



Technische Universität Wien  
Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft



# Stoffbilanzen mechanisch-biologischer Anlagen zur Behandlung von Restmüll

im Auftrag des  
Bundesministeriums für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft  
und der Umweltbundesamt GmbH



[lebensministerium.at](http://lebensministerium.at)

umweltbundesamt<sup>U</sup>

SEMBA



# **Stoffbilanzen mechanisch-biologischer Anlagen zur Behandlung von Restmüll (SEMBA)**

im Auftrag des  
Bundesministeriums für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft  
und der  
Umweltbundesamt GmbH

## **Endbericht**

Stefan Skutan  
P. H. Brunner

Wien, im Juli 2006

Projektleitung  
Stefan Skutan

Projektbearbeitung  
Stefan Skutan  
P. H. Brunner

Wissenschaftliche Begleitung  
Leo S. Morf

Mathematik und Programmierung der Simulationen  
Oliver Cencic

|                     |                         |
|---------------------|-------------------------|
| Probenaufbereitung  |                         |
| Anita Glatz         | Michael Bazant-Hegemark |
| Andrea Skutan       | Robert Abele            |
| Vesela Abadzhieva   | Marlies Vötsch          |
| Katharina Mosgöller | Hans Berger             |
| Gregor Preisl       | Fabienne Schlessler     |
| Martin Floh         | Stefan Mühlbauer        |
| Milko Milev         | Armel Ketchadji         |
| Peter Langkammer    | Stefan Hackl            |
| Stefan Skutan       | Karin Berger            |

Analytik (Labor TU Wien)  
Eva Ritter

Impressum  
Technische Universität Wien  
Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft  
Abteilung Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement  
A-1040 Wien, Karlsplatz 13/226.4  
Tel.: +43 1 58 801 226 42 (Skr.)

Fax.: +43 1 504 22 34

e-mail: [aws@iwa.tuwien.ac.at](mailto:aws@iwa.tuwien.ac.at)  
URL: <http://www.iwa.tuwien.ac.at>



## KURZFASSUNG

Ziel dieses Forschungsprojekts war, an großtechnischen Anlagen zur mechanisch-biologischen Restmüllbehandlung Stoffbilanzen zu messen. Mit der Methode der Stoffflussanalyse wurden die Anlagen MBA Oberpullendorf, MA Kirchdorf an der Krems und Splittinganlage der MA 48 in Wien untersucht. In Oberpullendorf wurden zwei verschiedene Aufbereitungsvarianten und die Rotte stoffbilanziert. Dieser Versuch diente zusätzlich dem Test für Probenahme- und Probenaufbereitungspläne, wie sie im ersten Projektabschnitt theoretisch ausgearbeitet wurden.

Die mechanischen Aufbereitungsschritte sind in der Lage, einzelne Elemente in bestimmten Fraktionen anzureichern. Cadmium als Bestandteil der NiCd-Akkus wird mehr als zur Hälfte durch die Magnetabscheidung mit dem Schrott ausgetragen, die verbleibende Fracht, die überwiegend Kunststoffen zuzuordnen ist, reichert sich in heizwertreichen Fraktionen an. Eine ebenso deutliche Lenkung ist bei Eisen über die Magnetabscheidung festzustellen. Weniger ausgeprägt aber dennoch eindeutig ist die Anreicherung von Kupfer und Chrom in den heizwertreichen Fraktionen. Das Rottematerial wird demnach gegenüber dem Restmüllinput an Cadmium, Eisen, Chrom und Kupfer deutlich entfrachtet. Eine generelle Metallentfrachtung ist jedoch nicht gegeben. Die Wirbelstromabscheider der Anlagen Oberpullendorf und Wien sind nicht in der Lage, mehr als 10 % der Kupfer- und Zinkfrachten bzw. 45 % der metallischen Aluminiumfracht (entsprechend ca. 15 % der gesamten Aluminiumfracht) abzutrennen.

Die festgestellten Unterschiede in den Stoffverteilungen lassen sich zum Teil mit den Anlagentechniken erklären. In der Schwer- und Feinfraktion der MA Kirchdorf finden sich wegen schwacher Magnetabscheidung überdurchschnittlich viele Metallgegenstände und Batterien. Die Transfers von Cadmium, Chrom, Nickel, Kupfer und Zink in den Schrott, die zum Teil mit dem Eisen gekoppelt sind, (Batterien, Edelstahl, Spulen) sind vergleichsweise niedrig. Der kleinere Siebschnitt von 25 mm und die Dano-Trommel der MBA Oberpullendorf wirken sich im Vergleich zu den Anlagen Kirchdorf und Wien (beide 50 mm Siebschnitt) dahingehend aus, dass der Transfer für die meisten Metalle in das Rottematerial in der MBA Oberpullendorf kleiner ist. Die zerstörende Wirkung der Dano-Trommel auf Papier, Pappe und Hygieneartikel bewirkt trotz des kleineren Siebschnitts einen vergleichbaren Massentransfer in das Rottematerial und damit eine Verdünnung der Metalle. Die Splittinganlage Wien ist unter den drei Anlagen am besten in der Lage, mineralisches Material aus den heizwertreichen Fraktionen zu entfernen.

Die Probenahme und -aufbereitung stellte sich als Schlüsselstelle der Stoffbilanzierung heraus. Es war notwendig, neue Techniken anzuwenden, um das Ziel der Bestimmung durchschnittlicher Güterzusammensetzungen inklusive aller Beiträge aus „Störstoffen“ der Probenaufbereitung (vornehmlich metallische Werkstoffe) zu erreichen. Die Notwendigkeit bestand, weil z.B. Kupfer, Chrom und Nickel deutlich über 50 % in dieser Form vorliegen können. Die konventionelle Bestimmung kann diese Anteile nicht oder nur mit größter Unsicherheit erfassen. Erkenntnisse darüber, in welcher Form Metalle im Abfall vorliegen, wurden bei den Separatbestimmungen metallischer Anteile als „Nebenprodukte“ der Stoffbilanzen gewonnen. Diese Ergebnisse sind von Bedeutung für die Erstellung statistisch-mathematisch abgesicherter Probenahmepläne für MBA-Produkte und für Fragen der Rückgewinnung von Metallen aus Abfällen.



## **DANKSAGUNG**

Dieses Projekt wurde im Auftrag und mit Finanzierung von BMLFUW und Umweltbundesamt GmbH durchgeführt. Beiden Auftraggebern ist insbesondere für die Geduld zu danken, die auf Grund zahlreicher Verzögerungen bei der Probenaufbereitung bis zum Abschluss der Arbeiten notwendig war.

Dank gilt auch den Anlagenbetreibern für die Ermöglichung der Versuche auf ihren Abfallbehandlungsanlagen und für die Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der praktischen Arbeiten vor Ort. Besonders ist in diesem Zusammenhang den Herren Ing. Wilflinger und Verbandsobmann Limberger vom BAV Kirchdorf an der Krems zu danken für die Organisation und finanzielle Unterstützung der Unterkunft für das Arbeiterteam der TU Wien im Ökodorf Schlierbach.







## INHALTSVERZEICHNIS

### KURZFASSUNG

|          |   |          |
|----------|---|----------|
| <b>1</b> | <b>EINLEITUNG .....</b>   | <b>1</b> |
| 1.1      | Bedeutung der mechanischen und mechanisch-biologischen Restmüllbehandlung für die österreichische Abfallwirtschaft.....       | 1        |
| 1.2      | Bisherige Arbeiten zu Stoffflussanalysen an mechanischen oder mechanisch-biologischen Anlagen.....                            | 2        |
| <b>2</b> | <b>ZIELE UND FRAGESTELLUNGEN .....</b>  | <b>7</b> |
| <b>3</b> | <b>METHODEN.....</b>  | <b>9</b> |
| 3.1      | Stoffflussanalyse .....   | 9        |
| 3.2      | Einführung in die Probenahme, Aufbereitung und Analyse von MBA-Outputmaterial .....   | 14       |
| 3.2.1    | <i>Repräsentative Proben</i> .....  | 14       |
| 3.2.2    | <i>Ausreißer</i> .....  | 16       |
| 3.2.3    | <i>Heterogenität</i> .....  | 16       |
| 3.2.4    | <i>Heterogenität versus Variabilität</i> .....  | 19       |
| 3.2.5    | <i>Probenahme aus dem heterogenen Gemenge</i> .....   | 20       |
| 3.2.6    | <i>Fehler bei der Probenteilung</i> .....   | 23       |
| 3.2.7    | <i>Zerkleinern – Mischen – Teilen als Einheit</i> .....   | 25       |
| 3.3      | Statistische Planungs- und Auswertungsmethoden .....  | 27       |
| 3.3.1    | <i>Varianzkomponentenanalyse</i> .....  | 27       |
| 3.3.2    | <i>Simulation der Varianzkomponentenbestimmung</i> .....  | 30       |
| 3.3.3    | <i>Kolmogorov-Smirnov-Test (KS-Test)</i> .....  | 33       |
| 3.3.4    | <i>Gauß'sche Fehlerfortpflanzung</i> .....  | 33       |
| 3.3.5    | <i>Bestimmung der Streuung in Abhängigkeit der Probenmasse nach dem modifizierten Ansatz von Bunge und Bunge (1999)</i> ..... | 33       |
| 3.3.6    | <i>Bestimmung der Streuung in Abhängigkeit der Probenmasse durch Simulation mit der Binomialverteilungsstatistik</i> .....    | 37       |
| 3.3.7    | <i>Probenmassebestimmung aus bestehenden Messreihen</i> .....   | 38       |
| 3.3.8    | <i>Auswertung der Stoffbilanzen mit Berechnung der Unsicherheiten anhand der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung</i> .....         | 39       |
| 3.3.9    | <i>Auswertung durch Monte Carlo Simulation</i> .....  | 45       |
| 3.3.10   | <i>Optimierungsverfahren für die Versuchsplanung</i> .....  | 45       |
| 3.4      | Aufbereitung der Proben.....  | 49       |
| 3.4.1    | <i>Grundsätze und Rahmenbedingungen</i> .....   | 49       |
| 3.4.2    | <i>Voraufbereitung am Ort der Probenahme</i> .....  | 50       |



|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.4.3    | <i>Laboraufbereitung</i> .....  | 63        |
| 3.5      | Chemische Analysen.....   | 73        |
| 3.5.1    | <i>Prüfverfahren Labor Umweltbundesamt GmbH Wien</i> .....  | 73        |
| 3.5.2    | <i>Prüfverfahren Labor TU Wien, IWA</i> .....   | 74        |
| 3.6      | Vergleichende chemische Analysen zwischen Umweltbundesamt und IWA .....                                   | 75        |
| 3.6.1    | <i>Referenzmaterial „BCR 146 R Sewage sludge of industrial origin“</i> .....                              | 75        |
| 3.6.2    | <i>Vergleichsmessungen an Aufschlusslösungen des Umweltbundesamtes</i> .....                              | 75        |
| 3.6.3    | <i>Vergleichsmessung an Abfallproben</i> .....  | 76        |
| 3.7      | Bestimmung identifizierbarer Werkstoffe und Produkte .....  | 76        |
| 3.7.1    | <i>Bestimmung der Werkstoffe und Produkte</i> .....   | 78        |
| 3.7.2    | <i>Bestimmung des Batterietyps</i> .....  | 79        |
| <b>4</b> | <b>ERGEBNISSE</b> .....   | <b>81</b> |
| 4.1      | Vorerhebungen - Provisorische Bilanzen aus Literaturdaten .....   | 81        |
| 4.1.1    | <i>Güter mit hohen Stoffkonzentrationen</i> .....   | 81        |
| 4.1.2    | <i>Provisorische Bilanzen</i> .....   | 84        |
| 4.1.3    | <i>Aussagekraft der Vorerhebungen</i> .....   | 117       |
| 4.2      | Versuch MBA Oberpullendorf .....  | 120       |
| 4.2.1    | <i>Anlagenbeschreibung</i> .....  | 120       |
| 4.2.2    | <i>Versuchsplanung</i> .....  | 123       |
| 4.2.3    | <i>Ursprünglicher Plan</i> .....  | 123       |
| 4.2.4    | <i>Ausgeführter Probenahmeplan nach Anlagenausfall</i> .....  | 130       |
| 4.2.5    | <i>Probenahme und Aufbereitung</i> .....  | 131       |
| 4.2.6    | <i>Güterbilanzen</i> .....  | 137       |
| 4.2.7    | <i>Zusammensetzung der Güter</i> .....  | 140       |
| 4.2.8    | <i>Varianzkomponentenanalysen über die Bestimmung der durchschnittlichen Güterzusammensetzungen</i> ..... | 156       |
| 4.2.9    | <i>Zuordnung der Cadmiumfracht in der Fraktion &gt;65 µm zu Trägern aus Kunststoff</i> .....              | 174       |
| 4.2.10   | <i>Stoffbilanzen</i> .....  | 175       |
| 4.3      | Versuch Kirchdorf an der Krems .....  | 179       |
| 4.3.1    | <i>Anlagenbeschreibung</i> .....  | 179       |
| 4.3.2    | <i>Versuchsplanung</i> .....  | 179       |
| 4.3.3    | <i>Probenahme und Probenaufbereitung</i> .....  | 182       |
| 4.3.4    | <i>Güterbilanz</i> .....  | 192       |
| 4.3.5    | <i>Zusammensetzung der Güter</i> .....  | 192       |
| 4.3.6    | <i>Stoffbilanzen</i> .....  | 197       |
| 4.4      | Splittinganlage Wien.....   | 198       |
| 4.4.1    | <i>Anlagenbeschreibung</i> .....  | 198       |



|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.4.2    | <i>Versuchsplanung</i> .....   | 199        |
| 4.4.3    | <i>Probenahme und Probenaufbereitung</i> .....   | 199        |
| 4.4.4    | <i>Güterbilanz</i> .....   | 200        |
| 4.4.5    | <i>Zusammensetzung der Güter</i> .....   | 201        |
| 4.4.6    | <i>Stoffbilanzen</i> .....   | 213        |
| 4.5      | <i>Anlagenvergleich</i> .....  | 214        |
| 4.5.1    | <i>Güter</i> .....   | 214        |
| 4.5.2    | <i>Trockensubstanz und Wasser</i> .....  | 215        |
| 4.5.3    | <i>Asche und Glühverlust</i> .....   | 218        |
| 4.5.4    | <i>Kohlenstoff gesamt (TC), organischer (TOC) und anorganischer Kohlenstoff (TIC)</i> .....  | 221        |
| 4.5.5    | <i>Stickstoff</i> .....  | 225        |
| 4.5.6    | <i>Schwefel</i> .....  | 226        |
| 4.5.7    | <i>Phosphor</i> .....  | 227        |
| 4.5.8    | <i>Aluminium</i> .....   | 228        |
| 4.5.9    | <i>Cadmium</i> .....   | 230        |
| 4.5.10   | <i>Chrom</i> .....   | 232        |
| 4.5.11   | <i>Kupfer</i> .....  | 234        |
| 4.5.12   | <i>Eisen</i> .....   | 236        |
| 4.5.13   | <i>Quecksilber</i> .....   | 238        |
| 4.5.14   | <i>Nickel</i> .....  | 241        |
| 4.5.15   | <i>Blei</i> .....  | 242        |
| 4.5.16   | <i>Zink</i> .....  | 244        |
| 4.6      | <i>Organische Verbindungen - Indikatorsubstanzen</i> .....   | 247        |
| 4.6.1    | <i>Zusammenstellung von Kriterien für die Auswahl von Substanzen zur Beschreibung der Leistung einer MBA</i> .....                                 | 247        |
| 4.6.2    | <i>Auswahl von Parametern (Stoffe und Stoffgruppen) und Indikatoren</i> .....  | 251        |
| 4.6.3    | <i>Provisorische Bilanzierung des TOC und N auf Basis von Sortieranalysen</i> .....  | 261        |
| 4.6.4    | <i>Aufteilung der Kohlenstoff und Stickstofffrachten auf Stoffgruppen</i> .....  | 263        |
| 4.6.5    | <i>Verhalten von PCB und PCDD/PCDF</i> .....   | 266        |
| <b>5</b> | <b>SCHLUSSFOLGERUNGEN</b> .....  | <b>269</b> |
| 5.1.1    | <i>Zusammensetzung der MBA-Outputs</i> .....   | 269        |
| 5.1.2    | <i>Konzentrierungsleistung, Schadstoffentfrachtung</i> .....   | 272        |
| 5.1.3    | <i>Defizit an praxistauglichen Methoden bei der Bestimmung der durchschnittlichen Abfallzusammensetzung zur Berechnung von Stofffrachten</i> ..... | 274        |
| 5.1.4    | <i>Praxistauglichkeit der Optimierungsmethode zur Versuchsplanung</i> .....  | 275        |



|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>6</b>  | <b>ALLGEMEINE METHODE ZUR STOFFBILANZIERUNG VON MECHANISCHEN UND MECHANISCH-BIOLOGISCHEN ANLAGEN ZUR BEHANDLUNG VON RESTMÜLL .....</b> | <b>279</b> |
| 6.1       | Methode .....  | 279        |
| 6.1.1     | <i>Voraussetzungen.....</i>  | <i>279</i> |
| 6.1.2     | <i>Systemdefinition .....</i>  | <i>280</i> |
| 6.1.3     | <i>Bilanzzeiträume und Bilanzarten .....</i>   | <i>282</i> |
| 6.1.4     | <i>Güterbilanzierung .....</i>   | <i>284</i> |
| 6.1.5     | <i>Bestimmung der durchschnittlichen Stoffkonzentrationen.....</i>   | <i>285</i> |
| 6.1.6     | <i>Versuchsoptimierung - Bestimmung der Probenzahlen.....</i>  | <i>294</i> |
| 6.1.7     | <i>Versuchsdurchführung .....</i>  | <i>295</i> |
| 6.1.8     | <i>Auswertung.....</i>   | <i>295</i> |
| 6.2       | Realisierungsmöglichkeiten.....  | 295        |
| 6.2.1     | <i>Bilanzierung nach Rezept - Faustzahlen zur Versuchsplanung.....</i>   | <i>295</i> |
| 6.2.2     | <i>Arbeitszeitbedarf der Probenaufbereitung .....</i>  | <i>298</i> |
| 6.2.3     | <i>Alternativen bei der Bestimmung der durchschnittlichen Stoffkonzentrationen.....</i>  | <i>301</i> |
| 6.3       | Fehlgeschlagene Versuche im Rahmen der Probenaufbereitung.....   | 303        |
| 6.3.1     | <i>Feinzerkleinerung der Kunststoffe .....</i>   | <i>303</i> |
| <b>7</b>  | <b>BEGRIFFSBESTIMMUNGEN.....</b>   | <b>307</b> |
| <b>8</b>  | <b>VERWENDETE SYMBOLE.....</b>   | <b>311</b> |
| <b>9</b>  | <b>VERWENDETE UND ZITIERTER NORMEN .....</b>   | <b>313</b> |
| <b>10</b> | <b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>   | <b>315</b> |
| <b>11</b> | <b>ANHANG.....</b>   | <b>321</b> |
| 11.1      | Daten für die provisorische Bilanzierung .....   | 321        |
| 11.2      | Probenahmedokumentation.....   | 340        |



## 1 EINLEITUNG

### 1.1 Bedeutung der mechanischen und mechanisch-biologischen Restmüllbehandlung für die österreichische Abfallwirtschaft

In den letzten Jahren ist gemessen an den behandelten Mengen die Bedeutung der mechanisch-biologischen Behandlung stark gestiegen. Der Anstieg ist ursächlich begründet im Ablagerungsverbot für unbehandelten Restmüll durch die Bestimmungen der Deponieverordnung (BGBl. Nr. 164/1996 idF BGBl. II Nr. 49/2004). Der Vergleich der Behandlungsmengen von 1999 und der prognostizierten Daten für 2004 (Angaben aus dem BAWP 2001) zeigt, dass bis dato die mechanisch-biologische Restmüllbehandlung durch den Behandlungszwang einen stärkeren Zuwachs erfahren hat als die Restmüllverbrennung. Die Steigerung von 194.000 auf 540.000 t steht der von 456.000 auf 690.000 t bei der Restmüllverbrennung gegenüber. In dieser Betrachtung nicht eingerechnet ist die Verbrennung bzw. Mitverbrennung der rund 270.000 t heizwertreicher Fraktionen, die als Produkte der mechanischen Prozesse zur Entsorgung anfallen. Für die Deponierung entstehen aus der mechanisch-biologischen Behandlung rund 110.000 t Rotterest und in Folge 70.000 t Rückstände aus der Verbrennung der heizwertreichen Fraktionen.

*Tabelle 1-1: Mechanisch-biologische Anlagen zur Restmüllvorbehandlung in Österreich (Quelle: Umweltbundesamt GmbH, Abfallwirtschaftliche Anlagen- und Stoffdatenbank, Stand 10. 3. 2004)*

| Anlagenstandort        | Jahreskapazität<br>[t/Jahr] |
|------------------------|-----------------------------|
| Aich-Assach (Stmk.)    | 7.000                       |
| Allerheiligen (Stmk.)  | 17.000                      |
| Frojach-Katsch (Stmk.) | 14.000                      |
| Fronleiten (Stmk.)     | 76.000                      |
| Halbenrain (Stmk.)     | 70.000                      |
| Liezen (Stmk.)         | 19.000                      |
| Gerling (OÖ)           | 15.000                      |
| Inzersdorf (OÖ)        | 9.000                       |
| Linz (OÖ)              | 85.000                      |
| Ort im Innkreis (OÖ)   | 15.000                      |
| Ternberg (OÖ)          | 35.000                      |
| Fischamend (NÖ)        | 30.000                      |
| Stockerau (NÖ)         | 75.000                      |
| St. Pölten (NÖ)        | 95.000                      |
| Wr. Neustadt (NÖ)      | 27.000                      |
| Siggerwiesen (Sbg.)    | 145.000                     |
| Zell am See (Sbg.)     | 27.000                      |
| Oberpullendorf (Bgld.) | 133.000                     |
| Kufstein (T)           | 9.500                       |
| Wien (W)*              | 175.000                     |
| <b>SUMME</b>           | <b>1.129.000</b>            |

\* Die Splittinganlage der MA 48 in Wien ist eine mechanische Behandlungsanlage ohne biologische Behandlungsstufe



Bezüglich der zu deponierenden Massen sind somit mechanisch-biologische Behandlung und Restmüllverbrennung etwa gleich bedeutend. Die tatsächlich mechanisch oder mechanisch-biologisch behandelten Restmüllmengen für 2004 können noch nicht abgeschätzt werden. Die tatsächlichen Durchsatzmengen der rund um den Jahreswechsel 2003/2004 in Betrieb gegangenen Anlagen sind noch abzuwarten. Als in Betrieb, Planung bzw. Bau befindliche Anlagen mit einer Summe von rund 800.000 t Jahreskapazität werden in der Datenbank des Umweltbundesamtes die in Tabelle 1-1 aufgelisteten angegebenen. Nach Angaben des BMLFUW sind mit Stand Juni 2004 zwei weitere Anlagen geplant, die MBA Innsbruck (T) mit 120.000 t/Jahr und die MBA Lavant (K) mit 20.000 t/Jahr Kapazität.

## **1.2 Bisherige Arbeiten zu Stoffflussanalysen an mechanischen oder mechanisch-biologischen Anlagen**

Arbeiten, die das Ziel der Messung von Stoffflüssen bei der mechanischen oder mechanisch-biologischen Restmüllbehandlung hatten, sind spärlich. Die einzige Arbeit, die sich mit einer Stoffflussanalyse bei einer MBA heutigen Anforderungsprofils auseinandersetzt, ist die von Harant et al. (1999). Sonst sind Arbeiten zu nennen, die im weiteren thematischen Umfeld der MBA angesiedelt sind. An der TU Dresden wurden von Rotter (2001) und Kost (2001) Dissertationen verfasst, welche die mechanische Aufbereitung von Restabfall zur Herstellung von Ersatzbrennstoffen zum Thema haben. Letztendlich sind die Versuche von Krauß, Bilitewski und Tabasaran in den 1980er Jahren zu nennen, die eine Schadstoffentfrachtung von kompostierbaren Restmüllfraktionen bzw. BRAM („Brennstoff aus Müll“) zum Ziel hatten. Allen Arbeiten ist gemeinsam, dass direkt oder indirekt das Problem der Schwermetallbestimmung in den heterogenen Outputfraktionen angesprochen wird. Die Unsicherheiten der Ergebnisse sind lediglich in den Arbeiten von Rotter (2001), Kost (2001) und Harant (1999) ansatzweise berücksichtigt bzw. angegeben.

Tabasharan (1984) untersuchte die Schwermetallgehalte verschiedener Sortierfraktionen unterteilt in Kornklassen mit dem Zweck, die Eignung derer zur Kompostherstellung zu beschreiben. Es wurden die Fraktionen „Feinanteil“, „Native Organik“, „Papier“, und „Kunststoffe“ gebildet und weiter in 9 verschiedene Korngrößenklassen unterteilt. Die Schwermetallgehalte der Siebfraktionen in unsortiertem Zustand (außer bei der Fraktion <10 mm) werden allerdings nicht angegeben, sind aber aus den angegebenen Daten errechenbar. Es zeigte sich, dass der Feinanteil überdurchschnittlich viel Cadmium und Zink enthielt, „Papier“ mit Ausnahme von Tiefdruckpapier und „native Organik“ allgemein geringe Schwermetallgehalte aufwiesen und die Fraktion „Kunststoffe“ durch erhöhte Cadmiumgehalte auffiel. Bei der Untersuchung der Fraktion „native Organik“ traten allerdings Ausreißer auf, die die Aussagekraft der Ergebnisse stark einschränken. Bei Blei ändert sich der Mittelwert bei Berücksichtigung der Ausreißer von 114 auf 397 mg/kg (TS) bei Zink von 301 auf 371 mg/kg (TS).

Krauß (1985) lieferte eine Arbeit, die die Schwermetallbelastung verschiedener Siebfraktionen des Hausmülls beschreibt und eine sehr ausführliche Darstellung der Probleme bei der Schwermetallbestimmung gibt. Krauß (1985) stellt einleitend fest, dass die realen Schwermetallgehalte höher sein müssten als gemessene, da stets die Fraktion der Nichteisenmetalle ausgeklammert würde. Die Siebfraktionen 0-8 mm, 8-40 mm, 40-120 mm und >120 mm wurden in die Fraktionen „Organisch“, „Papier“, „Kunststoff“, „Verbund“ und „>40 mm Nichteisenmetalle“ sortiert, um die Beiträge der Stoffgruppen zum Schadstoffgehalt aufschlüsseln zu können. Die Zusammensetzung der Fraktion „>40 mm Nichteisenmetalle“



wurde (konnte) nicht berücksichtigt werden. Die Ergebnisse zeigten bei Blei, Zink, Kupfer, Nickel, Chrom und Quecksilber eine geringe Entfrachtung der zur Kompostierung bestimmten Fraktion durch Abtrennung der Feinfraktion 0-8 mm. Bei Zink wurde die stärkste Wirkung festgestellt, bei Cadmium kam es zu einer deutlichen Anreicherung in der Grobfraktion >40 mm. Der Großteil der Cadmiumfracht konnte eindeutig Kunststoffen zugeordnet werden.

Krauß (1985) wählte eine Probenaufbereitung mit Abtrennung einer Schwerfraktion vor der Feinaufbereitung (ähnlich wie in dieser Arbeit), um die schneidenden Mahlwerkzeuge zu schonen. Die Schwerfraktionen der Probenaufbereitung wurde allerdings nicht weiter fein aufbereitet, um sie der Hauptprobenmenge wieder zuzusetzen, sondern separaten Bestimmungen einerseits durch chemische Analyse andererseits durch Sortierung der Partikel unterworfen. In den Schwerfraktionen wurden durchwegs hohe Gehalte an Schwermetallen festgestellt. Hohe Metallgehalte in den Proben wurden meist durch große Metallbeiträge aus der Schwerfraktion verursacht (Ausnahme Cadmium). Durch Auslesen von Kupfer und Messing (Messing mit 60 % Kupfergehalt angenommen) und Auswaage dieser Partikel wurden gute Übereinstimmungen mit den Messwerten der nasschemischen Analytik für Kupfer erzielt. Für Kupfer werden folgende Quellen genannt: Drähte unterschiedlichster Dicke (0,1-2 mm), Messingformteile (Zahnradchen, Patronenhülsen, Schrauben, Muttern), Messingdrehspäne, Kugelschreiberminen, Reißverschlußglieder, Druckknöpfe, Kettenglieder. Für Zink wird die Übereinstimmung zwischen Sortierung und naßchemischer Analyse als schlecht bezeichnet mit der Ursache der schlechten Erkennbarkeit von Zinkpartikeln als Zinkträger zusätzlich zu Messingteilchen. Für Blei wird über die Bestimmbarkeit durch Sortierung der Metallstückchen keine Angabe gemacht. Als identifizierbare Bleiquellen werden Folienbruchstücke (Bleikappen von Weinflaschen), Gitterbruchstücke und Bleidioxidkörnchen (aus Autobatterien), Lötzinn, Kugeln aus Spielzeuggewehren, Lametta und Folienbruchstücke unbekannter Herkunft (evtl. von Sofortbildfilmen) genannt. An Hand von Schwerfraktionierungen wurde auch in den Leichtfraktionen der Probenaufbereitung das Vorhandensein von Metallteilchen nachgewiesen.

Krauß (1985) kommt zu dem Schluss, dass die Dichtentrennung zur Abtrennung von metallischen Teilchen und körnigen Metalloxiden weit effektiver sei als die Klassierung nach Korngrößen, um eine Schwermetallentfrachtung zu erreichen. Durch Untersuchungen an der ORFA Anlage in Leibstadt konnte bestätigt werden, dass Blei, Kupfer und Zink bei der Dichtentrennung verstärkt in die Schwerfraktion gelenkt werden.

Bilitewski et al. (1985) veröffentlichten unter dem Titel „Bilanz eines Aufbereitungsprozesses“ die Untersuchungen zur Stoffverteilung einer mechanischen (Versuchs-) Aufbereitungsanlage in Wien. Diese Anlage bestand aus einem Magnetabscheider, einer Hammermühle, Sieben mit 4, 5, und 18 mm Lochweite und einem Zick-Zack-Windsichter. Der Windsichter trennte die Siebfraktion >18 mm in eine Leicht- und eine Schwerfraktion, wobei die Leichtfraktion durch nochmalige Siebung bei 4 mm von anhaftenden Feianteilen befreit werden sollte. Untersucht wurde nur der Materialfluss nach dem Magnetabscheider (erstes Aggregat in der Anlage noch vor der Hammermühle). Die Outputströme wurden durch chemische Analysen und Sortieranalysen untersucht. Die Aussagekraft der Untersuchungen ist eingeschränkt, da die Ergebnisse der drei Versuchstage sowohl bei den chemischen Analysen als auch den Sortieranalysen stark streuen. Die Autoren führen die Streuungen der chemischen Analysen vor allem auf die Heterogenität des Materials zurück und nennen bezüglich der Auswertung, dass „Statistisch erkennbare Ausreißer, meist auf Vor-Ort-Probe-



nahmefehler zurückzuführen, dabei ausgeschlossen wurden.“ Für die chemischen Laboruntersuchungen wurde unabhängig von der Korngröße und ohne Vorzerkleinerung beim Teilen je 1 kg Material entnommen. Anhand der dargestellten Einzeldaten für die drei Versuchstage lässt sich auf Grund der großen Streuungen die Wirkung der Siebung auf die Schwermetallverteilung nur schlecht darstellen. Für Cadmium ist keine beständige An- oder Abreicherung festzustellen, bei Blei, Kupfer, Zink und Chrom sind die Konzentrationen in der Feinfraktion in allen Fällen (z. T. erheblich) höher, als in der Grobfraktion.

Krauß und Brunner (1989) verglichen die Ergebnisse von Tabasaran (1984), Bilitewski et al. (1985) und die eigenen Arbeiten von Krauß (1985) an der ORFA Anlage und kommen zu dem Schluss, dass die für die Herstellung schadstoffarmen Komposts notwendige Schadstoffabreicherung durch die beschriebenen mechanischen Prozesse nicht gelingt.

Harant et al. (1999) erstellten als erste eine Untersuchung an einer großtechnischen Anlage, die dem heutigen Anforderungsprofil bezüglich der Beschaffenheit der Outputgüter entspricht (MBA Allerheiligen, Stmk.). In dieser Arbeit wurde allerdings der Fe-Schrott abgesehen von einer TS-Bestimmung nicht analysiert, die Schwermetallanalysen der übrigen Fraktionen weisen hohe Streuungen auf. Es liegt nahe, dass wenigstens für die Analyse der heizwertreichen Fraktion >80 mm die Probenahme unzureichend war. Die Autoren beschreiben den Sachverhalt folgendermaßen: „Beim Restabfall größer 80 mm ist es besonders schwierig, eine repräsentative Probe zu nehmen. Er enthält einen großen Anteil an Textil- und Kunststoffgegenständen, von denen schon ein einzelner unzerkleinert kaum Platz im Probenahmegefäß findet.“ Die Streuungen bei der Schwermetallbestimmung kommen auch bei der Untersuchung des Rotteverlaufs zum Ausdruck. Die Metallgehalte zeigen dort ein Auf und Ab anstatt des erwarteten stetigen Anstiegs. Für die drei gemessenen Schwermetalle Cadmium, Blei und Zink zeigt sich auf Basis der Messwerte eine tendenzielle Anreicherung von Cadmium in der Fraktion >80 mm, für Zink in der Fraktion <80 mm und ein indifferentes Verhalten von Blei. Die Cadmiumbilanz ist auch abgesehen von den Analysenstreuungen fraglich, da ein etwaiger Cadmiumaustrag mit dem Fe-Schrott durch die Abscheidung von NiCd-Akkus nicht berücksichtigt wurde. Der Cadmiumgehalt des Schrotts wurde aus Untersuchungen von Bilitewski (1985) abgeleitet, anhand derer die Autoren 0,85 % der Metallfrachten den Fe-Metallen (den Rest den NFe-Metallen) zuordnen. Dies Annahme führt zu einem Transfer des Cadmiums von nur 1 % in den Schrott.

Rotter et al. (2001) beschreiben Versuche, die das Ziel der Herstellung schadstoffentfrachteter Ersatzbrennstoffe hatten. Es wurden im technischen Maßstab mit jeweils 5-8 t Restmüll pro Versuch (Inhalt eines Pressfahrzeugs) verschiedene Verfahrenstechniken getestet. Den Varianten gemeinsam ist eine nicht näher erläuterte Grobgutabtrennung als erster Verfahrensschritt und die Magnetabscheidung. Der Abfall wurde nicht zerkleinert, um die nachträgliche Sortierung nicht zu erschweren. Die drei beschriebenen Aufbereitungsvarianten sind (1) eine Siebung bei 30 mm, (2) eine Siebung bei 30 mm mit einer zusätzlichen Siebung bei 200 mm und Windsichtung der Fraktionen 30-200 mm und >200 mm und (3) die Aufbereitung mittels Ballistischem Separator. Die Analyse erfolgte durch Sortierung in Fraktionen, innerhalb derer einheitliche Zusammensetzungen erwartet wurden, und der Hochrechnung der chemischen Zusammensetzung anhand von „fraktionsspezifischen Schadstoffcharakteristiken“ wie sie von Kost (2001) ermittelt wurden. Die Auswahl dieses Analysenverfahrens ist unter Berücksichtigung der Beurteilung in der Dissertation von Rotter (2001) nicht schlüssig. Rotter (2001) beschreibt, dass die Analysendaten für Schwermetalle aus direkter chemischer Analyse mit den Hochrechnungen aus den fraktionsspezifischen Schadstoffcharakteristiken





keinen Zusammenhang zeigen und gibt der direkten Analyse bzw. der Analyse an Hand von halbtechnischen Verbrennungsversuchen den Vorzug. Die Ergebnisse der von Rotter et al. (2001) beschriebenen Aufbereitungsversuche zeigen bei der Siebung bei 30 mm eine Anreicherung von Cadmium, Blei und Chlor im Brennstoff. Die 30 mm-Siebung bewirkt allerdings in der Variante mit Windsichter gegenteilig dazu eine Bleianreicherung in der Feinfraktion <30 mm (Bleikonzentration in Fraktion <30 mm von 373 mg/kg bei Variante „Windsichtung“, 40 mg/kg bei Variante „Siebung“). An diesem Umstand kommt die schlechte Vergleichbarkeit der Aufbereitungsvarianten zum Ausdruck, die Wirkungen der verschiedenen Verfahren werden durch andere Faktoren (vermutlich Unterschiede im Input) zu sehr überlagert. Ebenso uneinheitlich ist die Abtrennung von Cadmium mit dem nicht näher beschriebenen Grobgut und dem Fe-Schrott. Die Cadmiumkonzentrationen im Fe-Schrott werden mit 44, 18 und 106 mg/kg angegeben, die des Grobguts mit 93, 193 und 93 mg/kg. Der Anteil des Fe-Schrotts am Cadmiumtransfer reicht von „unbedeutend“ bis nahe zur Hälfte der Cadmiumdurchsatzes.





## 2 ZIELE UND FRAGESTELLUNGEN

Zu Beginn dieses Forschungsprojekts wurden folgende Ziele und Fragestellungen formuliert:

### **Teil 1: Methodenentwicklung – Theoretische Modellierung der Stoffflüsse von MBAen**

- Erstellung von synthetischen Bilanzen aufgrund des aktuellen Wissensstandes für die MBA-Konzepte Restmüll-Splitting (aerob wie anaerob) und Trockenstabilat für die Elemente C, N, S, Cl, P, Fe, Al, Hg, Cd, Pb, Zn, Cr, Ni und Cu, sowie für Stoffe, welche die Summenparameter TOC, TIC, GV, H<sub>o</sub>, A (Asche) bilden, und Wasser
- Erarbeiten von Kriterien zur Auswahl von org. (Schad-) Stoffen bzw. Stoffgruppen und Indikatorsubstanzen (siehe oben), deren Verhalten ebenfalls modelliert werden soll
- Prüfung, ob sinnvolle Vergleiche der Transferkoeffizienten verschiedener Anlagentypen aus den Ergebnissen der theoretischen Arbeit möglich sind, Abschätzung der Übertragbarkeit von Transferkoeffizienten daraus
- Auswahl von drei österreichischen MBAen für Teil 2
- Erarbeiten der Beprobungspläne, welche die minimalen Beprobungsintensitäten bei gegebener statistisch definierter Sicherheit darstellen

Dazu ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Was ist der bisherige Stand des Wissens bezüglich der Stoffverteilung in MBAen?
- Welche verfahrenstechnischen Unterschiede gibt es innerhalb der MBA-Konzepte
- Welche Stoffe sind relevant, welche sind als Indikatoren für die Abschätzung der Leistung einer MBA geeignet?
- Welche Stoffströme sind ggf. unmessbar (speziell solche in die Atmosphäre)?
- Welche Eigenheiten der MBAen müssen berücksichtigt werden, um das Probenahme-Konzept erstellen zu können?
- Welche Anforderungen müssen die Anlagen erfüllen, um sie bilanzieren zu können?

### **Teil 2: Messung und Bestimmung der Stoffbilanzen und Transferkoeffizienten von drei MBAen**

- Erstellung von Güterbilanzen für drei MBAen mit Angabe der Unsicherheiten
- Erstellung von Stoffbilanzen für drei MBAen, Berechnung der Transferkoeffizienten samt Angabe der statistischen Unsicherheiten zu allen Werten
- Gegenüberstellung der Leistungen der drei MBAen
- Bestimmung der Auswirkungen geänderter Bedingungen (z.B. andere Siebe, unterschiedlicher Input: Müll-Qualität, Klärschlamm dosierung) auf den mechanischen Teil
- Vergleich der Ergebnisse der theoretischen Betrachtungen mit den ermittelten realen Werten
- Entwicklung eines universell einsetzbaren Konzeptes für die Messung der Stoffverteilung von MBAen anhand der Erfahrungen



Dazu ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Welche zusätzlichen Erkenntnisse aus der praktischen Durchführung ergeben sich für die im 1. Teil entwickelte Methode?
- Wie sind die Produkte einer MBA zusammengesetzt, welchen Schwankungen können sie unterliegen und wie werden die untersuchten Stoffe verteilt?
- Wie groß sind die Transferkoeffizienten und ihre Schwankungen und inwiefern sind sie auf den untersuchten Anlagen und bei den während der Untersuchungen behandelten Abfällen von Verfahren und Input abhängig?

Um den praktischen Teil sinnvoll zu bearbeiten, war es notwendig, eine Reihe weiterer Fragen zu beantworten, um das Ziel „**Richtige Bestimmung der Stoffkonzentrationen (insbesondere Schwermetalle) in den MBA-Outputgütern**“ erfolgreich verfolgen zu können:

- Wie groß müssen die Probenmengen sein, um daraus auf die Beschaffenheit der Gesamt-mengen zu schließen?
- Mit welchen Techniken sind diese Mengen zu bewältigen, insbesondere bei Zerkleinerung und Trocknung?
- Welche Korngrößen dürfen die analysenfertigen Proben maximal aufweisen?
- Mit welchen Techniken gelingt die notwendige Feinzerkleinerung?
- Was geschieht mit (Metall-) Teilen, die sich nicht zerkleinern lassen, wie werden diese berücksichtigt?
- Wie kann überprüft werden, ob eine Vorgangsweise zur Bestimmung von Stoffgehalten richtige Ergebnisse liefert?



## 3 METHODEN

### 3.1 Stoffflussanalyse

Die Stoffflussanalyse wird ausgearbeitet wie von Brunner und Rechberger (2004) bzw. Baccini & Brunner (1991) beschrieben.

Definitionen

Folgende Begriffe werden für die Stoffflussanalyse (SFA) definiert:

#### Stoff

Ein Stoff besteht aus gleichartigen Teilchen und ist demzufolge ein Element (Atome gleicher Ordnungszahl) oder eine chemische Verbindung (gleichartige Moleküle). Beispiele sind die Elemente C, N oder Pb oder die Verbindungen  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Anders als nach gängigen Definitionen in der Chemie (z.B. Hollemann und Wiberg, 1985) muss ein Stoff keine Gestalt haben. Die chemischen Elemente werden auch dann als Stoffe bezeichnet, wenn sie in Verbindungen vorliegen und damit nur Bestandteile der gestaltgebenden Teilchen sind.

#### Gut

Ein Gut ist eine handelbare Substanz mit positivem oder negativem Wert, zusammengesetzt aus einem oder mehreren Stoffen. Beispiele sind Beton, Nudeln oder Restmüll, Klärschlamm.

#### Prozess

Ein Prozess ist ein Transport, eine Lagerung oder eine Transformation von Gütern und/oder Stoffen.

#### System

Ein System ist ein Satz von Güterflüssen und Prozessen zur Beschreibung eines Stoffhaushaltes einschließlich der Systemgrenze in Raum und Zeit.

Allgemeine Vorgangsweise

Die Erstellung einer SFA kann allgemein in folgende acht Teilschritte eingeteilt werden:

1. Formulierung der Ziele und Fragestellungen
2. Systemdefinition (Auswahl der zeitlichen und örtlichen Systemgrenzen, der Prozesse, Güter und Stoffe)
3. Erste Abschätzung der Güter- und Stoffbilanz anhand verfügbarer Daten („Provisorische Bilanz“), um die wichtigsten Güterflüsse und Prozesse zu identifizieren
4. Erstellung eines Untersuchungs- und Messprogramms für die Bestimmung der Güter- und Stoffflüsse unter Einbeziehung der notwendigen Genauigkeit der Resultate
5. Bestimmung der Massenflüsse der Güter und der Stoffkonzentrationen darin
6. Berechnung der Stoffflüsse aus den Massenflüssen und den Stoffkonzentrationen einschließlich der Abschätzung der Unsicherheiten der Resultate
7. Berechnung der Transferkoeffizienten



8. Numerische und graphische Darstellung der Resultate, um diese transparent, nachvollziehbar und interpretierbar zu machen

ad 1: Ziele und daraus abgeleitete Fragestellungen müssen ausformuliert werden. Dieser Schritt ist in einem iterativen Verfahren mit den darauf folgenden Schritten abzustimmen. Möglicherweise sind die Ziele oder die Fragen nach den Schritten zwei bis vier den Bedingungen der Praxis (begrenzte Mittel, Genauigkeit verfügbarer Daten, begrenzter Bilanzierungszeitraum) anzupassen.

ad 2: Mit dem zweiten Schritt beginnt die Vereinfachung eines üblicherweise komplexen Systems. Systemgrenzen werden gezogen. Die Abgrenzung ist räumlich und zeitlich vorzunehmen. Innerhalb des Systems werden die zu untersuchenden Prozesse ausgewählt, jeder dieser Prozesse muss bilanziert werden, Prozesse außerhalb des Systems werden nicht bilanziert. Die einzelnen Prozesse werden über die Güterflüsse verknüpft, wobei jedes Gut über einen Herkunfts- und Zielprozess verfügt. Prozesse werden als black box verstanden, d.h. die Vorgänge innerhalb des Prozesses werden nicht untersucht, mit Ausnahme etwaiger "Lager". Um ein besseres Verständnis von Prozessen zu gewinnen, können diese jedoch in Unterprozesse aufgeteilt und diese bilanziert werden. Nach dem Massenerhaltungsgesetz kann die Bilanz eines Prozesses für Stoffe, die keine Umwandlung erfahren, durch folgende Gleichung dargestellt werden:

$$\sum_i a_i = \sum_j b_j$$

$a_i$  sind die Edukte (Ausgangsprodukte) des Prozesses,  $b_j$  die Produkte. Erste provisorische Bilanzen auf Grund von Literaturdaten oder einfachen Messungen sind abzuschätzen, welche bereits möglichst viele Güter quantifizieren sollen. Die Qualität der Zahlen steht in dieser Phase nicht im Vordergrund.

ad 3: Die provisorische Bilanz ermöglicht, die für das System relevanten Prozesse und Güterflüsse zu bestimmen. Sie zeigt, welche Güterflüsse wie genau gemessen werden müssen. Die Bedeutung eines Prozesses für das Gesamtsystem hängt sehr von den zu untersuchenden Stoffen ab. Eine synthetische Bilanz als Simulation eines Versuchs ist für das Erstellen des Versuchsprogramms unerlässlich.

ad 4: Erst jetzt wird das Messprogramm geplant. Güter werden ins Messprogramm in Abhängigkeit ihrer Relevanz für die Fragestellung aufgenommen. In der Regel ist die Größe eines Flusses Kriterium für die Auswahl, bei Emissionsflüssen in die Umwelt gilt diese Regel bedingt.

ad 5: Die erste definitiv zu erstellende Bilanz ist die Güterbilanz, wobei in dieser Phase nur mehr die in Punkt 4 ausgewählten Güter bestimmt werden. Für die Bestimmung der Stoffkonzentrationen in den jeweiligen Gütern steht die Möglichkeit der Literaturstudie oder ein Messprogramm zur Verfügung.

ad 6: Die Stoffflüsse werden durch Multiplikation der Güterflüsse mit den jeweiligen Stoffkonzentrationen ermittelt:  $\dot{X}_{ij} = c_{ij} \cdot \dot{m}_i$       i...Gut, j...Stoff



ad 7: Die Ergebnisse der Stoffbilanzierung werden mit Hilfe der Transferkoeffizienten (Verteilungskoeffizienten) dargestellt. Der Transferkoeffizient  $TK_i$  ist definiert als

$$TK_i = \frac{\dot{X}_{\text{Produkt}}}{\sum \dot{X}_{\text{Edukt}}} (\cdot 100\%)$$

wobei die Summe aller  $TK_i = 1$  (bzw. 100 für Prozentangabe) ist.  $\dot{X}_{\text{Produkt}}$  bezeichnet den Stofffluss über das Produkt für welches der Transferkoeffizient gilt,  $\sum \dot{X}_{\text{Edukt}}$  ist die Summe der Stoffflüsse in den Edukten (= Summe der Stoffflüsse in den Produkten, wenn keine Lagerveränderung im Prozess passiert). Es ist auch möglich den Transferkoeffizienten auf den Stofffluss aus einem speziellen Inputgut zu beziehen um dessen Verteilung zu beschreiben.

ad 8: Liegen die Güter- und Stoffbilanzen vor, ist es wichtig, diese graphisch aufzubereiten, um die Hauptaussagen hervorzuheben. Die graphische Darstellung folgt einem definierten Schema (Abbildung 3-1). Prozesse werden als Rechtecke dargestellt, Güter als Ovale. Die Systemgrenze ist durch abgerundete Ecken gekennzeichnet.

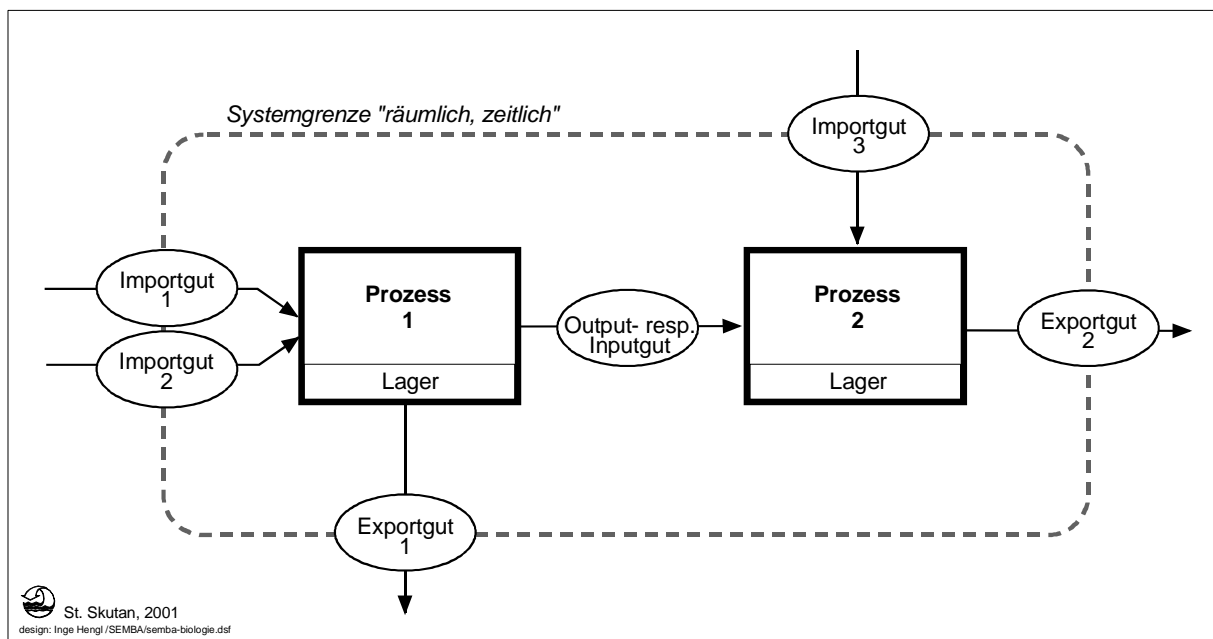


Abbildung 3-1: Allgemeines Schema zur Darstellung der SFA-Ergebnisse: Abgerundete Ecken der Systemgrenze; Prozesse als Rechtecke eventuell Lager beinhaltend; Güter als Ovale; Import- und Exportgüterflüsse über die Systemgrenzen; Input- und Outputgüterflüsse innerhalb des Systems

### Systemdefinition

In Abbildung 3-2 ist die Systemdefinition für MBAs vom Verfahrenstyp Restmüllsplitting graphisch dargestellt (Zuluft und Abluft der Rotte sind in Abstimmung mit dem praktischen Teil dieser Arbeit zusammengefasst zum Nettofluss „Rotteverlust“ aus dem System hinaus). Das System des Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahrens kommt mit einem Prozess („Mechanisch-biologische Behandlung“) aus.

