedlungsabfälle, das den öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträgern angedient wird, und das Aufkommen gewerblicher Herkunft, das auf dem Entsorgungsmarkt frei handelbar ist, (Berechnungen der Prognos AG<sup>7</sup>), berücksichtigt. Es werden sowohl die aktuellen Mengen für 2001 als auch für 2006 geschätzte Mengen dargestellt.

Weiterhin wird in Tabelle 3 der Anteil an NiCd-Batterien dargestellt, der sich aus dem Batterieanteil insgesamt berechnet. Wird der geschätzte Anteil an NiCd-Batterien mit den Abfallmengen für 2006 multipliziert, ergeben sich die zu erwartenden Frachten für jede Siedlungsabfallart.

Mit den geschätzten Anteilen für NiCd-Batterien in den Siedlungsabfallarten können 90 % der in den festen Siedlungsabfällen vermuteten Fracht an NiCd-Batterien dargestellt werden. Ein diffuser Anteil wird in den nicht relevanten Abfallarten vermutet. Dieser Anteil wurde mit dem halben Schwellenwert (0,00025 %) an NiCd-Batterien für diese Abfallarten berechnet. Die nicht in Siedlungsabfällen enthaltene Menge von ca. 200 Mg an NiCd-Batterien wird durch Export und Verbleib in Haushalten und Gewerbe erklärt.

Wird angenommen, dass jeweils die Hälfte des Aufkommens der Abfallarten Sperrmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle und Baumischabfälle und das gesamte Aufkommen der Leichtverpackungen und des getrennt erfassten Elektroschatzguts in Sortier-/Aufbereitungsanlagen gelangt und die enthaltene Fracht an NiCd-Batterien zur Hälfte in den Sortierresten und zur anderen Hälfte in der ferromagnetischen Fraktion<sup>8</sup> verbleibt, ist mit jeweils ca. 200 Mg NiCd-Batterien in diesen Stoffströmen zu rechnen. Baumischabfälle zur Beseitigung sollten aufgrund der geringen Fracht an NiCd-Batterien (28 Mg bzw. 1,4 %) nicht in das Monitoring einbezogen werden.

Die Abfallarten Hausmüll, Sperrmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Baumischabfälle zur Verwertung, Leichtverpackungen aus der DSD-Sammlung und Elektroschatzgut bzw. Sortierreste aus Anlagen werden aufgrund der Frachtbetrachtung als relevante Mengenströme eingestuft.

---

<sup>6</sup> GRS Batterien: Erfolgskontrolle 2003 (<http://www.grs-batterien.de/facts/pict/erfolg03.pdf>)

<sup>7</sup> Hoffmeister, J.; Alwast, H.: Akteure, Stoffströme und Märkte – Die Entsorgungssituation ab 2005; Bio- und Restabfallbehandlung, Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft des Witzenhausen-Instituts für Abfall, Umwelt und Energie; Witzenhausen; 2004.

<sup>8</sup> GRS Batterien: Untersuchungen an drei MBA-Anlagen in Hessen, NRW, und Sachsen

Tabelle 3: Relevanz der Siedlungsabfallarten aufgrund ihrer Menge und ihres Anteils an NiCd-Batterien

<b>Abfallarten der festen Siedlungsabfälle</b>	<b>Menge 2001<sup>(1)</sup> [Tsd. Mg]</b>	<b>Menge 2006<sup>(2)</sup> (geschätzt) [Tsd. Mg]</b>	<b>Anteil NiCd-Batt. (geschätzt) [%]</b>	<b>Fracht NiCd-Batt. (geschätzt) [Tsd. Mg]</b>	<b>Relevanz für das Monito-ring</b>
Hausmüll	14.488	14.200	0,007	994	ja
Sperrmüll	2.807	2.800	0,004	112	ja
Bioabfälle	3.797	4.200	<0,0005	<20	nein
Grüngut	4.290	4.600	<0,0005	<20	nein
Wertstoffe	2.512	1.900	<0,0005	<20	nein
PPK	6.201	6.500	<0,0005	<20	nein
LVP	2.163	1.800	0,004	72	ja
WEEE	1.100	1.500	0,1	150 <sup>(3)</sup>	ja
<b>Σ Abfälle aus Haushalten</b>	<b>37.758</b>	<b>37.500</b>		<b>1.371<sup>(4)</sup></b>	
hmähnl. Gewerbeabfälle zB	4.511	1.500	0,004	60	ja
hmähnl. Gewerbeabfälle zV	2.851	5.500	0,004	220	ja
Produktionsspez. Abfälle zB	2.156	1.100	<0,0005	<20	nein
Produktionsspez. Abfälle zV	1.574	2.000	<0,0005	<20	nein
Baumischabfälle zB	1.914	700	0,004	28	(ja)
Baumischabfälle zV	3.099	2.900	0,004	116	ja
Wertstoffe und Bioabfälle	(in getrennt erfassten Wertstoffen und Bioabfällen der Haushalte enthalten)				
<b>Σ Abfälle aus Gewerbe</b>	<b>16.105</b>	<b>13.700</b>		<b>432</b>	
Garten- und Parkabfälle	1.091 <sup>(6)</sup>	1.000	<0,0005	<10	Nein
Marktabfälle	173 <sup>(6)</sup>	150	<0,0005	<10	Nein
Straßenkehricht	730 <sup>(6)</sup>	700	<0,0005	<10	Nein
Papierkorbabfälle	(in Straßenkehricht enthalten)				
<b>Σ Infrastrukturabfälle</b>	<b>1.994</b>	<b>1.850</b>		<b>5</b>	
<b>Σ feste Siedlungsabfälle für 2006 geschätzte Menge</b>	<b>55.875</b>	<b>53.050</b>		<b>1.807</b>	
<b>Σ NiCd-Batterien ermittelte rechnerische Differenz<sup>(7)</sup></b>				<b>2.009</b>	
<b>Σ NiCd-Batterien, die durch Export und Verbleib in Haushalten und Gewerbe nicht erfasst wird<sup>(7)</sup></b>				<b>202</b>	

(1) Abfallbilanzen der Bundesländer

(2) Hoffmeister, J.; Alwast, H.: Akteure, Stoffströme und Märkte – Die Entsorgungssituation ab 2005; Bio- und Restabfallbehandlung, Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft des Witzenhausen-Instituts für Abfall, Umwelt und Energie; Witzenhausen; 2004.

(3) Verbleibende Fracht an NiCd-Batterien in Geräten nach Ausbau der Batterien in Aufbereitungsanlagen

(4) Für die Frachtberechnung der Abfallarten mit Anteilen an NiCd-Batterien von < 0,0005 % wurde der halbe Anteilswert (0,00025 %) angenommen.

(5) Abfallmengen und Frachten aus Anlagen sind Sekundärabfälle, die im Primärabfallaufkommen bereits enthalten sind. Sie werden daher nicht zum Aufkommen hinzugezählt.

(6) Abfallbilanzdaten der Bundesländer für 1999

(7) Berechnet auf der Basis der 2003 in Verkehr gebrachten und getrennt erfassten NiCd-Batteriemengen

### **3 Auswahl einer geeigneten Probenahmemethode für Abfallströme mit NiCd-Batterien**

Die Untersuchung des Mengenanteils an NiCd-Batterien in festen Siedlungsabfällen ist komplex. Zur Auswahl einer geeigneten Probenahmemethode und zur Erstellung eines Probenahmeplans sind daher alle verfügbaren Vorinformationen bezüglich der NiCd-relevanten Abfallströme von Bedeutung.

Für die Auswahl einer geeigneten Probenahmemethode ist der Verlauf der Stoffströme und die sich daraus ergebende Zugriffsmöglichkeit von Bedeutung. In Abbildung 1 wird das für 2006 geschätzte Aufkommen der relevanten Abfallarten von der Herkunft bis zum Verbleib schematisch dargestellt. Die Abfallströme nach einer Erstbehandlung werden in Abbildung 1 nur aufgezeigt, soweit es für die Beprobung von Interesse ist. Aus der Betrachtung der Stoffströme und Mengen lassen sich wertvolle Informationen für die Auswahl der geeigneten Probenahmemethode ableiten.

Die Mengen an Hausmüll und Sperrmüll zur Beseitigung gelangen voraussichtlich in 2006 zu über 70 % direkt vom Erzeuger, den privaten Haushalten und Geschäften, in Müllverbrennungsanlagen. Von den hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen zur Beseitigung gelangt ebenfalls der überwiegende Anteil in die Müllverbrennung. Der Sperrmüll zur Verwertung, die hausmüllähnlichen Gewerbeabfälle zur Verwertung und die Baumischabfälle zur Verwertung hingegen durchlaufen zu über 70 % eine Sortierung/Aufbereitung vor einer weiteren stofflichen oder thermischen Verwertung<sup>9</sup>. Die getrennt erfassten Leichtverpackungen und der Elektroschrott werden vollständig in Sortier-/Aufbereitungsanlagen verbracht.