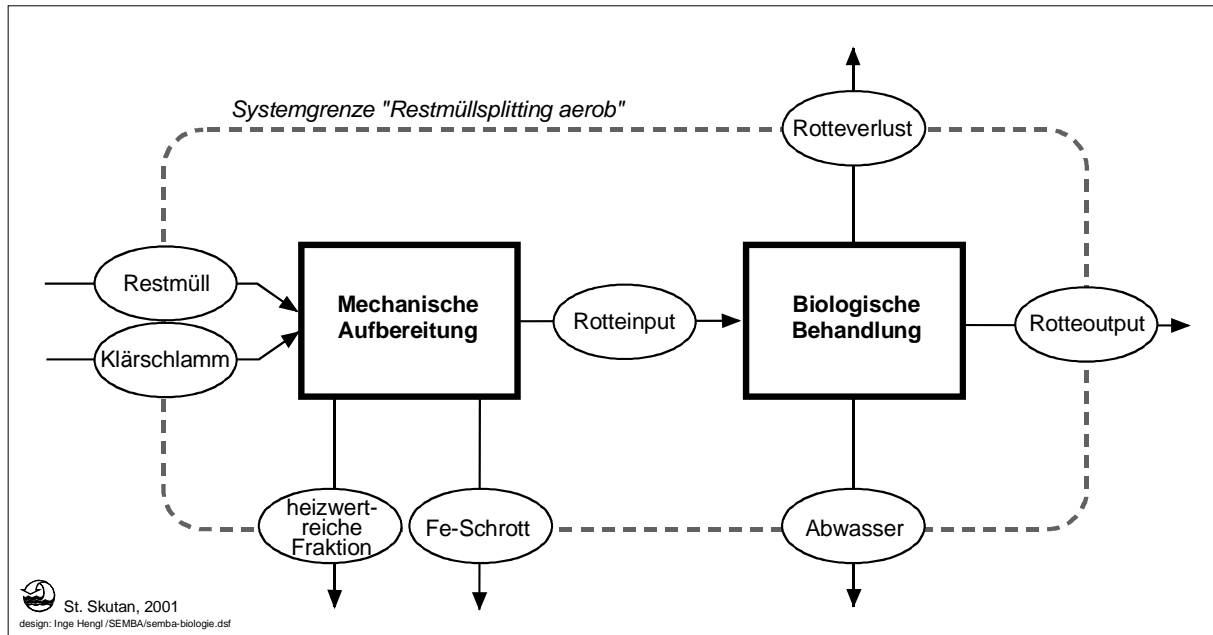


Abbildung 3-2: Systemdefinition beim Verfahren Restmüllsplitting aerob (Abwasser nicht obligat, Rotteverlust als Nettofluss: Abluft abzüglich Zuluft)

### Definition der Prozesse

#### Mechanische Aufbereitung

Prozess, der sich aus einem oder mehreren mechanischen Verfahrensschritten zusammensetzt  
Mögliche Schritte sind: Zerkleinern, Mischen, Sieben, Windsichten, ballistisches Separieren, Magnet- oder Wirbelstromscheidung

#### Biologische Behandlung

Prozess der aeroben, anaeroben oder kombiniert anaerob/aeroben Behandlung  
Das Outputgut „Gärgas“ existiert nur im System mit anaerober biologischer Behandlung.  
„Abwasser“ tritt je nach Anlagentyp gegebenenfalls auf. Die Biologische Behandlung kann auch eine biologische Trocknung vor der mechanischen Aufbereitung sein.

### Definition der Güter

#### Restmüll

Hausmüll und hausmüllähnlicher Gewerbeabfall, wie er neben der vorgeschriebenen Separatsammlung in der kommunalen Sammlung anfällt

#### Klärschlamm

entwässerter Klärschlamm (30% TS) oder Dickschlamm (5% TS) aus der kommunalen Abwassereinigung

#### Heizwertreiche Fraktion

mechanisch abgetrennte Fraktion mit hohem Heizwert, meist Siebüberlauf, gegebenenfalls Leichtfraktion aus Windsichtung oder ballistischer Separation





Fe-Schrott  
durch Magnetabscheidung gebildete Fraktion

Rotteinput  
Fraktion der mechanischen Aufbereitung mit hohem Anteil an biogenen Stoffen, meist Siebdurchgang (bei Anaerob-Verfahren: „Gärinput“)

Rotteoutput  
Material nach biologischer Behandlung (bei rein anaerober Behandlung: „Gärrest“)

Rotteverlust  
Massenverlust, den der Rotteinput durch Trocknung und biologischen Abbau erfährt und über das Abgas ausgetragen wird: Differenz Abluft-Zuluft

Gärgas  
Produkt der anaeroben Behandlung, im wesentlichen ein Gemisch aus Methan und Kohlendioxid

Abwasser  
Ablauf aus der Entwässerung von nass anaerob behandeltem Material. Gegebenenfalls auch Ablauf aus aerober Behandlung z.B. Kondensat von Trockenstabilisierung

#### *Bilanzierungszeitraum*

Für die gemessenen Bilanzen werden die Zeiträume bei der Versuchsplanung festgelegt.

Für die provisorischen Bilanzen wurde kein Bilanzierungszeitraum festgelegt. 1.000 kg Input wurden als Bezug gewählt.



## 3.2 Einführung in die Probenahme, Aufbereitung und Analyse von MBA-Outputmaterial

Diesem Themenkreis wird ein eigener Punkt gewidmet, weil die Bestimmung der Metallgehalte von Restmüll und Restmüllfraktionen durch direkte Analyse (d.h. Probenahme, Probenaufbereitung, Aufschluss und quantitative chemische Analyse) mit größten Schwierigkeiten verbunden ist. Große Probenmengen sind mit höchster Sorgfalt aufzuarbeiten. Es muss händisch zerlegt und sortiert werden, Metallteile sind, so sie nicht ausreichend zerkleinerbar sind, einer separaten Analyse zu unterziehen. Wird der Aufwand reduziert, ist mit erheblicher Unterschätzung der Metallgehalte zu rechnen.

### 3.2.1 Repräsentative Proben

Restmüll und Restmüllfraktionen gelten als „heterogen“ und damit kritisch bei der Gewinnung „repräsentativer“ Proben. Das Wort „repräsentativ“ wird unter Anführungszeichen gesetzt, weil es bei der Probenahme nicht möglich ist, repräsentative Proben gezielt auszuwählen, viel mehr ist jede Probe ein Zufallsprodukt. In den meisten Fällen ist es theoretisch wie praktisch nicht möglich, die durchschnittliche Zusammensetzung großer Mengen von mechanisch behandelten Abfällen in handhabbaren Proben abzubilden. Ob die weitere Behandlung einer Probe überhaupt einen Wert hat, ist bei der Probenahme noch nicht klar.

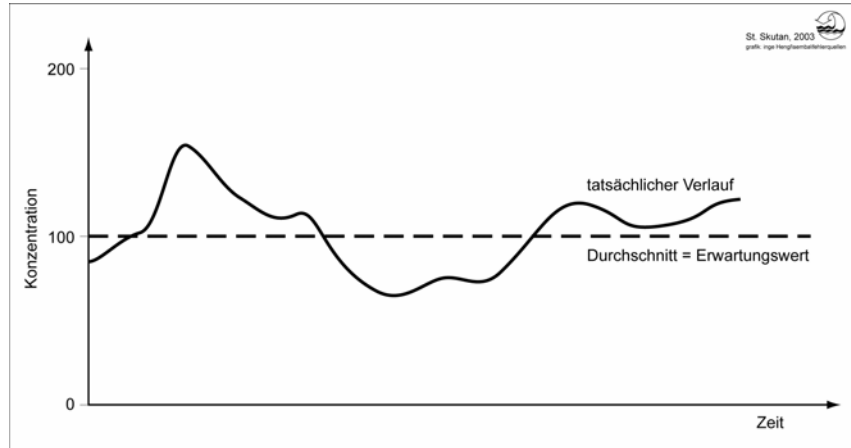
Die Streuung von Ergebnissen aus Parallelproben kann als Qualitätskriterium einer Untersuchung herangezogen werden, liefert aber nur einen Hinweis nicht den Beweis für die Richtigkeit von Ergebnissen. Zu kleine Probenmassen liefern bei den meisten Metallen gravierende Minderbefunde, diese aber mit kleiner Streuung. Die Richtigkeit kann nur überprüft werden, wenn die gleichen Messziele mit verschiedenen Methoden bearbeitet werden (z.B. indirekte Analyse über Verbrennungsversuch) oder definiertes Material mit der zu prüfenden Methode untersucht wird.

Die Streuung ist abhängig vom Ausmaß der Heterogenität und den tatsächlichen Schwankungen der Materialzusammensetzung innerhalb des Probenahmezeitraumes (Variabilität). Es gibt eine Hierarchie der Fehlerquellen, die nur von unten nach oben untersucht werden kann, um die eigentlichen Ursachen streuender Messwert zu finden (Abbildung 3-3).

Nur die Streuungen auf unterster Ebene sind beobachtbar (Labormesswerte). Mit einer Varianzkomponentenanalyse ist es möglich, die Herkunft der Gesamtstreuung zurückzuverfolgen und den einzelnen Quellen zuzuschreiben (siehe Punkt 3.3.1). Ist beispielsweise die Streuung der Messwerte groß, die Streuung, die aus der chem. Analytik resultiert, aber bekanntermaßen klein, so ist die Streuungsursache eine Stufe höher zu suchen. Ist man in der Lage auch die Probenaufbereitung als Hauptverursacher der Streuung auszuschließen, wird erst die Ebene der Probenahme für das Aufspüren der Streuungsursache zugänglich. In diesem Stadium ist sicher, dass man wenigstens die Zusammensetzung der ursprünglich gezogenen Proben genau bestimmen kann. Erst jetzt wird es möglich zu untersuchen, ob die nunmehr gesicherten Unterschiede zwischen den einzelnen Proben auf der Heterogenität des Materials und damit auf Probenahmefehlern beruhen oder auf tatsächlichen Änderungen der Zusammensetzung in der Zeit. Heterogenität bedeutet, aus einem Materialstrom, der seine Zusammensetzung über die Zeit nicht verändert, trotzdem Proben unterschiedlicher



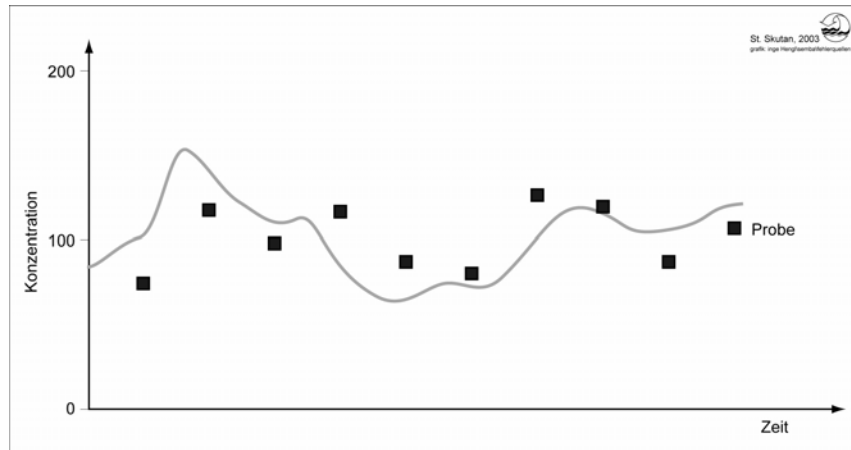
tatsächliche  
Variation der  
Zusammensetzung  
in der Zeit  
„Variabilität“



+

Der durchschnittliche Gehalt ist der Erwartungswert der Bestimmung. Ungeachtet der auftretenden Streuung strebt eine Untersuchung diesem Wert zu, wenn keine systematischen Fehler vorliegen. Je höher der getriebene Aufwand, umso wahrscheinlicher kommen die Messwerte in der Nähe des Erwartungswerts zu liegen.

Probenahmefehler  
durch  
Heterogenität



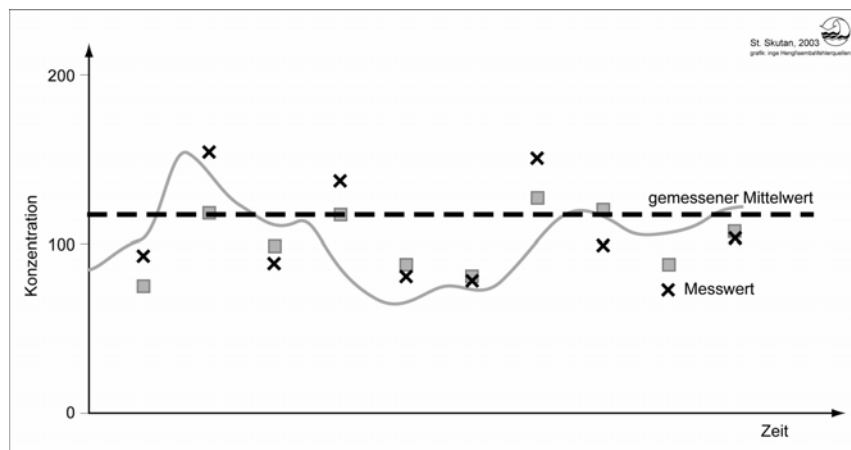
+

In Abhängigkeit der Probenmasse weicht die Zusammensetzung der Proben mehr oder weniger von der tatsächlichen aktuellen Zusammensetzung des Materials ab.

Verzerrung der  
Zusammensetzung  
durch die  
Probenaufbereitung

+

Streuung der  
chemischen  
Analytik



Gesamtstreuung  
der Ergebnisse

Die Zusammensetzungen der ursprünglichen Proben können nicht fehlerfrei bestimmt werden, weil Probenaufbereitung und chemische Analytik weitere Streuung erzeugen. Die Messwerte (Beobachtungswerte) liefern einen Mittelwert, der vom Erwartungswert abweicht.

Abbildung 3-3: Ursprung der an den Messwerten beobachteten Streuung



Zusammensetzung zu ziehen, d.h. die Proben sind „zu klein“. Hat man dieses Problem gelöst, d.h. den Probenahmefehler quantifiziert und auf ein erträgliches Maß reduziert, wird es möglich, tatsächlich Änderungen der Materialzusammensetzung in der Zeit zu beobachten.

### 3.2.2 Ausreißer

Ausreißer haben in der Abfallanalytik eine besondere Bedeutung. Landläufig werden Ausreißerhäufigkeiten von einigen % als „normal“ d.h. abfalltypisch angesehen. In der Regel handelt es sich um stark überhöhte Werte. Andererseits können sie Ausdruck dafür sein, dass mit unzureichenden Probenahme- und Aufbereitungsmethoden der wahre Durchschnitt systematisch unterschätzt wird. Ausreißer liefern Hinweise darüber, ob bedeutende Frachtanteile womöglich übersehen werden.

„Eigentliche“ Ausreißer sind Werte, die einen Mittelwert in hohem Ausmaß falsch beeinflussen. Es gibt zwei Möglichkeiten für das Entstehen solcher Werte: Entweder liegt ein tatsächlicher Fehler in der Bestimmung vor z.B. ein Dezimalfehler, Ausfall eines Messgeräts, kontaminiertes Probenahmegefäß etc. oder es handelt sich um einen Wert, der im Rahmen der zufälligen Streuung, die vom Bestimmungsverfahren vorgegeben ist, ab und zu auftritt.

Die Ausreißerelimination im Rahmen der Abfallanalytik sollte nicht kritiklos durch statistische Ausreißertests erfolgen, sondern muss sich am Sachverhalt der Probenahme und Aufbereitung orientieren. Wie die folgenden Beispiele zeigen (Punkt 3.2.5), erzeugen Probenahme- und Aufbereitungssysteme häufig systembedingt Verteilungen, die einen gewissen Prozentsatz stark überhöhter Werte enthalten. Diese Werte sind bei der Berechnung des Durchschnittes von Messreihen zu akzeptieren, werden sie eliminiert, wird der wahre Durchschnitt unterschätzt. Liegen andererseits nur wenige Messwerte vor (z.B. nur drei), von denen einer ein „Ausreißer“ ist, wird die Beibehaltung dieses Werts im Mittelwert oft eine Überschätzung verursachen, die größer ist als die Unterschätzung bei Elimination. Es sind daher Bestimmungsmethoden anzustreben, die derartige Messwertverteilungen nicht systembedingt erzeugen und die Ausreißerelimination überflüssig machen (siehe Punkt 3.2.5 und 6.1.5.1).

### 3.2.3 Heterogenität

Jedes Stück im Gemenge unterscheidet sich von einem anderen in der Zusammensetzung, außer es handelt sich um dasselbe Erzeugnis. Unter den Stücken, welche die Hauptbestandteile bilden (z.B. Verpackungskunststoffe, Papier, Karton, Glas, Organik), sind die Unterschiede klein, die Metallgehalte tief. Daneben gibt es aber Materialien, deren Schwermetallgehalte um viele Größenordnungen höher sind, im Extremfall treten die Metalle selbst auf (z.B. Kupfer). In Tabelle 3-1 sind dafür Beispiele angeführt. Gegenstände, die zur Gänze aus Metallen bestehen, sind etwa Bleche, Rohre, Armaturen, Maschinenteile etc. Dabei handelt es sich häufig um Metalle, die nicht von Magneten angezogen werden z.B. Kupfer, Messing, Zink, Aluminium oder bestimmte Edelstahlsorten. Neben diesen großen Stücken ist eine Vielzahl von kleinen Metallteilen in Form von Verbunden enthalten. Schuhe, Taschen, Jacken, Hosen, Vorhänge etc. tragen oft Metallteile: Ösen, Schnallen, andere Verschlüsse (Reißverschlüsse, Druckknöpfe) und Verstärkungen. Große Mengen Kupfer finden sich in Kabeln im Verbund mit PVC.



*Tabelle 3-1: Erzeugnisse, die in Restmüllfraktionen anzutreffen sind und Schwermetalle in hochkonzentrierter Form enthalten*

| Element | Erzeugnis   |
|---------|---|
| Blei    | Fahrzeuggelassen oder Teile davon, Bleisaum von Vorhängen, Sanitärrohre aus Pb, Leiterplatten, Schrotkugeln, Fischer- und Wuchtblei, PVC mit Pb/Ba-Stabilisatoren |
| Cadmium | PVC mit Cd/Ba-Stabilisatoren oder Cd-Pigmenten („langlebige PVC-Artikel“), NiCd-Akkumulatoren   |
| Chrom   | Chromleder, verchromte Metallteile, Edelstahlteile  |
| Kupfer  | Kabel, Rohre und Bleche aus Kupfer, Teile aus Messing, Teile von Elektro- und Elektronikgeräten   |
| Nickel  | Stahlteile mit Ni-Legierung, vernickelte Gegenstände, NiCd- oder NiMH-Akkumulatoren   |
| Zink    | Zink-Kohle- oder Alkali-Mangan-Batterien, verzinkte Teile, Teile aus Messing, PVC mit Zn/Ba-Stabilisatoren  |

Die hoch konzentrierten Teile sind im günstigsten Fall zufällig im Material verstreut. In den Abbildung 3-4 a bis c sind (a) die höchst unwahrscheinliche Gleichverteilung, (b) die zufällige Verteilung und (c) eine Verteilung mit zufälliger und systematischer Komponente dargestellt. Systematische Komponente bedeutet, dass es Unterschiede in der Materialzusammensetzung gibt, die nicht zufällig bedingt sind (z.B. Häufung von bestimmten Gegenständen).

Im Grunde ist die Zusammensetzung eines Abfalls nie zufällig, da zumindest theoretisch das Vorkommen jedes Stücks eine nachvollziehbare Ursache hat. Die große Zahl von an sich kontrollierten Ereignissen (Würfen in die Mülltonne) mündet aber in einer Verteilung, die einer zufälligen entspricht bzw. sehr nahe kommt. Zufällige Verteilungen im eigentlichen Sinn können nur durch vollkommenes Mischen erzeugt werden.

**Mischen erzeugt im besten Fall eine zufällige Verteilung, niemals\* eine Gleichverteilung.**

\* Natürlich besteht die theoretische Möglichkeit beim Mischen zufällig eine Gleichverteilung zu erreichen. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist allerdings genau so groß, wie für jede andere Verteilung, etwa für den Fall nach dem Mischen eine perfekte Sortierung in Stoffgruppen vorzufinden.

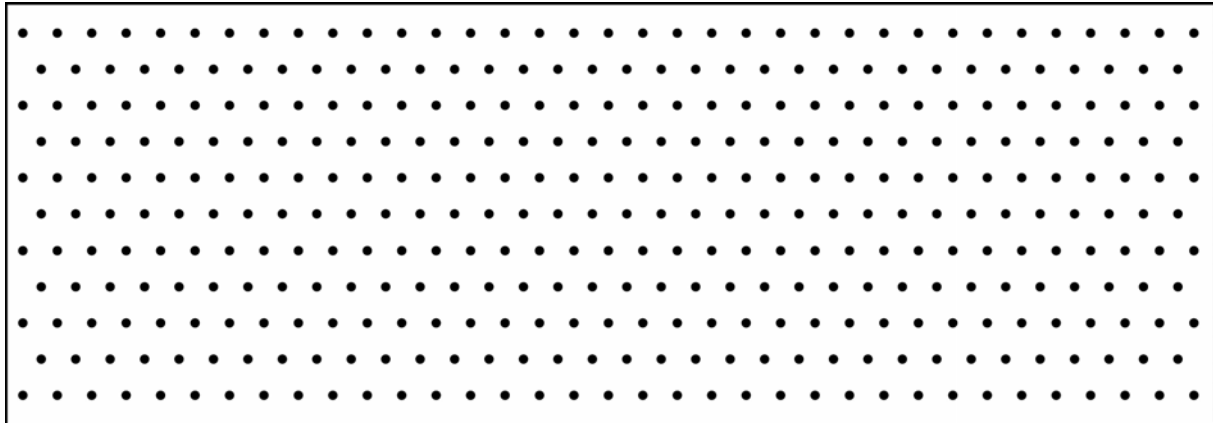


Abbildung 3-4 a: Gleichverteilung. Die Schwermetallträger sind gleichmäßig im Material verteilt. Eine derartige Verteilung lässt sich nur gezielt erzeugen.

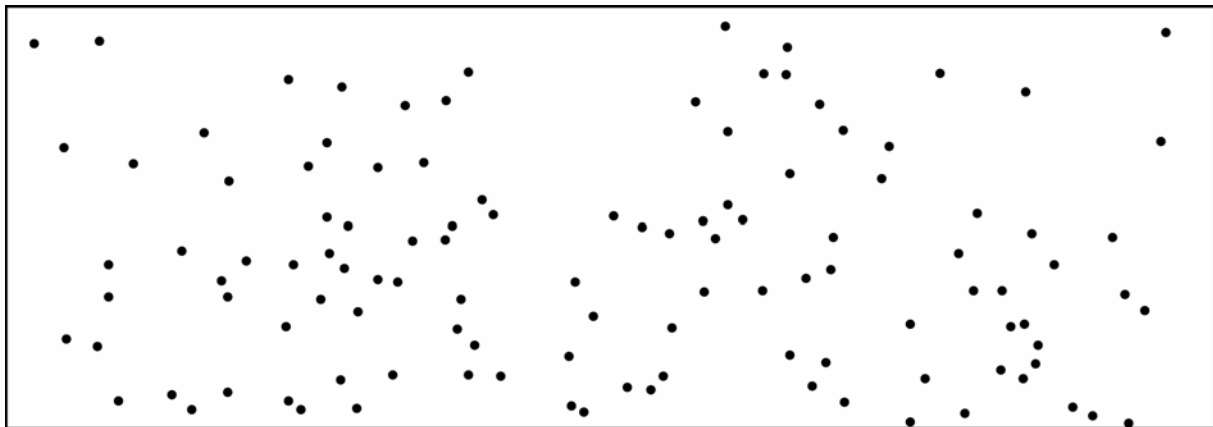


Abbildung 3-4 b: Zufällige Verteilung. Beim Ziehen von Proben ist die zufällige Verteilung der günstigste Fall, der praktisch vorliegen kann. Durch Mischen kann eine Zufallsverteilung erzeugt werden, wenn Entmischungseffekte beim Bewegen des Materials ausgeschlossen werden können. Verschiedenen Größe, Form und Dichte der einzelnen Stücke können zur Entmischung führen.

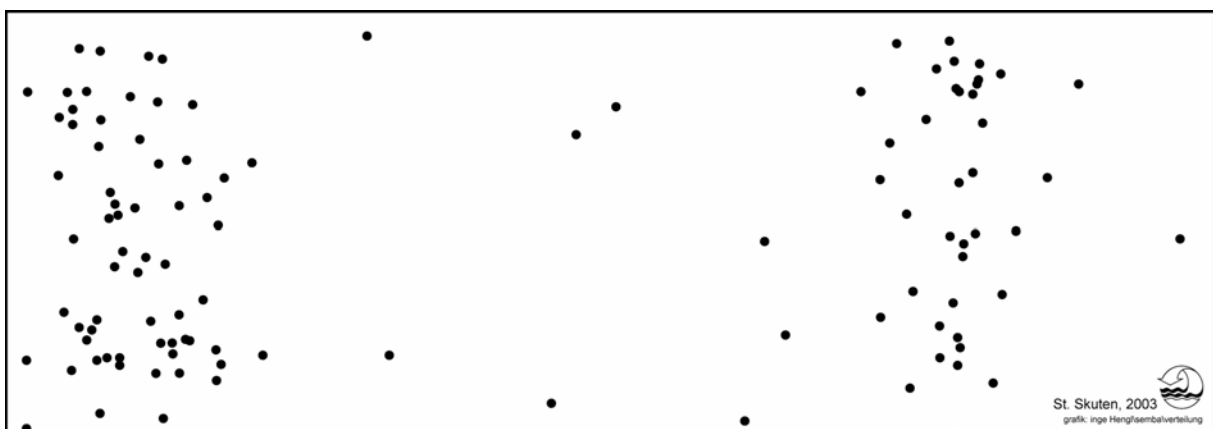
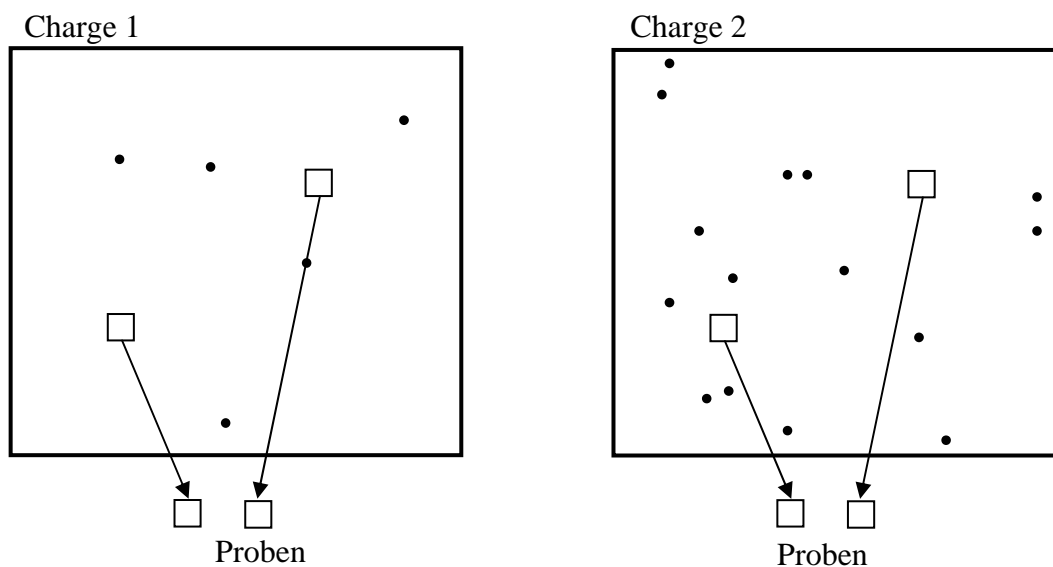


Abbildung 3-4 c: Verteilung mit zufälliger und systematischer Komponente. Die Schwermetallträgerpartikel treten zeitweise gehäuft auf. Bezogen auf die einzelnen Partikel ist das Vorkommen nicht mehr zufällig. Die Häufungen selbst können dagegen „zufällig“ oder periodisch auftreten.



### 3.2.4 Heterogenität versus Variabilität

Der Begriff „Variabilität“ bezeichnet Unterschiede in der Zusammensetzung eines Gutes über die Zeit oder über den Raum (vergl. Abbildung 3-4 c). Im Gegensatz zur Heterogenität - sie beschreibt die Unterschiede zwischen einzelnen Gemengteilen - beschreibt die Variabilität Unterschiede zwischen verschiedenen abgrenzbaren Mengen eines Gutes. Es kann sich um „natürliche“ (Chargen, Fuhren, Containerfüllungen, Haufen etc.) oder abstrakte Teilmengen (Stunden-, Tagesmengen, Ausschnitte von Haufen etc.) handeln. Die Teilmengen dürfen nicht beliebig klein gewählt werden, um Variabilität feststellen zu können, weil sonst die Heterogenität die Variabilität überdeckt. Variabilität kann nur erkannt und bestimmt werden, wenn die Heterogenität des Materials im Einfluss auf die Zusammensetzung einer Teilmenge eine untergeordnete Rolle spielt (vergl. Abbildung 3-5).



*Abbildung 3-5: Verfehlter Bestimmungsversuch für die Variabilität zwischen zwei Chargen eines außerordentlich heterogenen Gutes. Rechts ist die Konzentration des Stoffes (Anzahl der Träger) dreimal höher als links. Trotzdem ist es mit der dargestellten Probenahme nicht möglich, den Unterschied festzustellen, weil die Entnahme repräsentativer Proben auf Grund der Heterogenität misslingt. Abhilfe könnte durch größere Proben, öftere Probenahme oder Zerkleinerung (Zerkleinerung der Träger!) samt Durchmischung geschaffen werden.*

Durch Mischen kann die Variabilität vermindert werden nicht aber die Heterogenität. Das Erzeugen von Mischproben ist daher nur sinnvoll, wenn im Material Variabilität vorliegt. Der Heterogenität kann nur durch ausreichend große Proben und Zerkleinerung begegnet werden.



### 3.2.5 Probenahme aus dem heterogenen Gemenge

Im Folgenden sind am Beispiel Kupfer für drei verschiedenen Probenmassen Probenahmen aus einer Abfallmenge von 2.000 kg nachgestellt. Es wird angenommen, dass 90 % des Kupfers in Form von Kabeln (reines Elektrolysenkupfer) vorliegen. Die Kupferportion in einem Stück kann im höchsten Fall einige hundert g betragen. Der Gesamtgehalt inklusive dem Anteil aus Kabeln ist 2.000 mg/kg, im „Hintergrund“ sind 100 bis 200 mg/kg Kupfer. Als Hintergrundwert wird der durchschnittliche Gehalt in den am häufigsten vorkommenden Materialien bezeichnet (Papier, Textilien, Kunststoffe, etc).

#### Proben zu 5 kg

Abbildung 3-6 zeigt den Sachverhalt, der beim Ziehen von Proben zu jeweils 5 kg vorliegt.

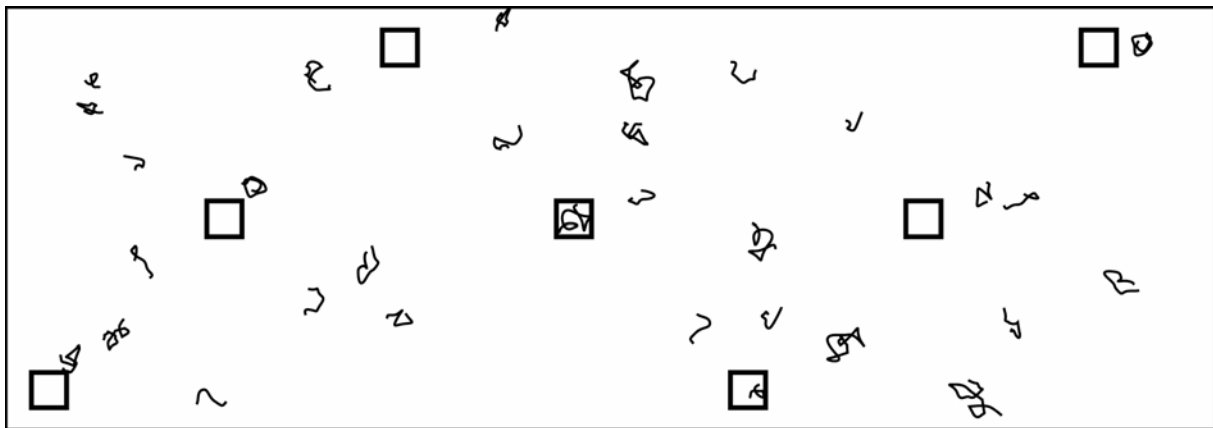


Abbildung 3-6: Probenahme von Proben zu 5 kg beim Vorhandensein von Kabeln

Die Wahrscheinlichkeit in einer 5 kg Probe ein Kabel zu finden, ist so klein, dass in den meisten Proben nur „Hintergrundgehalte“ gemessen werden. In einer Probe mit Kabel ist der Kupfergehalt ca. 100 mal höher. Wird der hohe Wert akzeptiert und nicht als Ausreißer angesehen und ausgeschlossen, tendiert der Mittelwert in Richtung Erwartungswert von 2.000 mg/kg. Der Mittelwert ist erwartungstreu. Werden sehr viele Proben gemessen und gemittelt, wird das richtige Ergebnis erhalten. Anders der Median, er ist im Fall zu kleiner Proben immer zu tief, d.h. unterschätzt den Durchschnitt. Wird der „Ausreißer“ eliminiert, erhält man ein Ergebnis mit relativ kleiner Streuung, das aber falsch ist.





|            |    |        |
|------------|----|--------|
| Messwerte  | 1  | 120    |
|            | 2  | 517    |
|            | 3  | 99     |
|            | 4  | 156    |
|            | 5  | 155    |
|            | 6  | 107    |
|            | 7  | 213    |
|            | 8  | 10.000 |
|            | 9  | 119    |
|            | 10 | 100    |
| Mittelwert |    | 1.159  |
| Median     |    | 138    |

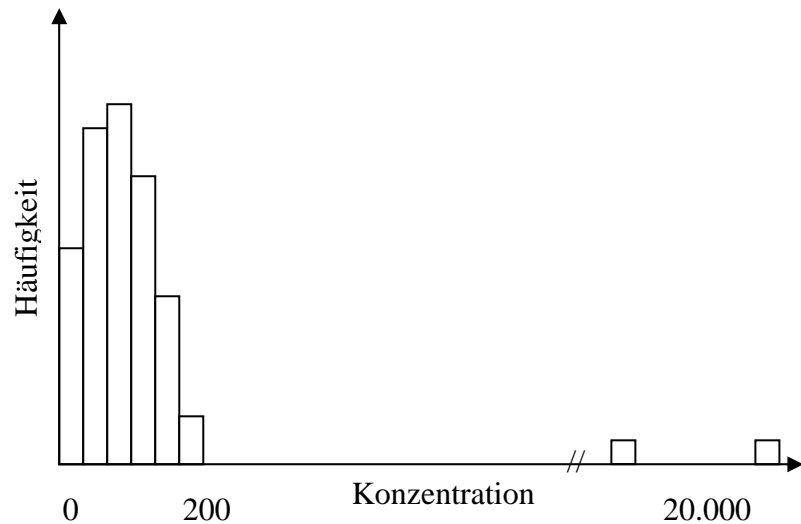


Abbildung 3-7: nachgestellte Ergebnisse bei Proben zu 5 kg  
links: Tabelle mit nachgestellter Messreihe aus 10 Werten  
rechts: Histogramm der erwarteten Verteilung bei einer großen Zahl von Proben

Die Verteilung im Histogramm ist extrem linkssteil: Es gibt sehr viele kleine, ein paar wenige sehr hohe Werte.

### Proben zu 50 kg

Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9 beschreiben den Sachverhalt und die zu erwartenden Ergebnisse bei einer Probengröße von 50 kg.

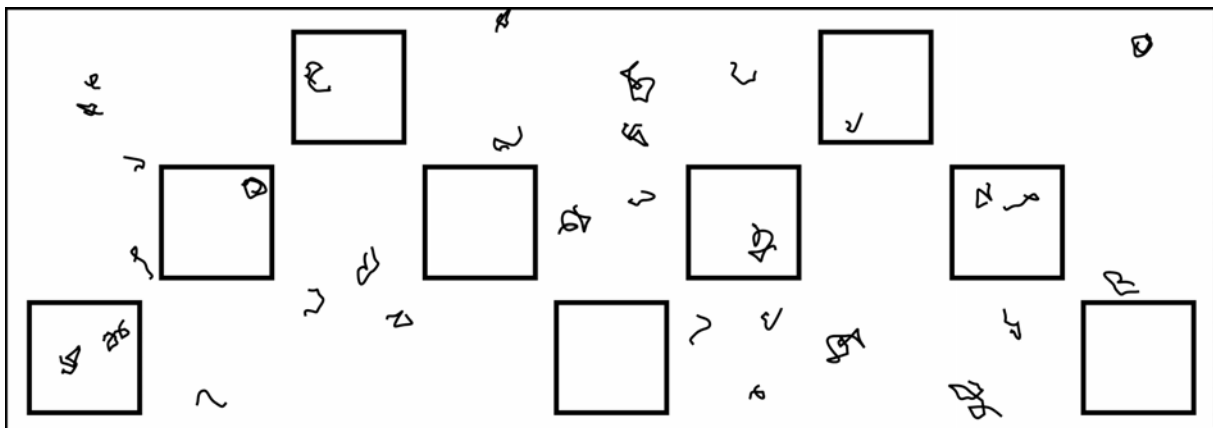


Abbildung 3-8: Probenahme von Proben zu 50 kg beim Vorhandensein von Kabeln.

Die Proben sind groß genug, um sehr häufig ein oder auch mehrere Kabel in einer Probe zu finden.



|            |       |       |
|------------|-------|-------|
| Messwerte  | 1     | 168   |
|            | 2     | 3.575 |
|            | 3     | 8.364 |
|            | 4     | 2.950 |
|            | 5     | 133   |
|            | 6     | 1.160 |
|            | 7     | 89    |
|            | 8     | 512   |
|            | 9     | 141   |
|            | 10    | 1.080 |
| Mittelwert | 1.817 |       |
| Median     | 796   |       |

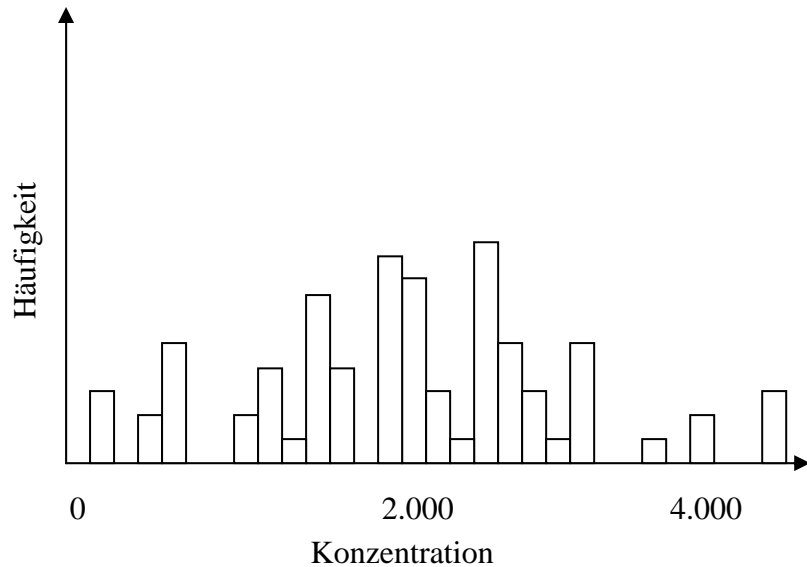


Abbildung 3-9: nachgestellte Ergebnisse bei Proben zu 50 kg  
links: Tabelle mit nachgestellter Messreihe aus 10 Werten  
rechts: Histogramm der erwarteten Verteilung bei einer großen Zahl von Proben

Die Streuung der Ergebnisse ist groß. Die Schiefe der Verteilung nimmt aber stark ab gegenüber den 5 kg Proben. Der Median nähert sich dem Mittelwert an. Obwohl die Streuung groß ist, kann mit einigen Messwerten, die untereinander „nicht zusammenpassen“, der Mittelwert gut bestimmt werden.

### Proben zu 1.000 kg

Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11 beschreiben den Sachverhalt und die zu erwartenden Ergebnisse bei einer Probengröße von 1.000 kg.

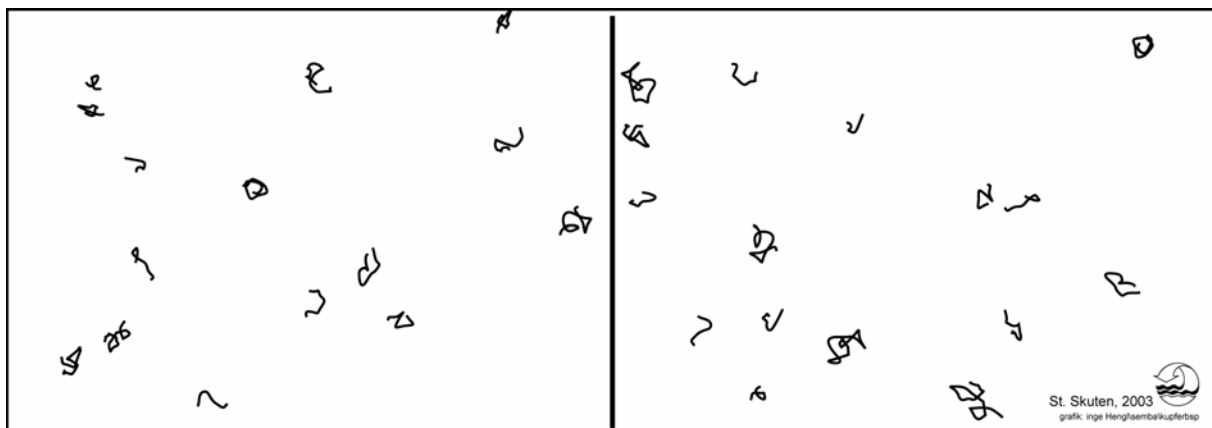


Abbildung 3-10: Probenahme von Proben zu 1.000 kg beim Vorhandensein von Kabeln. Im Beispiel kann dabei die Grundgesamtheit nur noch in zwei Proben geteilt werden.

Bei 1.000 kg sind die Proben so groß, dass ein Kabel nur mehr einen kleinen Teil zum Kupfergesamtgehalt einer Probe beiträgt. Bei zufälliger Verteilung der Kabel im Material differiert die Anzahl Kabel pro Probe nur wenig.



|            |       |       |
|------------|-------|-------|
| Messwerte  | 1     | 1.869 |
|            | 2     | 2.002 |
|            | 3     | 2.243 |
|            | 4     | 1.528 |
|            | 5     | 2.001 |
|            | 6     | 2.631 |
|            | 7     | 2.450 |
|            | 8     | 1.532 |
|            | 9     | 1.953 |
|            | 10    | 2.212 |
| Mittelwert | 2.042 |       |
| Median     | 2.002 |       |

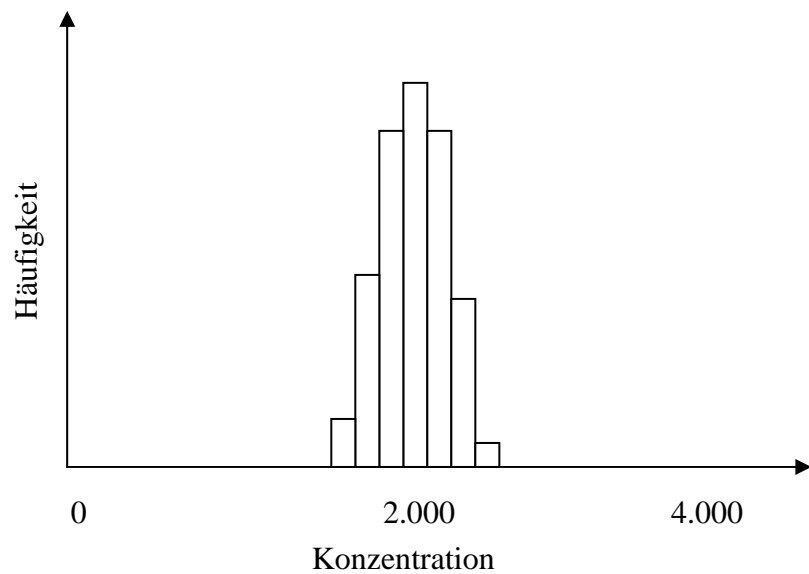


Abbildung 3-11: nachgestellte Ergebnisse bei Proben zu 1.000 kg  
links: Tabelle mit nachgestellter Messreihe aus 10 Werten  
rechts: Histogramm der erwarteten Verteilung bei einer großen Zahl von Proben

Die Verteilung nähert sich einer Normalverteilung mit geringer Standardabweichung. Mittelwert und Median liefern beide erwartungstreue Werte für den Durchschnitt.

### 3.2.6 Fehler bei der Probenteilung

Wiederholte Probenteilung ist fixer Bestandteil der Aufbereitungsprozeduren von Abfallproben. Jede Probenteilung ist eine erneute Stichprobenahme und damit Probenahmefehlern unterworfen. Es gibt zwei Möglichkeiten Proben zu teilen:

#### 1) Teilung nach Zufallsprinzip

Die Teilchen aus der ursprünglichen Menge werden auf die reduzierte Menge und den Rest aufgeteilt (Abbildung 3-12 oben). Für jedes Teilchen in der ursprünglichen Menge ist die Wahrscheinlichkeit gleich groß in die reduzierte Teilmenge aufgenommen zu werden. Bei Gemengen mit hoher Heterogenität kann die Teilmenge in ihrer Zusammensetzung stark von der Gesamtmenge abweichen, wenn die Teilmengen zu klein bemessen sind. Für die Entnahme der Teilmenge gilt die gleiche Verteilungsstatistik wie für die primäre Probenahme. Teilung nach Zufallsprinzip kann durch Vierteln im Mischkreuzverfahren, durch Riffelteiler oder andere gleichwertige Techniken erfolgen.



## 2) „Spezifische Teilung“

Hier werden nicht Teilchen verteilt sondern geteilt, d.h. von jedem Teilchen wird ein gleich großer Anteil für die Teilprobe abgeschnitten (Abbildung 3-12 unten). Beispielsweise werden bei einer 10:1-Teilung von jedem Teilchen im Gemenge jeweils 10 % heruntergeschnitten. Die abgeschnittenen Stücke bilden die verjüngte Probe, die tatsächlich repräsentativ ist für die ursprüngliche Probe (innerhalb der Wäggenauigkeit). Im Rahmen dieses Projekts wurden Kunststoffteile, die bei der Voraufbereitung aussortiert wurden (Kabelisolierungen, Kunststoffgehäuse von Geräten, etc.), sowie Metallstücke für die Separatbestimmung in dieser Art geteilt.

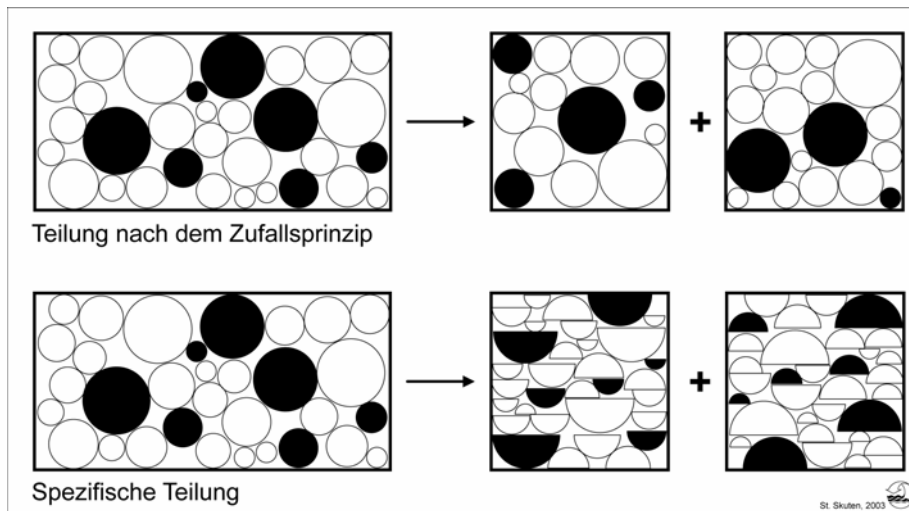


Abbildung 3-12: Zwei Prinzipien der Probenteilung. Aus Gründen der Darstellbarkeit ist die Teilung einer Probe in zwei gleichgroße Teilmengen gezeigt. Oben die Teilung nach dem Zufallsprinzip, unten die spezifische Teilung



### 3.2.7 Zerkleinern – Mischen – Teilen als Einheit

Bei Proben, die heterogene Gemenge darstellen, ist die Abfolge Zerkleinern – Mischen – Teilen eine untrennbare Einheit. In den Abbildung 3-13 a bis d ist veranschaulicht, was passiert, wenn ein Teilschritt weggelassen wird.

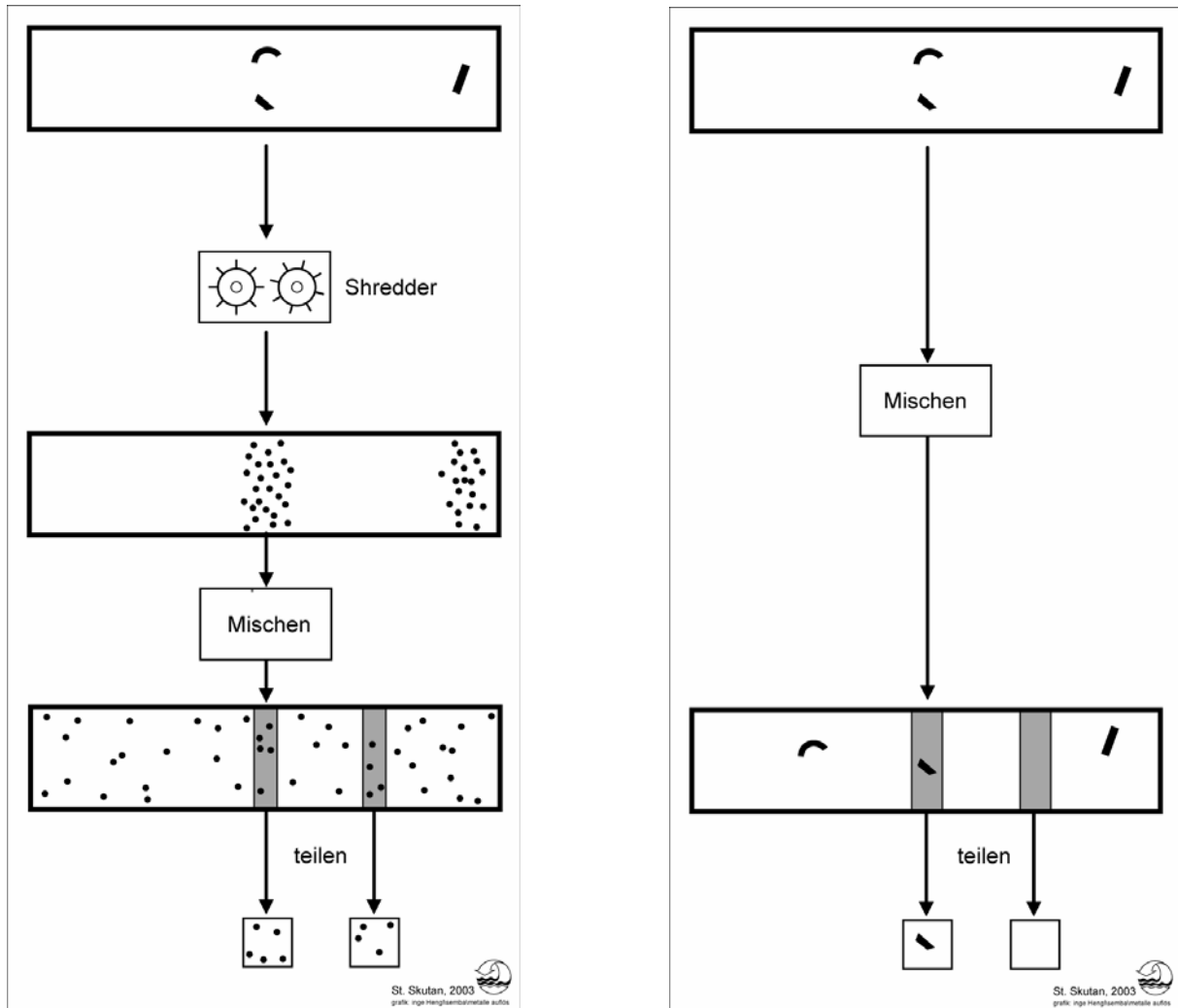


Abbildung 3-13 a (links) und b (rechts): Ausgangspunkt ist jeweils eine Abfallmenge mit drei Stoffträgerpartikeln. Im Bild a ist die Probenteilung nach dem Prinzip Zerkleinern – Mischen – Teilen dargestellt. Dieses System liefert die best möglichen Ergebnisse beim Teilen nach Zufallsprinzip. Bild b zeigt, dass alleiniges Mischen ohne Zerkleinerung keinen Effekt hat, wenn das Material heterogen zusammengesetzt ist.