Zur Ermittlung der Stoffzusammensetzungen und Mengenanteile bestimmter Abfallstoffgruppen (hier des Anteils an NiCd-Batterien) in festen Siedlungsabfällen stehen grundsätzlich drei verschiedene Ansätze der Probenahme zur Verfügung:

- Probenahme aus Abfallbehältern am Grundstück bzw. aus Sammelfahrzeugladungen bei Anlieferung an Entsorgungsanlagen
- Probenahme vom Band an Abfallentsorgungsanlagen
- Probenahme aus frei lagernden Haufwerken an Abfallentsorgungsanlagen

Abbildung 2 gibt eine Übersicht der Probenahmemethoden zur Bestimmung von Menge und Zusammensetzung fester Siedlungsabfälle.

Für die Beprobung der NiCd-relevanten Abfallstoffströme Hausmüll, Sperrmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Baumischabfälle, Leichtverpackungsabfälle aus der DSD-Sammlung und Elektroschrott aus der getrennten Sammlung kommt die Methode der geschichteten Zufallsauswahl von Abfallbehältern am Grundstück und/oder die systematische Zufallsauswahl vom Band in Betracht. Für eine deutschlandweite Untersuchung ist eine geschichtete und mehrstufige Vorgehensweise erforderlich.

---

<sup>9</sup> Hoffmeister, J.; Alwast, H.: Akteure, Stoffströme und Märkte – Die Entsorgungssituation ab 2005; Bio- und Restabfallbehandlung, Fachbuchreihe Abfall-Wirtschaft des Witzenhausen-Instituts für Abfall, Umwelt und Energie; Witzenhausen; 2004.

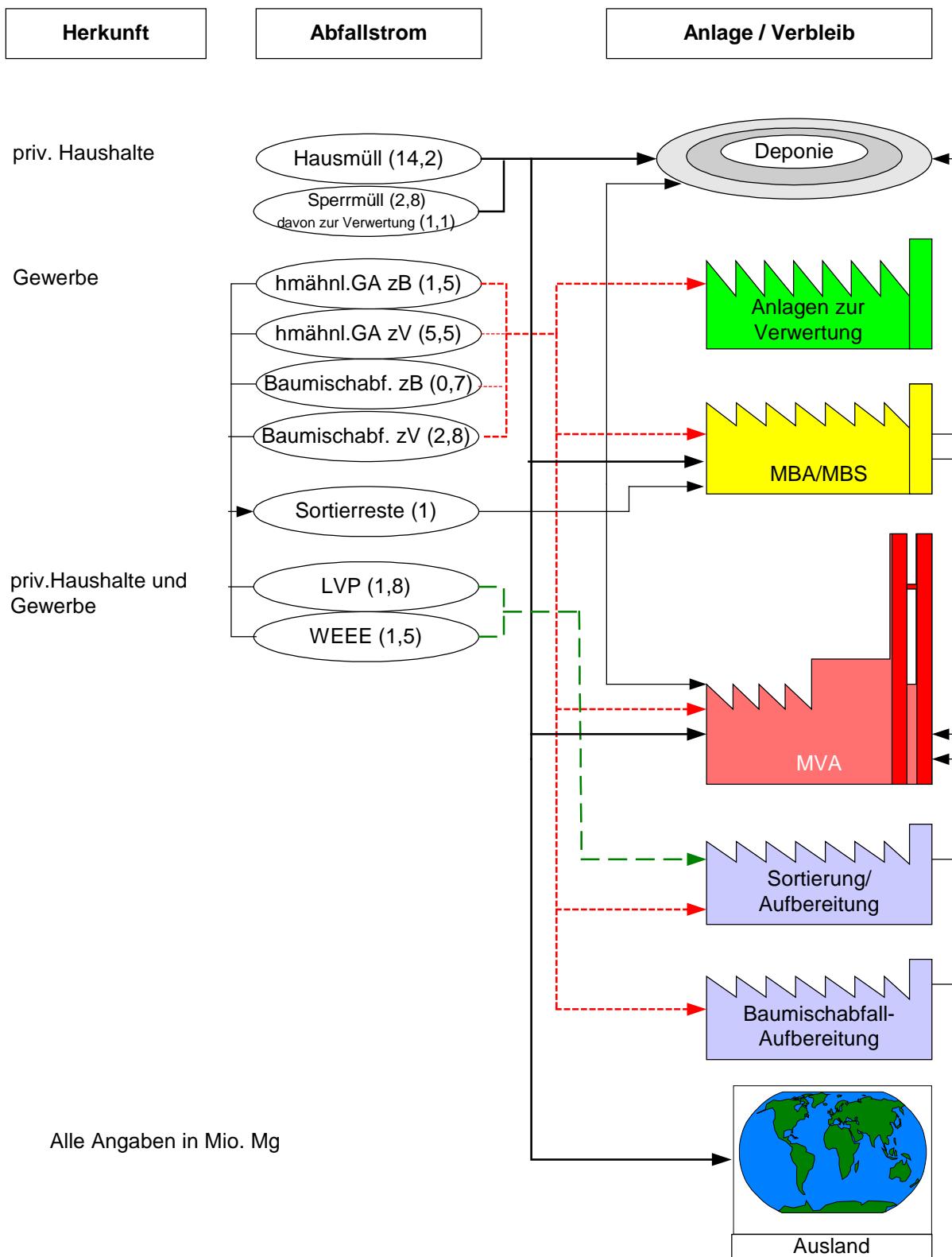


Abbildung 1: Schematische Darstellung der in 2006 erwarteten Stoffströme der relevanten Abfallarten

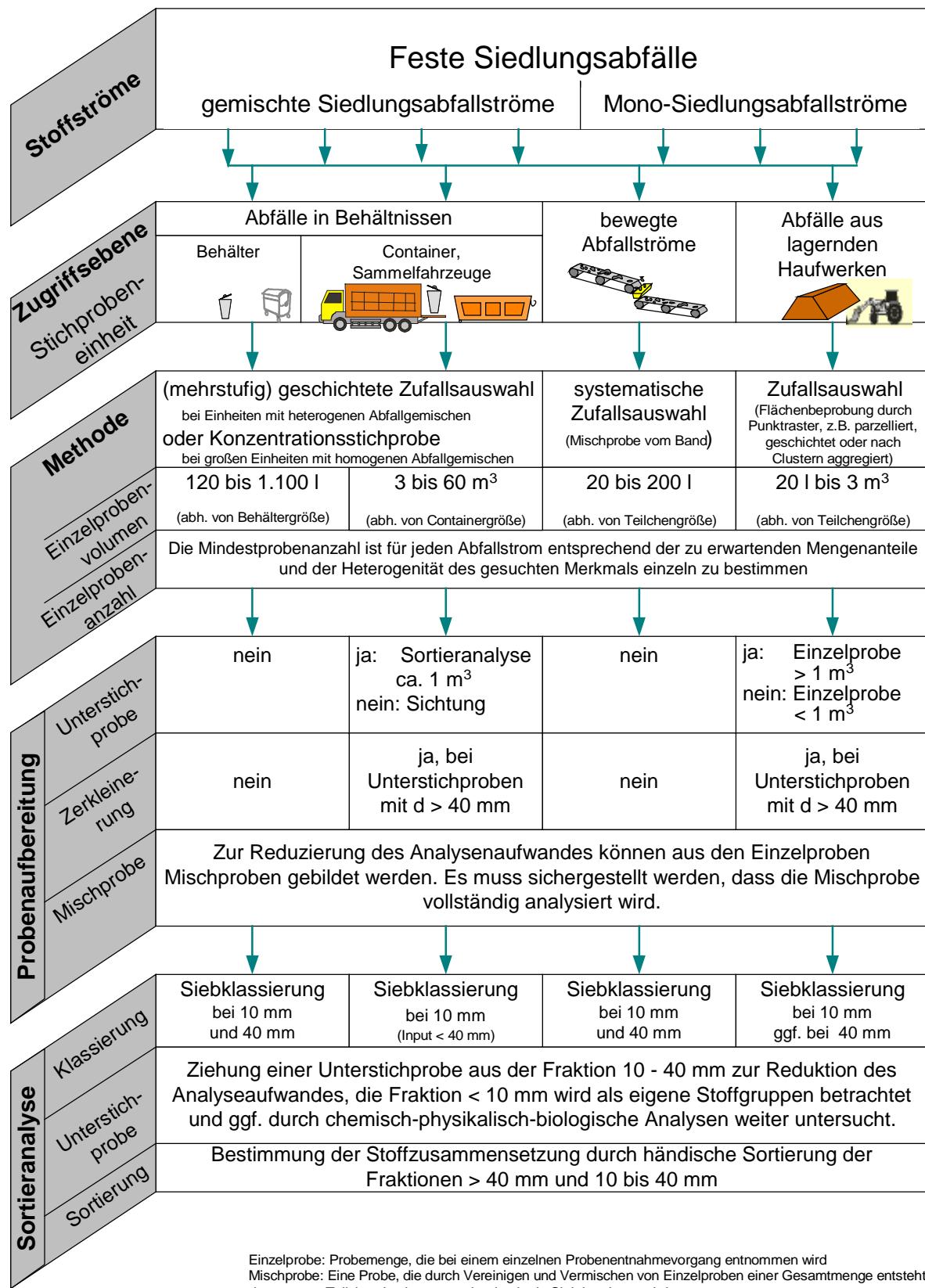


Abbildung 2: Probenahmemethoden zur Bestimmung von Menge und Zusammensetzung fester Abfälle

Für Hausmüll ist die Behälterbeprobung am Grundstück eine bewährte Methode zur Ermittlung der stofflichen Zusammensetzung<sup>10</sup>. Alternativ wird die Beprobung der relevanten Outputströme an MBA und anderen Sortier-/Aufbereitungsanlagen betrachtet. Da Hausmüll bis Juni 2005 noch zu großen Teilen ohne Vorbehandlung abgelagert oder verbrannt wird, steht diese alternative Beprobungsmethode bislang nur eingeschränkt zur Verfügung. Es ist zu berücksichtigen, dass für Hausmüll die Beprobung der relevanten Outputströme von MBA und anderen Sortier-/Aufbereitungsanlagen aufgrund des dominierenden Mengenstroms in Müllverbrennungsanlagen auch nach Juni 2005 nicht flächendeckend möglich ist. Daher werden für die Beprobung des Hausmüllstroms beide Methoden untersucht. Die Entscheidung für eine Methode muss nach Vorliegen des Kostenvergleichs unter Berücksichtigung der Unsicherheiten abgewogen werden.

Für Sperrmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle und Baumischabfälle wird die Stoffzusammensetzung üblicherweise durch eine Abfallsichtung bestimmt. Dabei werden die maßgeblichen Volumenanteile durch eine Volumenschätzung möglichst vieler Fahrzeugladungen bestimmt. Für die Ermittlung des Anteils an NiCd-Batterien ist diese Methode aufgrund der Zielstellung ungeeignet. Die Anteile an NiCd-Batterien in den betreffenden Abfällen können durch eine Sichtung nicht bestimmt werden. Die Untersuchung durch manuelle Sortierung einer Vielzahl von Fahrzeugladungen nach Batterien scheidet aus ökonomischen Gründen aus. Für die Sperrmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle und Baumischabfälle kommt daher nur eine Anlagenbeprobung in Betracht. Da ca. 70 % dieses Stoffstroms Abfälle zur Verwertung sind (Abbildung 1) gelangen diese Abfälle größtenteils in eine Sortierung-/Aufbereitungsanlage und sind somit einer Beprobung an der Anlage zugänglich. Als wesentliche Stoffströme mit NiCd-Batterien werden die Outputströme Ferromagnetische Fraktion und Sortierreste aus diesen Anlagen vermutet.

Für den Stoffstrom der Leichtverpackungen aus der DSD-Sammlung können beide Methoden eingesetzt werden. Über den gelben Sack/Tonne ist der Zugriff am Grundstück möglich. Die Behälterbeprobung am Grundstück kann analog der Hausmülluntersuchung durchgeführt und geplant werden. Da Leichtverpackungen vollständig in LVP-Sortieranlagen verbracht und behandelt werden, ist auch die Beprobung der relevanten Abfallströme vom Band in diesen Anlagen möglich. Es werden beide Methoden betrachtet.

Die Elektro- und Elektronikaltgeräte, die bereits jetzt und gemäß ElektroG<sup>11</sup> zukünftig verstärkt getrennt erfasst werden, beinhalten vermutlich einen nennenswerten Anteil an NiCd-Batterien. Nach Auskunft von Elektroschrottaufbereitern und der GRS<sup>12</sup> werden Batterien und Akkumulatoren vor einer Aufbereitung aus den Geräten entfernt und die Menge von den Anlagenbetreibern ermittelt. Damit werden NiCd-Batterien aus Elektroschrott der getrennt erfassten Menge zugeschlagen.

Da ein nicht unerheblicher Anteil an NiCd-Batterien in Elektrokleingeräten fest eingebaut ist, (z. B. Zahnbürsten, Spielgeräte etc.) ist jedoch damit zu rechnen, dass eine unbekannte Menge an NiCd-Batterien in den Restmüllstrom von Elektroschrott-Anlagen gelangt. Durch einen Abgleich der an Elektroschrott-Aufbereitungsanlagen erfassten NiCd-Batterien und der

---

<sup>10</sup> Bauer, R. K.; Barghoorn, M.; Gössele, P.; et al.: Bundesweite Hausmüllanalyse 1983-85; Arbeitsgruppe Umweltstatistik der Technischen Universität Berlin; UBA-Texte; Berlin; 1985.

<sup>11</sup> Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz – ElektroG); Entwurf vom Sept. 2004

<sup>12</sup> Telefonische Mitteilung, Dr. Fricke, GRS, und Dr. Böhme, Elektronik-Recycling GmbH, Berlin

nach Abschätzung in Elektroschrott-Geräten enthaltenen NiCd-Batterien<sup>13</sup> könnte der noch verbleibende Anteil an NiCd-Batterien im Restmüllstrom von Aufbereitungsanlagen geschätzt werden. Wir gehen in einer ersten groben Abschätzung von einer Fracht von 150 Mg an NiCd-Batterien (Tabelle 3) im Restmüllstrom von Elektroschrott-Aufbereitungsanlagen aus. Um diese Lücke (Anteil NiCd-Batterien im Restmüllstrom von Elektroschrottaufbereitungsanlagen) zu schließen, ist eine gezielte stichprobenartige Erhebung an Anlagen (zumindest einmalig) erforderlich.

Sperrmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle und Baumischabfälle besitzen in Bezug auf ihre Beprobung ähnliche Stoffeigenschaften und werden teilweise in den gleichen Anlagen aufbereitet. Außerdem werden diese Abfallarten, wie bereits erläutert, anlagenseitig beprobt. Sie können daher in einem Probenahmekonzept zusammengefasst werden. Die unterschiedlichen Anlagenarten (MBA, Gewerbeabfallaufbereitung, Bauabfallaufbereitung usw.) sollten entsprechend des Aufkommens der Abfallarten proportional berücksichtigt werden. Für die Bestimmung der Anteile an NiCd-Batterien in festen Siedlungsabfällen werden für die als relevant bestimmten Abfallarten die in Tabelle 4 aufgelisteten Untersuchungs-/Probenahmemethoden betrachtet.

Tabelle 4: Geeignete Probenahmemethoden für die als NiCd-relevant bestimmten Abfallarten

NiCd-relevante Abfallart	Geschichtete Zufallsauswahl der Abfallbehälter am Ort der Bereitstellung (Haushalte/Gewerbe)	Systematische Zufallsauswahl der Einzelproben vom Band an Abfallbehandlungsanlagen
Hausmüll	✓	✓
Sperrmüll		✓
Hausmüllähnliche Gewerbeabfälle		✓
Baumischabfälle zur Verwertung		✓
Leichtverpackungen (DSD)	✓	✓
Elektroschrott		✓
Sperrmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle, Baumischabfälle zur Verwertung		✓

<sup>13</sup> Infa-GmbH Ahlen; telefonische Mitteilung

## 4 Ermittlung der kostenbeeinflussenden Parameter für die Probenahme

Für die Erstellung eines Probenahme- und Untersuchungsplans mit dem Ziel, die Anteile an NiCd-Batterien in den als relevant bestimmten Abfallströmen zu ermitteln, werden Angaben zu den Erzeugern, den Erfassungssystemen, den Behälterarten und -größen, den Aufbereitungsschritten, den Entsorgungsanlagen usw. benötigt. Zusätzlich sind alle verfügbaren Angaben zu den Abfalleigenschaften wie z. B. Stoffgruppenzusammensetzung, Teilchengrößeverteilung, Mengenanteile und Varianzen der interessierenden Merkmale von Bedeutung.