Mischen und Teilen ohne Zerkleinern hat keinerlei Wirkung auf den Probenahmefehler. Stattdessen könnte man gleich Proben mit der Größe der Teilmengen ziehen.

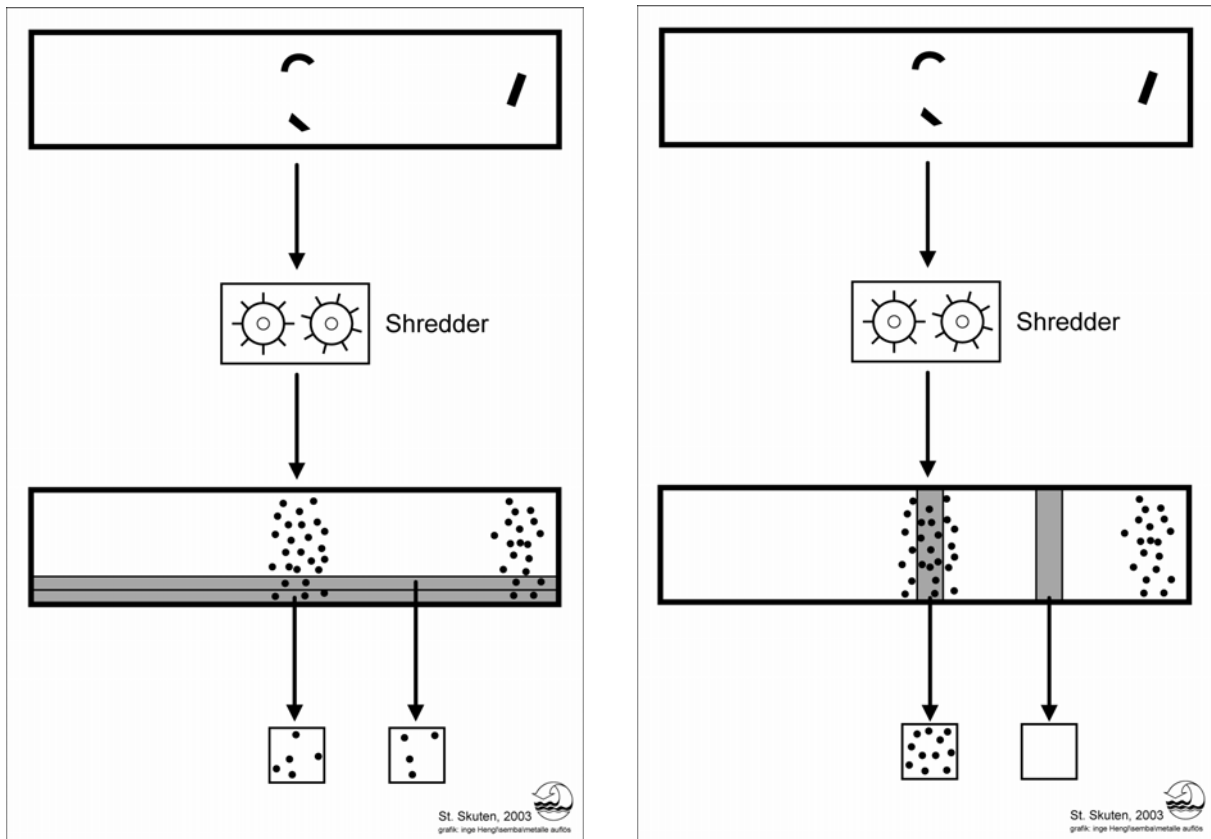


Abbildung 3-13 c (links) und d (rechts): In c ist die kontinuierliche Entnahme aus dem Gutstrom der Zerkleinerungsmaschine dargestellt, wie sie etwa mit einem automatischen Probenteiler möglich ist. Diese Variante ist der Variante a gleichwertig. Wird diskontinuierlich entnommen, wie in d dargestellt, ist das Ergebnis nur unwesentlich besser als beim Teilen ohne vorherige Zerkleinerung (vergl. mit Variante b)

Ohne intensive Durchmischung nach der Zerkleinerung verpufft die Wirkung der Zerkleinerung, weil sehr wahrscheinlich entweder alle oder keines der Teilchen, wie sie aus dem ursprünglichen, großen Trägerpartikel bei der Zerkleinerung entstanden sind, in die Teilmenge aufgenommen werden. Werden die Teilmengen aus dem laufenden Gutstrom der Zerkleinerungsmaschine entnommen, hat nur eine **kontinuierliche** Entnahme Sinn. Wird diskontinuierlich entnommen, ist die Zerkleinerung abgesehen von der geringfügigen Durchmischung in der Zerkleinerungsmaschine umsonst.



### 3.3 Statistische Planungs- und Auswertungsmethoden

Im folgenden sind alle statistischen Methoden beschrieben, wie sie für die Planung und Auswertung von Versuchen zur MBA-Stoffbilanzierung herangezogen werden. Varianzkomponentenanalyse und KS-Test dienen zur näheren Beschreibung der Verteilung von Messwerten, die weiteren Methoden zur Bestimmung notwendiger Probenmassen und optimierter Versuchspläne bzw. zur Auswertung der Unsicherheiten der Ergebnisse.

#### 3.3.1 Varianzkomponentenanalyse

Wenn mehrere Einflüsse die Streuung einer Messgröße verursachen, ermöglicht eine Varianzkomponentenanalyse, die gesamte gemessene Streuung (Standardabweichung des Mittelwerts) den einzelnen Einflussfaktoren zuzuschreiben. Klassischer Anwendungsfall ist die Evaluierung der Schritte von der Probenahme über die Probenaufbereitung bis zur chemischen Analyse bei der Bestimmung der durchschnittlichen Stoffkonzentration in einem Gut. Wie in Punkt 3.2.1 angerissen, ist in der Regel nur die letzte Ebene einer direkten Messung zugänglich. Umgelegt auf die klassische Bestimmung von Metallen bedeutet das: Nur in den Aufschlüssen der analysenfertigen Proben kann gemessen werden.

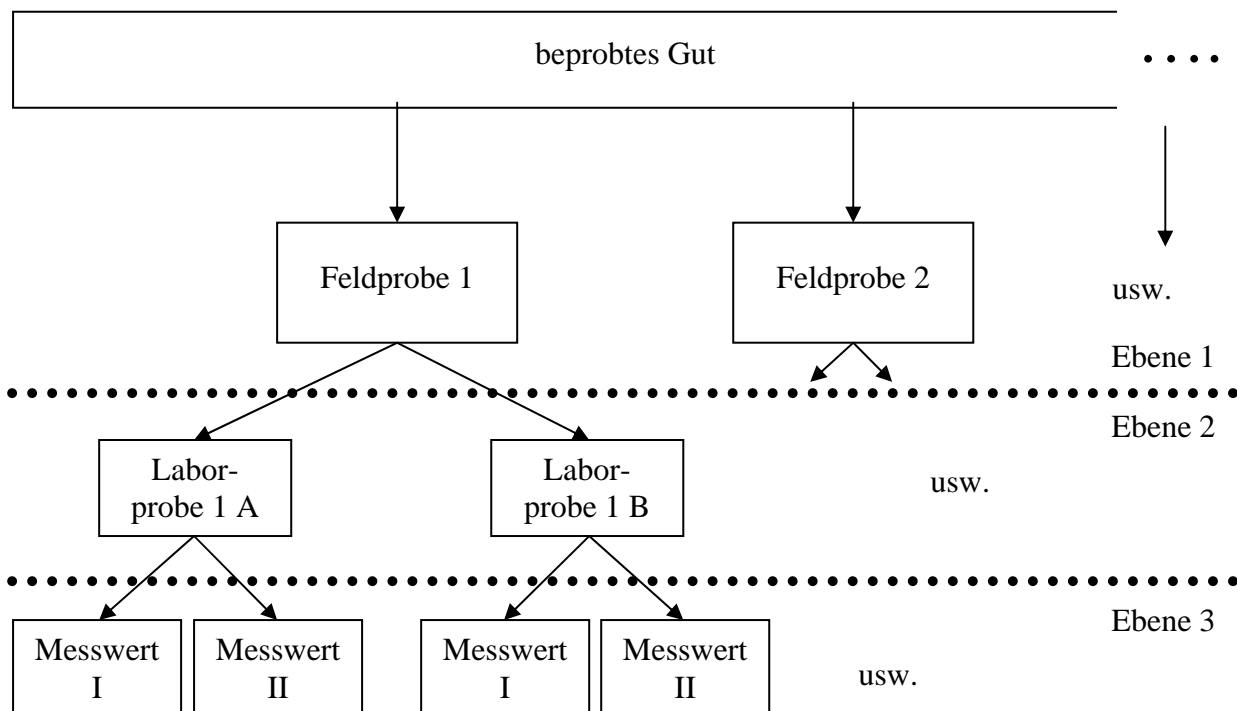


Abbildung 3-14: Versuchsaufbau bei einer Varianzkomponentenanalyse. Auf jeder Ebene, die untersucht werden soll, müssen mindestens zwei gleichrangige Parallelansätze geführt werden. Der Versuchsplan verzweigt sich daher von oben nach unten mit mindestens zwei weiterführenden Ästen pro Ebene

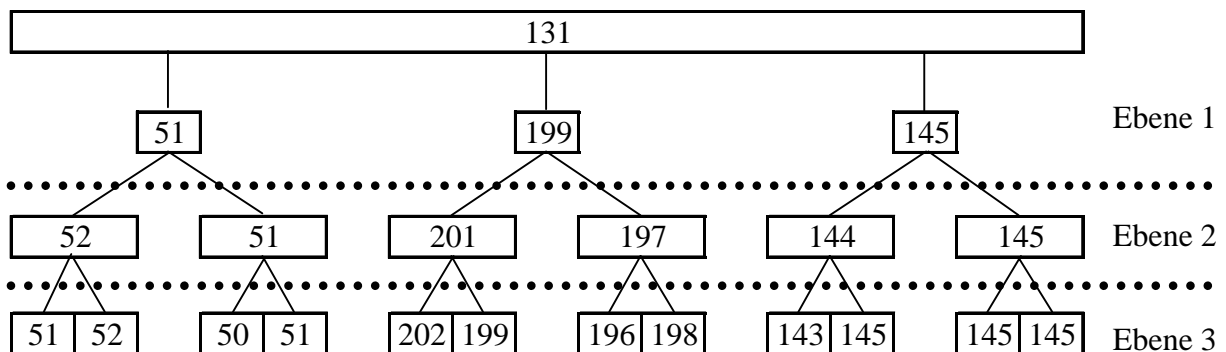
Es ist nicht sicher, ob eine gemessene Konzentration außer für die aufgeschlossene Menge (einige 100 mg) auch für die gesamte Analysenprobe (eine Dose mit einigen 100 g), die gesamte Laborprobe (ein 80 Liter Sack), die Feldprobe (2.000 kg) oder gar die ganze beprobte



Charge (zig Tonnen) gilt. Ein spezieller Versuchsaufbau ermöglicht, darüber Auskunft zu geben, sofern erhebliche systematische Fehler ausgeschlossen sind.

Abbildung 3-14 zeigt den Versuchsaufbau bei einer Varianzkomponentenanalyse an einem Beispiel. Jeder Schritt, dessen Einfluss auf die Streuung der Messwerte untersucht werden soll, muss in gleichwertigen Wiederholungen ausgeführt werden. Ebene 1 steht für die Streuung, die durch die Verschiedenartigkeit der primär gezogenen Proben verursacht wird. Die Stoffgehalte der einzelnen Proben können aber nicht direkt gemessen werden. Zuerst muss die Aufbereitung durchlaufen werden (Ebene 2), um die eigentliche chemische Analyse durchführen zu können (Ebene 3). Die Aufbereitung verursacht Fehler (Stichprobenentnahmen beim Verjüngen) ebenso wie die chemische Analyse. Die Streuung der Analyseergebnisse resultiert aus der Summe der Streuungen aus allen Ebenen. Durch das Anlegen von mindestens zwei gleichwertigen Parallelen pro Ebene lässt sich mit der Varianzkomponentenanalyse die Streuung der Analyseergebnisse zerlegen und auf die verschiedenen Ebenen aufteilen. Feldprobe 1 und Feldprobe 2 sind gleichwertige Wiederholungen der Probenahme aus dem Gutstrom, so wie Laborprobe 1 A und Laborprobe 1 B gleichwertige Teilproben aus einer Feldprobe sind. 1 A und 2 A sind keine gleichwertigen Parallelen, weil jede eine andere Ausprägung von Ebene 1 „Probenahme“ mitträgt.

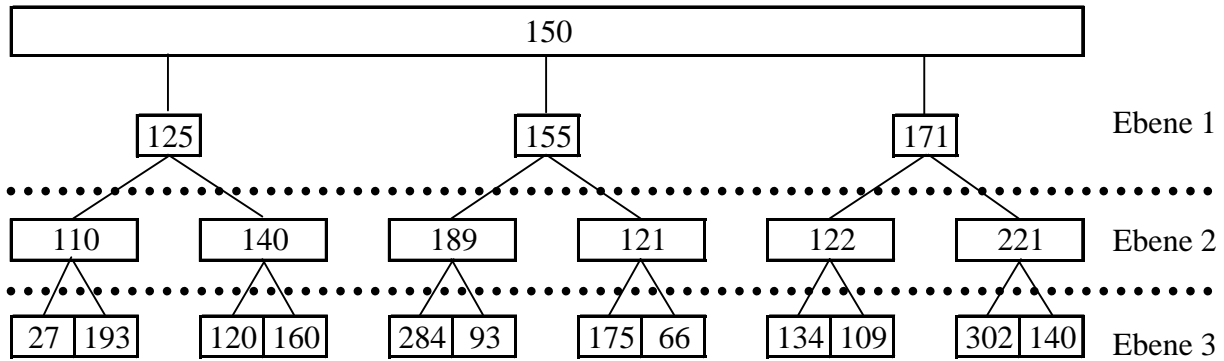
In den Abbildung 3-15 a und b sind Beispiele für Varianzkomponentenanalysen angegeben. Bei a ist die Ursache der Streuung vorrangig durch die Probenahme, bei b durch die Laboranalyse verursacht.



| Varianz |       |
|---------|-------|
| gesamt  | 1.862 |
| Ebene 1 | 5.585 |
| Ebene 2 | 2     |
| Ebene 3 | 2     |

Abbildung 3-15 a: Veranschaulichung der Varianzkomponentenanalyse, wenn auf Ebene 1 (Probenahme) die Hauptursache der Streuung liegt. Bei Laborproben (Ebene 2) und Messwerten (Ebene 3) treten nur geringfügige Abweichungen zwischen den gleichwertigen Parallelen auf.





| Varianz |        |
|---------|--------|
| gesamt  | 183    |
| Ebene 1 | -737   |
| Ebene 2 | -1.779 |
| Ebene 3 | 8.699  |

Abbildung 3-15 b: Varianzkomponentenanalyse, wenn auf Ebene 3 (chem. Analytik) die Hauptursache der Streuung liegt. Die Streuungen, die von den Ebenen 1 und 2 verursacht werden, sind von der Messungenauigkeit überlagert.

Negative Varianzkomponenten treten auf, wenn auf einer Ebene die Streuung (zufällig) stärker abnimmt, als durch die Mittelwertbildung auf der Ebene darunter zu erwarten ist. Im Beispiel sind die Messwertpaare so gewählt, dass sie beim Mitteln zügig Richtung Gesamtmittelwert streben, dieser Fall wird real kaum zu beobachten sein.

In Tabelle 3-2 sind die Gleichungen zur Durchführung der Varianzkomponentenanalyse mit drei Untersuchungsebenen angeführt.

Tabelle 3-2: Errechnung der Varianzkomponenten bei drei Ebenen

| Varianzursache | Varianzkomponente                                | MS  | SS (Quadratsummen)  |
|----------------|--|---|---|
| Ebene 1        | $\sigma_1^2 = \frac{MS_1 - MS_2}{n_2 \cdot n_3}$ | $MS_1 = \frac{SS_1}{n_1 - 1}$                       | $SS_1 = \sum_i^{n_1} n_2 \cdot n_3 (\bar{x}_{n_{1..}} - \bar{x}_{...})^2$                 |
| Ebene 2        | $\sigma_2^2 = \frac{MS_2 - MS_3}{n_3}$           | $MS_2 = \frac{SS_2}{n_1 \cdot (n_2 - 1)}$           | $SS_2 = \sum_i^{n_1} \sum_j^{n_2} n_3 (\bar{x}_{n_1 n_2 .} - \bar{x}_{n_1 ..})^2$         |
| Ebene 3        | $\sigma_3^2 = MS_3$                              | $MS_3 = \frac{SS_3}{n_1 \cdot n_2 \cdot (n_3 - 1)}$ | $SS_3 = \sum_i^{n_1} \sum_j^{n_2} \sum_k^{n_3} (x_{n_1 n_2 n_3} - \bar{x}_{n_1 n_2 .})^2$ |

Die Varianz des Mittelwerts aller Messwerte kann aus den Varianzkomponenten berechnet werden:

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_1 \cdot n_2} + \frac{\sigma_3^2}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3} + \dots \tag{3-1}$$



Das gleiche Ergebnis liefert die Berechnung aus den Werten der obersten Ebene (Ebene 1). Die berechneten Einzelwerte auf oberster Ebene sind unabhängig voneinander, ihre Varianz

$$s^2 = \frac{\sum (\bar{x} - x_i)^2}{n - 1} \quad (3-2)$$

wird für die Berechnung der Varianz des Mittelwerts verwendet:

$$s_{\bar{x}}^2 = \frac{s^2}{n} \quad (3-3)$$

### 3.3.2 Simulation der Varianzkomponentenbestimmung

Die Berechnung von Konfidenzintervallen für die Varianzkomponenten ist mathematisch überaus anspruchsvoll. Um die notwendigen Stichprobenumfänge für die praktische Durchführung zu klären, wurde deshalb die Bestimmung simuliert.

#### *Prinzip*

Probenahme, Aufbereitung und Messung werden simuliert und anschließend mit den daraus erhaltenen „synthetischen Messwerten“ die Auswertung durchgerechnet. Ausgehend von der angenommenen wahren Stoffkonzentration der Grundgesamtheit (Erwartungswert) werden auf Basis der angenommenen Streuung der Probenahme Zufallszahlen für die durchschnittlichen Stoffkonzentrationen der Feldproben erzeugt. Jeder dieser Werte ist Ausgangspunkt (Erwartungswert) für die Erzeugung der Zufallszahlenpaare mit der Streuung der zweiten Stufe (Probenaufbereitung), jeder Wert eines Paares wiederum Ausgangspunkt (Erwartungswert) für die Erzeugung der Zufallszahlenpaare der dritten Stufe.

#### **Vorgangsweise - Beispiel:**

Aus Gründen der Darstellbarkeit ist im Beispiel (Abbildung 3-16) der Stichprobenumfang auf Probenahmeebene mit nur drei Feldproben sehr klein. Im oberen Teil des dargestellten Tabellenblattes werden durch Simulation Werte erzeugt, im unteren Teil wird mit den simulierten Werten die Varianzkomponentenanalyse gerechnet. Die Inputdaten der Simulation (Erwartungswert, Annahmen für die Varianzen) werden oben in die hinterlegten Zellen eingetragen.

Ein Wert für die Stoffkonzentration der Grundgesamtheit (= Erwartungswert für den Mittelwert MW...) wird mit 100 angenommen. Mit diesem Erwartungswert und der angenommenen Probenahmevarianz ( $S^2$  Ebene 1) von 400 werden Zufallszahlen erzeugt (X1 bis X3). Dieser Vorgang simuliert die Probenahme, bei der in der Regel ebenfalls die gezogenen Proben in ihrer Zusammensetzung von der durchschnittlichen Zusammensetzung der Grundgesamtheit abweichen. Die Werte entsprechen den (nicht direkt messbaren) Stoffkonzentrationen (X1 bis X3) der Feldproben. Die zweite Ebene simuliert die Verjüngung der Proben im Verlauf der Probenaufbereitung. Mit X1 bis X3 als Erwartungswerten und der angenommenen Streuung von Stufe 2 ( $S^2$  Ebene 2 = 100) werden Paare von Zufallszahlen erzeugt (X11, X12, X21, X22 usw.), die den Stoffkonzentrationen in den verjüngten Proben entsprechen. Der gleiche Vorgang wird mit diesen neuen Werten als Erwartungswerten und der Streuung der Stufe 3 nochmals wiederholt. Die erzeugten Messwerte (X111, X112, X121) usw. („synthetische Messwerte“) enthalten nun alle Unsicherheiten (zufällige Fehler), die von der Probenahme bis



zur Messung passieren. Der errechnete Mittelwert trifft den „wahren“ Wert in Abhängigkeit der angenommenen Streuungen und der Zahl der Wiederholungen besser oder schlechter.

Mit den „synthetischen Messwerten“ wird nun die Varianzkomponentenanalyse zur Spaltung der Gesamtvarianz in die Komponenten der verschiedenen Ebenen durchgerechnet. Die Berechnung folgt den Formeln aus Tabelle 3-2. In Abbildung 3-16 sind die Hilfsgrößen zur Berechnung (Abweichungen der Einzelwerte von den Gruppenmittelwerten z.B.  $X_{ijk}-MW_{ij}$ , bzw. die quadratischen Abweichungen z.B.  $(X_{ijk}-MW_{ij})^2$ ) ebenfalls angegeben.

Das Beispiel zeigt, dass bei nur drei Wiederholungen auf Ebene 1 die Bestimmung der Varianzkomponenten schlecht funktioniert: Die zugrundegelegten Streuungen zum Synthetisieren der Werte werden nur größenordnungsmäßig aus der Varianzkomponentenanalyse wieder errechnet. Im Beispiel versagt die Bestimmung auf Ebene 1 völlig. (-8 statt 400). Mit den zu erwartenden Streuungen in der Praxis (die durch die Probenmassen effektiv steuerbar sind) sind ab Stichprobenumfängen von ca. 10 auf Ebene 1 größenordnungsmäßige Abschätzungen der Varianzkomponenten und qualitative Aussagen möglich.



| Erzeugung "synthetischer" Messwerte  |                              |       |             |                              |       |                            |         |       |       |               |                            |         |       |       |            |                           |       |                        |       |
|--------------------------------------|------------------------------|-------|-------------|------------------------------|-------|----------------------------|---------|-------|-------|---------------|----------------------------|---------|-------|-------|------------|---------------------------|-------|------------------------|-------|
|                                      | S <sup>2</sup> Ebene 1 = 400 | MW... | MW... = 100 | S <sup>2</sup> Ebene 2 = 100 | MWi.. | (MWij.-MWi..) <sup>2</sup> | Ebene 2 | MWij. | MWi.. | (MWij.-MWi..) | (MWij.-MWi..) <sup>2</sup> | Ebene 3 | Xijk  | MWij. | Xijk-MWij. | (Xijk-MWij.) <sup>2</sup> |       |                        |       |
| Ebene 1                              | MWi..                        | MW... | MWi..-MW... | MWi..                        | MWi.. | (MWi..-MW...) <sup>2</sup> | X11     | 92,7  | MWi.. | (MWij.-MWi..) | (MWij.-MWi..) <sup>2</sup> | X111    | 84,7  | MWij. | Xijk-MWij. | (Xijk-MWij.) <sup>2</sup> |       |                        |       |
| X1                                   | 81,2                         |       |             | 71,5                         |       |                            | X12     |       |       |               |                            | X112    | 91,1  |       |            |                           |       |                        |       |
| X2                                   | 110,7                        |       |             | 100,6                        |       |                            | X21     |       |       |               |                            | X211    | 103,9 |       |            |                           |       |                        |       |
| X3                                   | 93,4                         |       |             | 96,8                         |       |                            | X22     |       |       |               |                            | X221    | 104,3 |       |            |                           |       |                        |       |
|                                      |                              |       |             | 87,4                         |       |                            | X31     |       |       |               |                            | X311    | 97,1  |       |            |                           |       |                        |       |
|                                      |                              |       |             | 111,2                        |       |                            | X32     |       |       |               |                            | X312    | 76,8  |       |            |                           |       |                        |       |
|                                      |                              |       |             |                              |       |                            |         |       |       |               |                            | X321    | 116,0 |       |            |                           |       |                        |       |
|                                      |                              |       |             |                              |       |                            |         |       |       |               |                            | X322    | 107,2 |       |            |                           |       |                        |       |
| Auswertung der "synthetischen" Werte |                              |       |             |                              |       |                            |         |       |       |               |                            |         |       |       |            |                           |       |                        |       |
| MW1..                                | 83,3                         | 92,9  | -9,69       | 87,9                         | 83,3  | 4,63                       | MW11.   | 87,9  | 83,3  | 4,63          | 21,47                      | X111    | 84,7  | 87,9  | -3,24      | 10,47                     |       |                        |       |
|                                      |                              |       |             | 78,6                         | 83,3  | -4,63                      | MW12.   | 78,6  | 83,3  | -4,63         | 21,47                      | X112    | 91,1  | 87,9  | 3,24       | 10,47                     |       |                        |       |
| MW2..                                | 96,3                         | 92,9  | 3,39        | 88,1                         | 96,3  | -8,28                      | MW21.   | 88,1  | 96,3  | -8,28         | 68,52                      | X121    | 75,8  | 78,6  | -2,85      | 8,13                      |       |                        |       |
|                                      |                              |       |             | 104,6                        | 96,3  | 8,28                       | MW22.   | 104,6 | 96,3  | 8,28          | 68,52                      | X122    | 81,5  | 78,6  | 2,85       | 8,13                      |       |                        |       |
| MW3..                                | 99,2                         | 92,9  | 6,30        | 86,9                         | 99,2  | -12,33                     | MW31.   | 86,9  | 99,2  | -12,33        | 152,14                     | X211    | 103,9 | 88,1  | 15,84      | 250,84                    |       |                        |       |
|                                      |                              |       |             | 111,6                        | 99,2  | 12,33                      | MW32.   | 111,6 | 99,2  | 12,33         | 152,14                     | X212    | 72,2  | 88,1  | -15,84     | 250,84                    |       |                        |       |
|                                      |                              |       |             |                              |       |                            |         |       |       |               |                            | X221    | 104,3 | 104,6 | -0,33      | 0,11                      |       |                        |       |
|                                      |                              |       |             |                              |       |                            |         |       |       |               |                            | X222    | 104,9 | 104,6 | 0,33       | 0,11                      |       |                        |       |
|                                      |                              |       |             |                              |       |                            |         |       |       |               |                            | X311    | 97,1  | 86,9  | 10,16      | 103,19                    |       |                        |       |
|                                      |                              |       |             |                              |       |                            |         |       |       |               |                            | X312    | 76,8  | 86,9  | -10,16     | 103,19                    |       |                        |       |
|                                      |                              |       |             |                              |       |                            |         |       |       |               |                            | X321    | 116,0 | 111,6 | 4,43       | 19,61                     |       |                        |       |
|                                      |                              |       |             |                              |       |                            |         |       |       |               |                            | X322    | 107,2 | 111,6 | -4,43      | 19,61                     |       |                        |       |
|                                      |                              |       |             |                              |       |                            |         |       |       |               |                            |         |       |       |            | SS3                       | 784,7 |                        |       |
|                                      |                              |       |             |                              |       |                            |         |       |       |               |                            |         |       |       |            |                           | MS3   | 130,8                  |       |
|                                      |                              |       |             |                              |       |                            |         |       |       |               |                            |         |       |       |            |                           |       | S <sup>2</sup> Ebene 3 | 130,8 |
|                                      |                              |       |             |                              |       |                            |         |       |       |               |                            |         |       |       |            |                           |       |                        | 130,8 |

Abbildung 3-16: Simulation einer Varianzkomponentenbestimmung (Erläuterungen dazu im Text)



### 3.3.3 Kolmogorov-Smirnov-Test (KS-Test)

Mit dem KS-Test werden gemessene Verteilungen mit vorgegebenen Testverteilungen (hier die Normalverteilung) verglichen (vergl. dazu z.B. Hartung et al., 1991). Die Abstände der gemessene Werte von der Dichtefunktion der Testverteilung dienen als Maß für die Abweichung der gemessenen Verteilung zur Normalverteilung. Die Relation der Abstände zur Kolmogorov-Smirnov-Zahl beschreibt die Signifikanz, die Normalverteilungsannahme für die vorliegenden Messdaten abzulehnen.

### 3.3.4 Gauß'sche Fehlerfortpflanzung

Die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung ist eine Möglichkeit, die Auswirkungen unsicherer Messdaten auf die Unsicherheit eines Berechnungsergebnisses zu modellieren (vergl. dazu z.B. Hartung et al., 1991). Formel 3-4 gibt die mathematische Formulierung der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung an. Die Funktion zur Berechnung des Ergebnisses  $f(X_1, \dots, X_n)$  wird nach den einzelnen Messgrößen  $X_i$  partiell abgeleitet. Die partiellen Ableitungen beschreiben den Einfluss der Messgröße auf das Ergebnis. Die Varianz einer Messgröße  $X_i$  wird jeweils mit dem Quadrat der partiellen Ableitung multipliziert, um den sich fortpflanzenden Fehler zu quantifizieren.

$$\text{Var}(f(X_1, \dots, X_n)) \approx \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial X_i} \right)^2 \cdot \text{Var}(X_i) + 2 \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n \left( \frac{\partial f}{\partial X_i} \right) \cdot \left( \frac{\partial f}{\partial X_j} \right) \cdot \text{cov}(X_i, X_j) \quad (3-4)$$

Bestehen zwischen den einzelnen Messgrößen Wechselwirkungen, d.h. sind diese von einander abhängig, so ist der zweite Term auf der rechten Seite der Gleichung 3-4 (Kovarianzterm) zu berücksichtigen, andernfalls entfällt er.

### 3.3.5 Bestimmung der Streuung in Abhängigkeit der Probenmasse nach dem modifizierten Ansatz von Bunge und Bunge (1999)

Beim Ansatz von Bunge und Bunge (1999) wird die Grundgesamtheit als Menge aufgefasst, die aus „belasteten“ und „unbelasteten“ Partikeln besteht. Die unbelasteten Partikel sind frei vom gesuchten Stoff, die belasteten weisen alle die selbe (hohe) Konzentration auf („Schadstoffträgerpartikel“ im Folgenden als „Trägerpartikel“ oder „Trägerstücke“ bezeichnet). Die Probenahme entspricht der zufälligen Entnahme einer Teilmenge. Dieses Probenahmemodell nimmt Rücksicht auf die Häufigkeit von Trägerpartikeln im Gemenge. Bei Materialien mit hoher Heterogenität ist die Häufigkeit und Größe der Trägerpartikel der wichtigste Einflussfaktor auf die Probenahmestreuung. Dieser Ansatz ist daher bei der Charakterisierung von heterogenen Abfällen besser geeignet als andere, die (1) nur die Korngröße des Materials berücksichtigen und (2) keine Rücksicht auf die Verschiedenartigkeit der Gemengteile nehmen.



Folgende Annahmen werden zur Vereinfachung beim Ansatz von Bunge und Bunge (1999) getroffen:

- zufällige Verteilung der Trägerpartikel im Gemenge<sup>1</sup>
- gleiche Konzentrationen des gesuchten Stoffes in allen Trägerpartikeln
- kugelförmige Trägerpartikel
- homogener innerer Aufbau der Trägerpartikel
- andere Partikel (Matrix) frei vom gesuchten Stoff
- GGS-Verteilung der Korngrößen der Trägerpartikel<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Der Ansatz berücksichtigt daher nur Probenahmefehler, die als Folge der Heterogenität des Materials entstehen. Systematische Schwankungen in der Materialzusammensetzung (Variabilität) wird nicht berücksichtigt.

<sup>2</sup> Verteilung nach Gates, Gaudin und Schuhmann. Die GGS-Verteilung wird in der Verfahrenstechnik für die Beschreibung der Korngrößenverteilungen von Grobzerkleinerungsprodukten angewendet. Sie beschreibt eine lineare Beziehung zwischen Trennschnitt und Anteil des Siebdurchganges an den gesamten Partikeln.

Bunge und Bunge (1999) geben folgende Gleichung für die minimale Probenmasse an (zur Herleitung siehe dort).

$$M = \frac{1}{\omega} \cdot \left( \frac{z}{\varepsilon} \right)^2 \cdot \frac{\pi \cdot \rho_T}{6} \cdot \frac{1}{1 + 3 \cdot \lg \frac{d_{max}}{d_{10\%}}} \cdot d_{max}^3 \quad (3-5)$$

- M minimale Probenmasse, die notwendig ist, um den Probenahmefehler  $\varepsilon$  mit der durch z vorgegebenen Sicherheit zu unterschreiten [kg]  
 $\omega$  Massenanteil an Trägerpartikeln [dimensionslos]  
 z geforderte Sicherheit, Vertrauensbereich angegeben als Quantil der Standardnormalverteilung, z.B. Wert 1,96 bei 95 % Sicherheit [dimensionslos]  
 $\varepsilon$  relativer tolerierter Probenahmefehler [dimensionslos]  
 $\rho_T$  Dichte der Trägerpartikel [ $\text{kg/m}^3$ ]  
 $d_{max}$  maximale Korngröße der Trägerpartikel [m]  
 $d_{10\%}$  maximale Korngröße der 10 % kleinsten Trägerpartikel [m]

Für die Verwendung der Gleichung 3-5 ist es notwendig, als Vorinformation vom zu charakterisierenden Material Korngröße und Dichte der Trägerpartikel sowie deren Massenanteil im Material annähernd zu kennen. Die Korngröße der Matrixpartikel ist irrelevant.

### Abänderungen

Für MBA-Outputgüter ist es nicht sinnvoll, mit Partikeldurchmessern und der Annahme der Kugelgestalt zu rechnen. Die Masse eines Trägerpartikels steht nur in losem Zusammenhang mit dem Durchmesser. Die wenigsten Gegenstände haben auch nur annähernd Kugelgestalt, viele Teile sind hohl. Um diesem Sachverhalt gerecht zu werden, wird der Partikeldurchmesser durch die Partikelmasse ersetzt.



$$M = \frac{1}{\omega} \cdot \left( \frac{z}{\varepsilon} \right)^2 \cdot \frac{1}{1 + 3 \cdot \lg \frac{\sqrt[3]{m_{T_{max}}}}{\sqrt[3]{m_{T_{10}}}}} \cdot m_{T_{max}} \quad (3-6)$$

In der Regel enthalten die Abfälle nicht nur eine Art von Trägerpartikeln. Für Kupfer sind z.B. Kupfer- wie Messingteile frachtbestimmend, für Cadmium NiCd-Akkus und cadmiumstabilisierte PVC-Teile. Es wird daher die Möglichkeit geschaffen, verschiedene Partikeltypen, die bestimmte Anteile an der gesamten Elementfracht ausmachen, gleichzeitig zu berücksichtigen. Dazu wird der Gesamtgehalt  $c_{gesamt}$  in die Beiträge  $c_i$  aufgeteilt, die von den einzelnen Partikeltypen stammen.

$$c_{gesamt} = \sum c_i \quad (3-7)$$

Für alle Partikeltypen mit ihren Beiträgen  $c_i$  zur gesamten Stoffkonzentration wird jeweils separat der Ansatz von Bunge und Bunge (1999) verwendet. Mit Hilfe der Gauß'scher Fehlerfortpflanzung werden die Probenahmefehler, die von den verschiedenen Partikeltypen herrühren, zusammengefasst, indem die Varianzen aller Beiträge  $c_i$  addiert werden. Dazu ist es notwendig, in Gleichung 3-6 Standardabweichung und Mittelwert einzuführen. Das ist möglich durch Ersetzen des Bruches

$$\frac{z}{\varepsilon} \text{ durch } \frac{\bar{c}}{s}$$

( $z$  ist der Quotient aus der absoluten Abweichung eines Werts vom Mittelwert und der Standardabweichung,  $\varepsilon$  der Quotient aus der absoluten Abweichung und dem Mittelwert.

$$z = \frac{\text{absolute Abweichung}}{s} \quad (3-8)$$

$$\varepsilon = \frac{\text{absolute Abweichung}}{\bar{c}} \quad (3-9)$$

Man erhält die Gleichung

$$M = \frac{1}{\omega_i} \cdot \left( \frac{\bar{c}_i}{s_i} \right)^2 \cdot \frac{1}{1 + 3 \cdot \lg \frac{\sqrt[3]{m_{i_{max}}}}{\sqrt[3]{m_{i_{10\%}}}}} \cdot m_{i_{max}} \quad (3-10)$$

und durch Umformen

$$s_i^2 = \frac{1}{\omega_i} \cdot \frac{\bar{c}_i^2}{M} \cdot \frac{1}{1 + 3 \cdot \lg \frac{\sqrt[3]{m_{i_{max}}}}{\sqrt[3]{m_{i_{10\%}}}}} \cdot m_{i_{max}} \quad (3-11)$$

Gleichung 3-11 gibt für eine Trägerpartikeltype an, wie die Probenahmevarianz  $s_i^2$  von den Materialeigenschaften und der Probenmasse abhängt.



Nach der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung werden bei der Addition zufallsbehafteter Werte die Varianzen addiert, um die Streuung der Summe zu berechnen. (Der Kovarianzterm in der Formel der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung (zweites Glied der rechten Seite von Gleichung 3-4) wird nicht berücksichtigt, weil zwischen den Streuungsursachen keine Abhängigkeiten bestehen. Das Auftreten und die Beschaffenheit jedes Trägerpartikeltyps als Streuungsursache ist unabhängig von allen anderen.)

Zur Berechnung der Probenahmestreuung als Folge des Zusammenwirkens aller Trägerpartikeltypen werden die Varianzen aus den Gleichungen der Art 3-11 summiert.

$$s_{gesamt}^2 = \sum s_i^2 \quad (3-12)$$

Um die Berechnung der minimalen Probenmasse mit dem System aus mehreren Gleichungen (Gleichung vom Typ 3-11 für jede Partikeltype und Gleichung 3-12 zur Summenbildung) praktikabel zu machen, werden diese Gleichungen als Formeln in MS Excel eingegeben. Mit Hilfe des Solvers von MS Excel kann das Gleichungssystem numerisch nach der Probenmasse gelöst werden (Zielwertsuche für die gewünschte einzuhaltende Streuung). Dazu muss dem Solver als Nebenbedingung die Gleichsetzung der Probenmassen in allen Formeln der Art 3-11 eingegeben werden.

Die Excel-Datei „Probenmassen Bunge modifiziert“ auf der Daten-CD enthält anwendungsfertige Tabellenblätter zur Bestimmung der minimalen Probenmassen nach der beschriebenen Methode inklusive Kurzbeschreibung und Kurzanleitung. (Die Daten-CD liegt der Studie nicht bei, kann jedoch auf Anfrage beim Sachbearbeiter eingesehen werden.)

Bestehen Zweifel über die Richtigkeit der Annahme der GGS-Verteilungsfunktion für die Korngröße der Trägerpartikel, kann durch Angleichen des  $m_{10\%}$  an  $m_{max}$  der („schlimmste“) Extremfall berechnet werden, bei dem alle Trägerpartikel die Masse  $m_{max}$  aufweisen. Die berechnete Probenmasse ist dann bezüglich des Probenahmefehlers in jedem Fall auf der sicheren Seite. Erreicht die Probenmasse damit eine Höhe, die an die Grenzen der praktischen Durchführbarkeit stößt, ist die Vorerhebung soweit zu verbessern, dass  $m_{10\%}$  besser abgeschätzt werden kann. Da naturgemäß die großen Partikel zum Fehler bei der Probenahme am stärksten beitragen, sind Abweichungen von der Verteilungsfunktion und falsche Abschätzungen der Masse  $m_{10\%}$  in der Regel aber von geringem Einfluss. Ist die Verteilung offensichtlich völlig von einer GGS-Verteilung verschieden (z.B. Träger treten nur in zwei verschiedenen definierten Größen auf), können die Trägerpartikel in Gruppen unterteilt werden und als von einander unabhängige Partikeltypen in der Berechnung geführt werden. Sind alle Trägerpartikel von gleicher Zusammensetzung und gleich groß, kann die von Bunge und Bunge (1999) angegebene Faustregel verwendet werden, wonach die Probe mindestens 100 Trägerpartikel erfassen muss, dass mit 95 % Sicherheit der Probenahmefehler kleiner ist als 20 %.





### 3.3.6 Bestimmung der Streuung in Abhängigkeit der Probenmasse durch Simulation mit der Binomialverteilungsstatistik

#### 3.3.6.1 Prinzip

Es wird nachgestellt, wie hochkonzentrierte Teile, die zufällig im Gemenge verteilt sind, bei der Probenahme erfasst werden, die Aufbereitung durchlaufen und schließlich in die analysierten Mengen (Einwaagen) gelangen. Durch Simulation vielmaliger Wiederholungen (z.B. 1.000-fach) können Streuung (zufällige Fehler) und Differenz zum Erwartungswert (systematische Fehler) bestimmt werden.

#### 3.3.6.2 Methode

Die zu charakterisierende Charge des Materials wird als Grundgesamtheit angenommen, in der eine definierte Anzahl hochkonzentrierter Teilchen zufällig verteilt ist. Die unbelasteten Teilchen im Gemenge („Verdüner“) bleiben unberücksichtigt. Für diese kann ein fixer Sockelbetrag als „Hintergrundkonzentration“ angenommen werden. Die Zufallsverteilung der Trägerteilchen wird rechnerisch erzeugt, indem die Grundgesamtheit gedanklich in Kompartimente unterteilt wird, die jeweils Probengröße haben. Mit einem Zufallsgenerator werden alle hochkonzentrierten Teilchen auf die Kompartimente der Charge verteilt. Die Anzahl der Teilchen in den einzelnen Kompartimenten folgt der hypergeometrischen Verteilung (vergl. dazu Hartung et al., 1991). Beim Probenziehen werden anschließend einzelne Kompartimente samt den darin enthaltenen Trägerteilchen herausgegriffen. Mit der Anzahl enthaltener Teilchen im Kompartiment und deren Stofffracht wird die Zusammensetzung der Probe berechnet und mit der Zusammensetzung der Grundgesamtheit verglichen. Durch diesen Aufbau können nicht nur Mittelwert und Streuung sondern auch die Verteilung der simulierten Messwerte ausgewertet werden.

Die Verteilung der Teilchen beim Verjüngen während der Probenaufbereitung wird auf analoge Weise ermittelt (jede Verjüngung entspricht prinzipiell der Entnahme einer Stichprobe). Die im Probenahmeschritt geschaffenen Kompartimente werden nach einer gedachten Zerkleinerung des Materials (Erhöhung der Teilchenzahl bei gleichzeitiger Verringerung der Kornmasse) weiter unterteilt in kleinere Kompartimente, die der Größe der Teilproben nach der ersten Verjüngung entsprechen. In diese neuen Kompartimente werden die nun vermehrten, kleineren Teilchen mit Zufallsgenerator aufgeteilt, die Verteilung ausgewertet, erneut zerkleinert, kompartimentiert usw., bis der letzte Verjüngungsschritt, die Einwaage zur Analyse erreicht ist.

Das Ergebnis wird graphisch dargestellt. Für jeden Schritt wird im Histogramm angegeben, wie groß die Anzahl der Proben ist, die bestimmte Abweichungen einhalten. Abbildung 3-17 zeigt ein Beispiel. Aus den simulierten Werten lassen sich alle Parameter der Verteilung errechnen (Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe etc.) sowie verschiedene Tests (z.B. Test auf Normalverteilung) durchführen und Varianzkomponentenanalysen rechnen.

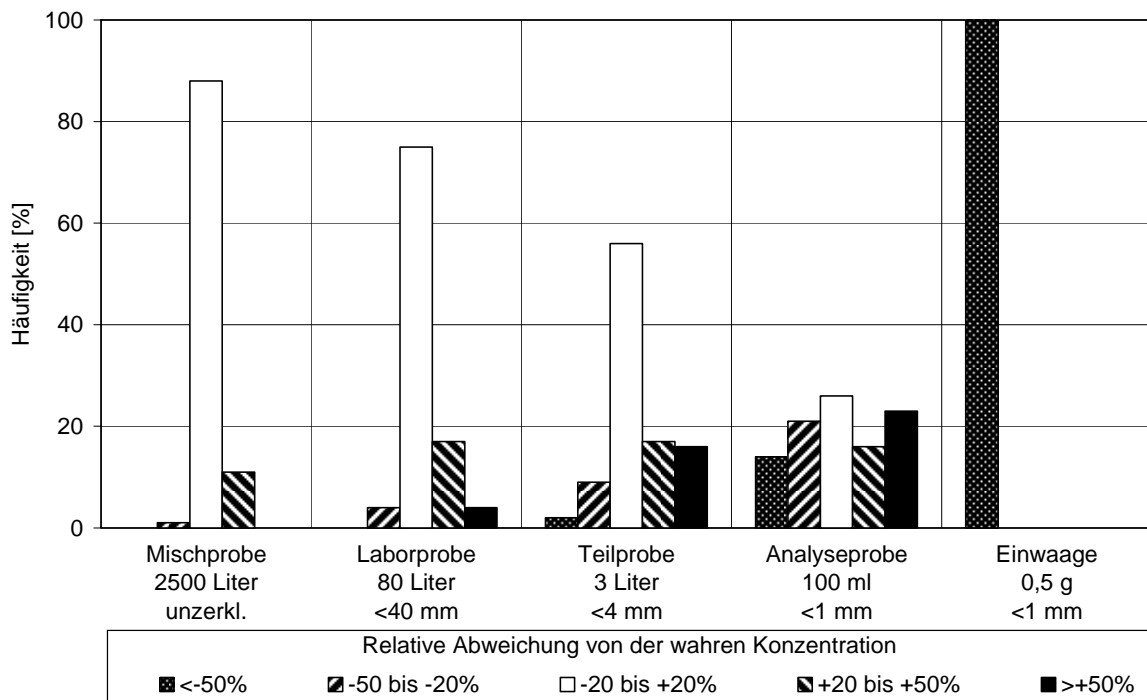


Abbildung 3-17: Simulation der Kupferbestimmung in einer heizwertreichen Fraktion, in der 2.500 mg/kg Kupfer in Form von Kabeln enthalten sind.

Auf der Daten-CD ist das Simulationsprogramm in der Excel-Datei „Probenmassen Binomialverteilung“ inklusive Kurzbeschreibung und Kurzanleitung enthalten. (Die Daten-CD liegt der Studie nicht bei, kann jedoch auf Anfrage beim Sachbearbeiter eingesehen werden.)

### 3.3.6.3 Vereinfachungen

Es werden nur die Konzentrationsbeiträge von hoch konzentrierten Teilchen betrachtet, die übrigen Beiträge werden als fixe „Hintergrundkonzentration“ gesehen. Alle hochkonzentrierten Teilchen sind gleich beschaffen, Masse und Konzentration sind vorgegeben. Für die Simulationen werden Teilchengrößen verwendet, die eine ungünstigere Verteilung bewirken, als es der Realität entspricht, damit bewegt sich der Fehler der Vereinfachung im sicheren Bereich. Die Teilchen werden zufällig verteilt. Die zufällige Verteilung entspricht einer vollkommenen Durchmischung, der günstigsten Situation, Variabilität wird ausgeschlossen.

### 3.3.7 Probenmassebestimmung aus bestehenden Messreihen

Der zufällige Fehler der Probenahme d.h. die Streuung auf Grund der Heterogenität ist abhängig von der Probenmasse. Die Varianzen der Stoffkonzentrationen von gezogenen Proben sinken theoretisch mit dem Kehrwert der Probenmasse bei Annahme von zufällig verteilten Trägerpartikeln im zu beprobenden Gut. Es ist daher möglich, aus bestehenden Messreihen, wenn diese nicht rigoros „ausreißerbereinigt“ sind, Streuungen bei Ausdehnung oder Einschränkung der Probenmassen abzuschätzen. Bei der Verwendung von Literaturdaten ist Vorsicht geboten, weil häufig die Probenaufbereitungsschritte unzureichend beschrieben sind und daher der Ursprung der Streuung nicht nachvollzogen werden kann.



### 3.3.8 Auswertung der Stoffbilanzen mit Berechnung der Unsicherheiten anhand der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung

Die Beschreibung der Auswertung eines Versuchs wird vor die Versuchsplanung gestellt, weil die Optimierung der Versuchsplanung auf der Rechenroutine der Auswertung aufbaut.

#### 3.3.8.1 Bilanzierung mit rechnerischer Ermittlung des Inputs (mechanische Prozesse)

Die Zusammensetzung des Inputs eines mechanischen Abfallaufbereitungsprozesses zu bestimmen, ist immer schwieriger, als die Outputs zu analysieren. Wenn es im Prozess nicht ein variables Lager unbekannter Größe gibt, ist die rechnerische Bestimmung der Input-Stoffflüsse zweckmäßiger als die direkte Messung. Die Aufbereitungsleistung der Anlage wird benutzt, um die Aufbereitungsarbeit bei den Proben zu reduzieren. In diesem Fall wird bei gegebenem Aufwand die Bilanz besser, wenn sich die Untersuchung auf die Outputgüter beschränkt. Umverteilen des Untersuchungsaufwands von Output zu Input verschlechtert die Sicherheit des Ergebnisses.

Die Transferkoeffizienten (TK) werden nicht direkt gemessen, sondern aus der gemessenen Güterbilanz und der Stoffkonzentrationen in den Gütern errechnet. Die Varianz einer errechneten Größe kann mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung (Gleichung 3-4) aus den Varianzen der zugrunde liegenden Messgrößen errechnet werden.

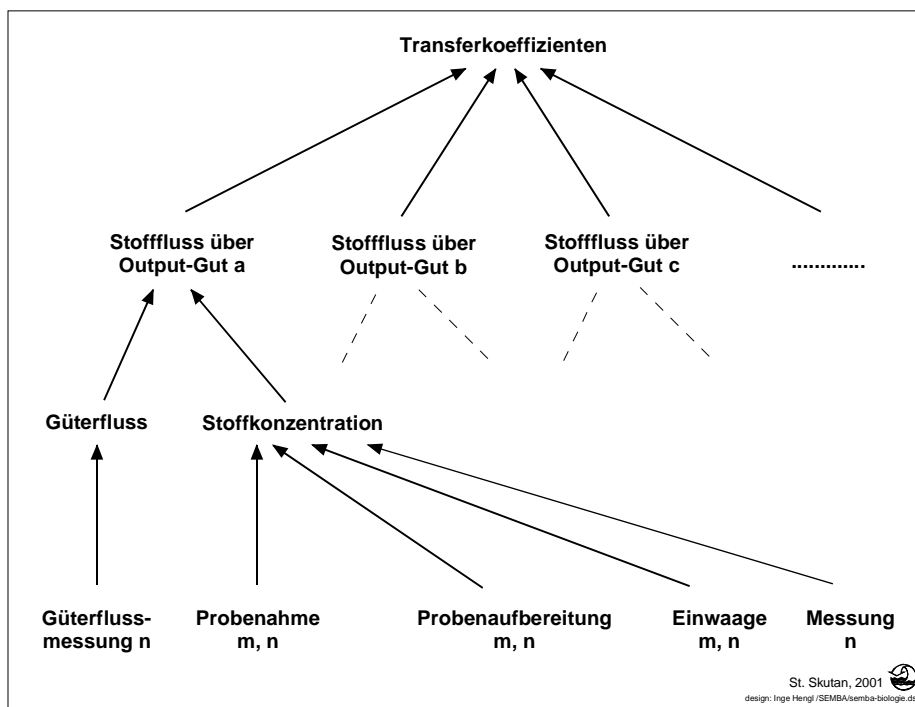


Abbildung 3-18: Fehlerquellen und Fehlerfortpflanzung zum Endergebnis:  $m$  und  $n$  symbolisieren Probenmassen und Wiederholungen, Steuerungsmöglichkeiten der Unsicherheit

Die Varianz eines Transferkoeffizienten ist in dieser Weise aus den Varianzen der Stoffflüsse berechenbar. Die Varianzen der Stoffflüsse lassen sich ihrerseits aus den Varianzen von gemessenen Konzentrationen und gemessenen Güterflüssen bilden (vgl. Abbildung 3-18).