Der Aufwand einer Abfalluntersuchungen zur stofflichen Zusammensetzung für die einzelnen Arbeitsschritte Untersuchungsplanung, Probengewinnung, Probenaufbereitung, Analyse und Auswertung der Stichprobenergebnisse kann aus einer Vielzahl vergleichbarer Untersuchungen<sup>14</sup> abgeschätzt werden. Das Besondere an der vorliegenden Zielstellung ist die geringe erwartete Konzentration (10 bis 100 ppb im Aufkommen) und das unregelmäßige Vorkommen des interessierenden Merkmals in der Grundgesamtheit (hier NiCd-Batterien in festen Siedlungsabfällen). Dies führt zu einer starken Heterogenität (große Variationskoeffizienten) der Grundgesamtheit bezüglich des Untersuchungsmerkmals. Um zuverlässige und belastbare Ergebnisse zu erhalten, muss eine große Anzahl an Einzelproben entnommen werden (d. h. große Probemengen müssen untersucht werden) oder eine varianzreduzierende Probenahmestrategie eingesetzt werden.

Die Probenahme vom Band an Abfallbehandlungsanlagen könnte eine geeignete varianzreduzierende Probenahmestrategie darstellen. In Abfallbehandlungsanlagen werden Batterien in bestimmten Outputströmen (z. B. in der Metallfraktion oder im Sortierrest) angereichert. Zudem wird der Abfallstrom in den meisten Anlagen zerkleinert, fraktioniert und nach Stoffeigenschaften sortiert. Im günstigen Fall wird das Untersuchungsmerkmal dadurch homogenisiert und aufkonzentriert. Für NiCd-Batterien ist von einer Homogenisierung und Aufkonzentrierung auszugehen. Ein weiterer Vorteil der Anlagenbeprobung besteht darin, dass verschiedene Abfallarten in einer Anlage behandelt werden (z. B. eine Aufbereitungsanlage für Sperrmüll, Gewerbeabfälle und Baumischabfälle) und die relevanten Outputströme gemeinsam untersucht werden können. Die Anlagenbeprobung könnte dadurch deutliche Kostenvorteile aufweisen.

Die Bestimmung der Anteile an NiCd-Batterien in Deutschland kann nicht an einer Anlage oder in einem Entsorgungsgebiet (örE) vorgenommen werden. Durch eine Schichtung nach Regionen (Süd, Nord-West und Ost) und nach Siedlungsstruktur (Stadt und Land) ist eine repräsentative Verteilung der zu untersuchenden Entsorgungsgebiete bzw. Anlagen sicherzustellen. Es ist daher ein mehrstufiges Probenahmekonzept erforderlich, in dem für jede Schicht die Entsorgungsgebiete bzw. Anlagen und daraus wiederum die Abfallbehälter bzw. die Einzelproben vom Band den Probenumfang ausgewählt werden.

Die entscheidenden kostenbestimmenden Parameter einer Untersuchung des Anteils an NiCd-Batterien in den festen Siedlungsabfällen sind somit die Konzentration und die Heterogenität der NiCd-Batterien in den relevanten Stoffströmen. Wobei die Heterogenität von der

---

<sup>14</sup> ARGUS: Durchführung von Abfallanalysen für Hausmüll, Sperrmüll, Leichtverpackungen, Gewerbeabfälle, Sortierreste; Referenzliste [WWW.argus-statistik.de](http://WWW.argus-statistik.de)

Varianz zwischen den Entsorgungsgebieten bzw. Anlagen und der Varianz der Einzelproben je Entsorgungsgebiet oder Anlage abhängt. Die Heterogenität bzw. Varianz der Einzelproben hängt wiederum von der Messwertverteilung und den Teilcheneigenschaften (Größe, Dichte, Form, Oberfläche usw.) der Stoffströme ab.

Zur Bestimmung der Varianzen von NiCd-Batterien in den relevanten Abfallströmen wurden in einer bundesweiten Recherche und Umfrage empirische Daten zur Varianz von Batteriemengen in den relevanten Abfallströmen zusammengetragen und ausgewertet. Empirisch ermittelte Varianzen liegen nur für Batterien im Hausmüll und für die Methode der Behälterauswahl am Grundstück vor. Empirische Varianzen speziell für NiCd-Batterien konnten nicht ermittelt werden und wurden daher aus den Angaben zur Varianz von Batterien insgesamt abgeschätzt (Tabelle 5). Untersuchungen zu Batterieanteilen, die eine Abschätzung der Varianzen zwischen Entsorgungsgebieten bzw. Anlagen und Varianzen zwischen Einzelproben an Anlagen ermöglichen, sind ebenfalls nicht verfügbar. Um diese unbefriedigende Situation abzusichern wurde eine Abschätzung der zu erwartenden Varianzen auf der Basis einer wahrscheinlichkeitstheoretisch/statistischen Betrachtung durchgeführt.

### **Abschätzung der Varianzen auf der Basis wahrscheinlichkeitstheoretisch/statistischer Betrachtungen (idealistische Anteilschätzung)**

Das theoretische Modell zur Abschätzung der Varianzen bzw. Variationskoeffizienten geht davon aus, dass alle Teilchen des zu untersuchenden Abfallgemisches die gleiche Auswahlwahrscheinlichkeit haben. In Gleichung 1 wird ein Modell mit vereinfachenden Annahmen eingeführt.

$$\frac{var(a_s)}{a_{U_G}^2} = \frac{1}{n} \cdot \frac{(1-P)}{P} \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left[ \frac{a_i - a_{U_G}}{a_{U_G}} \cdot \frac{m_i}{\bar{m}} \right]^2 \quad (1)$$

wobei:  $var(a_s)$ : Varianz des Merkmalgehalts der Probe

$a_s$  : interessierender Merkmalgehalt der Probe

$a_i$  : interessierender Merkmalgehalt des  $i$ -ten Stoffteilchens

$n$  : Gesamtanzahl der Stoffteilchen in der Probe

$P$  : Entnahmewahrscheinlichkeit für die Stoffteilchen

$N$  : Gesamtanzahl der Stoffteilchen im Prüfgut

$a_{U_G}$  : interessierender Merkmalgehalt des Prüfgutes

$m_i$  : Masse des  $i$ -ten Stoffteilchens

$\bar{m}$  : mittlere Masse der Stoffteilchen im Prüfgut  $\bar{m} = m/N$

Zur theoretischen Berechnung der Varianz nach diesem Modell müssen mindestens der interessierende Anteil  $a_{U_G}$  (das ist der Anteil an NiCd-Batterien im Abfallstrom, der bei einer Teilchenauswahl auch der Auswahlwahrscheinlichkeit  $P$  entspricht) und die Anteils- und Massenverteilung der Abfallbestandteile bekannt sein. Weitere Eigenschaften, die die Heterogenität und damit die Varianz beeinflussen, wie z. B. die Teilchendichte, die Teilchenform,

die Teilchenoberfläche etc. werden in diesem Modell nicht berücksichtigt. Der Anteil an NiCd-Batterien in den relevanten Abfallströmen wurde bereits in Tabelle 3 abgeschätzt und wird für die Berechnung der theoretischen Varianzen benutzt.

Für die Schätzung von Stoffanteilen kann angenommen werden, dass ein Stoffteilchen das interessierende Merkmal zu 100 % oder zu 0 % trägt. Die Stoffteilchen Batterien erfüllen dieses Kriterium. Jedem Stoffteilchen kann dann entweder der Anteil  $a_i = 0$  oder  $a_i = 1$  zugeordnet werden. Für die Modellannahme wird die Grundgesamtheit in zwei Teilmengen aufgeteilt. Für die Berechnung der Varianz nach Gleichung 2 muss dann nur die Massenverteilung und nicht mehr die Anteilsverteilung der Stoffteilchen bekannt sein.

Die Massenverteilung für Abfallgemische korreliert stark mit der Teilchengröße. Zwiesel<sup>15</sup> hat die Teilchengrößenverteilung für heterogene Abfallstoffe unterschiedlicher Zerkleinerungsgrade untersucht. Mithilfe der Teilchengrößenverteilung für unterschiedliche Abfallgemische und eines Umrechnungsfaktors können die Massenverteilungen für unterschiedliche Stoffgemische abgeschätzt werden.

Mit der bekannten Massenverteilung für unterschiedliche Abfallgemische wird nach Gleichung 2 der Variationskoeffizient für die relevanten Abfallströme geschätzt. Da in der Praxis nicht von einer idealtypischen Verteilung des gesuchten Merkmals ausgegangen werden kann, werden die Variationskoeffizienten mit den Faktoren  $\sqrt{2}$  für die Behälterbeprobung und  $\sqrt{1,5}$  für die Anlagenbeprobung korrigiert.

$$\frac{\text{var}(a_s)}{a_{U_G}^2} = \left[ \frac{1}{m_s} - \frac{1}{m_{U_G}} \right] \cdot \left[ (1-a_{U_G}) \cdot m'_A \cdot Q(n_{(m),A}) + \frac{(1-a_{U_G})^2}{a_{U_G}} \cdot m'_B \cdot Q(n_{(m),B}) \right] \quad (2)$$

- wobei:
- $m_{U_G}$ : Masse der Grundgesamtheit
  - $m'_A$ : Äquivalenzmasse der Stoffteilchen A (ohne NiCd-Batterien)
  - $Q(n_{(m),A})$ : Hilfsgröße für die Streuung der Stoffteilchen A
  - $m'_B$ : Äquivalenzmasse der Stoffteilchen B (NiCd-Batterien)
  - $Q(n_{(m),B})$ : Hilfsgröße für die Streuung der Stoffteilchen B

Die Varianzen zwischen den Entsorgungsgebieten bzw. Anlagen lassen sich ohne detaillierte Informationen zu den Entsorgungsgebieten und Anlagen (z. B. unterschiedliches Verhalten der Verursacher) auf theoretischer Grundlage nicht berechnen. Es ist aber davon auszugehen, dass der zusätzliche Varianzanteil im Vergleich zu den Varianzen der Einzelproben sehr gering sein wird. Damit kann die Gesamtvarianz in guter Näherung aus der Varianz der Einzelproben angenommen werden.

In Tabelle 5 sind die empirisch ermittelten und auf wahrscheinlichkeitstheoretisch-statistischer Basis ermittelten Variationskoeffizienten für die relevanten Abfallströme aufgelistet.

---

<sup>15</sup> Zwiesel, B.: Entwicklung einer neuen Probenahmemethode für heterogene Abfälle geringer Schüttdichte; Dissertation an der Technischen Universität Berlin; Rhombos-Verlag ISBN 3-937231-42-0; Berlin; 2004

Tabelle 5: Variationskoeffizienten für unterschiedliche Probenahmemethoden, Teilchengrößenverteilungen und NiCd-Anteile in den relevanten Abfallströmen

<b>NiCd-relevante Abfallart</b>		<b>Variationskoeffizienten der Einzelwerte (bezogen auf 1 m<sup>3</sup>)</b>		
		NiCd-Anteil [%]	empirisch* [%]	theoretisch** [%]
<b>Hausmüll</b>	Behälterbeprobung	0,007	500-750	501,4%
	Anlage d'=80mm	0,07		112,0%
	Anlage d'=40mm			97,0%
	Anlage d'=10mm			68,6%
	Anlage d'=80mm	0,035		158,5%
	Anlage d'=40mm			137,3%
	Anlage d'=10mm			97,1%
<b>Leichtverpa- ckungen (LVP)</b>	Behälterbeprobung	0,004		699,2%
	Anlage d'=80mm	0,04		203,0%
	Anlage d'=40mm			181,6%
	Anlage d'=10mm			104,8%
	Anlage d'=80mm	0,015		331,6%
	Anlage d'=40mm			296,6%
	Anlage d'=10mm			171,2%
<b>Sperrmüll, Hausmüllähnl. Gewerbeabfälle Baumischabfäl- le</b>	Anlage d'=80mm	0,04		148,3%
	Anlage d'=40mm			128,4%
	Anlage d'=10mm			90,8%
	Anlage d'=80mm	0,02		209,7%
	Anlage d'=40mm			181,6%
	Anlage d'=10mm			128,4%
<b>Elektroschrott</b>	Gerätebeprobung	0,01		32,0%
	Anlage d'=80mm	0,1		93,7%
	Anlage d'=40mm			81,2%
	Anlage d'=10mm			57,4%
	Anlage d'=80mm	0,05		132,6%
	Anlage d'=40mm			114,8%
	Anlage d'=10mm			81,2%

\* Der Variationskoeffizient für NiCd-Batterien im Hausmüll beruht auf empirischen Daten für Batterien aus Hausmüllanalysen von ARGUS (Tabelle 2) und wurde mit dem Faktor  $1/\sqrt{0,1}$  (Näherungswert für Anteile <0,1%), entsprechend dem Anteilsverhältnis NiCd-Batterien zu Batterien insgesamt (0,1), umgerechnet.

\*\* Die Variationskoeffizienten wurden mit den Faktoren  $\sqrt{2}$  für die Behälterbeprobung und  $\sqrt{1,5}$  für die Anlagenbeprobung korrigiert.

Mit den in Tabelle 5 dargestellten Variationskoeffizienten können die notwendigen Planungsdaten für die Untersuchung des Anteils an NiCd-Batterien in festen Siedlungsabfällen erstellt werden.

## 5 Untersuchungsplan für NiCd-relevante Abfallströme

Für die Auswahl repräsentativer Untersuchungsgebiete wird ein mehrstufiges Auswahlverfahren angewendet. Die entsprechenden Arbeitsschritte sind nachfolgend beschrieben und zudem in Abbildung 3 veranschaulicht.

**Schritt 1:** Für die Auswahl der einzelnen zu untersuchenden Entsorgungsgebiete bzw. Abfallbehandlungsanlagen, die im Rahmen der repräsentativen Untersuchung berücksichtigt werden sollen, wird das Gesamt-Untersuchungsgebiet (Deutschland) zunächst in drei Teilregionen unterteilt. Es wird davon ausgegangen, dass sich diese Regionen im Hinblick auf abfallwirtschaftliche Systeme voneinander unterscheiden, in sich jedoch relativ homogen sind. Für die Aufstellung des Untersuchungsplans wird die nachfolgende Aufteilung vorgenommen.

Tabelle 6: Unterteilung des Untersuchungsgebietes in Teilregionen

Nord-West	Ost	Süd
Schleswig-Holstein, Hamburg, Bremen, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen	Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin, Sachsen-Anhalt, Thüringen, Sachsen	Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Baden-Württemberg, Bayern

**Schritt 2:** Für jede der drei Regionen wird eine Differenzierung (Schichtung) nach „ländlich strukturiert“ und „städtisch strukturiert“ durchgeführt. Das bedeutet, die einzelnen Entsorgungsgebiete in den Teilregionen werden jeweils einer der beiden Kategorien zugeordnet.

**Schritt 3:** Innerhalb jeder Region werden sowohl aus den ländlichen als auch aus den städtischen Gebieten mittels Zufallsauswahl jeweils drei Gebiete bzw. Anlagen ausgewählt. Die Unterteilung nach Regionen und die Auswahl der Gebiete ist in der folgenden Abbildung 3 dargestellt.

Gemäß dem dargestellten Auswahlschema sollten insgesamt 18 Anlagen bzw. Gebiete pro Abfallstrom untersucht werden, um eine repräsentative Untersuchung zu gewährleisten. Kern des Untersuchungsplans ist zudem die Festlegung der Probenahmemethode je Abfallstrom und die zugehörigen Probenahmeparameter Probevolumen und Probenanzahl.