Ausgehend von einem TK für einen beliebigen Stoff im Outputgut a und drei (Beispiel) weiteren Outputgütern b, c, und d

$$TK_a = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a + \dot{m}_b + \dot{m}_c + \dot{m}_d} \quad (3-13)$$

und den Varianzen  $\sigma_{\dot{m}_i}^2$  mit denen die Stoffflüsse  $\dot{m}_i$  behaftet sind, kann die Varianz des  $TK_a$  gebildet werden. Mit  $\dot{m}_i$  werden die Stoffflüsse bezeichnet. Der Punkt über dem Buchstaben symbolisiert den Bezug der Massen auf einen Zeitraum.

*Herleitung:*

Für die Rechnung mit der Gauß'sche Fehlerfortpflanzung ist es notwendig, zunächst die partiellen Ableitungen des  $TK_a$  nach den einzelnen  $\dot{m}_i$  zu bilden:

$$\frac{\partial TK_a}{\partial \dot{m}_a} = \frac{\dot{m}_b + \dot{m}_c + \dot{m}_d}{(\dot{m}_a + \dot{m}_b + \dot{m}_c + \dot{m}_d)^2} \quad (3-14)$$

$$\frac{\partial TK_a}{\partial \dot{m}_b} = \frac{\partial TK_a}{\partial \dot{m}_c} = \frac{\partial TK_a}{\partial \dot{m}_d} = -\frac{\dot{m}_a}{(\dot{m}_a + \dot{m}_b + \dot{m}_c + \dot{m}_d)^2} \quad (3-15)$$

Die partielle Ableitung des TK nach einem Stofffluss  $\dot{m}_i$  beschreibt die Abhängigkeit des TK von diesem Stofffluss. Ist die partielle Ableitung groß, bedeutet das eine starke Sensitivität des TK gegenüber diesem Stofffluss, d.h. ändert sich der Stofffluss stark, ist auch die Änderung des TK groß.

Die Varianz des  $TK_a$  ergibt sich nach der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung aus der Summe der Produkte aus Quadraten der partiellen Ableitungen und Varianzen der Stoffflüsse:

$$\sigma_{TK_a}^2 \approx \left( \frac{\partial TK_a}{\partial \dot{m}_a} \right)^2 \cdot \sigma_{\dot{m}_a}^2 + \left( \frac{\partial TK_a}{\partial \dot{m}_b} \right)^2 \cdot \sigma_{\dot{m}_b}^2 + \left( \frac{\partial TK_a}{\partial \dot{m}_c} \right)^2 \cdot \sigma_{\dot{m}_c}^2 + \left( \frac{\partial TK_a}{\partial \dot{m}_d} \right)^2 \cdot \sigma_{\dot{m}_d}^2 \quad (3-16)$$

Die Kovarianzterme in der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung werden hier nicht berücksichtigt, weil die  $\dot{m}_i$  als unabhängig angenommen werden und somit die Kovarianzen gleich null sind.

Setzt man die Ausdrücke für die partiellen Ableitungen in die Gleichung ein und hebt den identischen Ausdruck für die partiellen Ableitungen nach  $\dot{m}_b$ ,  $\dot{m}_c$ , und  $\dot{m}_d$  heraus, ergibt sich:

$$\sigma_{TK_a}^2 \approx \frac{(\dot{m}_b + \dot{m}_c + \dot{m}_d)^2}{(\dot{m}_a + \dot{m}_b + \dot{m}_c + \dot{m}_d)^4} \cdot \sigma_{\dot{m}_a}^2 + \frac{\dot{m}_a^2}{(\dot{m}_a + \dot{m}_b + \dot{m}_c + \dot{m}_d)^4} \cdot (\sigma_b^2 + \sigma_c^2 + \sigma_d^2) \quad (3-17)$$

Die Summe der  $\dot{m}_i$  wird zur Vereinfachung durch das Symbol  $\dot{m}_{tot}$  ersetzt:



$$\dot{m}_a + \dot{m}_b + \dot{m}_c + \dot{m}_d = \dot{m}_{tot} \quad (3-18)$$

Außerdem wird im Zähler des ersten Bruchs die Summe  $\dot{m}_b + \dot{m}_c + \dot{m}_d$  ersetzt durch die Differenz  $\dot{m}_{tot} - \dot{m}_a$ . Man erhält die Gleichung

$$\sigma_{TK_a}^2 \approx \frac{(\dot{m}_{tot} - \dot{m}_a)^2}{(\dot{m}_{tot})^4} \cdot \sigma_{\dot{m}_a}^2 + \frac{\dot{m}_a^2}{(\dot{m}_{tot})^4} \cdot (\sigma_b^2 + \sigma_c^2 + \sigma_d^2), \quad (3-19)$$

die sich für eine beliebige Zahl an Outputgütern verallgemeinern lässt:

$$\sigma_{TK_i}^2 \approx \frac{(\dot{m}_{tot} - \dot{m}_i)^2}{(\dot{m}_{tot})^4} \cdot \sigma_{\dot{m}_i}^2 + \frac{\dot{m}_i^2}{(\dot{m}_{tot})^4} \cdot \sum_{j=1, j \neq i}^n \sigma_j^2 \quad (3-20)$$

### Unsicherheiten der Stoffflüsse

Die Stoffflüsse errechnen sich als Produkte der gemessenen Größen Güterfluss  $\dot{g}_i$  und Konzentration  $c_i$ :

$$\dot{m}_i = \dot{g}_i \cdot c_i \quad (3-21)$$

Die Varianz des Stoffflusses ist nach der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung daher anzugeben als

$$\sigma_{\dot{m}_i}^2 \approx \left( \frac{\partial \dot{m}_i}{\partial c_i} \right)^2 \cdot \sigma_{c_i}^2 + \left( \frac{\partial \dot{m}_i}{\partial \dot{g}_i} \right)^2 \cdot \sigma_{\dot{g}_i}^2 \quad (3-22)$$

Wieder werden wegen der Unabhängigkeit von  $c_i$  und  $\dot{g}_i$  die Kovarianzterme Null gesetzt. Die beiden partiellen Ableitungen lauten:

$$\left( \frac{\partial \dot{m}_i}{\partial c_i} \right) = \dot{g}_i \quad (3-23)$$

und

$$\left( \frac{\partial \dot{m}_i}{\partial \dot{g}_i} \right) = c_i \quad (3-24)$$

Die Varianz eines Stoffflusses errechnet sich daher als

$$\sigma_{\dot{m}_i}^2 = c_i^2 \cdot \sigma_{\dot{g}_i}^2 + \dot{g}_i^2 \cdot \sigma_{c_i}^2 \quad (3-25)$$



Mit der Kombination der Gleichungen (3-20) und (3-25) lassen sich Varianzen von TK aufgrund von Messwerten (Mittelwert und Varianz) von Güterflüssen und Konzentrationen bestimmen. Der Rechenalgorithmus wird in die Tabellenkalkulation übernommen:

| Gut          | TK       |                 |                 |            | Stofffluss |     | Eingabebereich |      |            |      |
|--------------|----------|-----------------|-----------------|------------|------------|-----|----------------|------|------------|------|
|              | Mittelw. | 95% Konf.-I.    |                 | Var von TK | Mittelw.   | Var | Konzentration  |      | Güterfluss |      |
|              |          | untere G.       | obere G.        |            |            |     | Mittelw.       | Var  | Mittelw.   | Var  |
| Out 1        | 0,167    | 0,1371          | 0,1962          | 0,0002269  | 200        | 410 | 2              | 0,04 | 100        | 2,5  |
| Out 2        | 0,167    | 0,1371          | 0,1962          | 0,0002269  | 200        | 410 | 2              | 0,04 | 100        | 2,5  |
| Out 3        | 0,417    | 0,3828          | 0,4505          | 0,0002983  | 500        | 575 | 100            | 3    | 5          | 0,05 |
| Out 4        | 0,25     | 0,2180          | 0,2820          | 0,0002664  | 300        | 527 | 100            | 3    | 3          | 0,05 |
| <b>SUMME</b> | <b>1</b> | <b>0,875112</b> | <b>1,124888</b> |            |            |     |                |      |            |      |

Abbildung 3-19: Tabellenkalkulation für Transferkoeffizienten und deren Unsicherheiten anhand von Mittelwerten und Varianzen von Output-Stoffflüssen

Im „Eingabebereich“ werden die Mittelwerte und Varianzen der Messwerte für Güterflüsse und Stoffkonzentrationen eingesetzt. Im Bereich „Stofffluss“ werden mit den Gleichungen 3-21 und 3-25 Mittelwerte und Varianzen der Stoffflüsse berechnet. Im Bereich „TK“ werden mit Gleichung 3-13 die Mittelwerte der TK und mit Gleichung 3-20 die zugehörigen Varianzen berechnet. Die untere und obere Schranke des Konfidenzintervalls wird wie für normalverteilte Werte gewohnt berechnet mit

$$\text{Konfidenzintervall} = \text{Mittelwert} \pm \sigma_{\text{Mittelwert}} \cdot z \quad (3-26)$$

$z$  bezeichnet den Vertrauensbereich, der beim 95 % Intervall 1,96 beträgt.

Der Aufbau der Tabelle und die enthaltenen Formeln erlauben es, die Zahl der Outputgüter in der Tabelle beliebig zu variieren. Zeilen können gelöscht bzw. neue Zeilen durch kopieren einer bestehenden Zeile ergänzt werden.

Auf der Daten-CD ist dieses Auswertungstabellenblatt unter „Auswertung Fehlerfortpflanzung“ inklusive Kurzbeschreibung und Kurzanleitung enthalten. (Die Daten-CD liegt der Studie nicht bei, kann jedoch auf Anfrage beim Sachbearbeiter eingesehen werden.)

### 3.3.8.2 Bilanzierung mit einem unbestimmten Output (biologische Behandlung)

In dieser Arbeit wird der Rotteverlust nicht direkt gemessen. Der Austrag von Kohlenstoff, Stickstoff, eventuell Schwefel und Quecksilber wird als Differenz (Rotteinput - Rotteoutput) bestimmt. Von den anderen Elementen ist aufgrund ihrer Eigenschaften kein Austrag bei der Rotte zu erwarten abgesehen von Anteilen in der Staubfracht der Abluft.

Der Stofffluss des Rotteverlusts wird berechnet als

$$\text{Rotteverlust} = \text{Rotteinput} - \text{Rotteoutput} \quad (3-27)$$

Die Varianz dieser Differenz ist nach der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung die Summe der Varianzen von Rotteinput und Rotteoutput:



$$\sigma_{\text{Rotteverlust}}^2 = \sigma_{\text{Rotteinput}}^2 + \sigma_{\text{Rotteoutput}}^2 \quad (3-28)$$

Zur Berechnung des Transferkoeffizienten des Rotteverlusts bezieht man den Rotteverlust auf den Rotteinput:

$$TK_{\text{Rotteverlust}} = \frac{\text{Rotteverlust}}{\text{Rotteinput}} = \frac{\text{Rotteinput} - \text{Rotteoutput}}{\text{Rotteinput}} \quad (3-29)$$

Mit der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung lässt sich die Varianz des Transferkoeffizienten anschreiben als

$$\sigma_{TK, \text{Rotteverlust}}^2 = \left( \frac{\partial TK_{\text{Rotteverlust}}}{\partial \text{Rotteoutput}} \right)^2 \cdot \sigma_{\text{Rotteverlust}}^2 + \left( \frac{\partial TK_{\text{Rotteverlust}}}{\partial \text{Rotteinput}} \right)^2 \cdot \sigma_{\text{Rotteinput}}^2 \quad (3-30)$$

Durch Einsetzen der partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial TK_{\text{Rotteverlust}}}{\partial \text{Rotteoutput}} = \frac{1}{\text{Rotteinput}} \quad (3-31)$$

und

$$\frac{\partial TK_{\text{Rotteverlust}}}{\partial \text{Rotteinput}} = -\frac{\text{Rotteoutput}}{(\text{Rotteinput})^2} \quad (3-32)$$

erhält man

$$\sigma_{TK, \text{Rotteverlust}}^2 = \frac{1}{(\text{Rotteinput})^2} \cdot \sigma_{\text{Rotteoutput}}^2 + \frac{(\text{Rotteoutput})^2}{(\text{Rotteinput})^4} \cdot \sigma_{\text{Rotteinput}}^2 \quad (3-33)$$

### 3.3.8.3 Berechnung der Zusammensetzung des Inputs (Restmüll) der mechanischen Prozesse

Aus der Stoffbilanz wird die Zusammensetzung des Inputs berechnet. Der Vergleich mit zuverlässigen Daten ist eine Möglichkeit die Plausibilität der Ergebnisse zu prüfen, ebenso kann abgelesen werden, ob die Zusammensetzung des Inputs während des Versuchs typisch für die Abfallart war.

Es wird angenommen, dass im mechanischen Prozess kein veränderbares Lager besteht, d.h. bei Güter- wie Stoffbilanzen für den Versuchszeitraum „Input = Output“ gilt. Die Stoffkonzentration des Inputs wird berechnet, indem die Summe der Outputstoffflüsse durch die Summe der Outputgüterflüsse dividiert wird:

$$C_{\text{Input}} = \frac{\sum \text{Stoffoutput}}{\sum \text{Güteroutput}} \quad (3-34)$$



Mit der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung wird für die Unsicherheit der Konzentration

$$\sigma_{C,Input}^2 = \left( \frac{\partial C_{Input}}{\partial \sum Stoffoutput} \right)^2 \cdot \sigma_{\sum Stoffoutput}^2 + \left( \frac{\partial C_{Input}}{\partial \sum Güteroutput} \right)^2 \cdot \sigma_{\sum Güteroutput}^2 \quad (3-35)$$

angeschrieben. Mit den partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial C_{Input}}{\partial \sum Stoffoutput} = \frac{1}{\sum Güteroutput} \quad (3-36)$$

und

$$\frac{\partial C_{Input}}{\partial \sum Güteroutput} = - \frac{\sum Stoffoutput}{(\sum Güteroutput)^2} \quad (3-37)$$

erhält man:

$$\sigma_{C,Input}^2 = \frac{1}{(\sum Güteroutput)^2} \cdot \sigma_{\sum Stoffoutput}^2 + \frac{(\sum Stoffoutput)^2}{(\sum Güteroutput)^4} \cdot \sigma_{\sum Güteroutput}^2 \quad (3-38)$$

Für die Berechnung der Inputzusammensetzung bezogen auf Trockensubstanz (TS) wird die Summe der Output-Stoffflüsse auf die Summe der TS-Outputs bezogen:

$$C_{Input} = \frac{\sum Stoffoutput}{\sum TS - Output} \quad (3-39)$$

Die Formel für die Varianz dieser Größe hat die selbe Struktur wie die zur Berechnung der Varianz der Inputzusammensetzung bezogen auf Frischmasse. Die Summe der Güteroutputs wird durch die Summe der TS-Outputs ersetzt, die Varianz der Summe der Güteroutputs durch die Varianz der Summe der TS-Outputs:

$$\sigma_{C,Input}^2 = \frac{1}{(\sum TS - Output)^2} \cdot \sigma_{\sum Stoffoutput}^2 + \frac{(\sum Stoffoutput)^2}{(\sum TS - Output)^4} \cdot \sigma_{\sum TS - Output}^2 \quad (3-40)$$





### 3.3.9 Auswertung durch Monte Carlo Simulation

Eine Alternative zur Gauß'scher Fehlerfortpflanzung ist die Verwendung von Monte Carlo-Simulationen zur Auswertung. Dabei wird die Verteilung der Funktion  $Y$  (z.B. die Verteilung der Konzentrationsmesswerte) mit einem entsprechenden Computerprogramm simuliert. Man generiert Zufallszahlen  $x_i$  gemäß den als bekannt angenommenen Verteilungen der Eingangsgrößen und berechnet  $y = f(x_1, \dots, x_i)$ . Dies wiederholt man einige tausend mal und erhält dadurch die Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $Y = f(X_1, \dots, X_k)$ . Aus dieser kann man Mittelwert und Fehler (Konfidenzintervalle) ermitteln.

Grundlage der Monte Carlo-Methode ist die Erzeugung von Zufallszahlen, die gemäß bestimmter Wahrscheinlichkeitsdichten (den gemessenen Wahrscheinlichkeitsdichten) verteilt sind. Dazu kann jede theoretische Verteilungsfunktion oder auch eine empirische Verteilungsfunktionen herangezogen werden. Die Zahlen werden von Zufallszahlengeneratoren mittels deterministischer Algorithmen berechnet. Sind diese Algorithmen gut, kann die erzeugte Sequenz von Zahlen praktisch nicht von wirklichen Zufallszahlen unterschieden werden; man spricht von „Pseudo-Zufallszahlen“. Welcher Verteilung die Zufallsgrößen jedoch wirklich folgen, ist durch die Versuche zu ermitteln. Da negative Werte bei der Bestimmung von Stoffkonzentrationen nicht auftreten können, sollten Verteilungen gewählt werden, die nur positive Werte beinhalten. Andernfalls muss man Fehler akzeptieren, indem man alle erzeugten negativen Zufallszahlen ausschließt.

Die Monte Carlo-Simulation funktioniert auch bei sehr hohen Varianzen, bei welchen die Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes an seine Grenzen stößt.

### 3.3.10 Optimierungsverfahren für die Versuchsplanung

#### *Prinzip*

Es wird zwischen Unsicherheit des Ergebnisses und Aufwand des Versuchs optimiert. Zwei Möglichkeiten bestehen:

- Festlegung der zulässigen Unsicherheit und Minimierung des dafür notwendigen Aufwands
- Festlegung des Aufwands und Minimierung der Unsicherheit des Ergebnisses

Die Varianzen der TK sind die „Zielgrößen“ bei der Erstellung des Beprobungsplanes. Als Parameter der Unsicherheit des Endergebnisses wird die Summe der Varianzen aller TK verwendet. Sie drückt aus, wie hoch die Unsicherheit der gesamten Bilanz ist, d.h. wie weit die Summen der unteren bzw. die Summen der oberen Schranken der Konfidenzintervalle der TK von 1 entfernt liegen. Diese Vorgangsweise bevorzugt die größeren Stoffflüsse in der Weise, dass ihre Variationskoeffizienten bei der Optimierung kleiner ausfallen als jene der kleinen Stoffflüsse. Alternativ kann als Parameter aber auch die Varianz eines ausgewählten Stoffflusses verwendet werden, wenn dieser der „wichtigste“ ist.

Die Verknüpfung des Parameters Unsicherheit der TK mit der Probenzahl besteht über die Varianzen der Stoffkonzentrationen. Die Stoffkonzentrationen gehen als Mittelwerte in die Berechnung der TK ein, die angegebenen Varianzen sind Varianzen dieser Mittelwerte und als solche vom Stichprobenumfang abhängig. Die Varianz eines Mittelwerts sinkt proportional mit dem Probenumfang und infolge auch die Varianzen aller TK.



Die Optimierung der Probenverteilung auf die verschiedenen Outputgüter wird in Analogie zu Optimierungsansätzen in der Ökonomie basierend auf marginalen Größen durchgeführt: Die Proben sind dann optimal verteilt, wenn die Verminderung der Unsicherheit („marginale Varianz“, „Grenzvarianz“) des Endergebnisses durch eine weitere Probe bei allen Outputgütern gleich groß ist. Ist das Optimum nicht erreicht (wenn etwa ein Gut übergebührlich, die anderen aber zu wenig beprobt werden), lässt sich durch Umverteilen von wenig „produktiven“ Proben zu solchen mit hoher „Grenzvarianz“ die Sicherheit der Bilanz verbessern.

### Ausführung

Die Optimierungsaufgabe kann auf mehrere Arten gelöst werden. Die Extremwertfindung (Bestimmung des Minimums) mit Lagrange-Multiplikatoren (siehe dazu z.B. Spiegel, 1978) liefert eine exakte Lösung, ist aber extrem rechenaufwendig, ebenso wie die Formulierung und Lösung eines Gleichungssystems, in dem für jeden wiederholbaren Schritt eine Ableitung des Unsicherheitskriteriums nach dem Aufwand enthalten ist. Beim Optimum würde in diesem Fall gelten, dass alle diese Ableitungen gleich groß sind. Einfacher ist die iterative Lösung mit Solver im Tabellenkalkulationsprogramm zur Extremwertbestimmung (z.B. Microsoft Excel) die zum selben Ergebnis führt.

Die Optimierung ist durch Erweiterung der in Abbildung 3-19 gezeigten Tabellenkalkulation realisierbar, wenn die Varianzen der Stoffkonzentrationen weiter aufgeschlüsselt werden.

Abbildung 3-3 und Abbildung 3-18 vermitteln, dass sich die Varianz der Stoffkonzentration aus der Summe der Varianzen der Teilschritte (Probenahme, Schritte der Aufbereitung, Analyse) zusammensetzt. Die Aufschlüsselung, wenn bei den aufeinander folgenden Schritten unterschiedliche Anzahlen von Wiederholungen verwendet werden, erfolgt wie bei Bauer (1995): Die Gesamtvarianz des Mittelwerts  $\sigma_{\bar{x}}^2$ , wie sie sich aus den Messwerten errechnet, kann aufgeschlüsselt werden in einzelne Glieder, die aus dem Quotienten Varianzkomponente des Teilschritts gebrochen durch die Zahl an Wiederholungen bestehen:

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_1 \cdot n_2} + \frac{\sigma_3^2}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3} + \dots \quad (3-41)$$

Die rechnerische Aufgliederung mittels Varianzkomponentenanalyse an einem Ergebnisdatensatz funktioniert nur bei vollständigen Versuchsplänen, wenn die Zahl an Wiederholungen von einem Schritt zum nächsten vervielfacht wird ( $n_i > 1$ ).

Die Anzahl Wiederholungen innerhalb jeder Stufe hat zwei Aspekte:

- Verminderung der Varianz des Mittelwerts
- Schätzung der Varianzkomponenten jedes Schrittes

Gleichung 3-41 zeigt, dass bei vorgegebenen  $\sigma_i^2$  die Erhöhung von  $n_1$  am schlagkräftigsten ist, um  $\sigma_{\bar{x}}^2$  zu reduzieren, weil  $n_1$  alle Glieder erfasst. Die  $\sigma_i^2$  sind von den Probenmassen beim Ziehen, Verjüngen und Einwägen abhängig. Um die Stoffkonzentration genauer zu bestimmen, ist daher vorrangig auf erster Ebene (Probenahme) die Zahl der Wiederholungen



zu erhöhen. Soll z.B. mit 12 Proben, die im Labor analysiert werden, die Zusammensetzung eines Gutes möglichst genau bestimmt werden, sind 12 Proben zu ziehen und aus diesen 12 Analysenproben zu erzeugen. Allerdings verursacht diese Variante auch den größten Aufwand bei der Probenahme und Aufbereitung. Berücksichtigt man den unterschiedlichen Aufwand jeder einzelnen Stufe und sucht das Optimum nach Aufwand und nicht nach Probenzahl, können Wiederholungen auf höherer Ebene sinnvoll sein. Ist beispielsweise der letzte Schritt, die chemische Analyse, der Hauptverursacher der Gesamtvarianz und wiederholte Messungen sind vergleichsweise billig gegenüber Wiederholungen in der Probenaufbereitung, sind Wiederholungen des letzten Schritts sinnvoll. Dieser Sachverhalt tritt ein, wenn es nicht gelingt, das Material der Analysenproben auf die für das Analysenverfahren notwendige Korngröße zu zerkleinern.

Eine Vervielfachung der Wiederholungen auf jeder Stufe ist notwendig, wenn die Untersuchung auch mit einer Varianzkomponentenanalyse ausgewertet werden soll, z.B. um nachfolgende Versuche genauer zu planen.

### Integration in die Tabellenkalkulation

In der Tabellenkalkulation zur Versuchsauswertung (Abbildung 3-19) werden im Eingabebereich der Spalte Varianz der Stoffkonzentrationen die Eingabefelder durch Formeln ersetzt, die die Varianz aus Varianzkomponenten und Probenzahlen (bzw. Wiederholungen) berechnen (nach Gleichung 3-42). Für Varianzkomponenten, Probenzahlen und –kosten werden Eingabefelder neu geschaffen.

$$Var_{Konzentration} = \frac{Var_{Probenahme}}{n_{Probenahme}} + \frac{Var_{Probenaufbereitung}}{n_{Probenahme} \cdot n_{Probenaufbereitung}} + \frac{Var_{Analyse}}{n_{Probenahme} \cdot n_{Probenaufbereitung} \cdot n_{Analyse}} \quad (3-42)$$

| Gut          | TK         |               | OUTPUT     |       |               |        |            |     | Probenahme     |                  | Probenaufbereitung |   |        | Analyse |   |        |     |
|--------------|------------|---------------|------------|-------|---------------|--------|------------|-----|----------------|------------------|--------------------|---|--------|---------|---|--------|-----|
|              | Mittelw.   | Var           | Stofffluss |       | Konzentration |        | Güterfluss |     | n              | Kosten           | Var                | n | Kosten | Var     | n | Kosten | Var |
|              |            |               | Mittelw.   | Var   | Mittelw.      | Var    | Mittelw.   | Var |                |                  |                    |   |        |         |   |        |     |
| Out 1        | 0,294      | 0,0009        | 750        | 3028  | 15            | 0,9861 | 50         | 2,5 | 18             | 200              | 15                 | 2 | 10     | 5       | 1 | 10     | 0,5 |
| Out 2        | 0,041      | 0,0002        | 105        | 1029  | 3             | 0,8214 | 35         | 2,5 | 14             | 100              | 6                  | 1 | 100    | 5       | 1 | 10     | 0,5 |
| Out 3        | 0,078      | 0,0001        | 200        | 725   | 20            | 3,2500 | 10         | 1   | 2              | 200              | 2                  | 1 | 100    | 3       | 2 | 10     | 3   |
| Out 4        | 0,587      | 0,0015        | 1500       | 49200 | 300           | 168,0  | 5          | 0,5 | 10             | 100              | 1600               | 1 | 100    | 20      | 5 | 2      | 300 |
| <b>SUMME</b> | <b>1,0</b> | <b>0,0027</b> |            |       |               |        |            |     |                | 10000            |                    |   |        |         |   |        |     |
|              |            |               |            |       |               |        |            |     | Kosten Vorgabe | Kosten insgesamt |                    |   |        |         |   |        |     |
|              |            |               |            |       |               |        |            |     | 10000          | 10000            |                    |   |        |         |   |        |     |

Abbildung 3-20: Tabelle für die Optimierung eines Beprobungsplanes anhand der Vorabschätzung der Güterflüsse samt Unsicherheiten, Mittelwerten der Stoffkonzentrationen in den Gütern, Varianzkomponenten und Kosten der Bestimmungsschritte. In die unterlegten Zellen sind die Inputdaten einzugeben, „Kosten Vorgabe“ definiert den vorgegebenen maximalen Aufwand, die Summe der Varianzen der TK ist die zu minimierende Zielgröße, die Zellen in den Spalten mit den Wiederholungen  $n$  sind als veränderbar definiert und werden berechnet.

Der Solver von MS Excel ist in der Lage, das Minimum für die Summe der Varianzen der TK zu finden. Alle Zellen, in denen die Zahlen der Wiederholungen ( $n$ ) enthalten sind, werden als „veränderbar“ definiert, die Zelle mit der Summe der Varianzen der TK als zu minimierende Zielzelle eingegeben. Als Nebenbedingung wird die Zelle mit den Gesamtkosten kleiner gleich den vorgegebenen Kosten gesetzt. Weitere Nebenbedingungen sind die Ganzzahligkeit



aller  $n$  und die Bedingung aller  $n$  größer gleich 1. Der Satz an Nebenbedingungen  $n$  größer gleich 1 ist programmtechnisch notwendig, weil sich der Solver leicht in den Bereich negativer  $n$  „verläuft“.

### *Exakte Lösung*

Die exakte Lösung des Minimierungsproblems ließe sich auch mit Hilfe von Lagrange-Multiplikatoren formulieren. Bei der Optimierung innerhalb aller drei Ebenen ist diese Rechnung mathematisch anspruchsvoll, vom Umfang kaum zu bewältigen und kann einem Anwender der angestrebten allgemeinen Methode zur Stoffbilanzierung von MBAs nicht zugemutet werden. Auf weitere Ausführungen dazu wird daher verzichtet.



### 3.4 Aufbereitung der Proben

Restmüll enthält beinahe alle Arten von Werkstoffen, die hergestellt werden und hergestellt wurden. So wie es in der Produktion nicht möglich ist, alle Werkstoffe mit ein und der selben Technik zu bearbeiten, ist eine gemeinsame Zerkleinerung in der Probenaufbereitung heute nicht möglich.

#### 3.4.1 Grundsätze und Rahmenbedingungen

##### 3.4.1.1 Vorgaben an Analysenproben und teilaufbereitete Proben

Die Ansprüche, die an die Analysenproben gestellt werden, richten sich nach dem Analyseverfahren, in erster Linie nach der einsetzbaren Menge pro Bestimmung. Davon und von der Körnung der Trägerpartikel hängt ab, ob die für eine Bestimmung eingesetzte Menge repräsentativ ist für die ganze Analysenprobe. Der selbe Sachverhalt besteht im anderen Maßstab bei jeder Probenteilung. In der Einführung unter Punkt 3.2 wurde auf dieses Problem eingegangen, in der allgemeinen Methodenbeschreibung unter 6.1.5.3 sind Beispiele für Kupfer und Cadmium gerechnet.

##### 3.4.1.2 Allgemeine Grundsätze

###### *Selektive Zerkleinerung*

Für die Zerkleinerung der relativ großen Mengen ist es notwendig, weiche und harte Bestandteile so gut wie möglich zu trennen. Schneidende Maschinen, die Kunststoffe, Papier, Textilien etc. zerkleinern können, werden durch harte, abrasive Materialien stark verschlissen oder ganz zerstört. Maschinen zur Zerkleinerung von harten, spröden Materialien (mineralisches) sind dagegen ungeeignet, weiche, elastische Teile zu zerkleinern. Als allgemein einsetzbare Trenntechnik hat sich die Abfolge Sieben/Quetschen/Sieben bewährt. Die mineralischen Teile werden dabei gebrochen und können abgesiebt werden bzw. es können im großen Maßstab (Voraufbereitung durch Walzen) unzerkleinerte weiche Teile aus dem zerdrückten, sandigen Material herausgereicht werden. Viele Metallstücke sind weder quetschend noch schneidend zerkleinerbar. Schneidende Maschinen können lediglich Bleche und Drähte zerkleinern. Die maximale Blech- oder Drahtstärke ist abhängig vom Schneidwerkzeug und der Antriebsleistung. Bei der Feinaufbereitung lassen sich mit schneidenden Mühlen nur dünne Folien auf Korngrößen von einigen Zehntel mm bringen. Quetschende Maschinen können Metallstücke in der Regel nur verformen. Nur die sprödesten Metallwerkstoffe (zum Teil Zinklegierungen, Gusseisen, Leichtmetallgusslegierungen, bestimmte Bronzen) können in Stücke brechen. Die Festigkeit ist aber zu hoch, um bei der Feinaufbereitung feine Pulver zu erzeugen, wie es mit mineralischen Körnern möglich ist. Das Aussortieren und separate Behandeln der Metalle ist daher unverzichtbar bei der Bestimmung von Gesamtgehalten.

###### *Rückstandsfreies Mahlen*

Bei Zerkleinerungsmaschinen mit Lochgittern oder Sieben im Austrag, kommt es häufig zum Zurückhalten von schwer zerkleinerbaren Materialien. Diese Materialien werden erst verzögert ausgetragen oder bleiben überhaupt im Mahlraum. Die Zusammensetzung der am Mühlenaustrag gesammelten Probenmenge entspricht nicht mehr der des aufgegebenen Materials. Rückstände in der Mühle zeigen, dass das eingelegt Lochgitter oder Sieb feiner ist, als es der Zerkleinerungsleistung bei gegebener Materialzusammensetzung entspricht. Rück-



stände in Mühlen sind entweder durch die Wahl größerer Siebe zu verhindern oder zu sammeln und gezielt weiterzubehandeln.

### 3.4.2 Voraufbereitung am Ort der Probenahme

#### 3.4.2.1 Heizwertreiche Fraktionen

Die Voraufbereitung ist notwendig, um die Proben auf Mengen zu teilen, die im Labor handhabbar sind. Generell sind im unzerkleinerten und unsortierten Zustand Probenmassen von einigen hundert kg bis einige Tonnen erforderlich (vgl. Punkt 3.2.5). Nach Separation von Metallen und Zerkleinerung auf wenige cm Korngröße sind Probenmassen von einigen kg bis

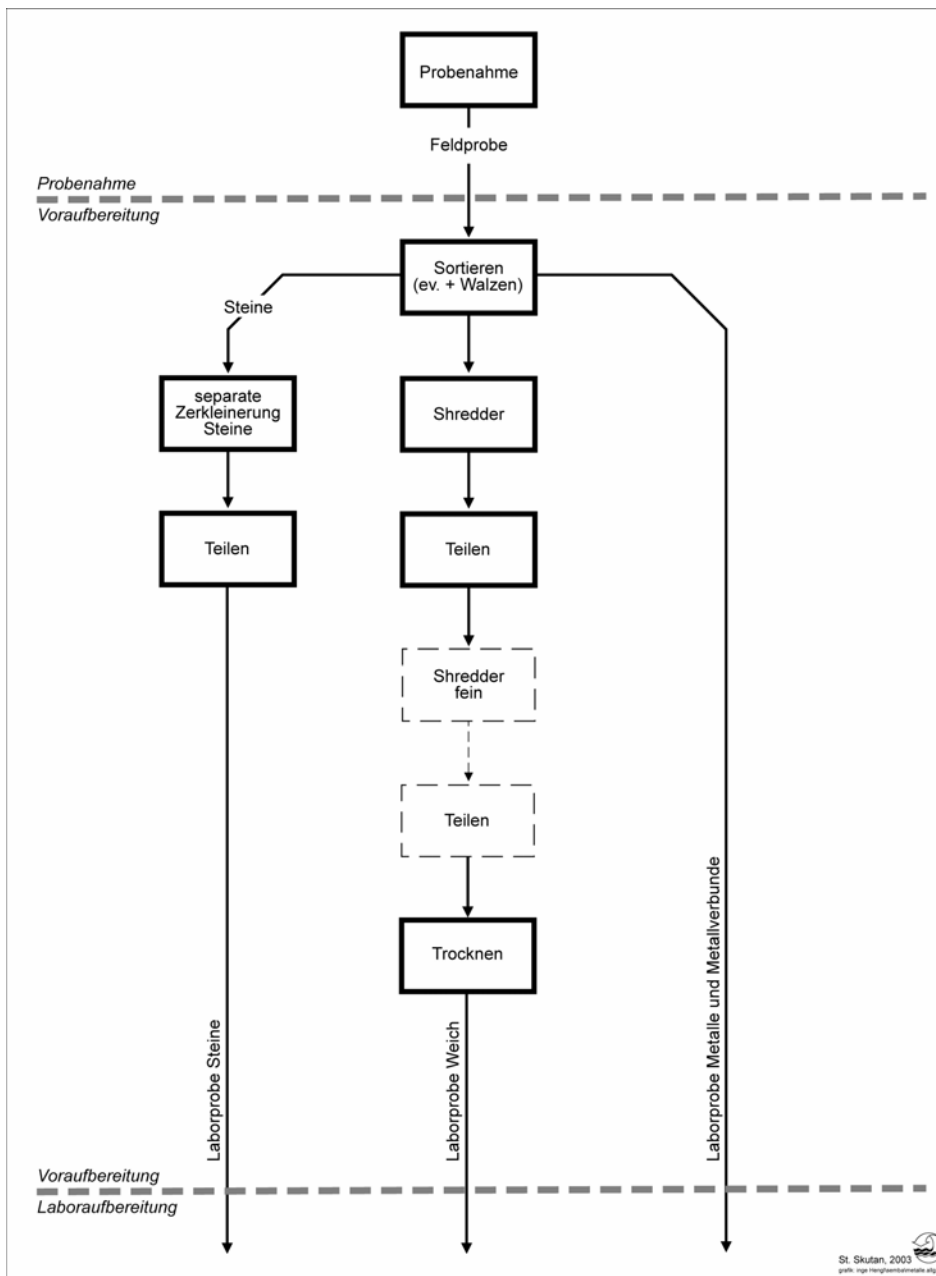


Abbildung 3-21: Allgemeines Schema für die Voraufbereitung von Proben einer heizwertreichen Fraktion am Ort der Probenahme



wenigen zig kg möglich. Die in heizwertreichen Fraktionen enthaltenen Steine, Baustoffbrocken, Glas etc. (der Massenanteil liegt bei einigen Zehntel % bis einige %) müssen in die Probenaufbereitung und Analyse weitergeleitet werden, wenn diese relevante Frachten der gesuchten Stoffe tragen. Relevante Frachtanteile können z.B. für TIC durch carbonathaltige Materialien (z.B. Kalk) oder für manche Schwermetalle durch Farbpigmente verursacht werden.

Die Arbeitsschritte der Voraufbereitung sind Wägen, Aussortieren von Metallen und großen mineralischen Stücken (Steine, Beton, Glas etc.), Shreddern, Teilen und Trocknen. Bei hohen mineralischen Anteilen wird eventuell ein Zerkleinerungsschritt mit einer Walze ergänzt.

Die Proben werden zuerst nach Metallen und groben mineralischen Stücken wie Steinen, Ziegeln, Betonbrocken, Glasscherben usw. durchsucht. Welche Metalle und mineralische Teile auszusortieren sind, richtet sich nach der Verträglichkeit gegenüber der Zerkleinerungsmaschine und den Anforderungen hinsichtlich Probenahmefehler (siehe dazu 6.1.5). Generell ist es unmöglich, alle Metallteile beim Sortieren (1) zu finden und (2) aus Verbunden zu lösen. Lose Metallteile können sich verheddert in Textilien, in Taschen und Sackerln oder flachgequetschten Hohlkörpern verstecken. Schnallen, Ösen, Reißverschlüsse, Edelstahl einlagen von Sicherheitsschuhen und ähnliches sind unmöglich abzutrennen.

Eine gute Möglichkeit zu sortieren ist, auf glattem Untergrund mit Mistgabel oder Rechen das Material in kleinen Portionen über eine Strecke von ein bis zwei Metern zu bewegen. Die größeren Stücke sollen dabei vereinzelt werden, Feinmaterial, das nicht geshreddert werden muss (soll), bleibt liegen, wird zusammengekehrt und dem geshredderten Material wieder zugemischt (oder separat weiterbehandelt). Die meisten Metalle und Steine sollten auf der Sortierstrecke sichtbar werden, um sie auszuklauben. Die Proben müssen frisch gewogen werden, um die Bezugsmasse für die ausgeklaubten Metalle zu bestimmen. Große Proben können vor der Aufbereitung auf einer Brückenwaage gewogen werden. Bei kleineren Proben ist es besser, die aussortierten Mengen und die entfrachtete Sortierfraktion (nach oder vor dem Shreddern) auf einer Dezimalwaage zu wägen.

Die aussortierten mineralischen Bestandteile können, wenn eine Walze verfügbar ist, vor Ort zerkleinert werden. Der Vorteil ist, dass die Teilprobe „Mineralisches“ vor Ort geteilt werden kann, ansonst ist es notwendig, die gesamte Menge zu einem Backenbrecher zu transportieren.

Bei hohen Anteilen von mineralischen Stücken in einer heizwertreichen Fraktion ist das Sortieren einfacher, wenn vorher gewalzt wird und diese Stücke damit gebrochen werden. Zur genaueren Beschreibung dieser Aufbereitungstechnik siehe Punkt 3.4.2.2.

Um eine Probe von 1.000 kg in einem Tag fertig bearbeiten zu können, sind ca. vier Arbeitskräfte und eine Zerkleinerungsmaschine mit mindestens 15 kW notwendig. Zum Zerkleinern eignen sich Vierwellenzerkleinerer mit Lochgitter besser als Zweiwellenzerkleinerer. Die Zweiwellenmaschinen produzieren häufig Streifen in der Breite der Schneidscheiben (um 2 cm). Für diese Arbeiten wurde ein UNTHA RS 30 Shredder mit 22 kW verwendet, eine Vierwellenmaschine mit wechselbarem Lochgitter. Damit ist eine Zerkleinerung auf <40 mm bei einem Durchsatz von etwa 400 kg pro Stunde möglich, bei <15 mm sind es immerhin noch ca. 100 kg pro Stunde. Die Zerkleinerung auf <40 mm ist nicht selektiv, es treten aber in geringer Häufigkeit Überlängen auf. Lange dünne Stücke (z.B. Schläuche mit einer Stärke bis



1 Zoll) werden gelegentlich in Längen bis zu 30 cm durch das Lochgitter geschoben. Solche Stücke müssen erneut aufgegeben werden (der Auswurf von Überlängen ist auffällig und wird kaum übersehen). Beim Zerkleinern auf <15 mm gibt es selten Überlängen. Wenn, handelt es sich um Stücke von biegsamen Schläuchen oder Stäben mit Durchmessern bis ca. 8 mm und Längen unter 8 cm. Die Zerkleinerung ist in geringem Maß selektiv. Nach der letzten Materialaufgabe sammeln sich fasrige Bestandteile in der Maschine, die aber in einer Nachlaufzeit von längstens 10 Minuten nach der letzten Materialaufgabe vollständig ausgetragen werden. Um Fehler zu vermeiden, muss der vollständige Austrag abgewartet und die Probe vor dem Teilen in sich gut gemischt werden.

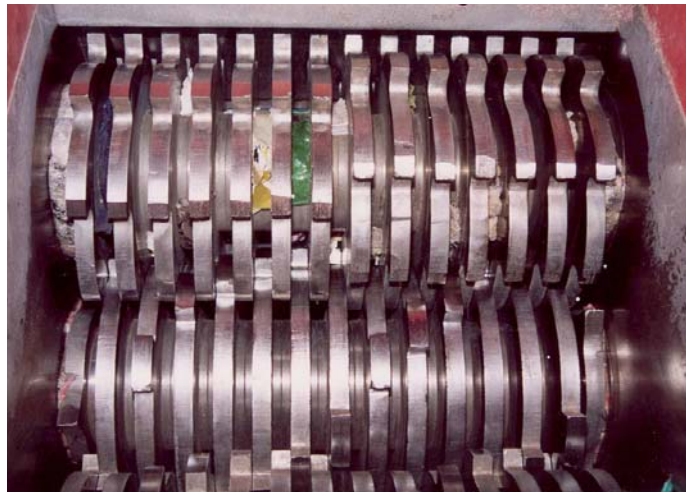


Abbildung 3-22 a und b: UNTHA RS 30 Vierwellenzerkleinerer für den Einsatz mit verschiedenen Lochgittern, 22kW Nennleistung; links: Gesamtansicht, rechts: Ansicht des Schneidwerks

Nach jeder Zerkleinerung kann die Probenmenge reduziert werden. Bei idealer Teilung besteht für jedes Teilchen in der frisch zerkleinerten Probe die gleiche Wahrscheinlichkeit, in die Teilmenge aufgenommen zu werden. Dazu ist es notwendig, die Teilchen einzeln zufällig auszuwählen (unmöglich bei derartigen Probenmassen) oder die Probe vollkommen zu mischen und daraus an beliebiger Stelle eine oder mehrere Teilmengen zu ziehen. Die vollkommene Durchmischung ist nur theoretisch realisierbar, praktisch treten bei jeder Bewegung des Materials gleichzeitig Entmischungseffekte auf, die der zufälligen Teilchenverteilung entgegen wirken. Kleine, kompakte Teilchen großer Dichte wandern im Gemenge nach unten, große, „sperrige“ Teilchen geringer Dichte nach oben. Im folgenden sind vier Möglichkeiten beschrieben, größere Probenmengen (zig kg bis Tonnen) zu teilen.





### Entnahme aus einem aufgeschichteten Feld

Das Prinzip ist, durch wiederholtes Aufschichten in dünnen Schichten die Probe durchzumischen und anschließend an verschiedenen Orten Teilmengen zu entnehmen. Geschichtet wird durch dünnes Streuen. Ist die erste Schicht fertig angelegt, darf die Grundfläche nicht mehr vergrößert werden. Das Feld ist so zu dimensionieren, dass 40 cm Höhe nicht wesentlich überschritten werden, weil sonst die Entnahme der Teilmengen Schwierigkeiten bereitet. In dieser Arbeit wurden die Felder jeweils einmal umgeschaufelt, d.h. das fertige Feld abgetragen und

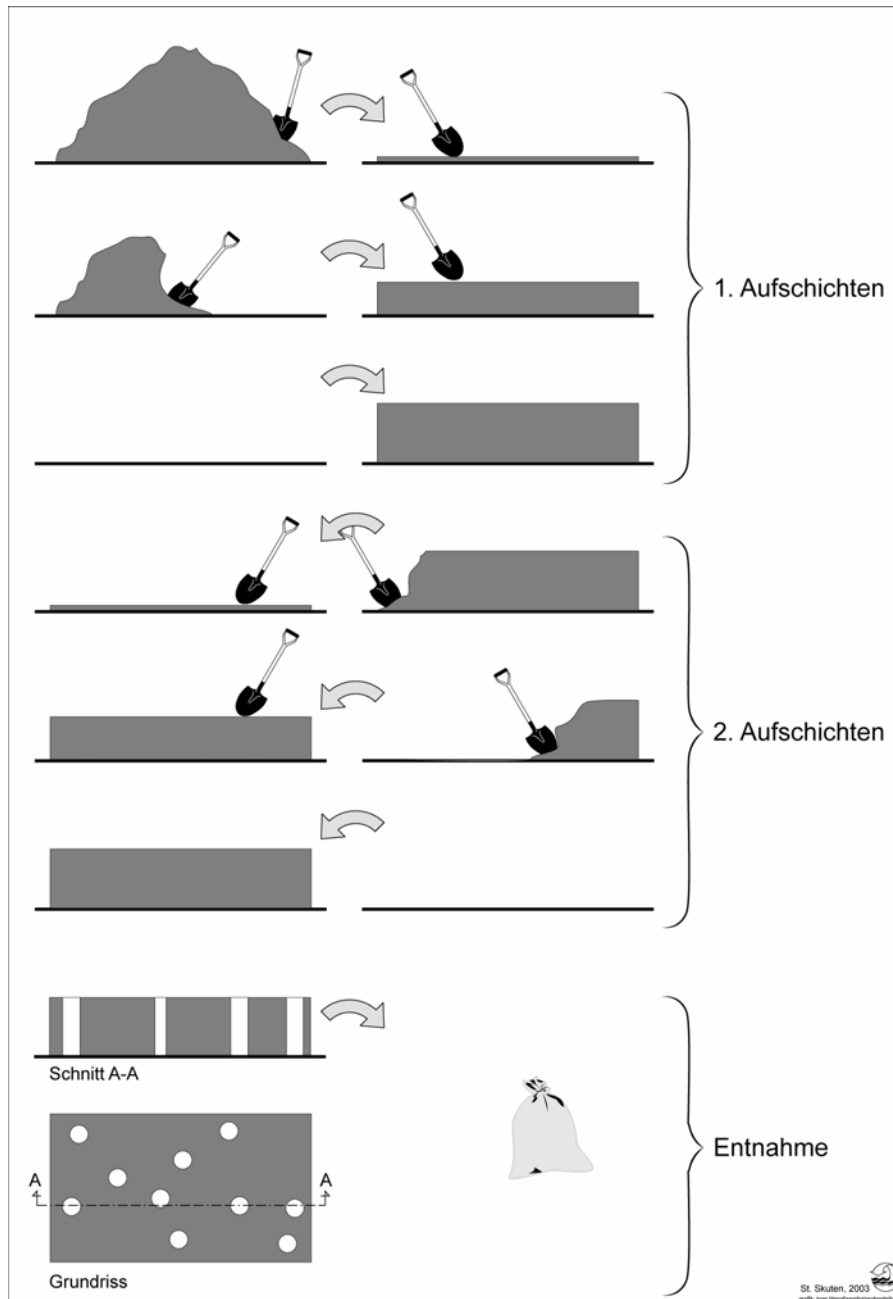


Abbildung 3-23: Probenentnahme durch Aufschichten zu einem Feld und Entnahme von Teilmengen an unterschiedlichen Stellen: Aufschichten eines Feldes in dünnen breit gestreuten Schichten; 2. Aufschichten; Entnahme der Teilmenge an mehreren Stellen, die senkrecht bis zum Grund des Feldes reichen



daneben noch einmal in gleicher Weise aufgebaut. Sind beim ersten Feld über den Querschnitt gelegentlich farblich unterscheidbare Schichten erkennbar, gibt es nach dem zweiten Aufschichten keine sichtbaren Inhomogenitäten mehr. Die Teilmenge wird entnommen, indem an mehreren Stellen Material über den ganzen Querschnitt herausgehoben wird. Die Vertiefungen, die durch die Entnahme entstehen, müssen senkrechte Wände aufweisen und bis zum Boden reichen. Keinesfalls darf am Grund feines Material, das schlecht zu erfassen ist, zurückbleiben. Wenn nötig können Rohrstücke verwendet werden, die wie Stechzylinder unter Drehen ins Material gedrückt werden. Der schematisierte Ablauf ist in Abbildung 3-23 dargestellt.

Wenn ausreichend Arbeitskräfte zur Verfügung stehen, ist in dieser Variante die Teilung von Proben mit vielen hundert kg problemlos möglich.



*Abbildung 3-24: Zweiter Durchgang des Aufschichtens einer Probe zur Teilung (Foto: Christian Rolland, mit freundlicher Genehmigung)*

#### *Entnahme aus einer aufgeschichteten Miete*

Das Prinzip ist das selbe, wie beim vorher beschriebenen Verfahren. Proben bis zu wenigen 100 kg können auch zu niedrigen Mieten aufgeschichtet werden, aus denen einzelne Abschnitte senkrecht herausgestochen werden. Auch die Miete sollte mindestens einmal umgeschaufelt werden.



### *Mischkreuzverfahren*

Das Mischkreuzverfahren zählt zu den Standardverfahren, es wird daher hier nicht im einzelnen beschrieben. Aus folgenden Gründen wurde dieses Verfahren zur Probenentteilung vor Ort nicht verwendet:

Massen von einigen hundert kg sind von Hand damit nicht bewältigbar. Es ist nicht möglich, jede Schaufel so zu schütten, dass sich das Material ringsum gleichmäßig verteilt. (Im übrigen ist diese Voraussetzung auch bei rieselfähigen Gütern nicht gegeben, selbst dann nicht, wenn diese aus einem starren Rohr rieseln, etwa aus einem Trichter. Vielmehr rutscht das Material abwechselnd auf verschiedenen Seiten des Kegels ab, der höchste Punkt des Kegels schwankt um die Mitte, d.h. dass eine kurzfristige Häufung von Trägerpartikeln, sehr wahrscheinlich auf einer Seite des Kegels zu liegen kommt und nicht gleichmäßig verteilt wird. Wird z.B. das Material direkt vom Shredderaustrag mit einer Schaufel aufgenommen, sind die Metallfrachten von einzelnen Portionen dann stark erhöht, wenn gerade ein großes metallbelastetes Stück ins Schneidwerk gelangte. Beim Aufschütten zum Kegel werden sehr wahrscheinlich die belasteten Teilchen auf einer Seite zu liegen kommen.) Wird ein Radlader eingesetzt, um einen Kegel zu schütten, ist dieses Problem noch gravierender.