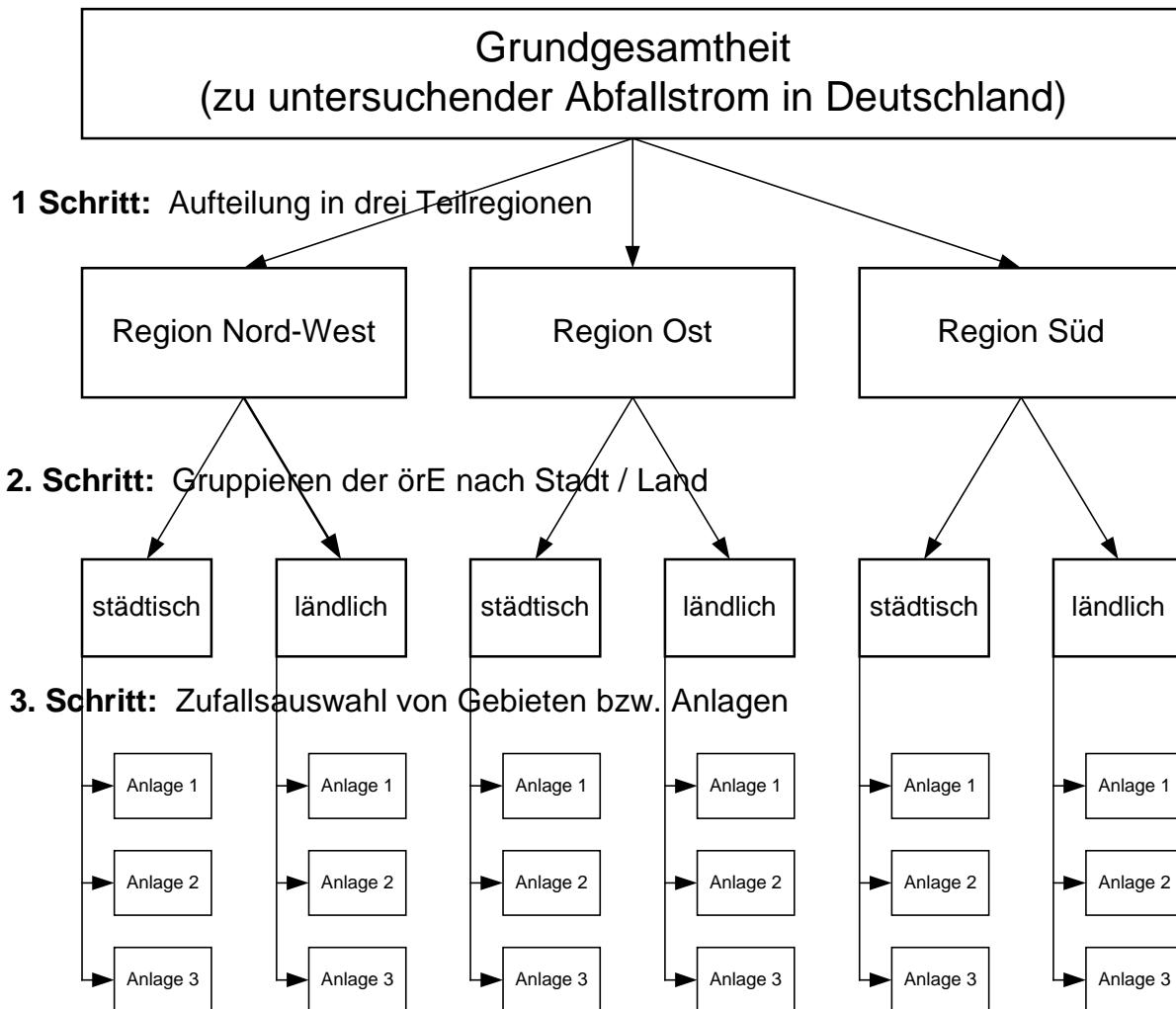


Abbildung 3: Auswahlschema für Stichprobengebiete

Aus der Abschätzung der Variationskoeffizienten durch die wahrscheinlichkeitstheoretisch-statistischen Berechnungen in Kapitel 4 kann nach Gleichung 3 die notwendige Probemenge für eine zulässige Abweichung von 10 % und ein Sicherheitsniveau von 95 % berechnet werden.

$$n_0 \geq \frac{\frac{var(a_s)}{a_{U_G}^2} \cdot (u_{1-\alpha/2})^2}{\varepsilon_{zul}^2} \quad (3)$$

wobei:  $u_{1-\alpha/2}$ : Konfidenzkoeffizient der Normalverteilung für eine Irrtumswahrscheinlichkeit von  $\alpha$   
 $\varepsilon_{zul}$ : zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit

Zur Erstellung eines Probenahmeplans an einer Sortier-/Aufbereitungsanlage für Abfälle muss von idealisierten Annahmen ausgegangen werden. Die Stoffströme in einer Sortier-/Aufbereitungsanlage sind in Abbildung 4 schematisch dargestellt. Es wird angenommen,

dass der interessierende Anteil im Inputstrom sich in einen Outputstrom mit unbedeutendem Anteil und in zwei Outputströme mit relevanten Anteilen des gesuchten Merkmals aufgeteilt. Für Hausmüll, und hausmüllähnliche Gewerbeabfälle wird ein relevanter Outputstrom von 10 bis 20 % der Inputmenge geschätzt. Für die Leichtverpackungen wird ein relevanter Outputstrom von 10 bis 30 % der Inputmenge geschätzt. Für die Aufteilung der gesuchten Anteile auf die relevanten Outputströme wird die in Abbildung 4 dargestellte Aufteilung angenommen.

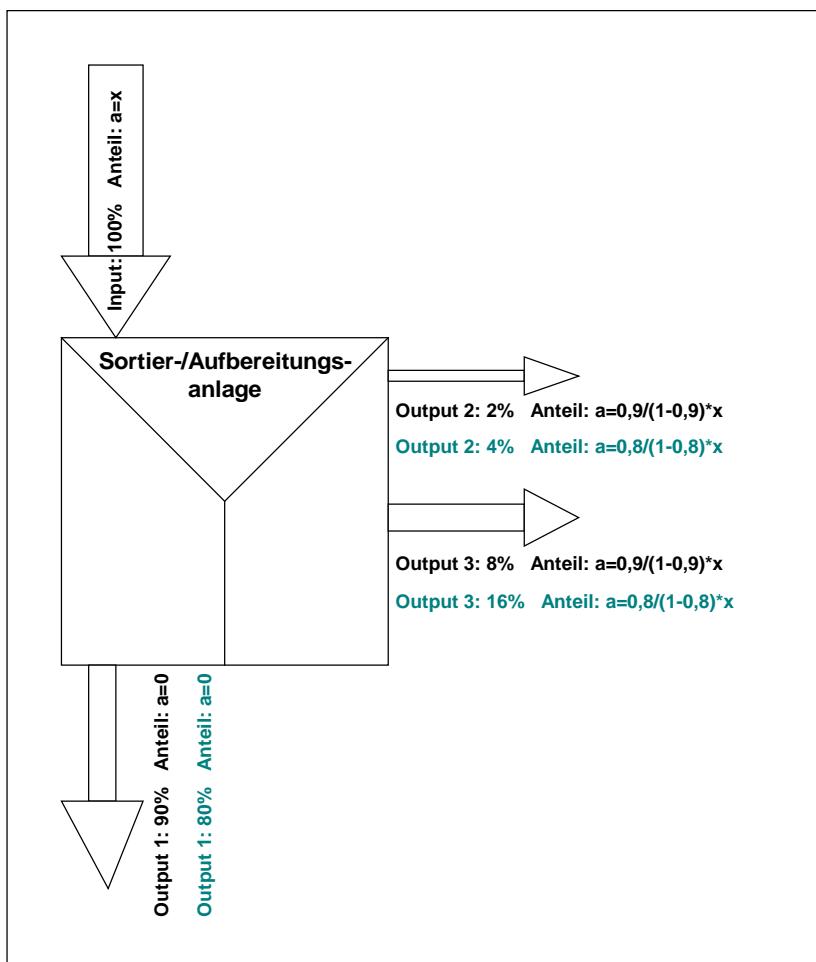


Abbildung 4: Stoffstromaufteilung einer Sortier-/Aufbereitungsanlage unter idealisierten Bedingungen

In Tabelle 7 sind die notwendigen Planungsdaten für die relevanten Abfallarten zusammengefasst. Diese Informationen sind die Grundlage für die Aufstellung des Untersuchungsplans zur Bestimmung des Anteils an NiCd-Batterien in festen Siedlungsabfällen. Tabelle 7 zeigt die Herleitung des minimalen bzw. maximalen Stichprobenumfangs, wenn der zu beprobende relevante Stoffstromanteil an einer Anlage auf 10 % bzw. 20/30 % des Gesamt-Stoffstroms abgeschätzt wird.

Tabelle 7: Stichprobenumfang bei der Untersuchung von 10 % bzw. 20/30 % relevantem Stoffstromanteil aus Anlagen

Abfallart, Art der Probenahme und Äquivalent-Durchmesser	NiCd *	Volu- men der Einzel- probe	Probe gesamt			Probe pro Anlage (bei 18 Anlagen)		
			Anzahl der Proben	Volumen der Probe [m³]	Masse der Probe [kg]	Anzahl der Proben	Volumen der Probe [m³]	Masse der Pro- be [kg]
Hausmüll Behälterauswahl	100 %	1.000 l	9.658	9.658	965.752	536	536	53.652
Hausmüll PN Anlage	10 %	10/20 l	24.114	362	72.340	1340	20	4.019
	20 %	10/20 l	48.260	724	144.782	2682		
LVP Behälterauswahl	100 %	1.000 l	18.780	18.780	845.084	1.043	1.043	46.949
LVP PN Anlage	10 %	10/20 l	70.373	1125	101.337	3.910	63	5.630
LVP PN Anlage	30 %	10/20 l	187.755	3004	270.368	10.431	167	15.020
Sperrmüll PN Anlage	10 %	10/20 l	42.224	633	126.672	2.346	35	7.037
Sperrmüll PN Anlage	20 %	10/20 l	84.482	1267	253.444	4.694	70	14.080
Gewerbe PN Anlage	10 %	10/20 l	42.224	633	126.672	2.346	35	7.037
Gewerbe PN Anlage	20 %	10/20 l	84.482	1267	253.444	4.694	70	14.080
Bau zV PN Anlage	10 %	10/20 l	42.224	633	126.672	2.346	35	7.037
Bau zV PN Anlage	20 %	10/20 l	84.482	1267	253.444	4.694	70	14.080
E-Schrott PN Anlage	-	Geräte	3.842	3,8	800	128	0,1	46.949
E-Schrott PN Anlage	10 %	10/20 l	16.870	253	50.608	938	14	2.812
E-Schrott PN Anlage	20 %	10/20 l	33.772	507	101.317	1876	28	5.629
			Probe gesamt			Probe pro Anlage (30)		
Sortierrest PN Anlage	10 %	10/20 l	70.374	1055	211.120	2.346	35	7.037
Sortierrest PN Anlage	20 %	10/20 l	140.804	2111	422.407	2.346	70	14.074

\*) geschätzter untersuchungsrelevanter Stoffstromanteil

Für die aufgeführten relevanten Abfallarten bietet sich grundsätzlich eine Beprobung in Sortier- bzw. Behandlungsanlagen an den entsprechenden Förderbändern an (PN vom Band). Da man sich hierbei auf die relevanten Teilströme in den Anlagen konzentrieren kann, in denen der Anteil an NiCd-Batterien aufkonzentriert ist, ist der erforderliche Stichprobenumfang geringer als bei einer Beprobung des vollständigen Abfallstroms (Probenahme der Behälter am Grundstück). Besonders deutlich zeigt sich dieser Sachverhalt bei getrennt erfasssten Leichtverpackungen. Dieser Abfallstrom sollte wegen des enormen erforderlichen Stichprobenumfangs nicht am Grundstück beprobt werden, zumal er sich zuverlässig und mit wesentlich geringerem Aufwand über eine Anlagenbeprobung untersuchen lässt.

Für Hausmüll zeigt sich ebenfalls, dass der Untersuchungsaufwand für die Methode der Behälterbeprobung am Grundstück wesentlich größer ist als der Untersuchungsaufwand für eine Anlagenbeprobung. Aufgrund der Tatsache, dass über eine Anlagenbeprobung ca. 75 % der Grundgesamtheit nicht in die Probe gelangen können, da nur ca. 25 % des Hausmülls Behandlungs- und Aufbereitungsanlagen zugeführt werden, sollte die Methode der Behälterbeprobung am Grundstück nicht aufgegeben werden. Gegebenenfalls müssen be-

stimmte Teilgebiete, die durch eine Anlagenbeprobung nicht zugänglich sind, mit dieser Methode untersucht werden.

Für Elektroschrott kommen zwei Varianten der Anlagenbeprobung in Betracht. Ausgehend von einem durchschnittlichen Anteil an NiCd-Batterien in Elektroschrott kann der vermutete Anteil an NiCd-Batterien nach Ausbau aus den Geräten (0,01 %) über eine Nachuntersuchung der Geräte oder über eine Beprobung der relevanten Outputströme (Sortierrest und Metallabscheidung) bestimmt werden.

Sperrmüll, hausmüllähnliche Gewerbeabfälle und Baumischabfälle können gemeinsam über die Sortierreste aus Anlagen untersucht werden, wenn die Frachten der einzelnen Abfallarten von untergeordnetem Interesse sind. In diesem Fall ist die Anzahl der in die Untersuchung einzubeziehenden Anlagen von 18 auf 30 zu erhöhen. Nur so kann sichergestellt werden, dass alle Anlagentypen ausreichend Berücksichtigung finden und die Probenanzahl auch für den Fall ausreichend ist, dass eine Abfallart keine nachweisbare Menge an NiCd-Batterien enthält.

## **6 Ermittlung der Kosten für das Monitoring**

Nach Festlegung der Randbedingungen für die einzelnen Arbeitschritte können der einhergehende Aufwand und die entsprechenden Kosten abgeschätzt werden. Wegen der Differenzierung hinsichtlich der relevanten zu untersuchenden Teilströme (10 % bzw. 20/30 %, siehe Tabelle 7) werden unterschiedliche Stichprobenumfänge untersucht. Dadurch ergeben sich die ausgewiesenen Kostenspannen.

Die Kostenabschätzungen beruhen auf folgenden Stundensätzen:

Projektingenieur	70,- €/h
Studentischer Mitarbeiter	25,- €/h
Sortierleiter	30,- €/h
Sortierer	15,- €/h

Bei sämtlichen ausgewiesenen Kosten handelt es sich um Nettoangaben.

Eine Kostenübersicht für verschiedene Probenahmemethoden, berücksichtigte Abfallarten und unterschiedliche Konzentrationen an NiCd-Batterien in den Outputströmen der Anlagen ist Tabelle 8 zu entnehmen.

Neben dem Untersuchungsaufwand an den einzelnen Abfallanlagen bzw. in den Untersuchungsgebieten muss zusätzlich der Aufwand für die Gesamtplanung, Projektkoordination und -steuerung, Gesamtauswertung der Einzelresultate sowie Berichterstellung berücksichtigt werden.

Die Gesamtkosten für das Monitoring der NiCd-Batterien in den festen Siedlungsabfällen werden maßgeblich durch die Arbeitschritte Probenahme und Sortierung verursacht. Dies liegt an der erforderlichen Mindestprobenmenge, die sowohl auf empirischer als auch auf theoretischer Basis ermittelt wurde.

Der große Schwankungsbereich wird durch die Komplexität bei Anlagenuntersuchungen verursacht. Für die Verteilung der Anteile an NiCd-Batterien und die Teilchengrößenverteilungen auf die Outputströme können nur idealisierte Annahmen getroffen werden.

In Tabelle 8 werden Kostenspannen für verschiedene Untersuchungsvarianten zusammengefasst und ausgewiesen. Je nach Vorgehensweise ergibt sich eine Kostenspanne von **1,1 – 3,3 Mio. EURO**.

Für die Interpretation der Kosten sind weiterhin folgende Gesichtspunkte zu beachten:

- Die Untersuchung des Hausmülls durch Behälterauswahl ist zwar kostenintensiver, aber auch mit einer höheren Zuverlässigkeit verbunden (100 % Gebietsabdeckung). Zur Steigerung der Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit der Daten empfiehlt es sich in einigen Gebieten den Hausmüll durch die Methode der Behälterauswahl am Grundstück zu untersuchen.
- Die gemeinsame Untersuchung von Sperrmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen und Baumischabfällen ist kostengünstiger, lässt aber keine statistisch zuverlässigen Aussagen über die Frachten an NiCd-Batterien in den einzelnen Stoffströmen zu.
- Das Untersuchungsdesign kann für eine Anlagenbeprobung nur sehr pauschal angenommen werden. In der Detailplanung können sich die Kosten noch erheblich verschieben.
- Aus Kostengründen ist es sinnvoll, zwischen einer klarenden Erstuntersuchung und regelmäßigen Überwachungsuntersuchungen zu unterscheiden. Für Abfallarten mit geringer Fracht an NiCd-Batterien könnte sich nach einer Erstuntersuchung herausstellen, dass diese Abfallarten in den Folgejahren nicht mehr zu untersuchen sind. Zur Klärung der Relevanz von Sperrmüll und Baumischabfällen empfiehlt es sich, eine Orientierungsuntersuchung (z. B. 10 % des notwendigen Stichprobenumfangs werden untersucht) durchzuführen.
- Durch die Gewinnung zuverlässiger empirischer Daten kann der Untersuchungsaufwand und damit die Kosten in den Folgejahren genauer angepasst werden. Bei einer Unterschätzung des Anteils an NiCd-Batterien um den Faktor 2 (z. B. 0,04 % anstelle 0,08 %) würde sich der Aufwand für Probenahme und Analyse im Folgejahr umgekehrt proportional um den Faktor 2 reduzieren. Bei einer Überschätzung des Anteils an NiCd-Batterien erhöht sich der Aufwand entsprechend.
- Wird die angestrebte Sicherheit für das Gesamtergebnis verdoppelt (z. B. von  $\pm 10$  auf  $\pm 5$  %), wird sich die Probemenge und damit der Aufwand für die Probenahme und Analyse vervierfachen. Wird das Konfidenzniveau von 95 % auf z. B. 90 % gesenkt, dann würde sich der Aufwand um den Faktor 0,7 verringern.
- Die Kosten können je nach Stundenansätzen und Optimierung der Arbeitsabläufe variieren und sind somit nicht als feste Größen anzusehen. Tatsächliche Kosten können nur durch eine Abfrage am Markt ermittelt werden.

Durch die genannten Gesichtspunkte kann es zu erheblichen Kostenabweichungen kommen.