Das Vierteln von Kegeln mit einigen hundert kg Masse ist ohne Maschinen kaum bewältigbar. Wenn große Mengen im Mischkreuzverfahren geteilt werden sollen, empfiehlt es sich, dies portionsweise zu tun.

### *Kontinuierliche Entnahme mit automatischem Probenteiler*

Das Verwenden von Maschinen zur Probenentteilung von Restmüllfraktionen ist prinzipiell problematisch, weil die Proben feucht sind und zum Verstopfen neigen. Nur eine **kontinuierliche** Entnahme aus einem Gutstrom (z.B. Auswurf des Shredders) ist zulässig, d.h. der Probenteiler muss zu jedem Zeitpunkt einen gleich großen Anteil des Gesamtstroms abzweigen. Wird diskontinuierlich entnommen, ist der Zerkleinerungsschritt sinnlos (vergl. Abbildung 3-13 c und d).

### *Trocknung*

Wenn keine ausreichenden Kapazitäten im Labor zur Verfügung stehen, können die Proben vor Ort in Containern getrocknet werden. In dieser Arbeit wurden 20'-Lagercontainer gemietet, in die hölzerne Stellagen gebaut wurden.

Die Proben können darin in bis zu sieben Lagen zum Lufttrocknen aufgebracht werden. Die Schichtdicken sind in Abhängigkeit der Körnung zu wählen, geschredderte heizwertreiche Fraktionen sind bis 8 cm problemlos zu trocknen, feuchte klebrige Schwerfraktionen nur halb so hoch. Als Unterlagen dienen Baufolien aus PE. Die Trocknung wird erheblich beschleunigt, wenn das Material ein bis zweimal pro Tag durchgemischt wird. In der warmen Jahreszeit ist eine Beheizung oder Entfeuchtung des Containers nicht notwendig, es ist lediglich auf ausreichenden Luftwechsel mit Bedacht auf mögliche Staubeinträge zu achten. Bei Temperaturen unter 15°C oder bei Regenwetter ist es günstig, im Container ein Entfeuchtungsgerät aufzustellen, unter 8°C zusätzlich eine Beheizung (Heizlüfter). Generell



*Abbildung 3-25: 20' Lagercontainer zur Probentrocknung. Links oben: Aufstellung der Container beim Versuch in Oberpullendorf, im Vordergrund ablaufendes Kondenswasser der Entfeuchtungsgeräte; unten links und rechts: Ansicht der eingebauten Stellagen*

sollten die Container in der Sonne aufgestellt werden. In der warmen Jahreszeit ist die Trocknung innerhalb weniger Tage abgeschlossen. Bei Temperaturen zwischen fünf und 10°C sind mit einem Entfeuchtungsgerät pro Container ca. zwei Wochen zu veranschlagen.

#### 3.4.2.2 Rotteinput, Rotteoutput, Schwerfraktionen

Ziel ist die Reduktion der Mengen durch Sortieren, Zerkleinern und Teilen, eventuell auch die Stabilisierung (Trocknung).

Die Zerkleinerung mit schneidenden Maschinen, wie sie für heizwertreiche Fraktionen geeignet sind, ist prinzipiell möglich, der Verschleiß am Schneidwerk aber nicht vertretbar. Backenbrecher andererseits als quetschende Zerkleinerungsmaschinen verstopfen, wenn elastische Gegenstände im Gemenge sind. Als einfaches aber effektives Verfahren hat sich das Walzen herausgestellt, das eine selektive Zerkleinerung der mineralischen Bestandteile bewirkt und somit hilft, weiche, elastische und harte, spröde Gemengeteile zu trennen.

Zum Walzen werden die Proben in dünner Schicht auf ebenem Untergrund aufgebracht. Der Untergrund muss zuvor gründlich gereinigt werden (Abkehren oder Saugen). Das aufgebretete Material wird mit einer Rüttelwalze (BOMAG-Diesel-Rüttelwalze) durch öfters überlappendes Überfahren plattgewalzt. Glas, Steine, Klumpen etc. werden dabei zerdrückt,





größere Aggregate zerstört. Das Material wird mehrere Male gewalzt und zwischendurch mit einem Rechen aufgelockert.



*Abbildung 3-26: Aufgebreiteter Rotteoutput vor dem Walzen*

Beim Bearbeiten von Fraktionen größerer Körnung können beim Auflockern die nicht zerkleinerbaren Gemengeteile (Kunststoffteile, Textilstückchen etc.) herausgereicht werden. Das Ausrechnen verbessert das Zerkleinerungsergebnis bei den mineralischen Bestandteilen. Schwerfraktionen ohne Feinmüllanteil (z.B. Schwerfraktionen ab ca. 25 mm aus ballistischen Separatoren) können in dieser Weise fast vollständig in eine mineralische und eine organische Fraktion getrennt werden.

Das fertig gewalzte Material wird zusammen geschoben (Alu-Schaufel, Schneeschaufel) und fein zusammengekehrt. Bei trockenen Proben kann mit einem Industriestaubsauger gearbeitet werden.

Metalle werden am zweckmäßigsten nach dem Walzen aussortiert, weil beim Walzen noch Stücke aus Verbunden gelöst werden. Batterien hingegen müssen vor der ersten Walzenüberfahrt entfernt werden, weil sie leicht aufplatzen und auslaufen. Wenn das Material vor oder nach dem Walzen gesiebt wird, sollten auch dabei Metallstücke aussortiert werden.

Bei feuchten feinkörnigen Materialien (Fraktionen mit Feinanteil, „Rotteinput“, „Rotteoutput“) ist eine Siebung vor dem Walzen bei 0,5 bis 1 cm sinnvoll, weil (1) der Feinanteil beim Walzen zusammenpackt und am Untergrund stark anhaftet und (2) weniger Wasser verloren geht (nur relevant, wenn der Wassergehalt aus den voraufbereiteten Proben bestimmt wird). Es ist auch möglich, das Material gleich nach dem Walzen zu sieben und das Überkorn noch einmal zu walzen.

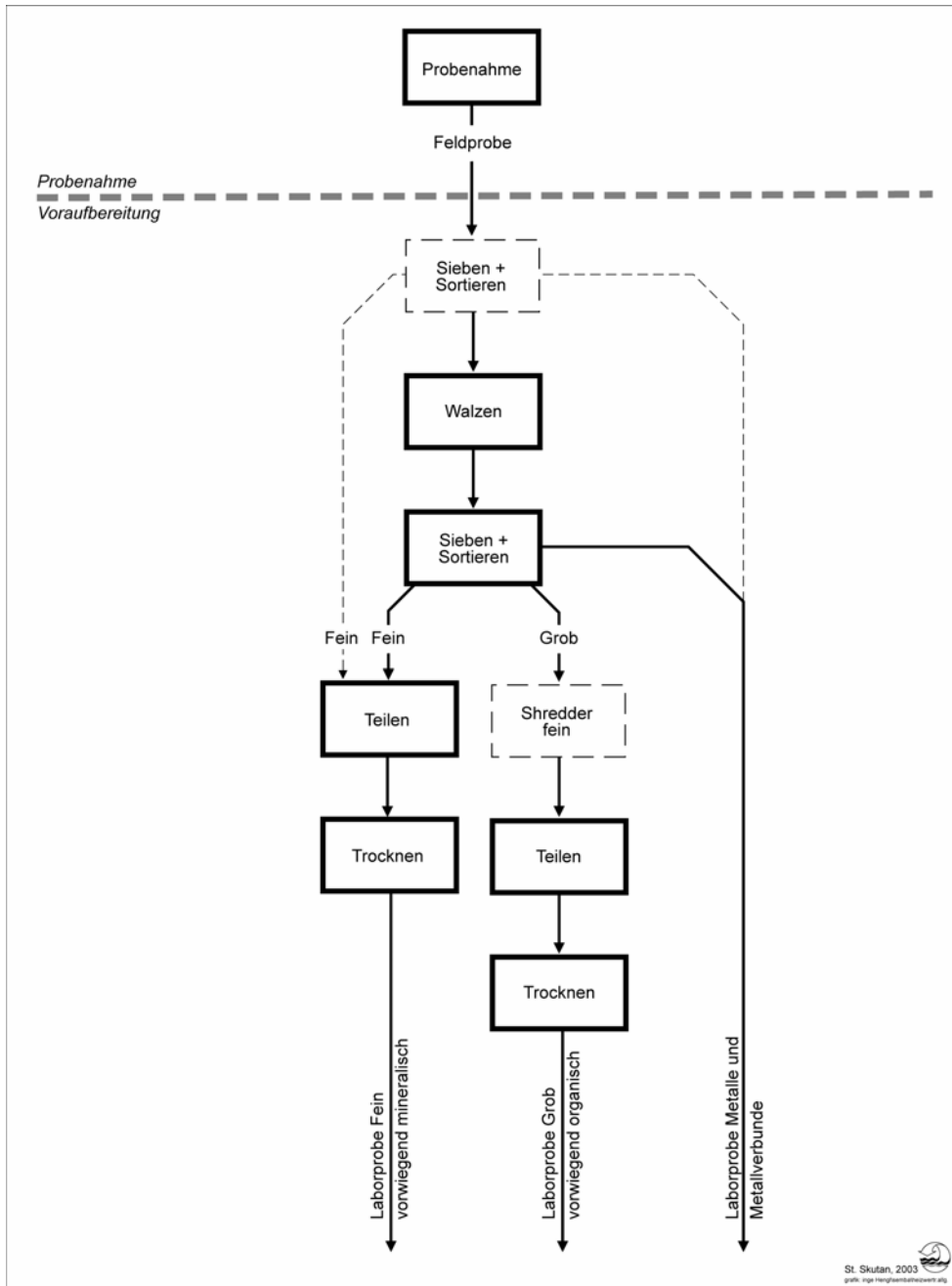


Abbildung 3-27: Allgemeines Schema für die Voraufbereitung einer mineralstoffreichen Fraktion am Ort der Probenahme. Bei geringem Grobanteil kann der Teilungsschritt bei diesem Material entfallen.

Generell ist es einfacher, trockenes Material zu walzen. Diese Variante ist allerdings nur bei sehr feinen Fraktionen realisierbar (etwa <math>< 3\text{ cm}</math>), weil sonst der Raumbedarf zum Trocknen zu groß ist.

Zur Trocknung von Proben vor Ort im Container siehe Punkt 3.4.2.1.



*Abbildung 3-28: Aufgebreiteter trockener Rotteoutput vor dem ersten Überfahren...*



*Abbildung 3-29: ...nach dem ersten Überfahren...*



*Abbildung 3-30: ...nach dem zweiten Überfahren.*



### 3.4.2.3 Magnetseparationsschrott

Das Ziel der Voraufbereitung ist die Reduktion der Menge durch Abtrennen der für die Analysen relevanten Gemeineteile. Die Träger der zu untersuchenden Stoffe (außer Eisen) werden separiert („Konzentrat“), der Rest nur stichprobenartig untersucht und zum größten Teil vor Ort gewogen und verworfen. Ein praktikabler Sortierkatalog ist in Tabelle 3-3 zusammengestellt.

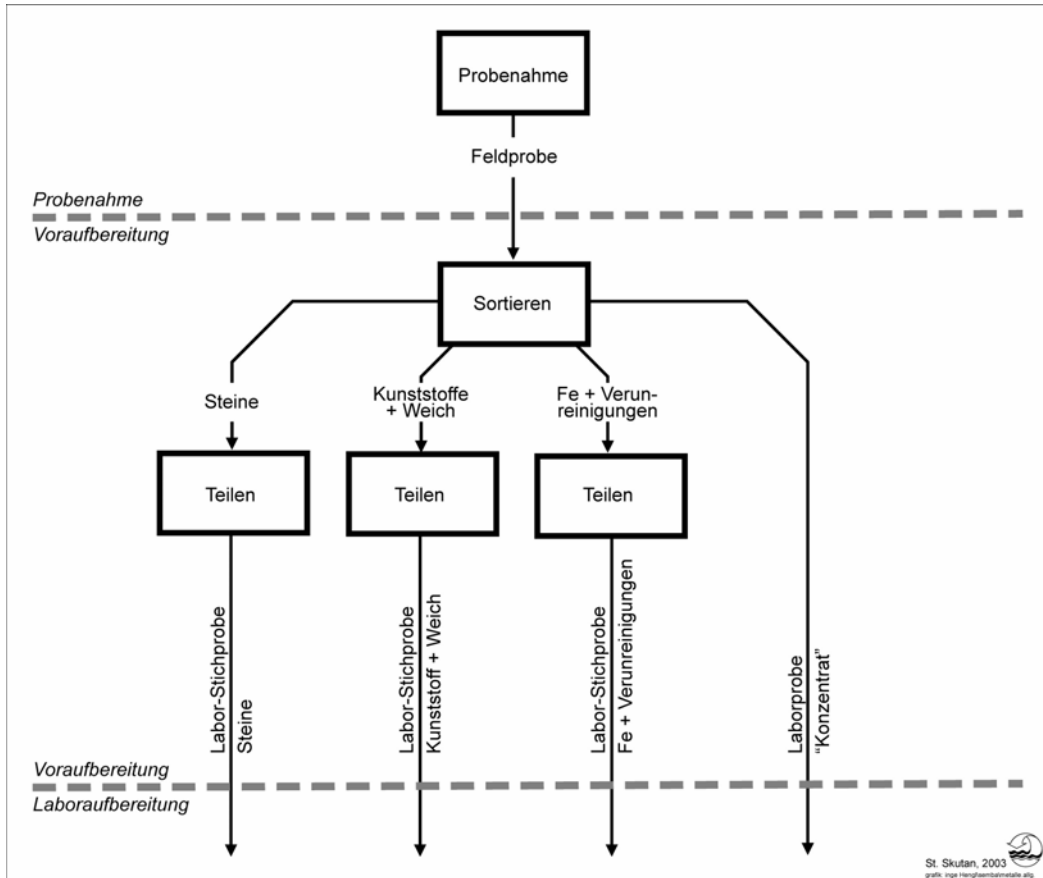


Abbildung 3-31: Allgemeines Schema für die Voraufbereitung von Metallschrottpollen am Ort der Probenahme

In Abbildung 3-32 ist das „Konzentrat“ einer Probe des Fe I-Schrotts aus Oberpullendorf zu sehen.

Von den Fraktionen „Eisen mit Verunreinigungen“, „Weich“, „Feinfraktion“ und „Mineralisch“ werden Stichproben entnommen (eventuell als Mischproben). Bei geringer Verschmutzung des Schrotts ist es nicht notwendig, die eben genannten Fraktionen zu trennen.





Tabelle 3-3: Sortierkatalog für die Sortierung von Magnetseparationschrott

| Bezeichnung                | Beschreibung  | Beispiele   |
|----------------------------|---|---|
| Eisen mit Verunreinigungen | Teile aus nicht legierten Stählen samt ihren nicht leicht entfernbaren Verunreinigungen und Verbunden; frei von oder nur minimale Bedeckung mit Beschichtungen, die eines der zu untersuchenden Elemente in hoher Konzentration enthalten | Fe-Verpackungen (Dosen, etc.) Nägel und Schrauben sofern völlig mit Rost überzogen, alle anderen völlig verrosteten Teile   |
| „Konzentrat“               | alle Teile, die einer weiteren Aufarbeitung bedürfen: Legierte Stähle; mit Metallen überzogene Stähle (Zink, Nickel, Chrom), Materialverbunde, die eines der untersuchten Elemente in hoher Konzentration enthalten können                | Bestecke, Küchengeräte und Werkzeuge aus hoch legierten Stählen z. B. Nirosta; Batterien; Verzinkte, vernickelte oder verchromte Stahlteile z.B. Schrauben, Nägel, Scharniere, Blechstücke etc. |
| Weich                      | alle weichen Materialien, die ohne großen Aufwand separiert werden können   | Kunststofffolien, Papier und Karton oder Textilien (oft in gequetschten Dosen eingeklemmt); Holz  |
| Feinfraktion               | Sortierrest mit einer maximalen Korngröße von ca. 10 mm, frei von glänzenden Metallteilchen und Teilchen, die sich mit einem Magneten separieren lassen   | „Schmutz“, größtenteils undefinierbares Zerreibsel  |
| Mineralisch                | Mineralische Bestandteile in einer Körnung $>0,5$ mm  | Scherben aus Glas, Porzellan; Steine, Ziegelstücke, etc.  |



Abbildung 3-32: Aussortiertes „Konzentrat“ aus einer Fe-Schrotprobe. In dieser Fraktion sind alle Gegenstände gesammelt, die andere Schwermetalle außer Fe in hoch konzentrierter Form enthalten.



### 3.4.2.4 Schrott vom Wirbelstromabscheider

Das Prinzip und die Vorgangsweise sind die selben wie bei der Voraufbereitung des Magnetseparationsschrotts. Statt des Eisens wird hier das Aluminium als Hauptbestandteil samt Verunreinigungen gewogen und verworfen. In Abbildung 3-33 ist das „Konzentrat“ einer Probe des NFe-Schrotts aus Oberpullendorf zu sehen.



Abbildung 3-33: Aussortierte „Konzentrat“ aus einer NFe-Schrotprobe von der Wirbelstromabscheidung der MBA Oberpullendorf. In dieser Fraktion sind alle Gegenstände gesammelt, die Schwermetalle in hoch konzentrierter Form enthalten.

Tabelle 3-4: Sortierkatalog für die Sortierung von NFe-Schrott aus der Wirbelstromabscheidung

| Bezeichnung                    | Beschreibung  | Beispiele   |
|--------------------------------|---|---|
| Aluminium mit Verunreinigungen | Teile aus Aluminium samt ihren nicht leicht entfernbaren Verunreinigungen und Verbunden   | Al-Verpackungen (Dosen, Tuben, etc.) Profile, Bleche, Rohre   |
| „Konzentrat“                   | alle metallischen Teile, die einer weiteren Aufarbeitung bedürfen:<br>alle Metallteile oder Metallverbunde mit anderen Metallen als Aluminium | Kupfer- und Messingrohre, -bleche und -drähte; Sanitärarmaturen; Zinkdruckgussteile: Spielzeugautos und -waffen, Maschinenteile, Edelstahlteile (solche, die nicht von Magneten angezogen werden) |
| Weich                          | alle weichen Materialien, die ohne großen Aufwand separiert werden können   | Kunststofffolien, Textilien, Holz   |
| Feinfraktion                   | Sortierrest mit einer maximalen Korngröße von ca. 5 mm, frei von Metallteilchen   | „Schmutz“, größtenteils undefinierbares Zerreibsel  |
| Mineralisch                    | Mineralische Bestandteile in einer Körnung >0,5 mm  | Scherben aus Glas, Porzellan; Steine, Ziegelstücke, etc.  |



### 3.4.3 Laboraufbereitung

Das Ziel der Laboraufbereitung ist, die dafür bestimmte Probenmenge rückstandsfrei in analysierbares Material zu verwandeln bzw. stofflich identifizierbare Anteile zu separieren und gravimetrisch zu bestimmen. Es darf keinen Teilstrom geben, der nicht stofflich charakterisiert wird, außer es handelt sich um Mengen, die mit Sicherheit nicht von Relevanz sind (abzuklären durch Sichtkontrollen zur Charakterisierung der enthaltenen Stoffgruppen und Sensitivitätsanalysen für den ungünstigsten Fall).

#### 3.4.3.1 Allgemeines

Es stehen sieben Techniken zur Verfügung mit denen in geeigneter Kombination jede Probe aufbereitet werden kann.

##### *Sortieren und Sieben, Separation Weich/Hart*

Aus den Laborproben müssen die meisten Metalle aussortiert werden, weil sie (1) die Mühlen beschädigen können und (2) nicht in die Analysenproben gelangen sollen, da die notwendige Zerkleinerung dafür nicht realisiert werden kann. Ebenso sollen Steine und Glas zur Schonung des Schneidwerks aus den für die Schneidmühle bestimmten Probenmengen abgetrennt werden. Das Sortieren ist einfacher, wenn das Material klassiert ist. Zu diesem Zweck werden die meisten Proben im geschlossenen Siebturm am Rüttler in die Fraktionen 0,5 mm, 0,5-2 mm, 2-6,3 mm und >6,3 mm getrennt. Beim Sieben kommt es in allen Siebfraktionen zu einer Entmischung nach Dichte, Form und Größe. Leichte voluminöse Teilchen kommen in der obersten Schicht zu liegen, die schweren, kompakten Teilchen finden sich direkt auf dem Siebgitter. Dieser Umstand erleichtert und beschleunigt das Ausklauben.

Der in allen MBA-Outputs vorhandene Sand und Staub sammelt sich, soweit er nicht an größeren Teilchen anhaftet, in den feinen Fraktionen. Die Teilfraktionen 0,5-2 mm und 2-6,3 mm einer Probe werden zur Schonung der Schneidmühle in hart und weich getrennt (in seltenen Fällen kann dieser Schritt entfallen, dazu muss der mineralische Anteil sehr niedrig sein). Durch Rütteln im Sieb bzw. einer Kunststoffdose wird das Material so gut wie möglich entmischt, damit die weichen, fasrigen Bestandteile oben abgeschöpft werden können. Der Rest wird in der Scheibenschwingmühle vermahlen und anschließend gesiebt. Auf diese Weise gelingt eine fast vollständige Trennung harter und weicher Bestandteile.

##### *Schneidende Zerkleinerung - Schneidmühle*

Alle weichen Teilfraktionen einer Probe werden mit der Schneidmühle gemahlen. Die Retsch SM 2000 kann in der langsamlaufenden Ausführung mit Schneidwalze (bestückt mit Hartmetallschneidplättchen) rückstandsfrei auf ca. <4 mm zerkleinern. Beim Einsatz feinerer Siebeinsätze werden festere Teilchen (Metalle und meisten Kunststoffe) im Mahlraum zurückgehalten. Verwendet wurden die Siebeinsätze 4 mm für die 1. Laborzerkleinerung und 0,5 mm für den zweiten Zerkleinerungsschritt (Vorbereitung zum Pressen und Sägen). Der zweite Zerkleinerungsschritt ist sehr schlecht und hoch selektiv. Kunststoffe werden kaum unter 2 mm zerkleinert, teilweise bleiben über 50 % der aufgegebenen Menge in der Mühle. Diese Menge muss verlustfrei dem Mahlraum wieder entnommen werden, um sie weiter zu behandeln.

Abhängig von der Schärfe der Schneidplättchen und Gegenschneiden sind die Durchsatzleistungen der Retsch SM 2000 zwischen 4-5 kg und 1 kg pro Stunde. In diesen Zeiten sind



die notwendigen Abkühlphasen nicht eingerechnet. Die Laufzeit bis zur Überhitzung beträgt 20 bis 90 Minuten je nach Zustand der Schneiden und der Materialzusammensetzung. Begrenzend ist das „Klebrig werden“ der Kunststoffe. Die starke Erwärmung ist auf das Mahlwerk beschränkt, der Antrieb wird nicht überlastet. Das Auskühlen dauert ohne Demontage des Rotors mindestens 1,5 Stunden.

### *Quetschende Zerkleinerung - Scheibenschwingmühle*

Beinahe alle mineralischen Bestandteile können in der Scheibenschwingmühle zu Pulver zermahlen werden. Ab und zu sind in den Proben Körnchen enthalten, die sich der Zerkleinerung widersetzen und die Mühlsteine aus Achat massiv zerkratzen. Metall- und Kunststoffteilchen bleiben bei der üblichen Mahldauer von 3 Minuten unverändert. Die Aufgabekörnung darf 5 mm nicht wesentlich überschreiten, andernfalls setzt die Zerkleinerungswirkung aus.

### *Kunststoffzerkleinerung durch Pressen und Sägen*

Zum Verpressen in der Hitze zu einem kompakten Block wurden aus Baustahl zwei Pressen gebaut. Die Pressen bestehen aus quadratischen Profilrohren (40x40 mm), in die Kolben eingepasst wurden. Die Kolben werden mit Spindeln (Gewindestangen M20) bewegt. Verschlossen werden die Rohre mit eingepassten Druckplatten aus 5 mm starkem Flachstahl. Der Rahmen, der die Zugspannung aufnimmt, ist aus Winkelprofilen (40x40 mm) gebaut. Die Kunststoffrestfraktion, die mit der Schneidmühle nicht <0,5 mm zerkleinerbar ist, wird löffelweise eingefüllt und mit einem Rundeisenstab gestampft. 250-300 g können bei



1 cm  
|-----|

*Abbildung 3-34 a und b: Probenpresse; Innere Struktur eines gepressten Blocks einer Kunststofffraktion (Schnittfläche)*

kompakter Füllung in die Presse geladen werden. Die Druckplatte wird aufgesetzt und mit zwei Stifte verriegelt. Das Material wird durch Eindrehen der Spindel so weit gepresst, bis ein deutlicher Widerstand fühlbar wird. Die Presse wird für eine dreiviertel Stunde bei 210° C im



Trockenschrank erhitzt. Im heißen Zustand wird so weit verdichtet, bis ein starker Widerstand an der Gewindestange zu spüren ist bzw. bis plastisches Material zwischen Pressrohr und Druckplatte austritt. Der hohe Druck wird über eine Minute durch langsames Nachziehen der Spindel gehalten. Der fertige Block wird nach dem vollständigen Abkühlen aus der Presse herausgeschlagen. Der gepresste Klotz löst sich beim Abkühlen dank der Schrumpfung der Kunststoffe meist selbst vom Pressrohr. Mit einer Eisensäge (Bi-Metall Sägeblätter für Hartstähle, Zahnung 24) wird der Klotz in ca. 2 mm dicke Lamellen geschnitten, die Sägespäne werden gesammelt. Die Abbildung 3-34 a zeigt eine Probenpresse b die innere Struktur eines gepressten Blocks.

#### *Teilung nach Zufallsprinzip*

Die Teilung im Mischkreuzverfahren ist nur mit kleinen Proben (bis ca. 2,5 kg) praktikabel und auch nur dann, wenn diese nicht übermäßig stauben. Größere Mengen werden im kleinen Maßstab nach dem Prinzip geteilt, wie es bei der Voraufbereitung (Punkt 3.4.2.1) beschrieben wurde. Dazu wird das Material schaufelweise in dünnen Schichten in einer flachen Wanne aufgebracht. Zusammenhaftende faserige Klumpen werden dabei möglichst aufgelöst. Aus dem ca. 15 cm hoch aufgeschichteten Material werden senkrecht Zylinder ausgestochen. Für jede entnommene Probe werden 4 bis 5 Einstiche gleichmäßig über die Fläche verteilt. Das Material wird bei jedem Einstich vollständig bis zum Boden der Wanne entnommen.

#### *Spezifische Teilung*

Spezifisch Teilen bedeutet, jedes Stück im Gemenge im richtigen Teilungsverhältnis zu teilen. Dazu werden die Stücke entweder gewogen oder vermessen. Lineare und flächige Stücke können nach Länge und Fläche zugeschnitten werden, von allen anderen müssen abgeschnittene Teilchen eingewogen werden. Spezifisch geteilt wird, wenn das Material einer kleinen Menge von Gegenständen fehlerfrei geteilt werden soll. Die Notwendigkeit besteht, wenn sich Gegenstände nicht mahlen lassen oder schwierig zu zerlegen sind. In der Laborprobenaufbereitung ist die spezifische Teilung notwendig, wenn (1) Metallteile geteilt werden müssen, um sie auflösen zu können oder (2) Stücke, die aus den Feldproben aussortiert wurden, in den Laborproben „Weich“ oder „Steine“ eingemischt werden sollen z.B. Kunststoffe aus Metallverbunden wie Kabelisierungen oder Gehäuse von Elektrogeräten.

#### *Rückvermischen*

Es wurde keine Möglichkeit gefunden, den Material-Mix der Laborproben auf die notwendigen Korngrößen zu bringen, ohne die Stoffgruppen aufzutrennen. Die separat zerkleinerten Teilmengen einer Probe müssen deshalb in dem Verhältnis, indem die Teilmengen angefallen sind, wieder vermischt werden. Die Durchmischung wird am besten dadurch erreicht, dass die fertig zusammengewogene Probe noch einmal „gemahlen“ wird (wobei keine weitere Zerkleinerung zu erwarten ist). Bei heizwertreichen Fraktionen kommt es wegen des hohen Anteils an Faserchen leicht zur Fusselbildung. Heizwertreiche Fraktionen werden daher am besten mit der Schneidmühle gemischt, andere Fraktionen können in der Scheibenschwingmühle gemischt werden, wobei teilweise noch Zerkleinerungseffekte erkennbar sind.





### 3.4.3.2 Heizwertreiche Fraktionen

In Abbildung 3-36 ist das Laboraufbereitungsschema für die Proben von heizwertreichen Fraktionen abgebildet. Begonnen wird mit dem Aussortieren von Metallteilen samt Zerlegen der Metallverbunde, Aussortieren von Steinen und Separieren von körnigen und sandigen, vorwiegend mineralischen Anteilen. Die große Masse der weichen Bestandteile wird mit der Schneidmühle auf <4 mm gemahlen. Die aussortierten Steine und separierten anderen mineralischen Anteile werden mit der Scheibenschwingmühle auf Endfeinheit gebracht, ebenso die vorzerkleinerten (gewalzt oder gebrochenen) Steine und größeren mineralischen Stücke, die aus den Feldproben im Rahmen der Voraufbereitung aussortiert wurden (Laborprobe Steine). Die fertig vermahlene mineralischen Anteile werden entweder vor der Feinaufbereitung oder beim Rückvermischen der Hauptmenge im richtigen Verhältnis wieder zugesetzt. Die Kunststoffe vom Zerlegen der Metall/Kunststoffverbunde werden ebenfalls im richtigen Verhältnis vor dem 1. Mahlschritt oder vor der Feinaufbereitung zugesetzt (spezifische Teilung). Das mit der Schneidmühle vollständig auf <4 mm vermahlene Material wird geteilt und durch die Abfolge Sieben/Mahlen/Sieben so weit zerkleinert, wie es mit der Schneidmühle möglich ist. Der unzerkleinerbare Rest (vorwiegend Kunststoffe) wird gepresst und gesägt. Alle anfallenden Teilfraktionen einer Probe werden im letzten Schritt im richtigen Verhältnis wieder rückvermischt. Die Metallteile werden so weit möglich stofflich identifiziert. Die unbekanntnen Stücke werden ganz oder in Teilen in Säure gelöst.



*Abbildung 3-35: Aussortiertes, zerlegtes und gereinigtes Material aus einer Probe der Schwerfraktion des BASEP der MBA Oberpullendorf. Von links oben im Uhrzeigersinn: Eisen, Aluminium, Blei, Eternit, Batterien, Messing (zum Teil verchromt), Kupfer (aus Kabeln, Wicklungen)*

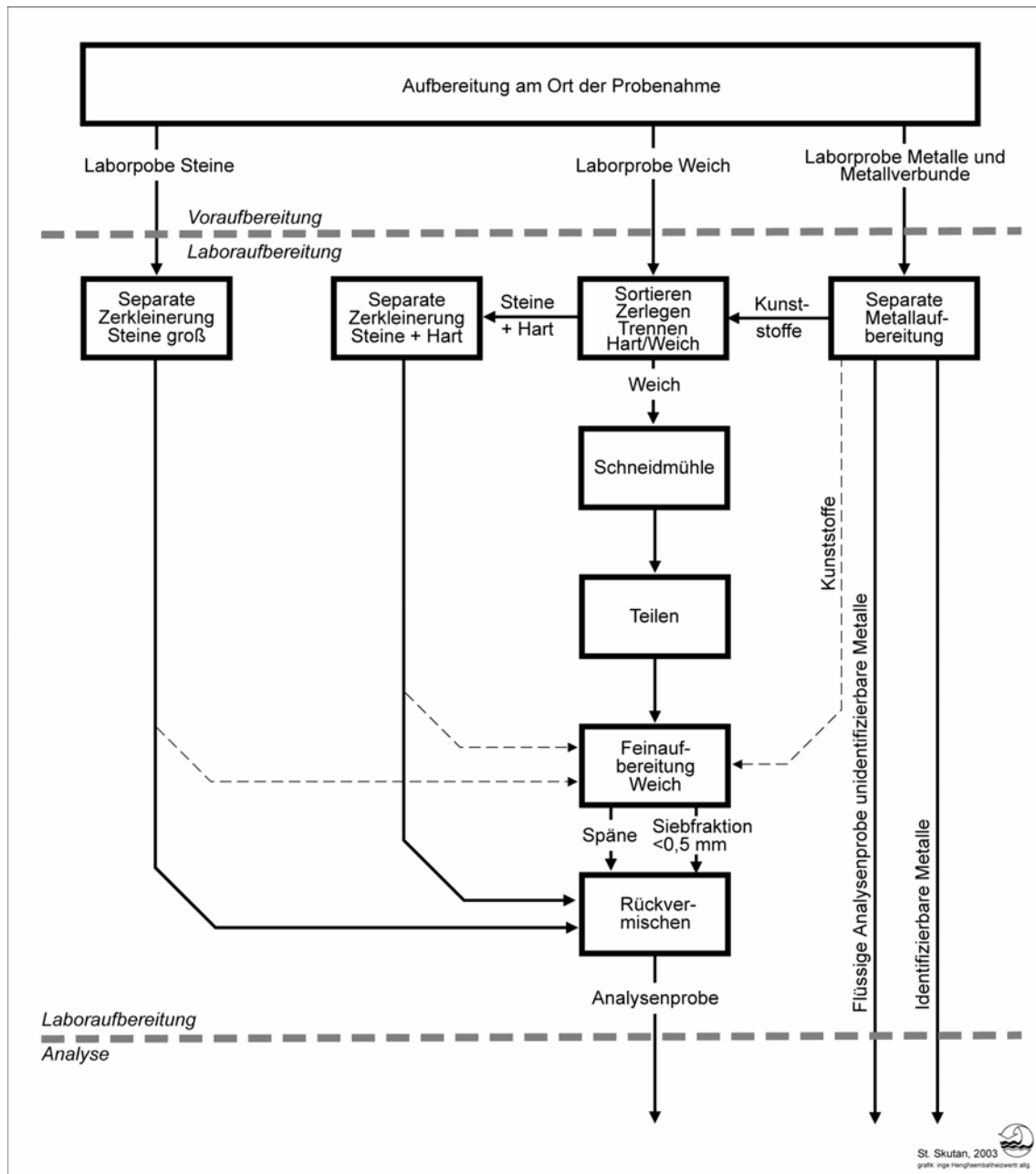


Abbildung 3-36: Allgemeines Schema für die Laboraufbereitung von heizwertreichen Fraktionen. Nicht dargestellt sind die Teilungsschritte und Einwaagen, die beim Zusammenführen verschiedener Teilmengen notwendig sind.

### 3.4.3.3 Schwerfraktionen, Rottegüter

In Abbildung 3-37 ist das allgemeine Aufbereitungsschema für Proben mit hohem mineralischen Anteil abgebildet. Von der Voraufbereitung gelangen jeweils ein Probenteil mit vorwiegend mineralischem bzw. organischem Anteil und die ausgeklauten Metalle ins Labor.



Der Probenteil mit überwiegend mineralischem Anteil wird auf die notwendige Menge geteilt. Die Teilung ohne vorhergehende Zerkleinerung ist eine Ausnahme, die darin begründet ist, dass bei der Teilung im Rahmen der Voraufbereitung die Mengen großzügig bemessen werden. Es ist damit nicht notwendig schon bei der Voraufbereitung die beiden Probenteile im richtigen Verhältnis einzuwägen (Gefahr von Verlusten beim Trocknen oder Absacken). Die Einwaage erfolgt erst beim „Teilen“ im Labor. Eventuell wird die vorwiegend mineralische Teilprobe vor der Teilung gesiebt (<0,5 mm, 0,5-2 mm, >2 mm), um die Siebfractionen einzeln zu teilen. Der Vorteil davon ist, dass (1) die Gefahr von Fehlern durch Entmischung kleiner ist und (2) die Korngrößenverteilung abgeschätzt wird, um gegebenenfalls die Probenmasse noch zu korrigieren. Das Material wird in der Scheibenschwingmühle vermahlen und anschließend gesiebt (0,5 mm). Beim Sieben sollen Metallkörnchen aus dem Siebüberlauf ausgeklaut werden (Pinzette). Der Siebüberlauf besteht praktisch nur aus organischem Material (und Metallen) und wird in die Feinaufbereitung „Weich“ übernommen.

Die Teilprobe aus überwiegend organischem Material wird wie die Probe einer heizwertreichen Fraktion sortiert. Je nach Qualität der Voraufbereitung ist das Sieben zur Erleichterung der Sortierung gegebenenfalls überflüssig. Das Material wird mit der Schneidmühle auf <4 mm gemahlen und anschließend geteilt. Die Feinaufbereitung durch Sieben, neuerliches Mahlen mit der Schneidmühle, nochmaliges Sieben, Pressen und Sägen muss bei hohen mineralischen Verunreinigungen durch einen Separationsschritt Hart/Weich vor dem Pressen ergänzt werden. Die Separation erfolgt durch gezieltes Entmischen (Rütteln) und Mahlen in der Scheibenschwingmühle. Die mineralischen Anteile werden in die Feinaufbereitung „Hart“ übernommen. Alle separat zerkleinerten Mengen werden im richtigen Verhältnis im letzten Schritt rückvermischt.

Die Metalle werden auf die selbe Weise behandelt wie bei heizwertreichen Fraktionen. Kunststoffe aus zerlegten Metallverbunden werden beim ersten Vermahlen in der Schneidmühle zugemischt (die Teile aus den Feldproben werden davor spezifisch geteilt).



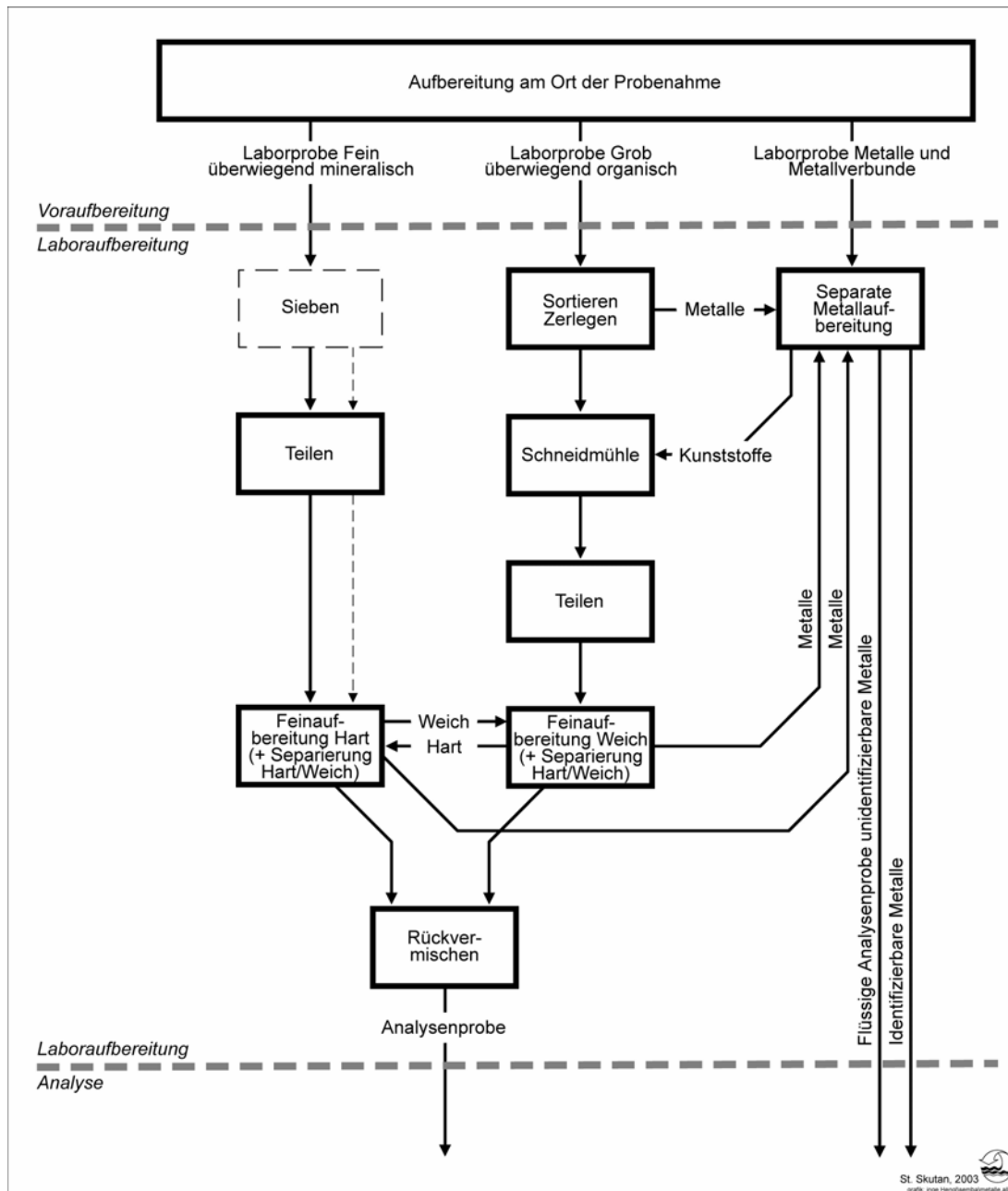


Abbildung 3-37: Allgemeines Schema für die Laboraufbereitung von mineralstoffreichen Fraktionen. Nicht dargestellt sind die Teilungsschritte und Einwaagen, die beim Zusammenführen verschiedener Teilmengen notwendig sind. Die optionale Siebung bei der Aufbereitung der „Laborprobe Fein“ reduziert die Gefahr von Fehlern beim Teilen wegen Entmischung.

#### 3.4.3.4 Metallschrotte

In Abbildung 3-38 ist das allgemeine Schema der Laboraufbereitung von Metallschrotten dargestellt. Die Aufbereitung wird für die verschiedenen Fraktionen, die in der Voraufbereitung gebildet wurden, getrennt geführt.

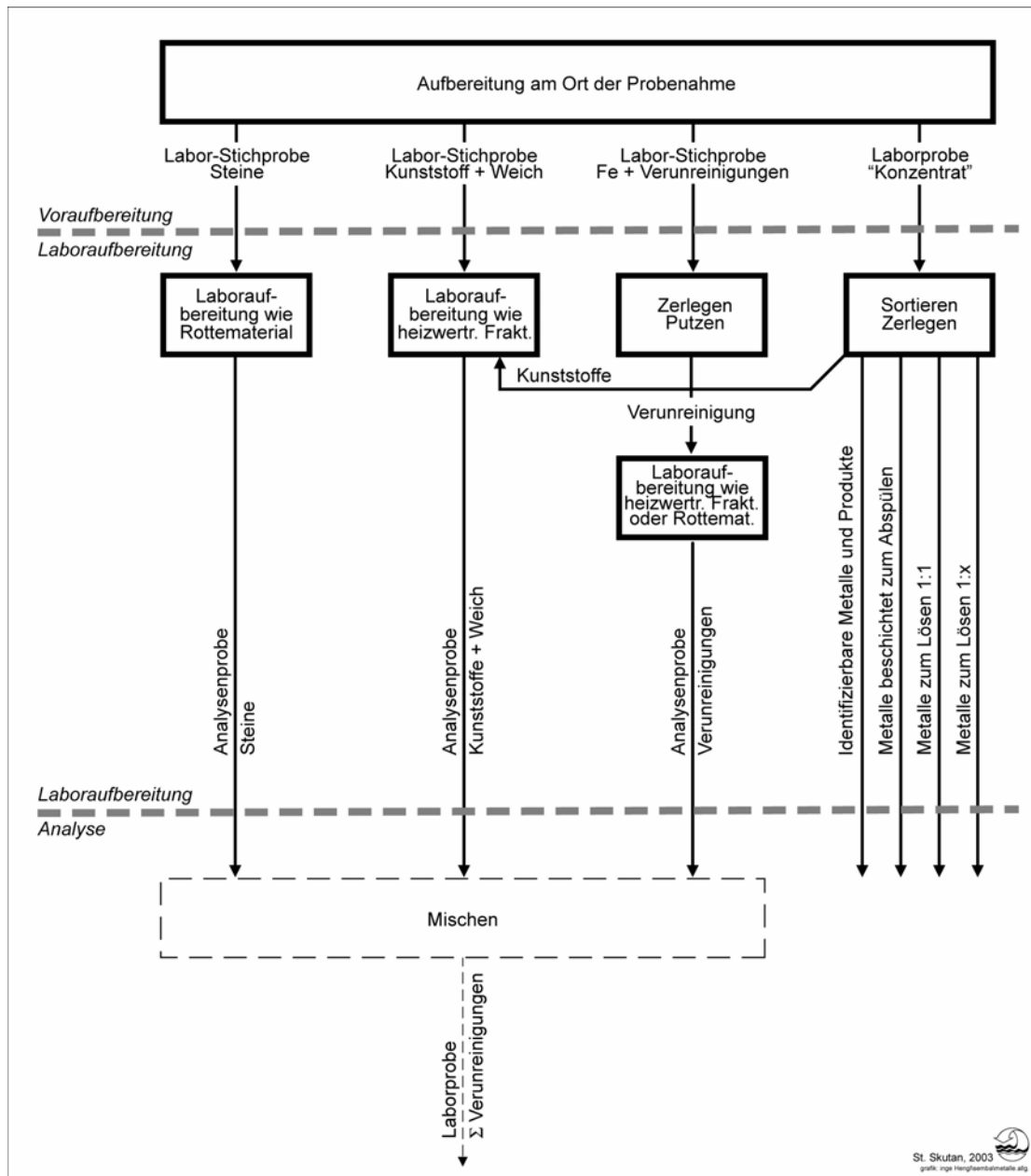


Abbildung 3-38: Allgemeines Schema für die Laboraufbereitung von vorsortierten Teilfraktionen aus Metallschrotten

#### Aufarbeitung der „Konzentrats“

Verbunde werden zerlegt. Stofflich identifizierbare Metallteile und Produkte werden gewogen und ausgeschieden. Ihr Beitrag zum Elementgehalt der Proben wird mit der Information der stofflichen Zusammensetzung und der Masse rechnerisch bestimmt. Die restlichen Metallteile werden sortiert in „massiv“ und beschichtet. Die Metallüberzüge der beschichteten Teile werden durch Spülen und Tauchen mit/in Säure gelöst, der verbleibende Stahl wird ausgewogen. Die Fraktion der „massiven“ Teile wird „spezifisch“ so weit verjüngt, dass sie für den Säureaufschluss handhabbar wird, d.h. es wird von jedem einzelnen Teil in der Fraktion ein Stück entsprechend dem Verjüngungsverhältnis abgeschnitten. Kleine Teile können ohne Verjüngung separat gelöst werden. Die einzelnen Lösungen (Oberflächenbeschichtung,



Massivteile ev. zweimal) werden entsprechend den Massenverhältnissen der Fraktionen unter Berücksichtigung der jeweiligen Verdünnung zusammen pipettiert bzw. gewogen zur Analysenprobe.



*Abbildung 3-39: Durch „spezifisches“ Verjüngen gewonnene Teilprobe der massiven Stücke aus einem „Konzentrat“ einer Fe-Schrottprobe aus der MBA Oberpullendorf*

#### *Lösen der unbekanntten Metalle, Ablösen von Beschichtungen*

Die verjüngten Metallstückchen (meist 1/25, 1/50 oder 1/100) werden in Salzsäure und Salpetersäure gelöst. Der Löseprozess wird jeweils mit Salzsäure begonnen und erst nach Verschwinden der leichter löslichen Bestandteile (AL, Zn) mit Salpetersäure verschärft. In gleicher Weise werden die unbekanntten Metallstückchen der 1/1-Fraktion gelöst. Die verzinkten Teile der 1/1-Fraktion werden in einem Kübel mit Salzsäure bis zum vollständigen Ablösen der Zinkschicht gespült. Die vernickelten und verchromten Gegenstände der 1/1-Fraktion werden mit Salpetersäure abgespült bzw. getaucht. Die Lösungen von den beiden 1/1 Metallen werden gemischt und 1/50 davon zur Lösung der 1/50 Metallstückchen dazu gegeben. Zur Bestimmung der Dichte werden die Lösungen in 250 ml Messkolben aufgefüllt und gewogen. Lösungen über 250 ml werden zur Gänze gewogen. Über die Dichtebestimmung im Messkolben mit einem Teil der Lösung wird das Gesamtvolumen errechnet.

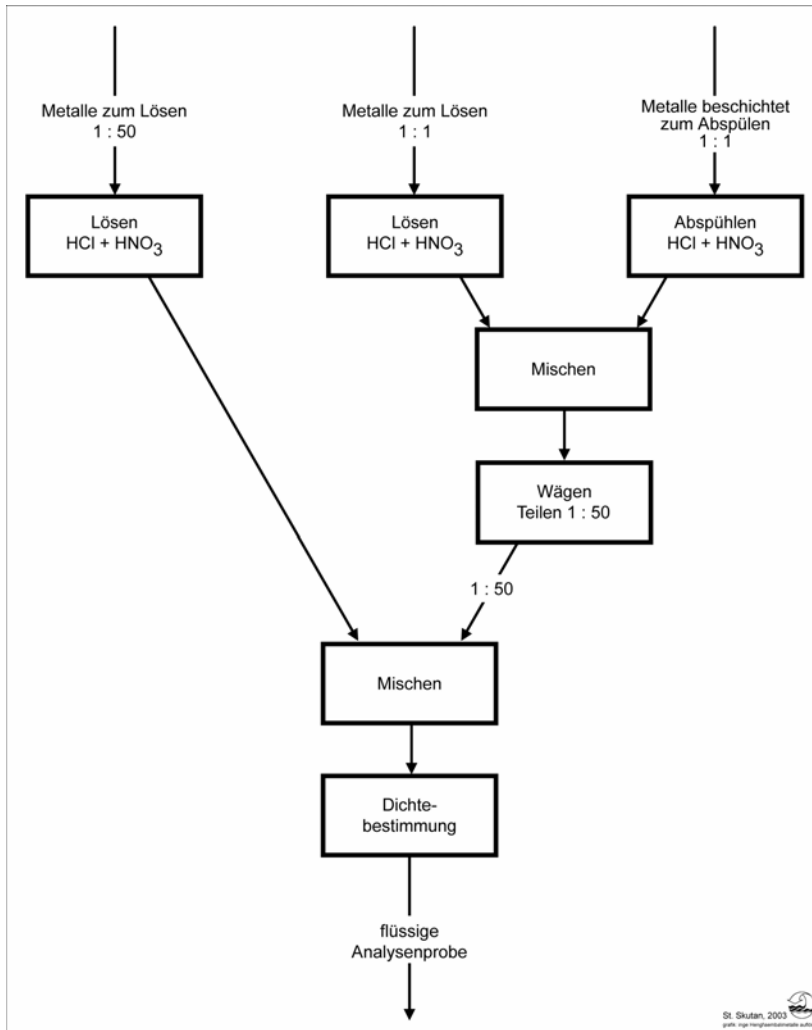


Abbildung 3-40: Ablaufschema beim Lösen der Metalle aus den Schrottfractionen. Das Teilungsverhältnis (hier 1:50) wird in der Probenaufbereitung bestimmt und richtet sich nach der Masse der größten massiven Stücke.

#### Aufarbeitung der Fraktion „Eisen mit Verunreinigungen“

Alle enthaltenen Teile müssen in Kleinarbeit (Abbürsten, Auskratzen) vom Schmutz befreit werden. Der abgetrennte Schmutz wird gewogen und mit den verfügbaren Techniken der selektiven Zerkleinerung (Trennung harter und weicher Materialien) analysenfertig aufbereitet und rückvermischt.

#### Aufarbeitung der Fraktion „Kunststoffe“

Zur Aufbereitung der Kunststofffraktion erfolgt nach dem Schema der Aufbereitung heizwertreicher Fraktionen.

#### Aufarbeitung der Fraktionen „Mineralisch“ und „Feinfraktion“

Diese Fraktionen werden nach dem allgemeinen Schema für die Aufbereitung von Proben mit hohem Mineralstoffanteil behandelt.



### 3.5 Chemische Analysen

Die Proben der Versuche Oberpullendorf I und II und damit der weitaus größte Teil der Proben wurden vom Labor der Umweltbundesamt Wien GmbH analysiert. Ausgenommen sind die flüssigen Proben der ausgeklauten unidentifizierbaren Metalle aus den Fraktionen >25 mm, >65 mm, Rotteinput, Rotteoutput sowie Leicht- und Schwerfraktion aus dem ballistischen Separator, diese wurden allein von der TU Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft (IWA) bestimmt.

#### 3.5.1 Prüfverfahren Labor Umweltbundesamt GmbH Wien

##### 3.5.1.1 Trockenmassebestimmung gemäß ÖNORM EN 12880

Die Proben wurden bei 105°C getrocknet (Überprüfung mit geeichtem Thermometer). Nach Erkalten der Probe im Exsikkator wird die Auswaage auf einer Analysenwaage durchgeführt.

##### 3.5.1.2 Metalle (Fe, Al, Zn, Cu, Cd, Pb, Hg, Cr, Ni), Phosphor und Schwefel

###### *Festproben*

Der Aufschluss der Feststoffproben erfolgte als mikrowellenunterstützter Druck-Aufschluss von jeweils 0,3 g Festprobe in einem Säuregemisch von Salpetersäure und Salzsäure in Quarz-Hochdruckgefäßen (35 Minuten bei ca. 200°C, Druck max. 75 bar). Als Säuremischung wurden 8 ml Salpetersäure (65 %) subboiled und 1 ml Salzsäure (30 %) subboiled pro Aufschluss gewählt. Die Aufschlüsse wurden nach dem Abkühlen in 50 ml Quarzkolben mit Reinstwasser aufgefüllt.

Die Analyse der Metalle (ausgenommen Hg), Schwefel und Phosphor erfolgte mit ICP-AES in Anlehnung an ÖNORM EN 11885 gegen säurematrixangepasste Bezugslösungen. Quecksilber wurde mit Fließinjektions-Kaltdampf-Technik in Anlehnung an ÖNORM EN 1483 (Reduktion mit Natriumborhydrid) bestimmt.

Zur Absicherung des Analysenverfahrens wurden Referenzmaterialanalysen und Blindwertbestimmungen der Aufschluss Säuren durchgeführt.

###### *Flüssigproben*

Die in Königswasser gelösten Metalle (Eisen- und Aluminiumschrottfractionen) wurden ohne weitere Vorbehandlung geeignet verdünnt der Analyse zugeführt.

##### 3.5.1.3 TC-Bestimmung

Die Bestimmung des TC-Gehaltes erfolgte als Verbrennung im Sauerstoffstrom bei 1.300°C mit anschließender coulometrischer Detektion gemäß ÖNORM EN 13137.

##### 3.5.1.4 TIC-Bestimmung

Die TIC-Gehalte wurden gasvolumetrisch nach Scheibler gemäß ÖNORM EN 13137 bestimmt.



### 3.5.1.5 TOC-Bestimmung

Der TOC wurde rechnerisch als Differenz TC - TIC bestimmt (ÖNORM EN 13137).

### 3.5.1.6 Gesamtstickstoffbestimmung

Die N-Bestimmung erfolgte gemäß ÖNORM L 1082. Durch ein Schwefelsäure-Salicylsäuregemisch werden aromatische Nitroverbindungen zu Aminoverbindungen reduziert. Nach dem Aufschluss mit Schwefelsäure und Selenkatalysator erfolgt eine Wasserdampfdestillation und eine potentiometrische Titration des gebildeten Ammoniums mit Schwefelsäure.

## 3.5.2 Prüfverfahren Labor TU Wien, IWA

Bei der Auswahl der Prüfverfahren wurde speziell auf die Erzielung vergleichbarer Messergebnisse mit dem Umweltbundesamt-Labor geachtet (insbesondere Aufschlussbedingungen).

### 3.5.2.1 Trockenmassebestimmung an den Analysenproben

wie Labor Umweltbundesamt

### 3.5.2.2 Glühverlust und Aschengehalt

Die Proben wurden nach ÖNORM S 2023 bei 550°C im Muffelofen vergüht.

### 3.5.2.3 Metalle

#### *Aufschluss der festen Analysenproben*

Der Aufschluss der Feststoffproben erfolgte als mikrowellenunterstützter Druckaufschluss mit Einwaagen von 0,2 bis 0,3 g. Als Aufschlussgefäße wurden Quarzgefäße verwendet als Säuregemisch jeweils 10 ml Salpetersäure 65 % p.a. und 2 ml Salzsäure 32 % p.a.. Dauer und Maximaltemperatur wurden den Aufschlussbedingungen des Umweltbundesamt-Labors angeglichen. Die Aufschlüsse wurden mit deionisiertem Wasser auf 50 ml aufgefüllt.

#### *Analyse der Aufschlusslösungen (Mikrowellenaufschlüsse und Lösungen ausgeklaubter, unidentifizierbarer Metalle)*

Die Lösungen wurden in geeigneter Verdünnung mit ICP-AES in Anlehnung an ÖNORM EN 11885 gegen säurematrixangepasste Bezugslösungen gemessen.



### 3.6 Vergleichende chemische Analysen zwischen Umweltbundesamt und IWA

#### 3.6.1 Referenzmaterial „BCR 146 R Sewage sludge of industrial origin“

In Tabelle 3-5 sind die Analysenergebnisse von 12 Messungen des IWA zusammengestellt und den Wiederfindungsraten des Umweltbundesamt-Labors gegenübergestellt. Die Streuung innerhalb der IWA-Messwerte ist niedrig. Die Wiederfindungsraten sind allerdings durchgehend niedriger als jene vom Umweltbundesamt-Labor, die Differenzen liegen mit Ausnahme von Aluminium um 10 %. Die Übereinstimmung ist als zufrieden stellend zu bezeichnen unter Berücksichtigung der beobachteten Streuungen die durch Probennahme und Probenaufbereitung auftreten, sowie der Tatsache, dass diese Messwerte nur Anteile der Metallgehalte darstellen, die noch um die Zuschläge der aussortierten Metallteile vermehrt werden.

*Tabelle 3-5: IWA-Messwerte vom Referenzmaterial BCR 146 R (Zeilen 1 bis 12) mit Mittelwert, Standardabweichung (stabw) und Variationskoeffizient (rsd). Unterhalb sind die zertifizierten Werte für Königswassergehalte (Soll-KW) und Gesamtgehalte (Soll-ges.) sowie die Wiederfindungsraten in % vom UBA- wie vom Umweltbundesamt-Labor angegeben.*

| Probe-<br>Bez.     |             | BCR 146R        |                    |                   |                 |                  |                   |                  |                      |
|--------------------|-------------|-----------------|--------------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|------------------|----------------------|
|                    |             | Blei<br>[mg/kg] | Cadmium<br>[mg/kg] | Kupfer<br>[mg/kg] | Zink<br>[mg/kg] | Chrom<br>[mg/kg] | Nickel<br>[mg/kg] | Eisen<br>[mg/kg] | Aluminium<br>[mg/kg] |
| Messwerte          | 1           | 549             | 17,7               | 748               | 2.552           | 172              | 62                | 12.251           | 21.376               |
|                    | 2           | 530             | 16,7               | 730               | 2.498           | 169              | 62                | 12.500           | 21.673               |
|                    | 3           | 531             | 16,7               | 734               | 2.565           | 172              | 62                | 12.573           | 21.783               |
|                    | 4           | 542             | 16,9               | 747               | 2.580           | 174              | 61                | 12.771           | 21.487               |
|                    | 5           | 535             | 16,7               | 740               | 2.594           | 175              | 60                | 12.707           | 21.532               |
|                    | 6           | 535             | 16,7               | 728               | 2.609           | 175              | 61                | 12.671           | 21.640               |
|                    | 7           | 525             | 16,4               | 736               | 2.606           | 170              | 58                | 12.912           | 20.734               |
|                    | 8           | 534             | 16,8               | 736               | 2.615           | 169              | 60                | 13.091           | 20.870               |
|                    | 9           | 544             | 17,3               | 747               | 2.648           | 175              | 61                | 13.536           | 22.555               |
|                    | 10          | 540             | 17,1               | 745               | 2.664           | 171              | 60                | 13.009           | 21.567               |
|                    | 11          | 540             | 16,8               | 736               | 2.448           | 176              | 61                | 13.272           | 21.451               |
|                    | 12          | 542             | 17,0               | 751               | 2.584           | 171              | 61                | 12.582           | 21.808               |
| <b>MW</b>          | <b>537</b>  | <b>16,9</b>     | <b>740</b>         | <b>2.580</b>      | <b>172</b>      | <b>61</b>        | <b>12.823</b>     | <b>21.540</b>    |                      |
| <b>stabw</b>       | <b>6,9</b>  | <b>0,34</b>     | <b>7,6</b>         | <b>60,2</b>       | <b>2,5</b>      | <b>1,3</b>       | <b>358,8</b>      | <b>460</b>       |                      |
| <b>rsd</b>         | <b>1,28</b> | <b>2,03</b>     | <b>1,03</b>        | <b>2,33</b>       | <b>1,47</b>     | <b>2,07</b>      | <b>2,80</b>       | <b>2,13</b>      |                      |
| <b>Soll-KW</b>     | <b>583</b>  | <b>18,5</b>     | <b>831</b>         | <b>3.043</b>      | <b>174</b>      | <b>65</b>        | <b>15.820</b>     | <b>17.450</b>    |                      |
| <b>WF-Rate IWA</b> | <b>92</b>   | <b>91</b>       | <b>89</b>          | <b>85</b>         | <b>99</b>       | <b>94</b>        | <b>81</b>         | <b>123</b>       |                      |
| <b>WF-Rate UBA</b> | <b>100</b>  | <b>96</b>       | <b>94</b>          | <b>94</b>         | <b>107</b>      | <b>102</b>       | <b>95</b>         | <b>139</b>       |                      |
| <b>Soll-ges.</b>   | <b>609</b>  | <b>18,8</b>     | <b>838</b>         | <b>3.061</b>      | <b>196</b>      | <b>69,7</b>      | <b>17.700</b>     | <b>25.130</b>    |                      |
| <b>WF-Rate IWA</b> | <b>88</b>   | <b>90</b>       | <b>88</b>          | <b>84</b>         | <b>88</b>       | <b>87</b>        | <b>72</b>         | <b>86</b>        |                      |
| <b>WF-Rate UBA</b> | <b>96</b>   | <b>94</b>       | <b>94</b>          | <b>94</b>         | <b>95</b>       | <b>95</b>        | <b>85</b>         | <b>96</b>        |                      |

#### 3.6.2 Vergleichsmessungen an Aufschlusslösungen des Umweltbundesamtes

Das Umweltbundesamt-Labor hat angeregt, an Aufschlusslösungen Vergleichsmessungen durchzuführen, um den Einfluss des Aufschließens (IWA und Umweltbundesamt arbeiten mit verschiedenen Mikrowellengeräten) im Messwertvergleich auszuschließen. Das Umweltbundesamt stellte je eine Lösung einer heizwertreichen Faktion und eines Rotteininputs zur Verfügung. Diese beiden Proben wurden deshalb ausgewählt, weil sich erstere unproblematisch, die zweite als problematisch bei der Messung im Umweltbundesamt heraus-



stellte. In Tabelle 3-6 sind die Ergebnisse und Abweichungen zusammengestellt. Es gibt keinen generellen Trend, die Abweichungen sind moderat.

*Tabelle 3-6: Vergleichsmessungen von IWA und Umweltbundesamt an zwei Aufschlüssen, die vom Umweltbundesamt hergestellt wurden (Heizwertreiche Fraktion und Rotteinput).*

| Probe-<br>Bez.                         |              | Blei | Cadmium | Kupfer | Zink | Chrom | Nickel | Eisen | Aluminium |
|--|--------------|------|---------|--------|------|-------|--------|-------|-----------|
|  |              | mg/l | mg/l    | mg/l   | mg/l | mg/l  | mg/l   | mg/l  | mg/l      |
| SO212 5331II 02/166                    | IWA          | 1,78 | 0,0502  | 6,06   | 5,88 | 1,82  | 0,283  | 57,1  | 77,0      |
|  | UBA          | 1,74 | 0,0477  | 5,6    | 5,30 | 1,69  | 0,282  | 56,2  | 72,9      |
|  | Abweichung % | -2,2 | -5,3    | -8,6   | -11  | -7,8  | -0,47  | -1,7  | -5,7      |
| SO211 4876II 20+21A                    | IWA          | 1,33 | 0,0123  | 0,563  | 4,67 | 0,552 | 0,212  | 62,4  | 92,4      |
|  | UBA          | 1,32 | 0,0122  | 0,752  | 4,48 | 0,494 | 0,224  | 69,6  | 90,9      |
|  | Abweichung % | -0,6 | -1,2    | 25     | -4,2 | -12   | 5,1    | 10    | -1,6      |
| Durchschnitt Abweichung beide Proben % |              | -1,4 | -3,3    | 8,3    | -7,6 | -10   | 2,3    | 4,4   | -3,6      |

### 3.6.3 Vergleichsmessung an Abfallproben

An sechs Abfallproben vom Versuch Oberpullendorf wurden vergleichende Messungen durchgeführt. Es handelte sich um jeweils zwei Proben der heizwertreichen Fraktion >25 mm, des Rotteinputs und des Rotteoutputs. Das Umweltbundesamt analysierte in Doppel- das IWA-Labor in Vierfachbestimmung. In den folgenden Tabellen sind die durchschnittlichen Abweichungen und mittleren Variationskoeffizienten über alle sechs Proben angegeben. Im Rahmen der gemessenen Streuungen sind die Abweichungen als zufällig zu bewerten. Bei Nickel mussten 4 Messwerte (von 24) des IWA-Labors für den Vergleich eliminiert werden, weil sie 2- bis 10-fach gegenüber den Parallelen innerhalb einer Probe überhöht waren. Solche „Ausreißer“ sind bedingt durch die Heterogenität der Analysenproben als „normal“ einzustufen, sie treten in der Routineanalyse dieser Abfallproben selten aber beständig auf.

*Tabelle 3-7 a und b: Relative Differenzen und Streuungen (Variationskoeffizienten rsd) bei den Vergleichsmessungen an Abfallproben*

|                   | Al    | Cd    | Cr   | Cu    | Fe   |
|-------------------|-------|-------|------|-------|------|
| IWA-UBA in %      | -20,4 | -14,0 | -4,2 | -12,4 | -4,7 |
| rsd im Mittel IWA | 7,4   | 14,3  | 9,7  | 41,2  | 7,4  |
| rsd im Mittel UBA | 2,3   | 17,7  | 1,8  | 34,3  | 4,7  |

|                   | Ni   | Ni*  | Pb   | Zn   |
|-------------------|------|------|------|------|
| IWA-UBA in %      | 133  | 1,5  | 10,7 | -1,2 |
| rsd im Mittel IWA | 76,1 | 12,9 | 21,5 | 9,4  |
| rsd im Mittel UBA | 7,2  | 7,2  | 12,0 | 9,3  |

\* Elimination von 4 „Ausreißern“ bei den IWA-Messungen

### 3.7 Bestimmung identifizierbarer Werkstoffe und Produkte

Die Beiträge von identifizierbaren Werkstoffen und Produkten zum Gesamtgehalt eines Stoffes werden durch die Massen der identifizierbaren Stücke und ihre charakteristischen Zusammensetzungen bestimmt. Die daraus durch Multiplikation ermittelten Mengen eines Inhaltsstoffes werden auf die jeweilige Masse der Probe bezogen, aus der diese Stücke separiert wurden. Nachdem es sich in den vorliegenden Fällen bei den aussortierten Stücken immer um Mengen handelt, die gegenüber den Gesamtmassen der Proben sehr klein sind,





wurde darauf verzichtet, die Werte aller gemessenen Parameter um den Fehler zu korrigieren, der beim Herausnehmen eines Gemengeteils entsteht. Ein Beispiel zur Veranschaulichung:

### Einrechnung des aussortierten Kupfers zum Gesamtkupfergehalt einer Probe

Aus einer Probe mit 20 kg werden 10 g reines Kupfer separiert (z.B. aus Kabeln). Die Probe hat einen Wassergehalt von 25 %. Der Kupfergehalt (Hintergrundgehalt) in der Probe (exklusive aussortiertes Kupfer) wurde bei der chemischen Analyse mit 300 mg/kg TS bestimmt, der Cadmiumgehalt mit 5 mg/kg TS.

Der Kupfergesamtgehalt wird berechnet:

$$C_{\text{Kupfer}} = \text{Hintergrundgehalt} + \frac{\text{aussortiertes Kupfer}}{\text{Trockensubstanz der Probe}} = \quad (3-43)$$

$$= 300 \text{ mg / kg TS} + \frac{10.000 \text{ mg}}{15 \text{ kg TS}} = 966,67 \text{ mg / kg TS}$$

Bei dieser Berechnung wird der Fehler ignoriert, dass die Hintergrundkonzentration nicht für 15 kg der Trockensubstanz sondern nur für 14,99 kg gilt, da ja 10 g Kupfer aus der Probe entfernt wurden. Der korrekte Berechnungsweg würde lauten:

$$C_{\text{Kupfer}} = \frac{\text{Hintergrundgehalt} \cdot \text{Trockensubstanz Hintergrundträger} + \text{aussortiertes Kupfer}}{\text{Trockensubstanz der Probe}} = \quad (3-44)$$

$$= \frac{300 \text{ mg / kg TS} \cdot 14,99 \text{ kg TS} + 10.000 \text{ mg}}{15 \text{ kg TS}} = 966,47 \text{ mg / kg TS}$$

Der exakt berechnete Kupfergehalt ist geringfügig niedriger als der vereinfacht berechnete. Die möglichen Abweichungen sind im Rahmen der Genauigkeit von Abfallanalysen aber irrelevant.

Analog wäre zur korrekten Berechnung aller anderen Analysenparameter die Verdrängung von Hintergrundanteilen zu berücksichtigen z.B.:

$$C_{\text{Cadmium}} = \frac{\text{Hintergrundgehalt} \cdot \text{Trockensubstanz Hintergrundträger} + \text{Cd im Aussortierten}}{\text{Trockensubstanz der Probe}} = \quad (3-45)$$

$$= \frac{5 \text{ mg / kg TS} \cdot 14,99 \text{ kg TS} + 0 \text{ mg}}{15 \text{ kg TS}} = 4,997 \text{ mg / kg TS}$$

Hier wird angenommen, dass das aussortierte Kupfer kein Cadmium (auch nicht in Spuren) enthält.



### 3.7.1 Bestimmung der Werkstoffe und Produkte

In der folgenden Tabelle sind die Werkstoffe und Produkte, die als identifizierbar angesehen werden, mit den Erkennungskriterien und den für die Auswertung verwendeten durchschnittlichen Zusammensetzungen aufgelistet.

*Tabelle 3-8: Identifizierbare Werkstoffe und Produkte (Die Angaben über die stoffliche Zusammensetzung der Werkstoffe wurde aus einem Lehrbuch der Werkstoffkunde (Weißbach, 1988) übernommen. Die Zusammensetzung der Münzen wurden bei der Münze Austria GmbH erfragt.)*

| <b>Werkstoff/<br/>Produkt</b> | <b>Erkennung</b>  | <b>durchschnittliche<br/>Zusammensetzung</b> |
|-------------------------------|---|--|
| <b>Metallwerkstoffe</b>       |   |  |
| Kupfer                        | rötliche Färbung („kupferfarben“), biegsam, formbar,<br>typisch für: elektrische Leitungen, Komponenten von elektrischen Geräten, Bleche und Rohre  | 100 % Cu                                     |
| Messing                       | goldgelbe Färbung, halbhart<br>typisch für: Installationsmaterial (Sanitär- und Heizungsbereich), präzise geformte Kleinteile an diversen Geräten (Teile in Schaltern und Steckern, Scharnieren, Schrauben, Uhrwerke, Ventile in Feuerzeugen, Spitzen von Kugelschreibern, Reißverschlüsse, etc.) | 59 % Cu<br>39 % Zn<br>2 % Pb                 |
| Blei                          | grau angelaufene Oberfläche, intensiver Silberglanz an frischen Schnittflächen, sehr weich, hohe Dichte<br>typisch für: Teile von KfZ-Starterbatterien, Schrot-, Wucht- und Senkblei, Bleisaum von Vorhängen  | 100 % Pb                                     |
| Bronze                        | goldgelbe bis rötlichgelbe Färbung, Bruch beim Verbiegen, Bruchfläche gräulich<br>typisch für: Gleitflächen (Lagerschalen, Buchsen etc.)  | 85 % Cu<br>5 % Zn<br>5 % Sn<br>5 % Pb        |
| Eisen                         | ferromagnetisch, mit Rost überzogen   | 100 % Fe                                     |
| Aluminium                     | geringe Dichte, matte silbrige Oberfläche   | 100 % Al                                     |
| Edelstahltopfreiniger         | produkttypisches Aussehen   | 16,87 % Cr<br>0,13 % Ni                      |
| <b>Münzen</b>                 |   |  |
| 10 Groschen                   |   | 98,5 % Al                                    |
| 50 Groschen und 1S            |   | 91,5 % Cu<br>8,5 % Al                        |
| 5 und 10 Schilling            |   | 75 % Cu<br>25 % Ni                           |



Fortsetzung Tabelle 3-8:

| <b>Batterien</b>                 |  |                               |
|----------------------------------|--|-------------------------------|
| Alkalimangan-Batterien           | Aufschrift: „Alkaline“, „Alkalimangan“; beim Durchschneiden im unteren Drittel (näher am negativen Pol) findet sich zentrisch der Ableitungsdorn aus Messing (ca. 1 mm stark) ggf. umgeben von einem weißen Ring in sonst schwarzem Material | 15 % Zn<br>20 % Fe            |
| Nickel/Cadmium-Akkumulatoren     | Aufschrift: NiCd-Accu; spiraliger Innenaufbau, positiver Cd-Nachweis für den Inhalt  | 16 % Cd<br>20 % Ni<br>40 % Fe |
| Nickelmetallhydrid-Akkumulatoren | Aufschrift: NiMH; spiraliger Innenaufbau, negativer Cd-Nachweis  | 35 % Ni                       |
| Zink-Kohle-Batterien             | Aufschrift „Zinkkohle“, „Standard“; beim Durchschneiden im unteren Drittel (näher am negativen Pol) findet sich zentrisch der Kohlestift (ca. 5 mm stark, dunkelgrau, leicht glänzend) umgeben von dunklem, graubraunem Material             | 20 % Zn<br>20 % Fe            |
| <b>Sonstige</b>                  |  |                               |
| Eternit                          | produkttypisches Aussehen  | 100 %<br>Asche                |
| Knochen                          |  | 5,2 % P                       |

### 3.7.2 Bestimmung des Batterietyps

Bei Batterien, die eine mechanische Aufbereitung durchlaufen haben, ist es in den meisten Fällen möglich, den Typ anhand der Aufschrift zu erkennen. Ist das nicht möglich, müssen die Batterien (bevorzugt im unteren Drittel, d.h. näher beim negativen Pol) aufgeschnitten werden.

Am inneren Aufbau lassen sich Zink-Kohle- und Alkali-Mangan-Batterien eindeutig erkennen (Kohlestift bei Zink-Kohle bzw. Ableitungsdorn aus Messing bei Alkali-Mangan). Von den Sekundärzellen (aufladbare Batterien) sind NiCd- und NiMH-Akkus an ihrem spiraligen Aufbau erkennbar. Lithiumionen-Batterien enthalten stark und unangenehm riechende organische Lösungsmittel, woran sie leicht zu erkennen sind (der Inhalt von NiCd- und NiMH-Akkus ist geruchlos). Die NiCd-Akkus werden durch den chemischen Test auf Cd von den NiMH-Akkus unterschieden.

#### *Cadmiumnachweis im Batterieinhalt*

Das Prinzip dieses Tests ist die Bildung von gelbem CdS aus Cd<sup>2+</sup>-Salzen. Ein Filterpapierstreifen wird mit Acetatpuffer (50 ml Eisessig + 50 ml Wasser + 1g NaOH) getränkt und eine kleine Menge vom Batterieinhalt darauf leicht verrieben. Nach einer Wartezeit von ca. einer halben Minute wird der Streifen in einer Epruvette mit H<sub>2</sub>S begast (H<sub>2</sub>S-Entwicklung mit einigen Körnern FeS + 1 ml verdünnte Salzsäure). Beim positiven Test bilden sich gelbe Flecken um den verriebenen Batterieinhalt.





## 4 ERGEBNISSE

### 4.1 Vorerhebungen - Provisorische Bilanzen aus Literaturdaten

Dieser Abschnitt ist wesentlicher Bestandteil des ersten, theoretischen Teils dieser Arbeit. Es wurde versucht, aus Literaturdaten Stoffbilanzprognosen für die gegenständlichen Stoffe und Behandlungsverfahren aufzustellen und Informationen für die Probenmassenbestimmung abzuleiten. Im folgenden sind die Ergebnisse der Vorerhebungen so wiedergegeben, wie sie vor Beginn des praktischen Teils vorlagen.

#### 4.1.1 Güter mit hohen Stoffkonzentrationen

In diesem Abschnitt wird versucht, Produkte die im Restmüll relevante Schwermetallfrachten tragen, zu identifizieren und daraus Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung der Stoffe im Müll zu ziehen. Diese Information dient als Basis für die Bestimmung von Probenmassen nach theoretischen Ansätzen (Binomialverteilungsstatistik und Ansatz nach Bunge und Bunge, 1999)

##### 4.1.1.1 Batterien

Batterien sind nach Angaben des UBA Berlin (1999) für folgende Anteile der Schwermetallfrachten im bundesdeutschen Hausmüll verantwortlich: Zn 10 %, Ni 65 % und Cd 85 %. Batterien werden in dieser Quelle als „bedeutendste Produktgruppe der Schwermetallbelastung im Hausmüll“ genannt. Diese Aussagen werden bei den provisorischen Bilanzen der Elemente Zn, Cd und Ni diskutiert.

##### *Mengen und Zusammensetzungen von Batterien*

(Quellen: Umweltforum Batterien (2001), UBA Berlin (1999) und Sager (1990)):

Das Umweltforum Batterien hat im Jahr 2000 in Österreich 1.327 t Zink-Kohle und Alkali-Mangan Batterien, 112 t NiCd-Akkus und 5,3 t Knopfzellen gesammelt. Das Forum schätzt die Sammelquote auf 60-65 % (BRD 50 % laut FRICKE, 2001). Für die Abschätzung der Mengen im Restmüll (Tabelle 4-1) wurden für Zink-Kohle-, Alkali-Mangan-Batterien und Knopfzellen 35 % bei NiCd-Akkus 25 % dem Restmüll zugeordnet.

Tabelle 4-1 zeigt, dass diese Abschätzung die Größenordnung gemessener Werte trifft. In der MBA Hartberg wurden nur lose Batterien erfasst (keine Vorzerkleinerung), die tatsächliche Menge ist damit höher anzusetzen (unbekannter Anteil an Batterien in 2,3 kg Elektronikschrott/t Müll).

Für die Abschätzung der Schwermetallgehalte der Knopfzellen (Summe) wurden die Werte der verschiedenen Zellen-Typen mit ihren Verkaufszahlen 1998 in der BRD gewichtet gemittelt. Die seit 2000 EU-weit verbotenen Quecksilberoxid-Knopfzellen (Richtlinie 98/101/EG) enthalten ca. 32 % Hg, die anderen Typen 0,5-1 %. Die Verkaufszahlen der Quecksilberoxid-Zellen sind seit mindestens 15 Jahren rückläufig (BRD –80 % von 1986 bis 1998). Unbekannt ist die Anteil an Quecksilberoxid-Knopfzellen, die mit Geräten (Uhren, Spielzeug) aus Länder außerhalb der EU importiert werden. Die Rundzellen enthalten ca. 5 mg/kg FS Hg (Zink-Kohle) bzw. 275 mg/kg/FS („Hg-freie“ Alkali-Mangan).



Tabelle 4-1: Batterien im Restmüll

| Batteriegehalt<br>[g/t] | Quelle  |
|-------------------------|---|
| 580                     | eigene Abschätzung aus Sammelmenge                              |
| 680                     | Restmüllanalyse Burgenland 2001 <sup>1</sup>                    |
| 260                     | MBA Hartberg <sup>2</sup>                                       |
| 500                     | MBS Rennerod BRD, Trockenstabilat-Verfahren Herhof <sup>3</sup> |
| 510                     | Hausabfall BRD 2000 (berechnet) <sup>4</sup>                    |
| 600                     | BRD Sortieranalysen <sup>5</sup>                                |

<sup>1</sup> aus ursprünglich 1,4 t Müll, inkl. Batterien in Geräten; eigene Untersuchung der Problemstofffraktion (zur Verfügung gestellt von der IUT im Rahmen der Restmüllanalyse 2001)

<sup>2</sup> Handauslese bei Behandlung von 370 t Restmüll; unbekannter Anteil an Batterien in 2,3 kg/t Elektronikschrott Daten von Mayr (2001)

<sup>3</sup> Handauslese aus Eisenschrott im normalen Anlagenbetrieb; Daten von Puchelt (2000)

<sup>4</sup> berechnet aus einer Batteriemenge von 112g/EW\*a (FRICKE, 2001) in 218 kg/EW\*a Hausabfall (Soyez, 2001)

<sup>5</sup> Mittelwert aus 6 Untersuchungen zu je ca. 1.000 kg Restmüll in verschiedenen Regionen, von Schneider et al. (2001)

NiCd-Akkus enthalten je ca. 20 % Cd und Ni. Die seit Mitte der 90er Jahre eingeführten Nickel-Metallhydrid-Akkus (enthalten ca. 35 % Ni) werden zur Zeit noch nicht in relevanter Menge im Müll vermutet.

Tabelle 4-2: Abschätzung der Beiträge zu Schwermetallfrachten im Restmüll verursacht durch Batterien

|                            | Gut | durchschnittliche Konzentration im Batterietyp |    |                     |                   | berechneter Konzentrationsbeitrag im Restmüll <sup>1</sup> |     |       |      |
|----------------------------|-----|--|----|---------------------|-------------------|--|-----|-------|------|
|                            |     | [% FS]   |    |                     |                   | [mg/kg FS]   |     |       |      |
|                            | t/a | Zn   | Cd | Hg                  | Ni                | Zn   | Cd  | Hg    | Ni   |
| Ni-Cd Akkus                | 43  | -  | 20 | -                   | 20                | -  | 6,6 | -     | 6,6  |
| Zink-Kohle + Alkali-Mangan | 710 | 20   | -  | 0,0015 <sup>2</sup> | -                 | 110  | -   | 0,008 | -    |
| Knopfzellen                | 2,9 | 15 <sup>3</sup>                                | -  | 3,5 <sup>3</sup>    | 0,84 <sup>3</sup> | 0,3  | -   | 0,08  | 0,02 |

<sup>1</sup> Grundlage: jährliches Restmüllaufkommen Österreich: 1,3 Mio. t

<sup>2</sup> nicht gewichteter Mittelwert von Zink-Kohle (0,0005 %) und Alkali-Mangan (0,0025 %)

<sup>3</sup> gewichteter Mittelwert der Zellen-Typen nach Verkaufszahlen BRD 1998: 9 % Quecksilberoxid (10 % Zn, 32 % Hg), 36 % Silberoxid (7 % Zn, 0,5 % Hg), 20 % Alkalimangan (10 % Zn, 0,6 % Hg, 0,7 % Ni), 35 % Zink-Luft (27 % Zn, 2 % Ni, 1 % Hg)

- keine Daten bzw. wird als unbedeutend angesehen



#### 4.1.1.2 Kabel, Elektronikschrott

Für den Anteil an Kupfer, der in Form von Kabeln, Blechen und Rohren bzw. Elektro- und Elektronikgeräten im Restmüll vorliegt, konnten nur die Daten von Mayr (2001) verwertet werden. Durch händisches Sortieren in der MBA Hartberg wurden durchschnittlich 2,5 kg Kabel (ca. 50 % Cu) und 25 g Metallrohre aus Nichteisenmetallen je 1.000 kg Restmüll separiert. Mit diesen Angaben errechnet sich ein Anteil zum Gesamtkupfergehalt des Restmülls von ca. 1.000 mg/kg. Die Masse der „Kupferportionen“ (Kupfermenge pro Stück) ist in dieser Kategorie im Bereich von einigen Gramm bis einigen hundert Gramm anzusetzen.

#### 4.1.1.3 „Hintergrundbelastung“

Als „Hintergrundbelastung“ wird das Konzentrationsniveau bezeichnet, das durchschnittlich in den am stärksten vertretenen Materialgruppen im Restmüll wie Organik, Papier und Pappe, Kunststoffverpackungen, Hygieneartikeln und der Feinfraktion zu finden ist. Die Bestimmung des Hintergrunds erfordert verglichen mit der Bestimmung des Anteils aus hochkonzentrierten Gemengeteilen einen geringen Aufwand bei Probenahme und Probenaufbereitung. In Tabelle 4-3 sind Analysenwerte von verschiedenen Sortierfraktionen des Restmülls angegeben. Sie zeigen, dass der größte Teil der Gemengeteile im Restmüll unterdurchschnittliche Stoffkonzentrationen aufweist. Mit Hilfe dieser Daten kann das Verhältnis zwischen „leicht bestimmbar“ (Hintergrund) und „aufwendig bestimmbar“ Anteil (aus hochkonzentrierten Partikeln) der Stofffrachten abgeschätzt werden.

Tabelle 4-3: Stoffkonzentrationen in ausgewählten Fraktionen des Restmülls

| Element        | Staub   | Papier,<br>Pappe                      | Verpackungen<br>Kunststoffe, Verbunde                        | Organik                               | Restmüll         |
|----------------|---|---------------------------------------|--|---------------------------------------|------------------|
| Cd<br>mg/kg TS | 6,5 (Haus) <sup>1</sup><br>0,37 (Straße) <sup>1</sup> | 0,12 <sup>2</sup><br>0,3 <sup>3</sup> | 1,8 (Kunststoff) <sup>2</sup><br>0,27 (Verbund) <sup>2</sup> | 0,53 <sup>2</sup><br>0,2 <sup>3</sup> | 9 <sup>4</sup>   |
| Cu<br>mg/kg TS | 210 (Haus) <sup>1</sup><br>66 (Straße) <sup>1</sup>   | 60 <sup>2</sup><br>15-30 <sup>4</sup> | 30 (Kunststoff) <sup>2</sup><br>40 (Verbund) <sup>2</sup>    | 110 <sup>2</sup><br>5 <sup>3</sup>    | 450 <sup>4</sup> |
| Pb<br>mg/kg TS | 410 (Haus) <sup>1</sup><br>39 (Straße) <sup>1</sup>   | 14 <sup>2</sup><br>15 <sup>3</sup>    | 150 (Kunststoff) <sup>2</sup><br>30 (Verbund) <sup>2</sup>   | 64 <sup>2</sup>                       | 700 <sup>4</sup> |
| Zn<br>mg/kg TS | 720 (Haus) <sup>1</sup><br>110 (Straße) <sup>1</sup>  | 66 <sup>3</sup>                       | -  |                                       | 950 <sup>3</sup> |

<sup>1</sup> Rasmussen et al. (2001)

<sup>2</sup> Bilitewski und Heilmann (1999)

<sup>3</sup> CalRecovery Inc. (1993)

<sup>4</sup> Schachermayer et al. (1995)



## 4.1.2 Provisorische Bilanzen

### 4.1.2.1 Vorbemerkung

Die provisorischen Bilanzen wurden mit dem Ziel erstellt, Planungsgrundlagen für die praktischen Versuche zu schaffen und die Verwertbarkeit der Literaturdaten bezüglich der Unterscheidung verschiedener Anlagentechniken zu prüfen. Alle verfügbaren Daten wurden zum aktuellen Wissensstand verdichtet.

Mit dem Wissen aus dem praktischen Teil sind die provisorischen Bilanzen wenigstens für die Metalle in Frage zu stellen. Die im praktischen Teil ermittelten Durchschnittskonzentrationen der Outputgüter weichen zum Teil erheblich von den Literaturdaten ab. Die aus dem theoretischen Teil der Probenahmeplanung abgeleiteten Einwände (vergl. 3.2.5) gegen die Verlässlichkeit der Literaturdaten (Probleme durch hoch konzentrierte Trägerpartikel) bestätigen sich im praktischen Teil.

Der Stellenwert dieser provisorischen Bilanzen zur Beschreibung der realen Verhältnisse wird nachträglich als niedrig eingestuft, ebenso die Verwertbarkeit für die Versuchsplanung.

**Die provisorischen Bilanzen dürfen daher nicht als Ergebnis dieser Studie bezüglich Stoffbilanzen von mechanischen oder mechanisch-biologischen Anlagen zur Behandlung von Restmüll verstanden werden, sondern sind als Zwischenergebnisse zu betrachten. Es wird ausdrücklich festgehalten, dass die provisorischen Bilanzen aufgrund der verwendeten Konzentrationsangaben aus der Literatur, die in der Regel mit für den Zweck der Stoffbilanzierung ungeeigneten Methoden gemessen wurden, erheblich von den realen Verhältnissen abweichen können.**

Zur Bewertung der einzelnen provisorischen Bilanzen und der zu Grunde gelegten Daten siehe Kapitel 4.5 (Vergleich gemessener Werte untereinander und mit Literaturdaten).

### 4.1.2.2 Allgemeines

#### *Ziel – allgemeine Bilanzen*

Die mechanisch-biologische Behandlung hat unabhängig von Einzelheiten immer das Trennen der selben Stoffgruppen zum Ziel. Es erscheint daher wahrscheinlich, dass für viele Stoffe „allgemeine“ Transferkoeffizienten existieren, die mehr oder weniger auf allen Anlagen zu beobachten sind. Vorweg ist es nicht abwegig zu unterstellen, dass sich ein Stoff generell in heizwertreichen Fraktionen oder anderen Outputgütern anreichert bzw. keine Lenkung eintritt. Mit den Literaturdaten, von welchen nur die wenigsten begründet zu Einzelbilanzen spezieller Verfahrensausprägungen verknüpft werden können, erscheint es sinnvoll, anhand der Zusammenfassung aller Werte über jeweils eine Art von Outputgut zu versuchen, das etwaige allgemeine Verhalten eines Stoffes sichtbar zu machen bzw. zu zeigen, dass keine Verallgemeinerung möglich ist.

#### *Verwendung der Daten*

Wenn nicht anders angegeben, sind als Rechenwerte die Mittelwerte der im Anhang tabellarisch aufgeführten Literaturdaten über die Güterzusammensetzungen verwendet.





*Zusammensetzung der Güter in Abhängigkeit von Input und Anlagentechnik; Zusammenfassung der Literaturdaten pro Outputkategorie*

Bei einigen Mengenelementen (C, P) und Summenparametern (GV, TOC) sind anhand der Literaturdaten Abhängigkeiten der Outputzusammensetzung von Input (Klärschlammzugabe) bzw. Anlagentechnik erkennbar. Für die meisten Parameter insbesondere die Metalle gilt das jedoch nicht. Daher wurden zur Charakterisierung der Güter Mittelwerte aus den verfügbaren Literaturdaten gebildet, ohne Anlagentechnik und Besonderheiten beim Input zu berücksichtigen (Ausnahme Phosphor: Hier sind die Inputfrachten bei Klärschlammzugabe so hoch, dass Rotteoutputs, die mit bzw. ohne Klärschlamm erzeugt wurden, eindeutig unterscheidbar sind). Aus den theoretischen Überlegungen zur Probenahme ist zu folgern, dass unterschiedliche Metallgehalte vor allem bei heizwertreichen Fraktionen, die an verschiedenen Anlagen zu verschiedenen Zeiten gemessen wurden, eher Folge der Probenahmestreuung als tatsächlicher Qualitätsunterschiede zwischen den Materialien sind. D.h. es ist zu erwarten, dass die Unsicherheiten der Literaturdaten (die zudem nur selten angegeben sind) tatsächliche Auswirkungen unterschiedlicher Anlagentechniken auf die Materialqualität überdecken, verschiedene Materialqualitäten daher nicht sichtbar werden. In diesem Fall ist es nicht sinnvoll, aus den vorhandenen Literaturdaten Rückschlüsse auf die Wirkung verschiedener Anlagentechniken zu ziehen, da falsche Schlüsse wahrscheinlich sind. Wichtiger ist, zu prüfen, ob sich an Hand der Literaturdaten überhaupt Unterschiede zwischen den Güterkategorien (z.B. zwischen heizwertreichen Fraktionen und Rottmaterialien allgemein) feststellen lassen, d.h. ob Siebüberläufe z.B. tendenziell andere Zusammensetzungen aufweisen als Siebdurchgänge. Erst dann ist es sinnvoll, auffallend hohe oder niedrige Werte innerhalb einer Kategorie mit speziellen Gegebenheiten der Anlagen in Verbindung zu bringen. In der vorliegenden Situation charakterisiert ein Mittelwert über alle Daten einer Güterkategorie, auch wenn verschiedene Siebschnitte etc. vermischt werden, die einzelnen untersuchten Materialien besser als die zugehörigen Einzelwerte. Auf die Zusammenfassung der Literaturdaten wird in Punkt 4.1.3 bei der Bewertung der provisorischen Bilanzen nochmals eingegangen.

*Auswahl der Güter*

Bei den drei provisorisch bilanzierten Verfahren wurden folgende Outputgüter aufgenommen:

*Tabelle 4-4: Outputgüter bei der provisorischen Bilanzierung*

| <b>Restmüllsplitting</b> |                         | <b>Trockenstabilat</b>                                |
|--------------------------|-------------------------|---|
| <b>aerob</b>             | <b>anaerob</b>          |   |
| heizwertreiche Fraktion  | heizwertreiche Fraktion | Trockenstabilat <sup>®</sup> inkl. Staub <sup>1</sup> |
| Abluft                   | Abluft                  | Abluft  |
| Rotterest                | Gärgas                  | Fe-Metalle  |
| Fe-Schrott               | Abwasser                | NE-Metalle  |
|                          | Rotterest               | Batterien   |
|                          | Fe-Schrott              | Glas  |
|                          |                         | Mineralische Fraktion                                 |

<sup>1</sup> Leichtgut und Staub aus der Dichtentrennung der Schwerfraktion, das dem Trockenstabilat<sup>®</sup> zugemischt wird

Beim Splitting mit anaerober Behandlung ist es nur bedingt möglich, die verschiedenen Verfahren in ein allgemeines Schema mit allgemein benannten Outputgütern zu ordnen. Die eingesetzten Verfahren sind in ihren Abfolgen von mechanischen und biologischen Stufen zu unterschiedlich, Naß- und Trockenvergärung unterscheiden sich zudem in ihren In- und



Outputgütern. Die mechanischen Aufbereitungsschritte zur ersten Abtrennung einer heizwertreichen Fraktion (Zerkleinerung, Siebung) vor einer biologischen Behandlung sind bei Aerob- und Anaerobverfahren jedoch vergleichbar. In Abhängigkeit der Vergärungstechnik werden die durch Sieben erzeugten Feinfraktionen aber verschieden behandelt, ehe sie in die Vergärung gelangen. Bei Nassverfahren ist häufig die Abtrennung einer Schwerfraktion eventuell auch einer weiteren Leichtfraktion vorgeschaltet.

Für das Splitting mit anaerober Behandlung wird daher jeweils anhand grundsätzlicher Überlegungen über die Eigenschaften der Stoffe und Stoffgruppen geprüft, ob die Bilanzen der Aerobverfahren übertragbar sind. Nur wenn Hinweise auf andere Stoffverteilungen bestehen, werden diese beschrieben und - sofern Daten verfügbar sind - quantifiziert.

#### *Stoffliche Zusammensetzung des Restmüll-Inputs*

Soweit verfügbar, wurden Werte indirekter Analysen über die Verbrennungsprodukte von Müllverbrennungsanlagen herangezogen. Diese Werte geben durchschnittliche Konzentrationen großer Müllmengen an und sind deshalb als robuste Mittelwerte anzusehen. Für Elemente, die hauptsächlich über die Produkte der Rauchgasreinigung die Verbrennungsanlagen verlassen, entfällt die Problematik der Probenahme aus dem heterogenen Gutstrom. Elemente, die vornehmlich über die Schlacke ausgetragen werden, sind in der anorganischen Matrix der Schlacke ebenfalls einfacher zu erfassen als im unbehandelten Müll.

#### *Bezugsmengen für Transferkoeffizienten*

Bei einigen Elementen gehen die provisorischen Bilanzen nicht auf, Input und Outputmengen unterscheiden sich stark. Es wurde darauf verzichtet, durch Abschätzungen oder statistische Methoden (Kleinstquadratmethode, wie beschrieben bei Bauer, 1995) jeweils einen Bilanzgleichgewicht herzustellen, weil keine Möglichkeit besteht die Richtigkeit einer derart ausgeglichenen Bilanz zu prüfen. Es wird angegeben, welche Bezugsbasis (Input oder Output) bei der Berechnung der Transferkoeffizienten im Einzelfall verwendet wurde.

#### 4.1.2.3 Güterbilanzen

##### *Splitting aerob*

In Tabelle 4-5 sind mittlere Massenbilanzen für 13 europäische Anlagen in drei Gruppen abgestufter Siebschnitte dargestellt. Angegeben ist der Output in kg bei 1.000 kg Input. Die detaillierten Angaben dazu finden sich tabellarisch im Anhang (Tabelle 11-1). Anlagen ohne Siebung bzw. <35 mm Siebschnitt, Anlagen ohne biologische Behandlung oder mit biologischer Trocknung wurden nicht aufgenommen.

*Tabelle 4-5: MBA-Massenbilanzen in Gruppen unterschiedlicher Siebschnitte: Output in kg bei 1.000 kg Input (durch Rundung weichen die Summen von 1.000 kg ab)*

| Outputgut      | 100 mm   |     | 50-80 mm |     | <50 mm   |     |
|----------------|----------|-----|----------|-----|----------|-----|
|                | Mittelw. | s   | Mittelw. | s   | Mittelw. | s   |
| heizwertr. Fr. | 300      | 130 | 340      | 100 | 440      | 90  |
| Rotterest      | 420      | 110 | 360      | 180 | 290      | 90  |
| Fe-Schrott     | 18       | 7   | 21       | 15  | 18       | 11  |
| Rotteverlust   | 280      | 170 | 300      | 210 | 280      | 130 |



Die Streuungen innerhalb der Gruppen rühren nicht daher, dass innerhalb der Gruppen eine Abhängigkeit des Massentransfers vom Siebschnitt festzustellen wäre. Die hohen Streuungen innerhalb der Gruppen zeigen viel mehr, dass der Trend zum höheren Massentransfer in die Rottefraktion bei größerem Siebschnitt von einer Fülle anderer Faktoren überlagert wird. Beispielsweise ist die jeweilige mechanische Beanspruchung des Materials bei Zerkleinerung und Siebung (Güte der selektiven Zerkleinerung heizwertarmer Bestandteile) bzw. eine intensive Homogenisierung vor der mechanischen Aufbereitung (z.B. Dano-Trommel) ebenso von Bedeutung wie der Feinanteil des Inputs. Die mechanische Belastung, der das Material abhängig von der Anlagentechnik und Fahrweise ausgesetzt ist, und der Feinanteil des Inputs sind aus den Angaben in der Literatur nicht ersichtlich. (Die große Bedeutung der Siebtechnik zeigt der Vergleich der gemessenen Güter- und GV-Bilanzen von Wien und Kirchdorf.

Für die 13 aufgenommenen Anlagen ergeben sich ohne Gruppierung folgende Gesamtmittelwerte:

*Tabelle 4-6: MBA-Massenbilanzen*

| <b>Outputgut</b> | <b>Mittelw.</b> | <b>Min</b> | <b>Max</b> | <b>s</b> |
|------------------|-----------------|------------|------------|----------|
| Heizwertr. Fr.   | 330             | 90         | 500        | 112      |
| Rotterest        | 380             | 200        | 620        | 132      |
| Fe-Schrott       | 20              | 8          | 42         | 10       |
| Rotteverlust     | 270             | 140        | 500        | 114      |

Von NE-Schrott-Mengen liegen kaum Daten vor. Etwa 10 kg/t Input könnten abgetrennt werden (Maleschitz, 2001). Dolle et al. (2000) geben 1,2 % abgetrennten NE-Schrott bei einer Aufbereitung von Hausmüll zur Verbrennung an.

Die Mittelwerte aus Tabelle 4-6 werden als Rechenwerte für die Güterbilanz allen provisorischen Bilanzen zu Grunde gelegt.

### *Splitting anaerob*

Es ist aufgrund der verschiedenen Verfahrenstypen nicht möglich, eine generelle Massenbilanz für das Restmüllsplitting mit anaerober biologischer Behandlung zu erstellen. Zur Abtrennung heizwertreicher Fraktionen werden in der Regel die selben Techniken verwendet wie bei Verfahren mit aerober Behandlung. Für die Transferkoeffizienten der heizwertreichen Fraktionen sind daher zwischen Aerob- und Anaerobverfahren keine Unterschiede zu erwarten. Als Gärgas-Output können unabhängig vom Verfahren ca. 50-120 kg pro Tonne Restmüll-Input angesetzt werden (Ibrahim, 1998; Six, 1999; Woelders et al., 1999; Soye, 2001). Für die festen Outputs ist bei der Trockenvergärung die Bilanz des aeroben Splittings als Näherung verwendbar, ebenso für die Naßvergärung, wenn netto kein Abwasser anfällt und keine andere feste Fraktion als der Gärrest (bzw. Rotterest einer angeschlossenen Aerobbehandlung) entsteht. Wird vor dem Gärprozess aus der Feinfraktion eine Schwerfraktion herausgetrennt, ist dafür mit einer Menge von ca. 70 kg pro Tonne Restmüllinput zu rechnen (Ibrahim, 1998). Analysendaten über die stoffliche Zusammensetzung solcher Schwerfraktionen sind in der Literatur nicht zu finden.



### Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

Die Massenbilanz der Trockenstabilat<sup>®</sup>-Anlage Rennerod wurde von Puchelt (2000) übernommen.

#### 4.1.2.4 Wasser

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-2)

Die Wasserbilanz stellt die Nettoflüsse dar. Wasser, das zur Befeuchtung des Materials während der Rotte eingebracht wird und wieder verdunstet, bleibt unberücksichtigt. Der Fluss über den Fe-Schrott wird nicht ausgewiesen, da er selbst unter Annahme unrealistisch hoher Wassergehalte unbedeutend ist. Der Output übertrifft den Input aufgrund der Wasserbildung beim biologischen Abbau im Rotteprozess. Durch Übertragen der Ergebnisse von Pöpel (1964) und Ramke (1991) auf die dargestellte Güterbilanz lässt sich die Wasserneubildung mit ca. 35 kg abschätzen. Der Netto-Wasserverlust als Rotteverlust wurde durch Bilanzausgleich (unter Berücksichtigung der neugebildeten Wassermenge) errechnet. Für den Wassergehalt des Restmülls wurde der von Schachermayer et al. (1995) auf der MVA Spittelau bestimmte Wert verwendet, da dieser auf Grund seiner Bestimmung über große Mengen Restmüll als sehr zuverlässig erscheint. Für die heizwertreiche Fraktion werden 27 % als Rechenwert für den Wassergehalt auf Basis der Literaturwerte in Tabelle 11-2 festgelegt. Wird das Rottematerial am Ende der Rotte „trockengefahren“, um die Tonnage zu verringern, verschiebt sich der Transfer des Wassers zugunsten des Rotteverlusts. Eine Halbierung des Wassergehalts im Rotterest ist denkbar.

Die Wasserbilanz des aeroben Splittings kann als Näherung für Splittingverfahren mit angeschlossener Trockenvergärung verwendet werden. Eine generelle Bilanz für Naßvergärungsverfahren kann aufgrund der verschiedenartigen Verfahrenstechniken nicht angegeben werden. Üblicherweise wird ein abwasserfreier Betrieb angestrebt, indem Prozesswässer der Vergärung zum Teil im Kreis geführt bzw. angeschlossenen Rotteprozessen zugeführt werden.