Tabelle 8: Kostenübersicht für ein NiCd-Monitoring-System

	<b>Abfallstrom</b>	<b>Arbeitspunkt</b>	<b>Kosten pro Arbeitspunkt</b>	<b>Kosten pro Anlage/Gebiet</b>	<b>Kosten pro Abfallstrom Min - Max</b>
1a	Hausmüll, Probenahme der Behälter am Grundstück	Planung	3.800 €	55.480 €	18 Gebiete 998.640 €
		Probenahme	15.600 €		
		Sortierung	33.800 €		
		Auswertung	2.280 €		
1b	Hausmüll, Probenahme vom Band (MBA etc.) (alternativ zu 1a)	Planung	1.520 €	12.600 – 22.540 €	18 Anlagen 226.800 – 405.720 €
		Probenahme	6.000 – 12.000 €		
		Sortierung	2.800 – 5.600 €		
		Auswertung	2.280 – 3.420 €		
2	LVP, Probenahme vom Band (Sortieranlage)	Planung	1.520 €	19.300 – 43.690 €	18 Anlagen 347.400 – 786.420 €
		Probenahme	9.800 – 24.500 €		
		Sortierung	5.700 – 14.250 €		
		Auswertung	2.280 – 3.420 €		
3	Sperrmüll, Probenahme vom Band (Sortieranlage / Aufbereitungsanlage)	Planung	1.520 €	14.900 – 27.140 €	18 Anlagen 268.200 – 488.520 €
		Probenahme	6.900 – 13.800 €		
		Sortierung	4.200 – 8.400 €		
		Auswertung	2.280 – 3.420 €		
4	Gewerbeabfälle, Probenahme vom Band (Sortieranlage / Aufbereitungsanlage)	Planung	1.520 €	14.900 – 27.140 €	18 Anlagen 268.200 – 488.520 €
		Probenahme	6.900 – 13.800 €		
		Sortierung	4.200 – 8.400 €		
		Auswertung	2.280 – 3.420 €		
5	Baumischabfälle, Probenahme vom Band (Sortieranlage / Aufbereitungsanlage)	Planung	1.520 €	14.900 – 27.140 €	18 Anlagen 268.200 – 488.520 €
		Probenahme	6.900 – 13.800 €		
		Sortierung	4.200 – 8.400 €		
		Auswertung	2.280 – 3.420 €		
6a	Elektroschrott, Probenahme von Einzelgeräten	Planung	760,00 €	7.080€	4 Anlagen 28.320 €
		Probenahme	1.600,00 €		
		Sortierung	2.440,00 €		
		Auswertung	2.280,00 €		
6b	Elektroschrott, Probenahme vom Band (Sortieranlage / Aufbereitungsanlage) (alternativ zu 1b)	Planung	760 €	9.480 - 17.060 €	18 Anlagen 170.640 – 307.080 €
		Probenahme	4.000- 8.000 €		
		Sortierung	2.440 – 4.880 €		
		Auswertung	2.280 – 3.420 €		
7	Sperrmüll, Gewerbeabfall, Baumischabfall, Probenahme vom Band (Sortieranlage / Aufbereitungsanlage) (alternativ zu 2, 3, 4, 5)	Planung	1.520 €	14.900 – 27.140 €	30 Anlagen 447.000 – 814.200 €
		Probenahme	6.900 – 13.800 €		
		Sortierung	4.200 – 8.400 €		
		Auswertung	2.280 – 3.420 €		
	Kosten für Gesamtplanung, Koordination und Auswertung				38.800 €
	<b>Gesamtkosten für alle Abfallströme mit Behälterbeprobung des Hausmülls (1a, 2, 3, 4, 5, 6a)</b>				<b>2.217.760 - 3.317.740 €</b>
	<b>Gesamtkosten für alle Abfallströme mit Anlagenbeprobung des Hausmülls und des Elektroschrotts (1b, 2, 3, 4, 5, 6b)</b>				<b>1.588.240 - 3.003.580 €</b>
	<b>Gesamtkosten für alle Abfallströme mit den kostengünstigsten Varianten (1b, 2, 6a, 7)</b>				<b>1.088.320 - 2.073.460 €</b>

Die ausgewiesenen Kostenspannen ergeben sich durch variable Anteile an NiCd-Batterien im Output, angenommene Genauigkeit und Sicherheit für das Gesamtergebnis: ± 10 %; Konfidenzniveau: 95 %)

## 7 Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war es, den Aufwand und die Kosten für das Monitoring von NiCd-Batterien in festen Siedlungsabfällen abzuschätzen. Es wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

1. Identifizierung der Abfallströme mit relevanten Anteilen an NiCd-Batterien
2. Auswahl einer geeigneten Probenahmemethode für Abfallströme mit NiCd-Batterien
3. Ermittlung der kostenbeeinflussenden Parameter für die Probenahme
4. Entwicklung eines Untersuchungsplans für Abfallströme mit relevanten Anteilen an NiCd-Batterien
5. Ermittlung der Kosten für das Monitoring von NiCd-Batterien in festen Siedlungsabfällen

Von den ca. 2.000 Mg NiCd-Batterien, die sich diffus auf die verschiedenen Abfallarten der Siedlungsabfälle verteilen oder temporär in Haushalten und Gewerbe verbleiben wurden 1.106 Mg dem Abfallstrom Hausmüll und Sperrmüll, 72 Mg den Leichtverpackungen aus der DSD-Sammlung, 280 Mg den hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen, 144 Mg den Baumischabfällen und 150 Mg dem Elektronikschrott (verbleibende Fracht nach Batterieausbau aus Geräten) zugeordnet. 55 Mg verteilen sich auf die restlichen Abfallarten. Für ca. 200 Mg wird angenommen, dass diese Menge exportiert wird oder in Haushalten und Gewerbe verbleibt.

Als geeignete Probenahmemethode hat sich die Behälterbeprobung am Grundstück und die Anlagenbeprobung erwiesen. Für beide Methoden wurden die kostenrelevanten Parameter ermittelt. Als maßgeblich kostenbeeinflussend haben sich die Parameter Anteil der NiCd-Batterien im Stoffstrom und die Massenverteilung der Stoffteilchen im Abfallstrom herausgestellt. Für die Festlegung des Einzelprobevolumens und die Abschätzung der Massenverteilung wird die Teilchengröße und Teilchengrößenverteilung und die Schüttdichte benötigt.

Die Sortier- und Aufbereitungsvorgänge in Abfallbehandlungsanlagen führen zu einer Aufkonzentrierung und Homogenisierung in den NiCd-relevanten Outputströmen der Anlagen. Höhere Anteile an NiCd-Batterien und eine Verkleinerung der Teilchengrößen in den Outputströmen der Anlagen führen zu geringeren Probemengen und dadurch zu deutlichen Kostenvorteilen für diese Methode.

Die Untersuchung des Hausmülls nach der Methode der Anlagenbeprobung ist die kostengünstigere Variante. Da mit dieser Methode nur auf ca. 25 % der Grundgesamtheit zugegriffen werden kann, ist diese Methode kritisch zu betrachten. Zur Steigerung der Sicherheit und Vertrauenswürdigkeit der Daten empfiehlt es sich in einigen Gebieten den Hausmüll durch die Methode der Behälterauswahl am Grundstück zu untersuchen.

Auf der Grundlage der ermittelten Probemengen und der geschätzten Kosten für die Planung, Probenahme, Sortierung und Auswertung einer Abfalluntersuchung wurden Kosten für das Monitoring von NiCd-Batterien ermittelt. Je nach Vorgehensweise ergibt sich eine Spanne von **1,1 – 3,3 Mio. EURO**. Sie wird maßgeblich durch die Arbeitsschritte Probenahme und Sortierung verursacht. Dieser hohe Aufwand ist auf die Mindestprobenmenge zurückzuführen. Der große Schwankungsbereich wird durch unterschiedliche methodische Ansätze und die Komplexität bei Anlagenuntersuchungen verursacht.

Durch verschiedene Untersuchungsmethoden, Unsicherheiten darüber, ob bestimmte Abfallarten aufgrund ihrer Relevanz in die Untersuchung einbezogen werden müssen, Unsicherheiten bezüglich der tatsächlichen Anteile an NiCd-Batterien in den Abfallströmen, Unsicherheiten bezüglich der Aufteilung der Frachten in den Outputströmen der Anlagen, Veränderung der zulässigen Fehlergrenzen, Veränderung des vorgegebenen Konfidenzniveaus, Variation der Arbeitskosten für das Monitoring u. a. kann es zu erheblichen Abweichungen der ausgewiesenen Kostenspannen kommen.

---

## Anhang

### Liste der kontaktierten Experten

Name	Firma
Dr. Jürgen Fricke	Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem (GRS) Batterien
Nicole Knudsen	Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem (GRS) Batterien
Dr. Christiani	Ingenieurbüro HTP
Fr. Bremerstein	DSD, Abt. Technik- und Systementwicklung
Eberhard Lütge	aha Hannover (Abfallzweckverband)
Ulf Meyer zu Westerhausen	Abfallbehandlungszentrum Hannover (Bioabfallkompostierung)
Detlev Cohrs	Bund Deutscher Stahlrecycling und Entsorgungsunternehmen
Herr Pohl	Herhof Umwelttechnik GmbH
Herr Gollub	Herhof Umwelttechnik GmbH
Herr Ebert	Bosch Servicezentrum
Herr Cerowski	Bosch Servicezentrum
Herr Lange	Bauschutt Recycling GmbH
Herr Gumbrecht	BASA (Bauabfallsortieranlage)
Fardin Seddigh	Ing.-Büro Seddigh und Klausing
Beate Winkler	ALBA