*Tabelle 4-7: Provisorische Wasser-Bilanz, Splitting aerob*

|              | Input              |                    |                | Output       |                    |                    |                |
|--------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------|--------------------|--------------------|----------------|
|              | Güterfluss<br>[kg] | Konz.<br>[g/kg FS] | Fracht<br>[kg] |              | Güterfluss<br>[kg] | Konz.<br>[g/kg FS] | Fracht<br>[kg] |
| Restmüll     | 900                | 300                | 270            | Heizw. Fr.   | 330                | 270                | 89             |
| Klärschlamm  | 100                | 700                | 70             | Rotterest    | 380                | 320                | 120            |
|              |                    |                    |                | Fe-Schrott   | 20                 | -                  | 0              |
|              |                    |                    |                | Rotteverlust | 270                |                    | 170*           |
| <b>Summe</b> | 1.000              |                    | 340            | <b>Summe</b> | 1.000              |                    | 380            |

\* inkl. 35 kg, die bei der Rotte neu gebildet werden



Tabelle 4-8 Provisorische Wasser-Bilanz, Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

| Input        |            |           |        | Output                       |            |           |        |
|--------------|------------|-----------|--------|------------------------------|------------|-----------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |                              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 1.000      | 300       | 300    | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 120       | 68     |
|              |            |           |        | Fe-Schrott                   | 40         | -         | 0      |
|              |            |           |        | Glas                         | 40         | -         | 0      |
|              |            |           |        | Mineral. Fr.                 | 40         | -         | 0      |
|              |            |           |        | NE-Schrott                   | 10         | -         | 0      |
|              |            |           |        | Batterien                    | 0,5        | -         | 0      |
|              |            |           |        | Rotteverlust                 | 300        |           | 240*   |
| <b>Summe</b> | 1.000      |           | 300    | <b>Summe</b>                 | 1.000      |           | 310    |

\* inkl. ca. 10 kg, die bei der biologischen Trocknung neu gebildet werden

Die Fraktionen neben dem Trockenstabilat<sup>®</sup> transportieren keine nennenswerten Mengen an Wasser und werden in der Wasserbilanz nicht berücksichtigt. Der Wassermenge, die bei der biologischen Trocknung neu gebildet wird, kommt geringe Bedeutung zu (ca. 10 % des Massenverlustes während der Trocknung durch biologischen Abbau (Puchelt, 2000).

Tabelle 4-9: Transferkoeffizienten für Wasser errechnet aus den provisorischen Bilanzen

|                               | Splitting aerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,24            |                              |
| Trockenstabilat <sup>®1</sup> |                 | 0,22                         |
| Rotterest                     | 0,32            |                              |
| Fe-Schrott                    | -               | -                            |
| Glas                          |                 | -                            |
| Mineral. Fr.                  |                 | -                            |
| NE-Schrott                    |                 | -                            |
| Batterien                     |                 | -                            |
| Rotteverlust                  | 0,44            | 0,78                         |

<sup>1</sup> inkl. Staub

Die Bezugsmengen der TK für Wasser beinhalten die durch biologische Vorgänge gebildeten Mengen.

Die Transferkoeffizienten des aeroben Splittings sind auf Trockenvergärungsverfahren und Verfahren mit angeschlossener aerober Behandlung übertragbar.



#### 4.1.2.5 Asche

(Datenquellen: Tabelle 11-4 und Tabelle 11-3)

In der Literatur werden meist Werte für den Glühverlust nicht für den Aschegehalt angegeben. Bei der Erstellung der provisorischen Aschenbilanzen wurden daher die Glühverlustwerte mit berücksichtigt (mit Glühverlust % + Asche % = 100 %).

Bei Asche und Glühverlust ist, anders als bei Metallen, die pauschale Verwendung von Mittelwerten zur Charakterisierung der Zusammensetzung der Güter eine Vereinfachung, die die in den Literaturdaten sichtbare Abhängigkeit der Aschegehalte von der Anlagentechnik (Zerkleinerung, Siebschnitt) ignoriert. Die Bilanz für das aerobe Splitting geht mit den pauschalen Werten dennoch auf. Die für die Versuchsplanung notwendige Genauigkeit der Werte ist in jedem Fall ausreichend.

*Tabelle 4-10: Provisorische Asche-Bilanz, Splitting aerob*

|              | Input      |           |        | Output       |           |        |     |
|--------------|------------|-----------|--------|--------------|-----------|--------|-----|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht | Güterfluss   | Konz.     | Fracht |     |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   | [kg]         | [g/kg FS] | [kg]   |     |
| Restmüll     | 900        | 270       | 240    | Heizw. Fr.   | 330       | 190    | 64  |
| Klärschlamm  | 100        | 110       | 11     | Rotterest    | 380       | 470    | 180 |
|              |            |           |        | Fe-Schrott   | 20        | 800    | 15  |
|              |            |           |        | Rotteverlust | 270       |        | 0   |
| <b>Summe</b> | 1.000      |           | 250    | <b>Summe</b> | 1.000     |        | 260 |

Der Aschegehalt des Restmülls ist aus dem Glühverlustwert berechnet. Für die heizwertreiche Fraktion und den Rotterest wurden jeweils alle Werte für Glühverlust und Asche herangezogen. Für den Fe-Schrott wird aus den Daten in Tabelle 11-3 ein Rechenwert für den Aschegehalt von 80 % FS festgelegt.

Die Aschebilanz für das anaerobe Splitting unterscheidet sich dann von der Aerobvariante, wenn vor der Vergärung Schwerfraktionen abgetrennt werden. Die Ableitung von Abwässern sollte keinen entscheidenden Einfluss auf die Aschenbilanz haben. Über Trocken- und Glührückstände von Abwässern oder Prozesswässern liegen keine Daten vor. Der Austrag an Aschebildnern mit dem Abwasser ist aber auf wenige % einzugrenzen: In Frage kommen lösliche Salze und suspendierte anorganische Partikel als Träger. Aschegehalte über einigen % (inkl. aufgeschlämmte anorganische Stoffe) sind unrealistisch. D.h., mit Aschenaustragen über 5 % ist erst zu rechnen, wenn die Abwassermasse etwa gleich groß ist wie die Restmüll-Inputmenge. (dagegen: 340 kg Wasser/t Restmüll beim BRV-Verfahren, MBA Quarzbichl: Soyez, 2001). Über das Gärgas kann nur Schwefel (als Aschebildner in Form von Sulfat im Gärinput) die Vergärung verlassen. Allerdings tritt der Schwefel als H<sub>2</sub>S im Gärgas nicht als Aschebildner auf, weil er in Abwesenheit von basischen Verbindungen zu gasförmigem SO<sub>2</sub> verbrennt.

Für Trockenstabilat<sup>®</sup> wird ein Asche-Gehalt von 15-20 % (FS) angegeben (aus Zeschmar-Lahl et al., 2000). Summiert man diese Menge mit den restlichen mineralischen bzw. metallischen Fraktionen, so geht die Bilanz um ca. 20 % nicht auf. Die Asche-Gehalte der mineralischen Fraktionen (Glas, min. Fraktion) der NE-Fraktion und der Batterien wurden



vereinfachend mit 100 % (FS) angenommen. Zum Bilanzausgleich müsste der Aschegehalt im Restmüll entweder 21 % (FS) betragen, oder die Mengen der mineralischen Output-Fractionen müssten vermehrt bzw. der Gehalt im Trockenstabilat<sup>®</sup> auf ca. 25 % (FS) erhöht werden.

Tabelle 4-11: Provisorische Asche-Bilanz, Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

|              | Input              |                    |                | Output                       |                    |                |     |
|--------------|--------------------|--------------------|----------------|------------------------------|--------------------|----------------|-----|
|              | Güterfluss<br>[kg] | Konz.<br>[g/kg FS] | Fracht<br>[kg] | Güterfluss<br>[kg]           | Konz.<br>[g/kg FS] | Fracht<br>[kg] |     |
| Restmüll     | 1.000              | 270                | 270            | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570                | 180            | 100 |
|              |                    |                    |                | Fe-Schrott                   | 40                 | 900            | 36  |
|              |                    |                    |                | Glas                         | 40                 | 1.000          | 40  |
|              |                    |                    |                | Mineral. Fr.                 | 40                 | 1.000          | 40  |
|              |                    |                    |                | NE-Schrott                   | 10                 | 1.000          | 10  |
|              |                    |                    |                | Batterien                    | 0,5                | 1.000          | 0,5 |
|              |                    |                    |                | Rotteverlust                 | 300                |                | 0   |
|              |                    |                    |                |                              |                    |                |     |
| <b>Summe</b> | 1.000              |                    | 270            | <b>Summe</b>                 | 1.000              |                | 230 |

Tabelle 4-12: Transferkoeffizienten für Asche errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Output)

|                               | Splitting aerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,25            |                              |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                 | 0,44                         |
| Rotterest                     | 0,69            |                              |
| Fe-Schrott                    | 0,059           | 0,16                         |
| Glas                          |                 | 0,18                         |
| Mineral. Fr.                  |                 | 0,18                         |
| NE-Schrott                    |                 | 0,044                        |
| Batterien                     |                 | 0,0022                       |
| Rotteverlust                  | 0               | 0                            |

\* inkl. Staub

Die Transferkoeffizienten des aeroben Splittings sind auf Trockenvergärungsverfahren und Verfahren ohne Abtrennung einer Schwerfraktion vor der Vergärung übertragbar.



#### 4.1.2.6 Glühverlust

(Datenquellen: Tabelle 11-4 und Tabelle 11-3)

Die Glühverlust-Bilanz ist umgekehrtes Abbild der Asche-Bilanz. Beim aeroben Splitting wurde der Rotteverlust aber gegensätzlich zur Aschebilanz durch Bilanzausgleich errechnet.

*Tabelle 4-13: Provisorische GV-Bilanz, Splitting aerob*

| Input        |            |           |        | Output       |            |           |        |
|--------------|------------|-----------|--------|--------------|------------|-----------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 900        | 430       | 390    | Heizw. Fr.   | 330        | 560       | 180    |
| Klärschlamm  | 100        | 190       | 19     | Rotterest    | 380        | 210       | 81     |
|              |            |           |        | Fe-Schrott   | 20         | 200       | 3,8    |
|              |            |           |        | Rotteverlust | 270        |           | 140    |
| <b>Summe</b> | 1.000      |           | 410    | <b>Summe</b> | 1.000      |           | 410    |

Beim Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren wurde der GV des Trockenstabilat<sup>®</sup> aus dem Asche-Gehalt errechnet, der Massenverlust während der Trocknung durch Substanzabbau (nicht Wasserverlust) beträgt ca. 3 % des Restmüll-Inputs (Puchelt, 2000). In Übereinstimmung mit der Asche-Bilanz ergibt sich ein Überhang beim Output.

*Tabelle 4-14: Provisorische GV-Bilanz, Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren*

| Input        |            |           |        | Output                       |            |           |        |
|--------------|------------|-----------|--------|------------------------------|------------|-----------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |                              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 1.000      | 430       | 430    | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 820       | 470    |
|              |            |           |        | Fe-Schrott                   | 40         | 100       | 4      |
|              |            |           |        | Glas                         | 40         | 0         | 0      |
|              |            |           |        | Mineral. Fr.                 | 40         | 0         | 0      |
|              |            |           |        | NE-Schrott                   | 10         | 0         | 0      |
|              |            |           |        | Batterien                    | 0,5        | 0         | 0      |
|              |            |           |        | Rotteverlust                 | 300        |           | 30     |
| <b>Summe</b> | 1.000      |           | 430    | <b>Summe</b>                 | 1.000      |           | 500    |





Tabelle 4-15: Transferkoeffizienten für GV errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Output)

|                               | Splitting aerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,45            |                              |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                 | 0,93                         |
| Rotterest                     | 0,20            |                              |
| Fe-Schrott                    | 0,0094          | 0,0079                       |
| Glas                          |                 | 0                            |
| Mineral. Fr.                  |                 | 0                            |
| NE-Schrott                    |                 | 0                            |
| Batterien                     |                 | 0                            |
| Rotteverlust                  | 0,35            | 0,059                        |

\* inkl. Staub

Die Transferkoeffizienten des aeroben Splittings sind prinzipiell auf Trockenvergärungsverfahren und Verfahren ohne Abtrennung einer Schwerfraktion vor der Vergärung übertragbar. Berücksichtigt werden muss, dass sich aber der Rotteverlust in Gärgas und Rotteverlust (bzw. nur Gärgas, wenn keine aerobe Nachbehandlung erfolgt) teilt. Mit den 50-120 kg Gärgas pro 1.000 kg Restmüll ist eine Verschiebung von 50 bis fast 100 % des Transfers von Rotteverlust zu Gärgas möglich.

#### 4.1.2.7 Organischer Kohlenstoff TOC

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-5)

Für die Festlegung des TOC-Gehalts von Restmüll werden die Kohlenstoffgehalte, die von Schachermayer et al. (1995) an der MVA Spittlau bestimmt wurden, mit berücksichtigt (unter der Annahme, dass nur unbedeutende Anteile der Kohlenstofffracht als TIC vorliegen). Anhand dieser Daten wird der Rechenwert mit 18 % FS festgelegt.

Die TOC-Bilanz wird über den Rotteverlust rechnerisch ausgeglichen. Die Angabe des Rotteverlusts als TOC ist allerdings irreführend: Tatsächlich wird der TOC im Prozess „Biologische Behandlung“ größtenteils transformiert und in Form von CO<sub>2</sub> abgegeben. Etwa 1 kg/t Input wird tatsächlich als TOC in Form flüchtiger organischer Verbindungen ins Abgas (Rohgas) transferiert (Lahl und Zeschmar-Lahl, 2001).

Tabelle 4-16: Provisorische TOC-Bilanz, Splitting aerob

|              | Input      |           |        | Output       |            |           |        |
|--------------|------------|-----------|--------|--------------|------------|-----------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 900        | 180       | 160    | Heizw. Fr.   | 330        | 290       | 97     |
| Klärschlamm  | 100        | 100       | 10     | Rotterest    | 380        | 130       | 50     |
|              |            |           |        | Fe-Schrott   | 20         | 55        | 1,1    |
|              |            |           |        | Rotteverlust | 270        |           | 31     |
| <b>Summe</b> | 1.000      |           | 170    | <b>Summe</b> | 1.000      |           | 170    |



Die Flüsse der Feststoffe aus der Bilanz des aeroben Splittings sind auf Trockenvergärungsverfahren und Verfahren ohne Abtrennung einer Schwerfraktion vor der Vergärung übertragbar. Bei den gasförmigen Outputgütern kommt es zu einer Verschiebung von Rotteverlust zu Gärgas. Mit den angegebenen Gasmengen von 50-120 kg pro 1.000 kg Input können 20-50 kg TOC mit dem Gärgas ausgetragen werden.

Die TOC-Bilanz des Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahrens zeigt einen Überhang im Output. Zum Ausgleich würde eine TOC-Konzentration im Restmüll von 22 % FS dem unveränderten Output bzw. eine TOC-Konzentration von 30 % FS im Trockenstabilat<sup>®</sup> dem unveränderten Input genügen. Der TOC-Gehalt des Fe-Schrotts ist eine Schätzung: 10 % brennbare Verunreinigungen mit gleichem TOC Gehalt wie Trockenstabilat<sup>®</sup>. Der TOC-Verlust während der biologischen Trocknung wurde in Anlehnung an Pöpel (1964) und Ramke (1991) abgeschätzt.

Tabelle 4-17: Provisorische TOC-Bilanz, Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

| Input        |            |           |        | Output                       |            |           |        |
|--------------|------------|-----------|--------|------------------------------|------------|-----------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |                              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 1.000      | 180       | 180    | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 360       | 210    |
|              |            |           |        | Fe-Schrott                   | 40         | 36        | 1,4    |
|              |            |           |        | Glas                         | 40         | 0         | 0      |
|              |            |           |        | Mineral. Fr.                 | 40         | 0         | 0      |
|              |            |           |        | NE-Schrott                   | 10         | 0         | 0      |
|              |            |           |        | Batterien                    | 0,5        | 0         | 0      |
|              |            |           |        | Rotteverlust                 | 300        |           | 10     |
| <b>Summe</b> | 1.000      |           | 180    | <b>Summe</b>                 | 1.000      |           | 220    |

Tabelle 4-18: Transferkoeffizienten für TOC errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Output)

|                               | Splitting aerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,56            |                              |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                 | 0,95                         |
| Rotterest                     | 0,29            |                              |
| Fe-Schrott                    | 0,0064          | 0,0066                       |
| Glas                          |                 | 0                            |
| Mineral. Fr.                  |                 | 0                            |
| NE-Schrott                    |                 | 0                            |
| Batterien                     |                 | 0                            |
| Rotteverlust                  | 0,15            | 0,046                        |

\* inkl. Staub

Die Transferkoeffizienten des aeroben Splittings sind auf das anaerobe Splitting übertragbar, wenn berücksichtigt wird, dass der Fluss über den Rotteverlust zur Hälfte bis zur Gänze auf das Gärgas verlagert wird.



#### 4.1.2.8 Anorganischer Kohlenstoff TIC

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-6)

Für TIC konnte wegen der fehlenden Konzentrationsangaben für Restmüll und heizwertreiche Fraktionen keine provisorische Bilanz erstellt werden.

Das Verhältnis von TOC zu TIC im Klärschlamm wurde mit 7:1 angenommen. Von Winkler (2001) wird dieses Verhältnis als sehr variabel bezeichnet (abhängig vom Kalkzusatz) und mit 5:1 bis 10:1 gelegentlich auch darüber beziffert. Es ist davon auszugehen, dass der gesamte TIC des Klärschlammes und der Großteil des Restmüll-TIC in den Rotterest gelangen (TIC des Restmülls ist vor allem als Bestandteil mineralischer Teilchen aber auch in Form von Kalk-Füllstoffen von Kunststoffartikeln zu erwarten.). Unter der Annahme, dass der TIC-Gehalt des Restmülls deutlich unter dem des Klärschlammes liegt, ist die Inputfracht vor allem von der Klärschlammzumischung abhängig. Möglicherweise ist das der Grund für die starke Variabilität der Literaturangaben über TIC-Gehalte von Rotteresten. Für die TIC-Bilanz des anaeroben Splittings fehlen Literaturdaten. Es gibt andererseits keine Hinweise, die gravierende Unterschiede zwischen Aerob- und Anaerobverfahren erwarten lassen.

Tabelle 4-19: Ansätze zur provisorischen TIC-Bilanz, Splitting aerob

|              | Input      |           |        | Output       |           |        |
|--------------|------------|-----------|--------|--------------|-----------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht | Güterfluss   | Konz.     | Fracht |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   | [kg]         | [g/kg FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 900        | -         | -      | Heizw. Fr.   | 330       | -      |
| Klärschlamm  | 100        | 21        | 2,1    | Rotterest    | 380       | 19     |
|              |            |           |        | Fe-Schrott   | 20        | -      |
|              |            |           |        | Rotteverlust | 270       | 0      |
| <b>Summe</b> | 1000       |           | >2,1   | <b>Summe</b> | 1000      | >7,2   |

- keine Literaturdaten verfügbar

Von den Output-Gütern des Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahrens liegen keine TIC-Angaben vor, eine provisorische Bilanzierung ist daher nicht möglich. Es ist aber davon auszugehen, dass TIC-haltiges Material (Sand, Steine) hauptsächlich in die mineralische Fraktion gelangt.

#### 4.1.2.9 Kohlenstoff TC

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-7)

Für die Kohlenstoffbilanz wurden sowohl Literaturwerte für Gesamtkohlenstoff als auch Summen aus TOC und TIC verwendet. Für Restmüll wurde 18 % FS als Rechenwert festgelegt unter der Annahme, dass TIC im Restmüll im Vergleich zu TOC keine Bedeutung hat. Als Rechenwert für den TC-Gehalt des Klärschlammes wurde der TOC-Gehalt mit einem Zuschlag von 15 % für TIC versehen. Für den TC-Gehalt des Rotterests wurde ein gemeinsamer Mittelwert aus den TC-Werten und der Summe aus TIC und TOC-Werten gebildet.

Die TC-Bilanz für das aerobe Splitting wurde über den Rotteverlust rechnerisch ausgeglichen. Beim anaeroben Splitting werden mit dem Gärgas ca. 30 kg TC pro Tonne Restmüllinput ausgetragen (Annahme: 70 kg Gas entspricht ca. 60 m<sup>3</sup> pro Tonne Restmüll).



Tabelle 4-20: Provisorische TC-Bilanz, Splitting aerob

|              | Input      |           |        | Output       |            |           |        |
|--------------|------------|-----------|--------|--------------|------------|-----------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 900        | 180       | 160    | Heizw. Fr.   | 330        | 290       | 97     |
| Klärschlamm  | 100        | 120       | 12     | Rotterest    | 380        | 150       | 56     |
|              |            |           |        | Fe-Schrott   | 20         | 58        | 0,11   |
|              |            |           |        | Rotteverlust | 270        |           | 19     |
| <b>Summe</b> | 1.000      |           | 170    | <b>Summe</b> | 1.000      |           | 170    |

Wegen der fehlenden TIC-Daten für das Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren kann dafür keine provisorische TC-Bilanz erstellt werden. Es ist aber abschätzbar, dass der TIC-Anteil der TC-Bilanz unbedeutend ist und sich innerhalb der Unsicherheiten der provisorischen TOC-Bilanz bewegt.

Tabelle 4-21: Transferkoeffizienten für TC errechnet aus der provisorischen Bilanz (bezogen auf Summe Output)

|              | Splitting aerob |
|--------------|-----------------|
| Heizw. Fr.   | 0,56            |
| Rotterest    | 0,32            |
| Fe-Schrott   | 0,0006          |
| Rotteverlust | 0,12            |

Für das Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren können die Transferkoeffizienten für TOC als Näherungen verwendet werden. Die anaeroben Splittingverfahren unterscheiden sich von den Aerobverfahren durch die Verschiebung des TC-Outputs von Rotteverlust zu Gärgas im Ausmaß von 50 bis beinahe 100 %.

#### 4.1.2.10 Brennwert $H_o$

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-8)

Bei den Brennwert-Bilanzen bleiben die Beiträge (Verbrennungsenthalpien) der Metalle (Al, Fe) unberücksichtigt. Beim aeroben Splitting wurde der Rotteverlust aus dem Bilanzausgleich errechnet.

Beim anaeroben Splitting wird unter der Bedingung, dass 60 m<sup>3</sup> Gas mit einem Methangehalt von 60 % aus 1.000 kg Input gebildet werden, eine  $H_o$ -Fracht von ca. 1.300 MJ im Gärgas auf Kosten des Rotteverlusts transportiert (auch ohne aerobe Nachbehandlung treten während der Gasbildung  $H_o$ -Verluste auf).

Tabelle 4-22: Provisorische  $H_o$ -Bilanz, Splitting aerob

| Input        |            |            | Output |              |            |            |        |
|--------------|------------|------------|--------|--------------|------------|------------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |
|              | [kg]       | [MJ/kg FS] | [MJ]   |              | [kg]       | [MJ/kg FS] | [MJ]   |
| Restmüll     | 900        | 10         | 9.000  | Heizw. Fr.   | 330        | 16         | 5.200  |
| Klärschlamm  | 100        | 4,7        | 470    | Rotterest    | 380        | 5,8        | 2.200  |
|              |            |            |        | Fe-Schrott   | 20         | -          | -      |
|              |            |            |        | Rotteverlust | 270        |            | 2.100  |
| <b>Summe</b> | 1.000      |            | 9.500  | <b>Summe</b> | 1.000      |            | 9.500  |

Der Brennwert von Trockenstabilat<sup>®</sup> wurde aus dem Heizwert, Wasser- und Wasserstoffgehalt (Daten aus Zeschmar-Lahl et al., 2000) hochgerechnet. Für die mineralische Fraktion und Glas-Fraktion wurde der Brennwert mit Null angenommen (<3 % GV der mineralischen Fraktion), die Metallfraktionen bleiben unberücksichtigt.

Tabelle 4-23: Provisorische  $H_o$ -Bilanz, Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

| Input        |            |            | Output |                              |            |            |        |
|--------------|------------|------------|--------|------------------------------|------------|------------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |
|              | [kg]       | [MJ/kg FS] | [MJ]   |                              | [kg]       | [MJ/kg FS] | [MJ]   |
| Restmüll     | 1.000      | 10         | 10.000 | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 17,5       | 10.000 |
|              |            |            |        | Fe-Schrott                   | 40         | -          | -      |
|              |            |            |        | Glas                         | 40         | 0          | 0      |
|              |            |            |        | Mineral. Fr.                 | 40         | 0          | 0      |
|              |            |            |        | NE-Schrott                   | 10         | -          | -      |
|              |            |            |        | Batterien                    | 0,5        | -          | -      |
|              |            |            |        | Rotteverlust                 | 300        |            | 510    |
| <b>Summe</b> | 1000       |            | 10.000 | <b>Summe</b>                 | 1.000      |            | 10.500 |

Tabelle 4-24: Transferkoeffizienten für  $H_o$  errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Output)

|                               | Splitting aerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,55            |                              |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                 | 0,95                         |
| Rotterest                     | 0,23            |                              |
| Fe-Schrott                    | -               | -                            |
| Glas                          |                 | 0                            |
| Mineral. Fr.                  |                 | 0                            |
| NE-Schrott                    |                 | -                            |
| Batterien                     |                 | -                            |
| Rotteverlust                  | 0,22            | 0,049                        |

\* inkl. Staub

Die Transferkoeffizienten des aeroben Splittings sind auf das anaerobe Splitting übertragbar, sofern der Wert des Rotteverlust geteilt wird in Gärgas und Rotteverlust. Das Teilungsverhältnis kann mit ca. 1:1 veranschlagt werden.



## 4.1.2.11 Chlor

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-9)

Die provisorische Chlorbilanz geht nicht auf. Die Datenlage bezüglich Chlor-Gesamtgehalte von Rotteresten ist aber schlecht. Bei nicht abwasserfreien Verfahrenskonzeptionen sind erhebliche Chlorid-Flüsse über Abflüsse aus dem Rottebereich zu erwarten, deren Bedeutung nicht abgeschätzt werden kann. Der Chlor-Austrag über die Abluft ist mit  $<1$  g/t Input zu veranschlagen. Dieser Bereich ergibt die Addition der Chlor-Frachten aus verschiedenen chlorierten organischen Verbindungen mit den Daten von Angerer (1999). Für den Rechenwert bei der heizwertreichen Fraktion wurde ein gewichteter Mittelwert gebildet (der Wert von Lahl, 2001 ist ein Mittelwert aus 95 Einzelwerten und wurde dementsprechend gewichtet)

Tabelle 4-25: Provisorische Cl-Bilanz, Splitting aerob

|              | Input              |                    |                |              | Output             |                    |                |
|--------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------|--------------------|--------------------|----------------|
|              | Güterfluss<br>[kg] | Konz.<br>[g/kg FS] | Fracht<br>[kg] |              | Güterfluss<br>[kg] | Konz.<br>[g/kg FS] | Fracht<br>[kg] |
| Restmüll     | 900                | 5,6                | 5,1            | Heizw. Fr.   | 330                | 0,56               | 1,8            |
| Klärschlamm  | 100                | 0,19               | 0,19           | Rotterest    | 380                | 0,20               | 0,75           |
|              |                    |                    |                | Fe-Schrott   | 20                 | -                  | -              |
|              |                    |                    |                | Abluft       | 270                |                    | $<0,001$       |
| <b>Summe</b> | 1000               |                    | 5,2            | <b>Summe</b> | 1000               |                    | 2,6            |

Auch bei der Bilanz des Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahrens klaffen In- und Output deutlich auseinander. Der Bilanzausgleich bei unverändertem Input würde dem Trockenstabilat<sup>®</sup> etwa die doppelte Chlor-Konzentration zuschreiben, die Fracht auf die anderen Fraktionen zu verteilen erscheint unrealistisch.

Tabelle 4-26: Provisorische Cl-Bilanz, Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

|              | Input              |                    |                |                              | Output             |                    |                |
|--------------|--------------------|--------------------|----------------|------------------------------|--------------------|--------------------|----------------|
|              | Güterfluss<br>[kg] | Konz.<br>[g/kg FS] | Fracht<br>[kg] |                              | Güterfluss<br>[kg] | Konz.<br>[g/kg FS] | Fracht<br>[kg] |
| Restmüll     | 1000               | 5,6                | 5,6            | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570                | 0,44               | 2,5            |
|              |                    |                    |                | Fe-Schrott                   | 40                 | -                  | -              |
|              |                    |                    |                | Glas                         | 40                 | -                  | -              |
|              |                    |                    |                | Mineral. Fr.                 | 40                 | 0,050              | 0,020          |
|              |                    |                    |                | NE-Schrott                   | 10                 | -                  | -              |
|              |                    |                    |                | Batterien                    | 0,5                | -                  | -              |
|              |                    |                    |                | Rotteverlust                 | 300                |                    | $<10^{-3}$     |
| <b>Summe</b> | 1000               |                    | 5,6            | <b>Summe</b>                 | 1000               |                    | 2,5            |



Tabelle 4-27: Transferkoeffizienten für Cl errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Input)

|                               | Splitting aerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,36            |                              |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                 | 0,45                         |
| Rotterest                     | 0,12            |                              |
| Fe-Schrott                    | -               | -                            |
| Glas                          |                 | -                            |
| Mineral. Fr.                  |                 | 0,004                        |
| NE-Schrott                    |                 | -                            |
| Batterien                     |                 | -                            |
| Rotteverlust                  | $<10^{-4}$      | $<10^{-4}$                   |

\* inkl. Staub

Der Input-Bezug der Transferkoeffizienten wurde aus folgenden Gründen gewählt:

Daten aus der MVA über den Input sind sehr robust. Probenahme- und analysentechnisch sind wesentlich geringere Fehler zu erwarten als im heterogenen MBA-Output (Teil der Fracht als PVC-Teile). Bei den vorliegenden Daten über Rottereste ist unklar, ob Chloride über Abwässer abgeführt wurde. Beim Inputbezug sind die Transferkoeffizienten untereinander unabhängig. Beim Outputbezug verursacht ein Fehler bei einem Output automatisch Fehler bei allen anderen Outputs.

Die Transferkoeffizienten des aeroben Splittings sind auf das anaerobe Splitting mit Trockenvergärung oder abwasserfreie Verfahren übertragbar. Bei Nassverfahren mit Abwasseranfall sind erhebliche Chlorid-Flüsse mit dem Abwasser zu erwarten, die hier mangels Daten über Chloridkonzentrationen nicht quantifiziert werden können.

#### 4.1.2.12 Phosphor

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-10)

Für die P-Bilanz spielt die Klärschlammzugabe eine große Rolle, weil die P-Konzentration im Klärschlamm ca. 8 mal höher ist als im Restmüll. Bei einem Inputverhältnis von 90 % Restmüll zu 10 % Klärschlamm ist die Inputfracht aus beiden Gütern etwa gleich groß. Es ist davon auszugehen, dass der Phosphor aus dem Klärschlamm beinahe vollständig in den Rotterest transferiert wird. Ein Transfer in die heizwertreiche Fraktion ist nur möglich, wenn die Klärschlammzugabe von der Siebung erfolgt und dadurch Anhaftungen an den Gemengteilen der heizwertreichen Fraktionen entstehen. Von heizwertreichen Fraktionen liegen zur Zeit keine P-Messwerte vor. Die P-Gehalte in beiden Varianten (mit und ohne Klärschlamm) wurden durch Bilanzausgleich errechnet und zeigen beide ähnliche Werte.



Tabelle 4-28: Provisorische P-Bilanz, Splitting aerob mit Klärschlamm

| Input        |            |        |        | Output       |            |        |        |
|--------------|------------|--------|--------|--------------|------------|--------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.  | Fracht |              | Güterfluss | Konz.  | Fracht |
|              | [kg]       | [% FS] | [kg]   |              | [kg]       | [% FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 900        | 0,1    | 0,9    | Heizw. Fr.   | 330        | 0,07   | 0,23   |
| Klärschlamm  | 100        | 0,80   | 0,80   | Rotterest    | 380        | 0,39   | 1,5    |
|              |            |        |        | Fe-Schrott   | 20         | 0,003  | 0,0006 |
|              |            |        |        | Rotteverlust | 270        |        | 0      |
| <b>Summe</b> | 1000       |        | 1,7    | <b>Summe</b> | 1000       |        | 1,7    |

Tabelle 4-29: Provisorische P-Bilanz, Splitting aerob ohne Klärschlamm

| Input        |            |        |        | Output       |            |        |        |
|--------------|------------|--------|--------|--------------|------------|--------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.  | Fracht |              | Güterfluss | Konz.  | Fracht |
|              | [kg]       | [% FS] | [kg]   |              | [kg]       | [% FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 1.000      | 0,1    | 1,0    | Heizw. Fr.   | 330        | 0,13   | 0,43   |
|              |            |        |        | Rotterest    | 380        | 0,15   | 0,57   |
|              |            |        |        | Fe-Schrott   | 20         | 0,003  | 0,0006 |
|              |            |        |        | Rotteverlust | 270        | -      | 0      |
| <b>Summe</b> | 1.000      |        | 1,0    | <b>Summe</b> | 1.000      |        | 1,0    |

Die P-Bilanz des Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahrens basiert auf dem Input-Wert und den Werten für mineralische Fraktion und Fe-Schrott. Für die restlichen Output-Güter fehlen Konzentrationsangaben, doch können mit Ausnahme des Trockenstabilats<sup>®</sup> alle Güter als unbedeutend für den P-Austrag angenommen werden. Der errechnete P-Gehalt des Trockenstabilats<sup>®</sup> erscheint plausibel. Trockenstabilat<sup>®</sup> setzt sich zu ca. 50 % aus biogenem Material zusammen, pflanzliche Bestandteile enthalten 0,1-0,6 % Phosphor in der TS.

Tabelle 4-30: Provisorische P-Bilanz, Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

| Input        |            |        |        | Output                       |            |        |        |
|--------------|------------|--------|--------|------------------------------|------------|--------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.  | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.  | Fracht |
|              | [kg]       | [% FS] | [kg]   |                              | [kg]       | [% FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 1.000      | 0,1    | 1,0    | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 0,17   | 0,96   |
|              |            |        |        | Fe-Schrott                   | 40         | 0,003  | 0,0012 |
|              |            |        |        | Glas                         | 40         | -      | -      |
|              |            |        |        | Mineral. Fr.                 | 40         | 0,1    | 0,04   |
|              |            |        |        | NE-Schrott                   | 10         | -      | -      |
|              |            |        |        | Batterien                    | 0,5        | -      | -      |
|              |            |        |        | Rotteverlust                 | 300        | -      | 0      |
| <b>Summe</b> | 1.000      |        | 1,0    | <b>Summe</b>                 | 1.000      |        | 1,0    |





Tabelle 4-31: Transferkoeffizienten für P errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen aus Summe Output, Splitting aerob mit 10 % Klärschlamm)

|                               | Splitting aerob   | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,14              |                              |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                   | 0,96                         |
| Rotterest                     | 0,86              |                              |
| Fe-Schrott                    | $3 \cdot 10^{-4}$ | 0,012                        |
| Glas                          |                   | 0                            |
| Mineral. Fr.                  |                   | 0,04                         |
| NE-Schrott                    |                   | -                            |
| Batterien                     |                   | -                            |
| Rotteverlust                  | 0                 | 0                            |

\* inkl. Staub

Die Transferkoeffizienten des aeroben Splittings sind auf das anaerobe Splitting mit Trockenvergärung oder abwasserfreie Verfahren übertragbar. Bei Nassverfahren mit Abwasseranfall sind Phosphor-Flüsse mit dem Abwasser zu erwarten. Wegen fehlender Daten über Phosphorgehalte solcher Abwässer kann für Nassverfahren keine provisorische Bilanz erstellt werden.

#### 4.1.2.13 Schwefel

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-11)

Die S-Bilanz für das aerobe Splitting geht auf. Der Input verteilt sich hauptsächlich auf Rotterest und heizwertreiche Fraktion, Fe-Schrott und Abluft tragen unbedeutende Mengen. Für die heizwertreiche Fraktion wurde als Rechenwert der Mittelwert der von Lahl (2001) zu Verfügung gestellten Werte verwendet. Der Wert von der MBA Kufstein wurde nicht einbezogen, weil er stark abweicht (bildete man einen gewichteten Mittelwert wäre die Auswirkung dieses Werts allerdings gering).

Tabelle 4-32: Provisorische S-Bilanz, Splitting aerob

|              | Input      |           |        | Output       |            |           |        |
|--------------|------------|-----------|--------|--------------|------------|-----------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 900        | 2,9       | 2,6    | Heizw. Fr.   | 330        | 1,5       | 0,48   |
| Klärschlamm  | 100        | 4,4       | 0,44   | Rotterest    | 380        | 6,1       | 2,3    |
|              |            |           |        | Fe-Schrott   | 20         | 0,75      | 0,014  |
|              |            |           |        | Rotteverlust | 270        | -         | 0,075  |
| <b>Summe</b> | 1.000      |           | 3,0    | <b>Summe</b> | 1.000      |           | 2,9    |

Für das Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren errechnet sich ein Fehlbetrag von 60 % im Output. Der Bilanzausgleich unter Beibehaltung des Inputs liefert eine S-Konzentration im Trockenstabilat<sup>®</sup> von 4,4 g/kg FS bzw. (unrealistisch) hohe Frachten in den weiteren Output-Gütern.



Tabelle 4-33: Provisorische S-Bilanz, Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

| Input        |            |           |        | Output                       |            |           |                    |
|--------------|------------|-----------|--------|------------------------------|------------|-----------|--------------------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.     | Fracht             |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |                              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]               |
| Restmüll     | 1000       | 2,8       | 2,8    | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 2,6       | 1,5                |
|              |            |           |        | Fe-Schrott                   | 40         | 0,075     | 0,030              |
|              |            |           |        | Glas                         | 40         | -         | -                  |
|              |            |           |        | Mineral. Fr.                 | 40         | 1,0       | 0,040              |
|              |            |           |        | NE-Schrott                   | 10         | -         | -                  |
|              |            |           |        | Batterien                    | 0,5        | -         | -                  |
|              |            |           |        | Rotteverlust                 | 300        |           | 4*10 <sup>-5</sup> |
| <b>Summe</b> | 1000       |           | 2,6    | <b>Summe</b>                 | 1000       |           | 1,6                |

Tabelle 4-34: Transferkoeffizienten für S errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen aus Summe Output bei Splitting aerob, Summe Input bei Trockenstabilat<sup>®</sup>)

|                                | Splitting aerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|--------------------------------|-----------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                     | 0,17            |                              |
| Trockenstabilat <sup>®</sup> * |                 | 0,54                         |
| Rotterest                      | 0,80            |                              |
| Fe-Schrott                     | 0,0049          | 0,011                        |
| Glas                           |                 | 0                            |
| Mineral. Fr.                   |                 | 0,014                        |
| NE-Schrott                     |                 | -                            |
| Batterien                      |                 | -                            |
| Rotteverlust                   | 0,026           | 1,4*10 <sup>-5</sup>         |

\* inkl. Staub

Beim anaeroben Splitting ist mit H<sub>2</sub>S-Konzentrationen von einigen g/m<sup>3</sup> im Gärgas zu rechnen. Bei einer Gasbildung von 50-120 m<sup>3</sup> pro 1.000 kg Input entspricht das bilanz-relevanten Frachten von einigen 100 g, die beim Gärprozess das System verlassen.

#### 4.1.2.14 Stickstoff

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-12)

Die Bilanz für das aerobe Splitting geht auf, der Input verteilt sich zu etwa gleichen Teilen auf heizwertreiche Fraktion und Rotterest. N-Verluste über das Abgas sind allerdings nur in Form von Ammoniak, Lachgas und organischen Stickstoffverbindungen erfasst, Verluste in Form von N<sub>2</sub> sind unbestimmt. Als Rechenwert für die heizwertreiche Fraktion ist ein gewichteter Mittelwert verwendet (der Wert von Lahl, 2001) ist selbst ein Mittelwert aus vier Werten).



Tabelle 4-35: Provisorische N-Bilanz, Splitting aerob

| Input        |            |           | Output |              |            |           |        |
|--------------|------------|-----------|--------|--------------|------------|-----------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 900        | 4,7       | 4,2    | Heizw. Fr.   | 330        | 9,3       | 3,1    |
| Klärschlamm  | 100        | 18        | 1,8    | Rotterest    | 380        | 7,3       | 2,8    |
|              |            |           |        | Fe-Schrott   | 20         | -         | -      |
|              |            |           |        | Rotteverlust | 270        |           | 0,15   |
| <b>Summe</b> | 1000       |           | 6,0    | <b>Summe</b> | 1000       |           | 6,0    |

Beim Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren ergibt sich ein Überhang beim Output. Der Rotteverlust wurde aus der Ammoniakfracht der Abluft (Daten in Lahl und Zeschmar-Lahl, 2001) errechnet.

Tabelle 4-36: Provisorische N-Bilanz, Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

| Input        |            |           | Output |                              |            |           |        |
|--------------|------------|-----------|--------|------------------------------|------------|-----------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |                              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 1000       | 4,7       | 4,7    | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 11        | 6,3    |
|              |            |           |        | Fe-Schrott                   | 40         | -         | -      |
|              |            |           |        | Glas                         | 40         | -         | -      |
|              |            |           |        | Mineral. Fr.                 | 40         | -         | -      |
|              |            |           |        | NE-Schrott                   | 10         | -         | -      |
|              |            |           |        | Batterien                    | 0,5        | -         | -      |
|              |            |           |        | Rotteverlust                 | 300        |           | 0,16   |
| <b>Summe</b> | 1000       |           | 4,7    | <b>Summe</b>                 | 1000       |           | 6,5    |

Tabelle 4-37: Transferkoeffizienten für N errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Output)

|                               | Splitting aerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|-----------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,51            | -                            |
| Trockenstabilat <sup>®1</sup> | -               | 0,98                         |
| Rotterest                     | 0,46            | -                            |
| Fe-Schrott                    | -               | -                            |
| Glas                          |                 | -                            |
| Mineral. Fr.                  |                 | -                            |
| NE-Schrott                    |                 | -                            |
| Batterien                     |                 | -                            |
| Rotteverlust                  | 0,025           | 0,025                        |

<sup>1</sup> inkl. Staub



#### 4.1.2.15 Aluminium

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-13 und Tabelle 11-14)

Als Rechenwert für den Al-Gehalt des Restmülls wurde der von Daxbeck et al. (2000) angegebene Wert von der MVA Wels verwendet. Die Al-Gehalte der heizwertreichen Fraktion sind aus Sortieranalysen und Al-Gehalten von Gütern im Müll hochgerechnet (vgl. Tabelle 11-14). Der Al-Gehalt des Rotterestes wurde ebenso errechnet. Basis sind der durchschnittliche Al-Gehalt der mineralischen Bestandteile und die Annahme, dass sich der Großteil der Haushalts-Aluminiumfolien im Rotterest fänden (verwendete Daten aus Daxbeck et al., 2000). Mit diesen errechneten Werten geht die Bilanz für das aerobe Splitting auf, mit Messwerten für heizwertreiche Fraktionen wurden niedrigere Output-Mengen errechnet.

Tabelle 4-38: Provisorische Al-Bilanz, Splitting aerob

| Input        |            |           |        | Output       |            |           |        |
|--------------|------------|-----------|--------|--------------|------------|-----------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 900        | 13        | 12     | Heizw. Fr.   | 330        | 15        | 5,0    |
| Klärschlamm  | 100        | 6,0       | 0,6    | Rotterest    | 380        | 21        | 8,0    |
|              |            |           |        | Fe-Schrott   | 20         | -         | -      |
|              |            |           |        | Rotteverlust | 270        |           | 0      |
| <b>Summe</b> | 1000       |           | 13     | <b>Summe</b> | 1000       |           | 13     |

Über den Al-Gehalt des Trockenstabilat<sup>®</sup> liegen keine Messwerte vor, die Bilanz wurde über die Fracht im Trockenstabilat<sup>®</sup> ausgeglichen. Die Zusammensetzung des NE-Schrotts wurde von Tubergen (1996) übernommen.

Tabelle 4-39: Provisorische Al-Bilanz, Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

| Input        |            |           |        | Output                       |            |           |        |
|--------------|------------|-----------|--------|------------------------------|------------|-----------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |                              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 1000       | 13        | 13     | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 8,4       | 4,8    |
|              |            |           |        | Fe-Schrott                   | 40         | -         | -      |
|              |            |           |        | Glas                         | 40         | 0,50      | 0,020  |
|              |            |           |        | Mineral. Fr.                 | 40         | 15        | 0,6    |
|              |            |           |        | NE-Schrott                   | 10         | 800       | 8      |
|              |            |           |        | Batterien                    | 0,5        | -         | -      |
|              |            |           |        | Rotteverlust                 | 300        | -         | 0      |
| <b>Summe</b> | 1000       |           | 13     | <b>Summe</b>                 | 1000       |           | 13     |



Tabelle 4-40: Transferkoeffizienten für Al errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Output)

|                               | Splitting<br>aerob/anaerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,38                       |                              |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                            | 0,36                         |
| Rotterest                     | 0,62                       |                              |
| Fe-Schrott                    | -                          | -                            |
| Glas                          |                            | 0,0015                       |
| Mineral. Fr.                  |                            | 0,045                        |
| NE-Schrott                    |                            | 0,60                         |
| Batterien                     |                            | -                            |
| Rotteverlust                  | 0                          | 0                            |

\* inkl. Staub

Die Bilanz des aeroben Splittings ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auf das anaerobe Splitting übertragbar. Es ist aufgrund der pH-Wertes im Abwasser auszuschließen, dass relevante Mengen auf diesem Weg ausgetragen werden.

#### 4.1.2.16 Blei

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-15)

Für die heizwertreiche Fraktion wurde ein gewichteter Mittelwert aus allen Literaturwerten verwendet (der Wert von Lahl, 2001 ist ein Mittelwert aus 96 Werten). Die Blei-Bilanz geht nicht auf, In- und Output liegen aber „wenigstens“ in der gleichen Größenordnung. Der Bilanzausgleich ist zu erreichen, wenn für die Outputgüter nicht die Mittelwerte sondern Werte, die noch deutlich unterhalb der Maxima der Bandbreite in der Literatur liegen, verwendet werden.

Tabelle 4-41a: Provisorische Pb-Bilanz, Splitting aerob

|              | Input      |            |        | Output       |            |        |     |
|--------------|------------|------------|--------|--------------|------------|--------|-----|
|              | Güterfluss | Konz.      | Fracht | Güterfluss   | Konz.      | Fracht |     |
|              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |              | [mg/kg FS] | [g]    |     |
| Restmüll     | 900        | 540        | 480    | Heizw. Fr.   | 330        | 150    | 50  |
| Klärschlamm  | 100        | 23         | 2,3    | Rotterest    | 380        | 260    | 99  |
|              |            |            |        | Fe-Schrott   | 20         | 350    | 7   |
|              |            |            |        | Rotteverlust | 270        | -      |     |
| <b>Summe</b> | 1.000      |            | 480    | <b>Summe</b> | 1.000      |        | 160 |

Input und Output beim Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren liegen – mit einem deutlichen Input-Überhang – in der selben Größenordnung. Es existieren keine Messwerte für die Güter neben dem Trockenstabilat<sup>®</sup>, deshalb wurden Werte vergleichbarer Güter verwendet. Der Bleigehalt des NE-Schrotts ist unbekannt.



Tabelle 4-42: Provisorische Pb-Bilanz, Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

| Input        |            |            |        | Output                       |            |            |        |
|--------------|------------|------------|--------|------------------------------|------------|------------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |
|              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |                              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |
| Restmüll     | 1000       | 540        | 540    | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 150        | 87     |
|              |            |            |        | Fe-Schrott                   | 40         | 350        | 14     |
|              |            |            |        | Glas                         | 40         | 42         | 1,7    |
|              |            |            |        | Mineral. Fr.                 | 40         | 100        | 4      |
|              |            |            |        | NE-Schrott                   | 10         | -          | -      |
|              |            |            |        | Batterien                    | 0,5        | 50         | 0,025  |
|              |            |            |        | Rotteverlust                 | 300        |            | 0      |
| <b>Summe</b> | 1.000      |            | 540    | <b>Summe</b>                 | 1.000      |            | 110    |

Tabelle 4-43: Transferkoeffizienten für Pb errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Input)

|                               | Splitting<br>aerob/anaerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,10                       |                              |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                            | 0,20                         |
| Rotterest                     | 0,63                       |                              |
| Fe-Schrott                    | 0,043                      | 0,032                        |
| Glas                          |                            | 0,0037                       |
| Mineral. Fr.                  |                            | 0,0092                       |
| NE-Schrott                    |                            | -                            |
| Batterien                     |                            | $6 \cdot 10^{-5}$            |
| Rotteverlust                  | 0                          | 0                            |

\* inkl. Staub

Die Transferkoeffizienten sind inputbezogen. Sollte das Output-Defizit durch einen unterschätzten Mittelwert in den heizwertreichen Fraktionen begründet sein (heterogenes Gut), so sind die Transferkoeffizienten der anderen Outputs von diesem Fehler dank des Inputbezugs nicht betroffen.

Die Bilanz des aeroben Splittings ist auf das anaerobe Splitting übertragbar, Abwasser aus der Vergärung transportiert keine relevanten Bleifrachten (Daten aus Sievers und Nitz, 1997).



## 4.1.2.17 Chrom

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-16)

Die Chrom-Bilanz lässt sich ausgleichen, ohne dass sich die Stoffkonzentrationen der Güter wesentlich von den Mittelwerten der Literaturdaten entfernen.

Tabelle 4-44: Provisorische Cr-Bilanz, Splitting aerob

| Input        |            |            |        | Output       |            |            |        |
|--------------|------------|------------|--------|--------------|------------|------------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |
|              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |
| Restmüll     | 900        | 91         | 82     | Heizw. Fr.   | 330        | 160        | 54     |
| Klärschlamm  | 100        | 19         | 1,9    | Rotterest    | 380        | 170        | 63     |
|              |            |            |        | Fe-Schrott   | 20         | 1.200      | 22     |
|              |            |            |        | Rotteverlust | 270        |            | 0      |
| <b>Summe</b> | 1.000      |            | 84     | <b>Summe</b> | 1.000      |            | 140    |

Die Chrom-Bilanz des Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahrens errechnet sich anhand der verfügbaren Daten als ausgeglichen. Die Flüsse über NE-Schrott und Batterien sind allerdings unbestimmt.

Tabelle 4-45: Provisorische Cr-Bilanz, Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

| Input        |            |            |        | Output                       |            |            |        |
|--------------|------------|------------|--------|------------------------------|------------|------------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |
|              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |                              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |
| Restmüll     | 1.000      | 91         | 91     | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 72         | 41     |
|              |            |            |        | Fe-Schrott                   | 40         | 1.200      | 46     |
|              |            |            |        | Glas                         | 40         | 7          | 0,28   |
|              |            |            |        | Mineral. Fr.                 | 40         | 50         | 2      |
|              |            |            |        | NE-Schrott                   | 10         | -          | -      |
|              |            |            |        | Batterien                    | 0,5        | -          | -      |
|              |            |            |        | Rotteverlust                 | 300        | -          | 0      |
| <b>Summe</b> | 1.000      |            | 74     | <b>Summe</b>                 | 1.000      |            | 89     |

Die Bilanz der aeroben Splittings ist auf das anaerobe Splitting übertragbar, Abwasser aus der Vergärung transportiert keine relevanten Chromfrachten (Daten aus Sievers und Nitz, 1997).



Tabelle 4-46: Transferkoeffizienten für Cr errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Output)

|                               | Splitting<br>aerob/anaerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,39                       |                              |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                            | 0,46                         |
| Rotterest                     | 0,46                       |                              |
| Fe-Schrott                    | 0,16                       | 0,52                         |
| Glas                          |                            | 0,0031                       |
| Mineral. Fr.                  |                            | 0,022                        |
| NE-Schrott                    |                            | -                            |
| Batterien                     |                            | -                            |
| Rotteverlust                  | 0                          | 0                            |

\* inkl. Staub

#### 4.1.2.18 Cadmium

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-17)

Die Cd-Bilanz des aeroben Splittings weist auf der Outputseite einen leichten Überhang auf, dem größten Fluss (Fe-Schrott) liegen allerdings keine Messdaten zugrunde sondern eine Abschätzung der Menge an NiCd-Akkus. Für den Restmüll wurde der Wert von Henneke (1991) nicht in die Mittelwertbildung zu Rechenwertfestlegung aufgenommen, da dieser für ein Material nach Metallabscheidung bestimmt wurde. Die Literaturdaten über Rottereste, die mit oder ohne Klärschlamm erzeugt wurden, unterscheiden sich nicht hinsichtlich der Cd-Konzentration, sie wurden zusammengefasst. Die Cd-Konzentration des Fe-Schrotts wurde mit der in Punkt 4.1.1.1 abgeschätzten Fracht aus NiCd-Akkus festgesetzt. Es wurde eine Abscheideleistung von 80 % bei der Magnetscheidung angenommen. Der Cd-Output über das Abgas (Rotteverlust) liegt im Maximum bei einigen Zehntel mg/t Input (errechnet aus den Daten von Angerer, 1999) und bleibt unberücksichtigt.

Tabelle 4-47: Provisorische Cd-Bilanz, Splitting aerob

|              | Input              |                     |               | Output       |                    |                     |               |
|--------------|--------------------|---------------------|---------------|--------------|--------------------|---------------------|---------------|
|              | Güterfluss<br>[kg] | Konz.<br>[mg/kg FS] | Fracht<br>[g] |              | Güterfluss<br>[kg] | Konz.<br>[mg/kg FS] | Fracht<br>[g] |
| Restmüll     | 900                | 6,6                 | 5,9           | Heizw. Fr.   | 330                | 2,4                 | 0,80          |
| Klärschlamm  | 100                | 0,48                | 0,048         | Rotterest    | 380                | 3,3                 | 1,2           |
|              |                    |                     |               | Fe-Schrott   | 20                 | 250                 | 4,7           |
|              |                    |                     |               | Rotteverlust | 270                | -                   | 0             |
| <b>Summe</b> | 1.000              |                     | 6,0           | <b>Summe</b> | 1.000              |                     | 6,8           |

Diese Bilanz für das Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren geht von der Annahme aus, dass 90 % der NiCd-Akkus durch die händische Sortierung aus dem Fe-Schrott separiert werden.





Tabelle 4-48: Provisorische Cd-Bilanz Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

| Input        |            |            |        | Output                       |            |            |        |
|--------------|------------|------------|--------|------------------------------|------------|------------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |
|              | kg         | [mg/kg FS] | [g]    |                              | kg         | [mg/kg FS] | [g]    |
| Restmüll     | 1.000      | 6,6        | 6,6    | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 1,9        | 1,1    |
|              |            |            |        | Fe-Schrott                   | 40         | 14         | 0,57   |
|              |            |            |        | Glas                         | 40         | 0,3        | 0,012  |
|              |            |            |        | Mineral. Fr.                 | 40         | 0,3        | 0,012  |
|              |            |            |        | NE-Schrott                   | 10         | -          | -      |
|              |            |            |        | Batterien                    | 0,5        | 11.000     | 5,7    |
|              |            |            |        | Rotteverlust                 | 300        | -          | -      |
| <b>Summe</b> | 1000       |            | 6,6    | <b>Summe</b>                 | 1000       |            | 7,4    |

Tabelle 4-49: Transferkoeffizienten für Cd errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Input)

|                               | Splitting<br>aerob/anaerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,13                       |                              |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                            | 0,17                         |
| Rotterest                     | 0,21                       |                              |
| Fe-Schrott                    | 0,79                       | 0,086                        |
| Glas                          |                            | 0,0018                       |
| Mineral. Fr.                  |                            | 0,0018                       |
| NE-Schrott                    |                            | -                            |
| Batterien                     |                            | 0,86                         |
| Rotteverlust                  | 0                          | 0                            |

\* inkl. Staub

Wegen der Unsicherheit der Outputseite bei den Gütern Fe-Schrott und Batterien (Menge NiCd-Akkus) wurden die Transferkoeffizienten auf den Input bezogen. Die Summe bei aeroben Splitting ist daher >1.

Die Bilanz des aeroben Splittings ist auf das anaerobe Splitting übertragbar, Abwasser aus der Vergärung transportiert keine relevanten Cadmiumfrachten (Daten aus Sievers und Nitz, 1997).

#### 4.1.2.19 Eisen

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-18)

Über Eisengehalte von heizwertreichen Fraktionen liegen keine direkten Messwerte vor. Der mittlerer Gehalt wurde aus den Fe-Metallrückstandsmengen bei einem Schwel-Brenn-Versuch (Soyez, 2001) geschätzt. Literaturangaben zu Fe-Gehalten des Rotterests liegen um 2 % TS.



Tabelle 4-50: Provisorische Fe-Bilanz, Splitting aerob

| Input        |            |           | Output |              |            |           |        |
|--------------|------------|-----------|--------|--------------|------------|-----------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 900        | 35        | 32     | Heizw. Fr.   | 330        | 22        | 7,1    |
| Klärschlamm  | 100        | 8,1       | 0,81   | Rotterest    | 380        | 14        | 5,2    |
|              |            |           |        | Fe-Schrott   | 20         | 800       | 15     |
|              |            |           |        | Rotteverlust | 270        | -         | 0      |
| <b>Summe</b> | 1.000      |           | 32     | <b>Summe</b> | 1.000      |           | 27     |

Der Fe-Gehalt des Trockenstabilats<sup>®</sup> wurde durch Bilanzausgleich errechnet, Messwerte fehlen. Mit dieser Annahme werden 5 % der Stör- und Inertstoffe des Trockenstabilats<sup>®</sup> (2 %) dem Fe zugerechnet.

Tabelle 4-51: Provisorische Fe-Bilanz, Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

| Input        |            |           | Output |                              |            |           |        |
|--------------|------------|-----------|--------|------------------------------|------------|-----------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.     | Fracht |
|              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |                              | [kg]       | [g/kg FS] | [kg]   |
| Restmüll     | 1.000      | 35        | 35     | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 1,0       | 0,57   |
|              |            |           |        | Fe-Schrott                   | 40         | 850       | 34     |
|              |            |           |        | Glas                         | 40         | -         | -      |
|              |            |           |        | Mineral. Fr.                 | 40         | 20        | 0,8    |
|              |            |           |        | NE-Schrott                   | 10         | -         | -      |
|              |            |           |        | Batterien                    | 0,5        | 200       | 0,10   |
|              |            |           |        | Rotteverlust                 | 300        | -         | 0      |
| <b>Summe</b> | 1.000      |           | 35     | <b>Summe</b>                 | 1.000      |           | 35     |

Tabelle 4-52: Transferkoeffizienten für Fe errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Output)

|                               | Splitting<br>aerob/(anaerob) | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,26                         | 0,016                        |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                              |                              |
| Rotterest                     | 0,16                         |                              |
| Fe-Schrott                    | 0,55                         | 0,96                         |
| Glas                          |                              | -                            |
| Mineral. Fr.                  |                              | 0,023                        |
| NE-Schrott                    |                              | -                            |
| Batterien                     |                              | 0,0028                       |
| Rotteverlust                  | 0                            | 0                            |

\* inkl. Staub

Die Bilanz ist auf das anaerobe Splitting bei Trockenvergärung und abwasserfreiem Betrieb übertragbar. Daten über Eisengehalte von Abwässern aus Nassverfahren liegen nicht vor, doch ist die Löslichkeit von Eisen (auch Fe (II)) unter den herrschenden Bedingungen als gering anzusehen.



## 4.1.2.20 Kupfer

(Datenquellen: Anhang

Tabelle 11-19)

Die Bilanz für das aerobe Splitting geht auf. Manche Angaben lassen allerdings wesentlich höhere Kupfergehalte vermuten, z.B. wurden durch händisches Sortieren in der MBA Hartberg durchschnittlich 2,5 kg Kabel (ca. 50 % Cu-Anteil) und 25 g NE-Metallrohre je 1.000 kg Restmüll separiert (Mayr, 2001). Als Rechenwert für den Restmüll wurde hier ein Mittelwert aus den Werten von Schachermayer (1995) und Friedrich (2000) gebildet. Der Wert von Hennecke (1999) wurde ausgeschlossen, weil er metallisches Kupfer ausschließt. Der Wert von Krauß (1985), dieser beträgt 2.000 mg/kg TS, wurde ebenfalls ausgeschlossen, weil er weit über den als sehr verlässlich angesehenen Messwerten aus MVA-Bilanzierungen liegt.

Tabelle 4-53: Provisorische Cu-Bilanz Splitting aerob

|              | Input      |            |        | Output       |            |            |        |
|--------------|------------|------------|--------|--------------|------------|------------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |
|              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |
| Restmüll     | 900        | 500        | 450    | Heizw. Fr.   | 330        | 700        | 230    |
| Klärschlamm  | 100        | 59         | 5,9    | Rotterest    | 380        | 230        | 89     |
|              |            |            |        | Fe-Schrott   | 20         | 2.200      | 41     |
|              |            |            |        | Rotteverlust | 270        | -          | 0      |
| <b>Summe</b> | 1.000      |            | 330    | <b>Summe</b> | 1.000      |            | 360    |

Für die Cu-Bilanz des Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahrens fehlen wichtige Messwerte. Zur Abschätzung des NE-Schrotts (zu erwarten: Kupfer, Messing, Bronze) wurde die NE-Metallrohrfracht (Untersuchungen an MBA Hartberg von Mayr, 2001) verwendet. Mit diesem Wert geht die Bilanz allerdings nicht auf. Der Bilanzausgleich über diese Fraktion würde gelingen, wenn ein Kupfergehalt von 2,6 % eingesetzt wird.

Tabelle 4-54: Provisorische Cu-Bilanz Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

|              | Input      |            |        | Output                       |            |            |        |
|--------------|------------|------------|--------|------------------------------|------------|------------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |
|              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |                              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |
| Restmüll     | 1.000      | 500        | 500    | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 220        | 120    |
|              |            |            |        | Fe-Schrott                   | 40         | 2.200      | 90     |
|              |            |            |        | Glas                         | 40         | 7          | 0,28   |
|              |            |            |        | Mineral. Fr.                 | 40         | 50         | 2      |
|              |            |            |        | NE-Schrott                   | 10         | 2.600      | 26     |
|              |            |            |        | Batterien                    | 0,5        | -          | -      |
|              |            |            |        | Rotteverlust                 | 300        |            | 0      |
| <b>Summe</b> | 1.000      |            | 500    | <b>Summe</b>                 | 1.000      |            | 240    |



Tabelle 4-55: Transferkoeffizienten für Cu errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Output beim aeroben Splitting, Summe Input bei Trockenstabilat<sup>®</sup>)

|                               | Splitting<br>aerob/anaerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,64                       |                              |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                            | 0,24                         |
| Rotterest                     | 0,25                       |                              |
| Fe-Schrott                    | 0,11                       | 0,17                         |
| Glas                          |                            | $5 \cdot 10^{-4}$            |
| Mineral. Fr.                  |                            | 0,004                        |
| NE-Schrott                    |                            | 0,052                        |
| Batterien                     |                            | -                            |
| Rotteverlust                  | 0                          | 0                            |

\* inkl. Staub

Die Bilanz ist auf das anaerobe Splitting übertragbar, Abwasser aus der Vergärung transportiert keine relevanten Kupferfrachten (Daten aus Sievers und Nitz, 1997).

#### 4.1.2.21 Nickel

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-20)

Der Rechenwert für Restmüll wurde auf Basis der Werte von Friedrich (2000) und EAWAG (1982) festgesetzt. Der Rechenwert für die heizwertreichen Fraktionen ist ein gewichteter Mittelwert (Wert von Lahl, 2001 ist seinerseits ein Mittelwert). Die Ni-Bilanz lässt sich innerhalb der Bandbreiten der Messwerte in der Literatur ausgleichen. Die Mittelwerte ergeben die im Folgenden dargestellte Bilanz.

Tabelle 4-56: Provisorische Ni-Bilanz, Splitting aerob

|              | Input |            |     | Output       |       |            |     |
|--------------|-------|------------|-----|--------------|-------|------------|-----|
|              | [kg]  | [mg/kg FS] | [g] |              | [kg]  | [mg/kg FS] | [g] |
| Restmüll     | 900   | 40         | 36  | Heizw. Fr.   | 330   | 49         | 16  |
| Klärschlamm  | 100   | 12         | 1,2 | Rotterest    | 380   | 66         | 25  |
|              |       |            |     | Fe-Schrott   | 20    | 1.000      | 19  |
|              |       |            |     | Rotteverlust | 270   |            | 0   |
| <b>Summe</b> | 1.000 |            | 37  | <b>Summe</b> | 1.000 |            | 60  |

Die Bilanz des Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahrens geht von der Annahme aus, dass 90 % der NiCd-Akkus durch die händische Sortierung aus dem Fe-Schrotts separiert werden.



Tabelle 4-57: Provisorische Ni-Bilanz, Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

| Input        |            |            | Output |                              |            |            |        |
|--------------|------------|------------|--------|------------------------------|------------|------------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |
|              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |                              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |
| Restmüll     | 1.000      | 40         | 40     | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 24         | 14     |
|              |            |            |        | Fe-Schrott                   | 40         | 600        | 24     |
|              |            |            |        | Glas                         | 40         | 9          | 0,36   |
|              |            |            |        | Mineral. Fr.                 | 40         | 50         | 2      |
|              |            |            |        | NE-Schrott                   | 10         | -          | -      |
|              |            |            |        | Batterien                    | 0,5        | 12.000     | 5,9    |
|              |            |            |        | Rotteverlust                 | 300        | -          | 0      |
|              |            |            |        |                              |            |            |        |
| <b>Summe</b> | 1.000      |            | 40     | <b>Summe</b>                 | 1.000      |            | 46     |

Tabelle 4-58: Transferkoeffizienten für Ni errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Output)

|                               | Splitting<br>aerob/anaerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,28                       |                              |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                            | 0,30                         |
| Rotterest                     | 0,42                       |                              |
| Fe-Schrott                    | 0,32                       | 0,52                         |
| Glas                          |                            | 0,0078                       |
| Mineral. Fr.                  |                            | 0,043                        |
| NE-Schrott                    |                            | -                            |
| Batterien                     |                            | 0,13                         |
| Rotteverlust                  | 0                          | 0                            |

\* inkl. Staub

Die Bilanz des aeroben Splittings ist auf das anaerobe Splitting übertragbar, Abwasser aus der Vergärung transportiert keine relevanten Nickelfrachten (Daten aus Sievers und Nitz, 1997).

#### 4.1.2.22 Quecksilber

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-21)

Als Rechenwert für den Input wurde der an der MVA Spittelau gemessene Wert von Schachermayer et al. (1995) verwendet. Die Bilanz für das aerobe Splitting weist ein großes Defizit zwischen In- und Output auf. Die Frachten über die Abluft sind bei einigen mg bis einigen zig mg/t Abfallinput anzusetzen (Häusler und Angerer, 1998; Angerer, 1999; Angerer und Reisenhofer, 1999 und Cuhls, 2000), sie sind für die provisorische Stoffbilanz irrelevant. Zur Abschätzung der Fracht im Fe-Schrott wurde nur der Beitrag der Batterien berücksichtigt, wobei die Abscheideleistung mit 80 % angenommen wurde.



Tabelle 4-59: Provisorische Hg-Bilanz Splitting aerob

| Input        |            |            | Output |              |            |            |        |
|--------------|------------|------------|--------|--------------|------------|------------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |
|              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |
| Restmüll     | 900        | 1,8        | 1,6    | Heizw. Fr.   | 330        | 0,42       | 0,14   |
| Klärschlamm  | 100        | 0,60       | 0,060  | Rotterest    | 380        | 1,3        | 0,50   |
|              |            |            |        | Fe-Schrott   | 20         | 3,3        | 0,063  |
|              |            |            |        | Rotteverlust | 270        |            | 0,01   |
| <b>Summe</b> | 1.000      |            | 1,7    | <b>Summe</b> | 1000       |            | 0,71   |

Auch die Bilanz für das Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren geht nicht auf, allerdings basieren viele Daten auf Annahmen bzw. vergleichbaren Gütern. Nur die Hg-Konzentrationen von Trockenstabilat<sup>®</sup> und Abluft sind bekannt, wobei die Abluftfracht aus der Konzentration im Umluftsystem und den inputspezifischen Abluftmengen berechnet ist (Daten aus Wengenroth, 2000). Die Fracht für Hg in Batterien und Fe-Schrott berücksichtigt nur die aus Batterien stammende Menge. Dabei ist der angenommene Anteil von 90 % händischer Aussortierung im Hinblick, dass Knopfzellen hauptsächlich Träger sind, kritisch zu bewerten. Für die mineralische Fraktion wurde der von Rechberger (1999) verwendete Wert für die mittlere Erdkrustenzusammensetzung verwendet. Es ist anzunehmen, dass der Hg-Gehalt bedingt durch Verunreinigungen tatsächlich höher ist. Die Bilanz ist aber wenig sensitiv bezüglich dieses Wertes.

Tabelle 4-60: Provisorische Hg-Bilanz Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

| Input        |            |            | Output |                              |            |            |        |
|--------------|------------|------------|--------|------------------------------|------------|------------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |
|              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |                              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |
| Restmüll     | 1.000      | 1,8        | 1,8    | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 0,35       | 0,21   |
|              |            |            |        | Fe-Schrott                   | 40         | 0,22       | 0,0088 |
|              |            |            |        | Glas                         | 40         | 0,01       | 0,0004 |
|              |            |            |        | Mineral. Fr.                 | 40         | 0,08       | 0,0032 |
|              |            |            |        | NE-Schrott                   | 10         | -          | -      |
|              |            |            |        | Batterien                    | 0,5        | 160        | 0,079  |
|              |            |            |        | Rotteverlust                 | 300        |            | 0,024  |
| <b>Summe</b> | 1.000      |            | 1,8    | <b>Summe</b>                 | 1.000      |            | 0,32   |



Tabelle 4-61: Transferkoeffizienten für Hg errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Input)

|                               | Splitting<br>aerob/anaerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,083                      |                              |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                            | 0,11                         |
| Rotterest                     | 0,30                       |                              |
| Fe-Schrott                    | 0,037                      | 0,0049                       |
| Glas                          |                            | 0,00022                      |
| Mineral. Fr.                  |                            | 0,0018                       |
| NE-Schrott                    |                            | -                            |
| Batterien                     |                            | 0,044                        |
| Rotteverlust                  | 0,0059                     | 0,013                        |

\* inkl. Staub

Die Bilanz ist auf das anaerobe Splitting übertragbar, Abwasser aus der Vergärung transportiert keine relevanten Quecksilberfrachten (Daten aus Sievers und Nitz, 1997). Über Hg-Gehalte des Gärgases liegen allerdings keine Daten vor (enthält eventuell HgH<sub>2</sub>).

#### 4.1.2.23 Zink

(Datenquellen: Anhang Tabelle 11-22)

Die Bilanz für das aerobe Splitting geht mit den als Rechenwerte verwendeten Mittelwerten auf.

Tabelle 4-62: Provisorische Zn-Bilanz Splitting aerob

|              | Input              |                     |               | Output             |                     |               |     |
|--------------|--------------------|---------------------|---------------|--------------------|---------------------|---------------|-----|
|              | Güterfluss<br>[kg] | Konz.<br>[mg/kg FS] | Fracht<br>[g] | Güterfluss<br>[kg] | Konz.<br>[mg/kg FS] | Fracht<br>[g] |     |
| Restmüll     | 900                | 600                 | 540           | Heizw. Fr.         | 330                 | 570           | 190 |
| Klärschlamm  | 100                | 220                 | 22            | Rotterest          | 380                 | 690           | 260 |
|              |                    |                     |               | Fe-Schrott         | 20                  | 3.500         | 67  |
|              |                    |                     |               | Rotteverlust       | 270                 |               | 0   |
| <b>Summe</b> | 1.000              |                     | 560           | <b>Summe</b>       | 1.000               |               | 520 |

Die Bilanz für das Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren zeigt ein deutliches Defizit beim Output. Die Zinkfracht verursacht durch Batterien liegt bei ca. 20 % der gesamten Zinkfracht. Es ist unklar, wie viel Zink über den NE-Schrott ausgetragen wird (Messing, Zinkguß).



Tabelle 4-63: Provisorische Zn-Bilanz Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren

| Input        |            |            | Output |                              |            |            |        |
|--------------|------------|------------|--------|------------------------------|------------|------------|--------|
|              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |                              | Güterfluss | Konz.      | Fracht |
|              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |                              | [kg]       | [mg/kg FS] | [g]    |
| Restmüll     | 1.000      | 600        | 600    | Trockenstabilat <sup>®</sup> | 570        | 350        | 210    |
|              |            |            |        | Fe-Schrott                   | 40         | 2.000      | 80     |
|              |            |            |        | Glas                         | 40         | 5,0        | 0,20   |
|              |            |            |        | Mineral. Fr.                 | 40         | 50         | 2,0    |
|              |            |            |        | NE-Schrott                   | 10         |            | -      |
|              |            |            |        | Batterien                    | 0,5        | 200.000    | 99     |
|              |            |            |        | Rotteverlust                 | 300        |            | 0      |
| <b>Summe</b> | 1.000      |            | 600    | <b>Summe</b>                 | 1.000      |            | 390    |

Tabelle 4-64: Transferkoeffizienten für Zn errechnet aus den provisorischen Bilanzen (bezogen auf Summe Output bei Splitting aerob, Summe Input bei Trockenstabilat<sup>®</sup>)

|                               | Splitting<br>aerob/anaerob | Trockenstabilat <sup>®</sup> |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Heizw. Fr.                    | 0,37                       | 0,34                         |
| Trockenstabilat <sup>®*</sup> |                            |                              |
| Rotterest                     | 0,51                       |                              |
| Fe-Schrott                    | 0,13                       | 0,13                         |
| Glas                          |                            | $3 \cdot 10^{-4}$            |
| Mineral. Fr.                  |                            | 0,0033                       |
| NE-Schrott                    |                            | -                            |
| Batterien                     |                            | 0,17                         |
| Rotteverlust                  | 0                          | 0                            |

\* inkl. Staub

Die Bilanz ist auf das anaerobe Splitting übertragbar, Abwasser aus der Vergärung transportiert keine relevanten Zinkfrachten (Daten aus Sievers und Nitz, 1997).





### 4.1.3 Aussagekraft der Vorerhebungen

#### *Kritische Betrachtung der in der Literatur angegebenen Metallgehalte*

Für die Stoffflussanalyse werden durchschnittliche Gesamtgehalte als Konzentrationsangaben für die Güter benötigt. (Nachdem nur ein unbedeutender Anteil der betrachteten Metalle in der nicht salz- und salpetersäurelöslichen silikatischen Matrix vorliegt, liefern Aufschlüsse ohne Flusssäure von Totalaufschlüssen kaum unterscheidbare Werte, solange die Zerstörung der organischen Matrix, vor allem der Kunststoffe, vollständig ist.) Die Abschätzungen der Probenmassen und notwendigen Zerkleinerungsgrade bei der Probenaufbereitung aus den theoretischen Überlegungen (Kapitel 3.3.5 und 3.3.6) lässt Zweifel über die Verlässlichkeit von praxisüblich bestimmten Messwerten aufkommen. Die massive Unterschätzung der realen durchschnittlichen Konzentrationen erscheint auf Grund zu geringer Probenmassen wahrscheinlich, vor allem für Cadmium und Kupfer. Für Eisen und Aluminium (auch Kupfer und Zink in Messing bzw. Cr und Ni in Edelstahl) ist durch die Nichtberücksichtigung der „Störstoffe“ bei der praxisüblichen Probenaufbereitung eine Fehlerquelle zur systematischen Unterschätzung gegeben. Für Kupfer und Zink lässt sich besonders gut an Hand der im praktischen Teil gemessenen Werte die Vermutung untermauern, dass durchschnittliche Gehalte häufig unterschätzt werden (vgl. Kapitel 4.5).

In den seltensten Fällen sind die Literaturwerte mit Streuungsangaben versehen. Die theoretischen Überlegungen zur Probenahme lassen in allen Fällen hohe Streuungen erwarten, sodass die Treffsicherheit der angegebenen Werte bezüglich durchschnittlicher Gehalte in Frage gestellt werden muss. Das heißt, es ist auf Grund der heterogenitätsbedingten Streuungen bei der Probenahme unwahrscheinlich, dass praxisüblich gemessene Werte tatsächlich das beprobte Material zum Beprobungstermin hinsichtlich der Gesamtgehalte charakterisieren.

Ein weiteres Indiz für systematische Unterschätzungen bei den Metallgehalten der MBA-Outputgüter sind die oft beobachteten Defizite auf den Outputseiten der provisorischen Bilanzen. Auf der Inputseite wurden bevorzugt Daten von indirekten Müllanalysen in Verbrennungsanlagen verwendet. Diese sind vor allem bei Elementen, die bevorzugt über die Produkte der Rauchgasreinigung die Anlagen verlassen, als sehr zuverlässig anzusehen, weil die Bestimmung vergleichsweise „einfach“ ist. Bleibt nun die Stofffracht auf der Outputseite der provisorischen Bilanz zurück, kann die systematische Unterschätzung der Konzentrationen in den MBA-Outputgüter die Ursache sein.

#### *Verfahrenstechnische Unterschiede*

Im vorangegangenen Punkt und in Punkt 4.1.2.2 ist dargestellt, wieso es nicht sinnvoll ist, für Metalle an Hand der Outputanalysendaten der Literatur verfahrenstechnische Unterschiede von Anlagen zu suchen. Die Sichtung der gesammelten Literaturdaten zeigt auch, dass sich bei den Metallen keine Trends etwa in Abhängigkeit von Siebschnitt oder Vorzerkleinerung ablesen lassen, weshalb auf eine statistische Auswertung verzichtet wurde. Die Darstellung der Auswirkung von unterschiedlichen Verfahrenstechniken oder unterschiedlichen Inputs auf die Metallgehalte der MBA-Outputs bzw. die Transferkoeffizienten ist an Hand der verfügbaren Literaturdaten nicht möglich.

Lediglich für GV (damit auch Asche), TOC und Brennwert wird der erwartete Trend in Richtung höherer Werte bei größerem Siebschnitt sichtbar. Es ist aber nicht möglich, klare



Abhängigkeiten von einzelnen Faktoren (und der Kombinationen) zu finden. Dazu ist die Zahl an Faktoren zu hoch (Siebschnitt, Siebtechnik, Vorzerkleinerung, Input, Homogenisierung vor der mechanischen Aufbereitung z.B. Dano-Trommel etc.) und die Ausprägung der Faktoren zu schlecht quantifizierbar (Zerkleinerungswirkung der Zerkleinerungsaggregate, Siebe, Güte der Siebung etc.).

Die (beeinflussbare) Inputabhängigkeit ist bei Phosphor mit dem Transfer ins Rottematerial am deutlichsten. Die P-Konzentration von Klärschlamm ist um ein Vielfaches höher als jene des Restmülls. Der Klärschlamm gelangt abgesehen von geringen anhaftenden Mengen an den Gemengeteilen der heizwertreichen Fraktion (auch nur, wenn der Klärschlamm zu Beginn der mechanischen Aufbereitung zugegeben wird) ins Rottematerial. Die (nicht beeinflussbare) Inputabhängigkeit, d.h. jene die von der Zusammensetzung des Restmülls bestimmt ist, ist aus den Vorerhebungen nur an Hand von Folgerungen aus dem Verhalten einzelner Erzeugnisse während der mechanischen Behandlung zu beschreiben (Beispiel Batterien, Kapitel 4.1.1).

#### *Messbarkeit von Stoffflüssen, Notwendigkeit der Messung*

Aus den theoretischen Arbeiten über die Probenahme lässt sich folgern, dass es nicht sinnvoll ist, den Restmüll-Input zu beproben, um seine Zusammensetzung zu bestimmen. Es ist effektiver, diesen Aufwand in die verstärkte Beprobung aller Outputs zu investieren, weil (1) die indirekte Analyse des Inputs über die Summe der Outputs effizienter ist und (2) die Bestimmungsgenauigkeit für die Outputs noch gewinnt. Am Beispiel der NiCd-Akkus lässt sich leicht vor Augen führen, dass es effizienter ist, diese ca. 30-fach angereichert im Magnetseparationsschrott zu erfassen als im Restmüll (sofern die Magnetscheidung zuverlässig ist). Die Probenmenge, die zur Erfassung derselben Batteriemenge notwendig ist, lässt sich so auf ein Dreißigstel reduzieren. Die Separationsleistung der Anlagen lässt sich für viele Gegenstände, die als Stoffträger fungieren, nutzen. Die Messung der Stoffflüsse im Restmüll-Input ist daher zwar möglich aber nicht notwendig und nicht sinnvoll. Die Messung im Input wäre dann erforderlich, würden Verbindungen betrachtet, die zerstört oder umgewandelt werden, ehe sie im Output gemessen werden können.

Für die gasförmigen Outputgüter wurde zu Projektbeginn vereinbart, keine Messungen in Abgasen durchzuführen. Die Bilanzierung ist trotzdem möglich, weil der Nettorotteverlust als Differenz zwischen Rotteinput und Rotteoutput berechnet werden kann. Für Quecksilber hätte die direkte Messung des Rotteverlusts Bedeutung, weil der Rotteverlust als kleine Differenz schwer über den Bilanzausgleich zu bestimmen ist, aber trotzdem einen (umwelt-)relevanten Fluss darstellt.

Die Messbarkeit aller gewählten Stoffe in den festen Outputgütern inklusive Schrott wurde zum Zeitpunkt der provisorischen Bilanzierungen mit Zuversicht betrachtet, obwohl klar war, dass Neues neben den etablierten Methoden nötig ist.

#### *Aussagekraft für Versuchsplanung*

Die Aussagekraft der provisorischen Bilanzen genügte, um die Aufnahme aller festen Outputgüter in den Beprobungsplan zu bestätigen. Keines der festen Outputgüter ist bei der Stoffbilanzierung für diese Kombination ausgewählten Stoffe als irrelevant zu betrachten.



Für die Planung der Beprobung und Probenaufbereitung sind die Informationen aus den provisorischen Bilanzen als mangelhaft zu bezeichnen. Auf Basis der Folgerungen aus den theoretischen Arbeiten zur Probenahme sind die verwendeten Durchschnittskonzentrationen als Rechenwerte zum Teil anzuzweifeln. Es ist wahrscheinlich, dass viele Werte aus der Literatur die Frachten, welche in Form hoch konzentrierter Trägerpartikeln in den Gütern enthalten sind, nicht oder nur zum Teil beinhalten.

Im Nachhinein kann daher die provisorische Bilanzierung im Vergleich zu den theoretischen Arbeiten zur Probenahme und den Anlagenbesuchen mit Probesortierungen der Outputgüter als wenig hilfreich eingestuft werden.

## 4.2 Versuch MBA Oberpullendorf

Die MBA Oberpullendorf wurde aus folgenden Gründen für die ersten beiden Versuche ausgewählt:

- Zustimmung und Unterstützung durch Anlagenbetreiber
- ausreichende technische Voraussetzungen
- interessantes Auftrennungssystem, sechs Fraktionen inkl. Wirbelstromabscheidung
- erwartete günstige Eigenschaften der Outputgüter hinsichtlich Probenahme und Probenaufbereitung durch Trennung in insgesamt sechs Fraktionen, Auflösung von Papier und Pappe in den Dano-Trommeln
- Durchmischung großer Input-Mengen in den Dano-Trommeln
- Entfernung von Wien nicht allzu groß

Durch den Ausfall eines Anlagenteils (Aufbereitung der Mittelfraktion 25-65 mm durch ballistischen Separator (BASEP) und Wirbelstromabscheider) während des Versuchs mussten allerdings Einschränkungen bei den technischen Voraussetzungen und der Eignung der Outputgüter zur Probenaufbereitung in Kauf genommen werden.

### 4.2.1 Anlagenbeschreibung

Für die MBA Oberpullendorf war zur Versuchszeit die Erweiterung um eine Voraufbereitung (samt Kapazitätserhöhung) geplant, welche mittlerweile errichtet und in Betrieb ist. Die folgende Anlagenbeschreibung gibt den Stand vor dem Umbau an.

Die MBA Oberpullendorf hatte eine Kapazität von ca. 200 t pro Tag. In Abbildung 4-2 ist das Anlagenschema abgebildet, für das die beiden Versuche ursprünglich ausgelegt wurden. Abbildung 4-1 zeigt das geänderte Schema, wie es bei Stilllegung der Aufbereitungsaggregate zur Auftrennung der Mittelfraktion 25-65 mm in Leicht- und Schwerfraktion bzw. NFe-Schrott gilt. Wegen der technischen Gebrechen an den Förderbändern vom und zum BASEP in der Anfangsphase wurde für den Hauptversuch („Oberpullendorf I“) kurzfristig die einfache Betriebsweise nach Schema Abbildung 4-1 gewählt. Für den Versuch unter geänderten Bedingungen („Oberpullendorf II“) wurde die Anlage im Betrieb nach Schema Abbildung 4-2 bilanziert.

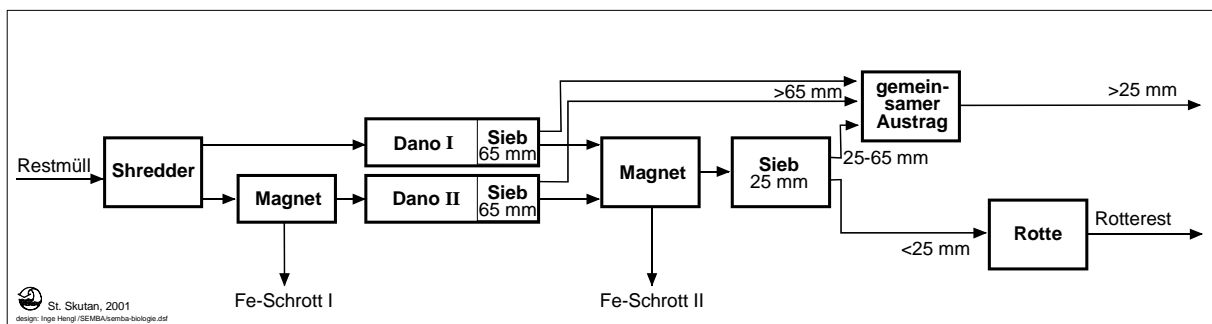


Abbildung 4-1: Anlagenschema der MBA Oberpullendorf (Stand 2001) bei stillgelegter Aufbereitung der Mittelfraktion 25-65 mm (Versuch „Oberpullendorf I“)

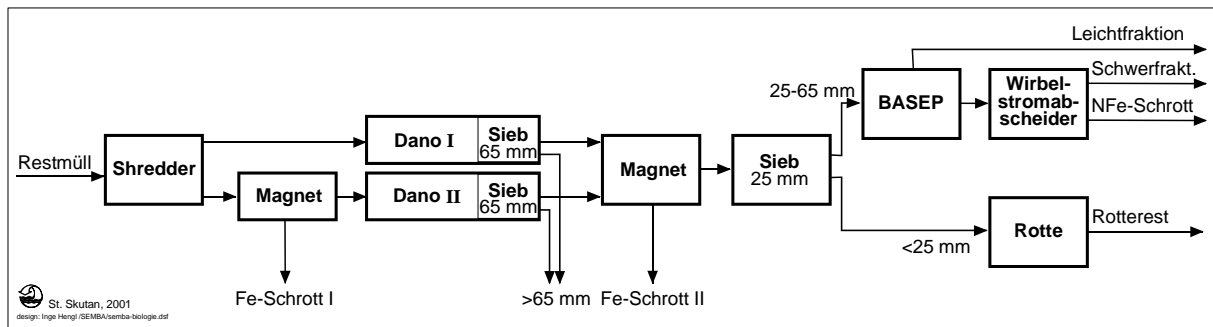


Abbildung 4-2: Anlagenschema der MBA Oberpullendorf in der Betriebsweise für welche die Versuche ursprünglich geplant wurden (Versuch „Oberpullendorf II“)

Der angelieferte Restmüll wird gewogen und mit einem mobilen Shredder am hinteren Teil des Geländes vorzerkleinert. Der geshredderte Müll wird von dort per LKW zum Aufgabebunker transportiert. Der erste Teil der Anlage ist in zwei Linien ausgeführt, Förderbänder bringen den Müll vom Bunker in die Dano-Trommeln. Vor dem Abwurf in die Trommeln sind Überbandmagnetabscheider („FE I“) installiert, von welchen einer zur Versuchszeit defekt war. Die Dano-Trommeln fassen insgesamt ca. 150 t Müll, d.h. ein bis eineinhalb Tagesdurchsatzmengen. Diese Menge ist als Lager im Prozess „Mechanische Behandlung“ zu sehen. Die hintersten Abschnitte der Dano-Trommeln sind als Siebtrommeln mit 65 mm Lochung ausgeführt. Das Material <65 mm gelangt über ein Förderband zu einem 25 mm Sieb in der Siebhalle. Vor dem Sieb ist ein weiterer Überbandmagnetabscheider angeordnet, der die Fraktion „Fe II“ abtrennt. Die Fraktion <25 mm, der „Rotteinput“ wird auf Bändern in die Rottehalle transportiert, wo nach dem System „Wendelin“ Felder aufgesetzt werden, die nach regelmäßigem Umsetzen 10 Wochen später am anderen Ende der Rottehalle ausgetragen werden. Die Fraktion 25-65 mm wird in einen ballistischen Separator (BASEP) geführt, der daraus eine Leichtfraktion (BasL) und eine Schwerfraktion (BasS) erzeugt. Die Schwerfraktion läuft über einen Wirbelstromabscheider, die Leichtfraktion wird in Ballen verpresst.

Alternativ kann die Aufbereitung der Mittelfraktion 25-65 mm mit BASEP und Wirbelstromabscheider stillgelegt werden. In dieser Betriebsweise wird aus den beiden Siebfraktionen >65 mm und 25-65 mm die Fraktion >25 mm erzeugt (Betriebsweise Versuch „Oberpullendorf I“).

Die Inputgütermengen und alle Outputgütermengen bis auf den Rotteinput und die Abluft sind in ihrer Gesamtheit messbar. Der Rotteverlust während des Aufenthalts in den Trommeln ist nicht bestimmbar, bewegt sich laut Anlagenbetreiber und –planer im Bereich unter 5 %. Lagerveränderungen im Prozess „Mechanische Behandlung“ (Füllstand Dano-Trommeln) erzeugen entsprechend Fehler bei der Berechnung der Menge des Rotteinputs. Da die Trommelfüllstände im Regelbetrieb kaum schwanken, sind für die Errechnung der Menge des Rotteinputs bei Versuchszeiten von einer Woche maximale Fehler von wenigen % möglich (z.B. Änderung des Trommelinhalts um 10 t in einer Woche mit 100 t Durchsatz pro Tag bewirkt einen Fehler von 2 % in der Massenbilanz Input/Output, d.h. einen Fehler von ca. 4 % in der Berechnung des Rotteinputs, wenn angenommen wird, dass der Transferkoeffizient auf Güterebene für den Rotteinput 0,5 ist).



Für die Stoffbilanzierung wurden die Systeme wie in Abbildung 4-4 und Abbildung 4-3 gezeigt definiert (mit Vorabschätzung der Güterflüsse). Mit dargestellt sind die Stellen der Massenerfassung und der Probenahmen.

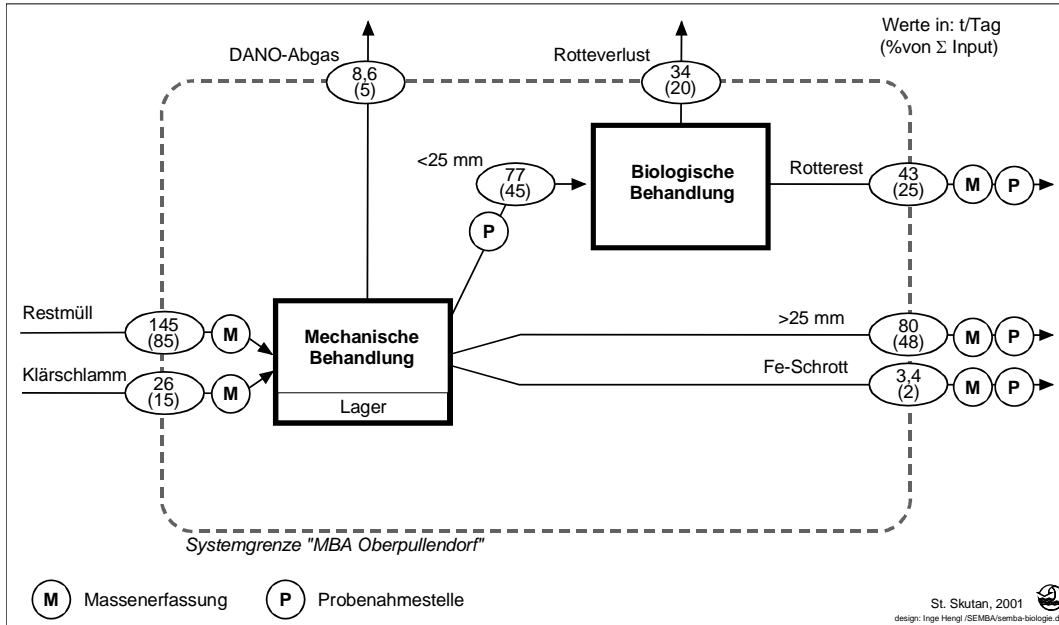


Abbildung 4-3: Systembild für die Stoffflussanalyse an der MBA Oberpullendorf Hauptversuch (Versuch „Oberpullendorf I“): Vorabschätzung der Güterflüsse für die Versuchsplanung in t/Tag bzw. % von der Summe Input (Restmüll + Klärschlamm); ebenfalls eingezeichnet sind die Stellen für Massenerfassung und Probenahme

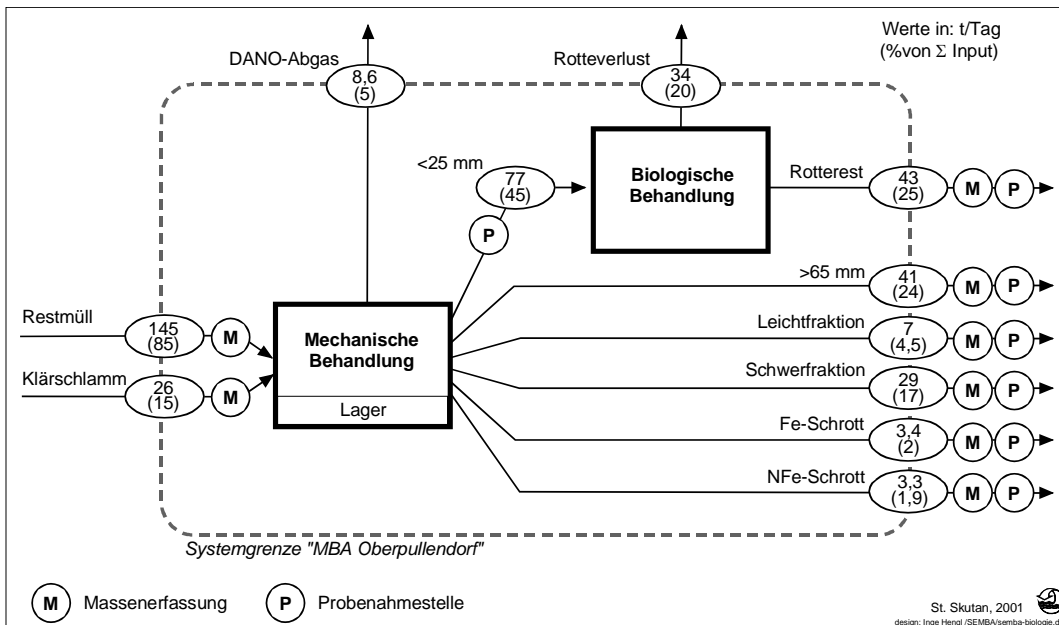


Abbildung 4-4: Systembild für die Stoffflussanalyse an der MBA Oberpullendorf unter geänderten Bedingungen (Versuch „Oberpullendorf II“): Vorabschätzung der Güterflüsse für die Versuchsplanung in t/Tag bzw. % von der Summe Input (Restmüll + Klärschlamm); ebenfalls eingezeichnet sind die Stellen für Massenerfassung und Probenahme



## 4.2.2 Versuchsplanung

Die ursprüngliche Versuchsplanung hatte zum Ziel, zwei Versuchsvarianten (Hauptversuch und Versuch unter geänderten Bedingungen) hintereinander durchzuführen, um den all-fälligen Einfluss der Klärschlammzugabe auf die mechanische Aufbereitung zu prüfen. Wegen technischer Probleme an der Anlage im Bereich der Aufbereitung der Mittelfraktion 25-65 mm musste kurzfristig der Versuchsaufbau grundlegend geändert werden, um alle, für die vorgesehene Zeitspanne eingeteilten Arbeitskräfte und reservierten Maschinen nutzen zu können. Im folgenden sind beide Versuchsplanungen beschrieben.

## 4.2.3 Ursprünglicher Plan

Folgende Rahmenbedingungen galten für die ursprüngliche Versuchsplanung:

- maximal 350 analysenfertige Proben
- mindestens zwei Parallelen bei jeder Probenverjüngung zur Bestimmung der Streuungsursache mittels Varianzkomponentenanalyse
- keine Messungen der Abluftmengen und -qualitäten
- ausreichende Versuchsdauer, um auch von Gütern, die in geringen Mengen anfallen (Fe-, NFe-Schrott) ausreichende Mengen zu gewinnen
- Versuch unter geänderten Bedingungen (Wasser statt Klärschlamm als Zusatz zum Restmüll) muss so angelegt sein, dass sich Differenzen zum Normalbetrieb statistisch testen lassen

Für die Bilanzierung des Prozesses „Mechanische Behandlung“ unter geänderten Bedingungen sollten nur wenige Proben analysiert werden. Ursprünglich war geplant, diesen Versuch erst nach Vorliegen der Ergebnisse des Hauptversuchs durchzuführen, um die Informationen über die Streuungsursachen (Varianzkomponenten) für die Versuchsplanung nutzen zu können. Auf eine erneute Bestimmung der Varianzkomponenten sollte verzichtet werden.

Im Rahmen des Budgets wurden weitere Randbedingungen festgelegt:

- Versuchsdauer (Massenbilanzierung und Probenahmen) 2 Wochen
- 32 Personentage verfügbare Arbeitskraft
- Zerkleinerungsmaschine zur Voraufbereitung der Proben der heizwertreichen Fraktionen vor Ort mit einer Durchsatzleistung von ca. 150 kg/Stunde
- maximal sieben 20' Lagercontainer als Trocknungsraum

### 4.2.3.1 Auswahl der Güter zur Untersuchung

Zur Auswahl wurden die Informationen aus den provisorischen Bilanzen verwendet. Alle Outputgüter, die relevante Frachten tragen und nicht durch Bilanzierung errechnet werden können, müssen berücksichtigt werden. Relevante Frachten sind solche, die sich von der Unsicherheit der Gesamtbilanz abheben. Für den Versuch wurde mit einer Streubreite von 15-30 % für die Bilanzsummen gerechnet, daraus ergibt sich eine Grenze für bilanzrelevante Flüsse bei etwa 5-10 % der Bilanzsumme. Aufgrund der Unsicherheit der provisorischen Bilanzierungen ist eine sichere Grenze noch darunter anzusetzen.

Für die massenmäßig bedeutenden Fraktionen ist die Aufnahme in den Versuchsplan außer Zweifel, weil aufgrund der für sie erwarteten Zusammensetzungen auf jeden Fall relevante Stofffrachten anzunehmen sind. Auch die Outputgüter kleiner Massenströme (Metallschrotte)



sind aufzunehmen, weil sie zumindest bei den Elementen Cd, Fe, Ni, Cu, Cr für die Vollständigkeit der Bilanzen notwendig sind.

#### 4.2.3.2 Probenmassen und Probenaufbereitungsstrategien

In der Literatur lagen zu wenige Daten vor, um daraus fundiert die notwendigen Probenmassen bestimmen zu können. Weiters war zu wenig bekannt über die Bestimmung, Art und Menge von metallischen Anteilen, die üblicherweise als „Störstoffe“ bei der Probenaufbereitung separiert werden. In dieser Situation wurden die theoretischen Werkzeuge der Probenahmeplanung zur Anwendung gebracht. Im folgenden ist dargestellt, wie mit dem modifizierten Ansatz von Bunge und Bunge (1999) Probenmassen und Vorgaben an die Probenaufbereitung abgeleitet wurden. Es wurde angenommen, dass Kupfer und Cadmium die höchsten Anforderungen stellen würden. Kupfer, weil es in metallischer Form in „großen Portionen“ im Abfall vorkommt (Kabel, Elektrogeräte, Bleche und Rohre in Einzelfällen bis zu einigen 100 g/Stück), Cadmium, weil vermutet wurde, dass ein großer Teil bei heizwertreichen Fraktionen in Form von Cd/Ba-stabilisiertem PVC vorliegt. Das Verhältnis Konzentration im Träger zur durchschnittlichen Konzentration im Abfall (1.000-3.000 mg/kg zu ca. 5 mg/kg) ist etwa ebenso ungünstig wie bei Kupfer (1.000.000 mg/kg zu einige 100 bis einige 1.000 mg/kg). Cd/Ba-stabilisiertes PVC kann anders als Kupfer nicht erkannt, separiert und gewogen werden, sondern muss in unverfälschtem Anteil, fein zerkleinert schlussendlich in der Analysenprobe vorliegen.

Zur Abschätzung der notwendigen Probenmassen wurde die Beziehung zwischen Streuung und Teilchenmasse der Trägerpartikel (Formel 3.11, Punkt 3.3.5) in Form von Kurven in Diagramme eingetragen, die den erwarteten Variationskoeffizienten (der Variationskoeffizient ist Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert) in Abhängigkeit der Trägerteilchenmassen und des Beitrags der Trägerteilchen zum durchschnittlichen Gesamtgehalt im Abfall beschreiben.

#### *Lesen und Interpretieren der Diagramme*

Jedes Diagramm ist für eine definierte Probenmasse und eine definierte Art von Stoffträgerpartikel gezeichnet. Für die Stoffträgerpartikel ist die Konzentration des gesuchten Stoffes im Träger fix. Auf der x-Achse wird die Teilchenmasse der Stoffträger aufgetragen, welche die Heterogenität verursachen, auf der y-Achse der Variationskoeffizient der Stoffkonzentration, die im Schnitt von den Trägerpartikeln verursacht wird. Die heterogenitätsbedingte Streuung ist umso größer, je weniger Trägerpartikel durchschnittlich in einer Probe erfasst werden, d.h. die Streuung ist relativ größer bei niedrigen Stoffkonzentration im Gut. Um das Diagramm für einen größeren Konzentrationsbereich, d.h., unterschiedliche Häufigkeiten von Trägerpartikeln anwendbar zu machen, wurden deshalb für mehrere Konzentrationen Kurven eingetragen, die jeweils die Abhängigkeit des Variationskoeffizienten von der Trägerteilchenmasse bei fixer Stoffkonzentration (= Häufigkeit von Trägerpartikeln) angeben. Die eingezeichneten Ellipsen bezeichnen die Bereiche, in welchen die Teilchenmassen und Stoffkonzentrationen der jeweiligen Fragestellung erwartet wurden. Auf der y-Achse kann die Bandbreite der erwarteten Streuung abgelesen werden.

#### *Feldproben, Probenmasse 300 kg*

Abbildung 4-5 beschreibt allgemein die Abhängigkeit der erwarteten Streuung von der Masse der Metallstücke und dem Beitrag der Metallstücke zum Gesamtgehalt. Im Diagramm ist





ingezeichnet, in welchem Bereich Kupfer bei heizwertreichen Fraktionen vermutet wurde (einige 100 mg/kg bei Stücken im Bereich von zig g). (Anmerkung: Zu beachten ist die grobe Unterschätzung des Kupfergehalts bei der Versuchsplanung.)

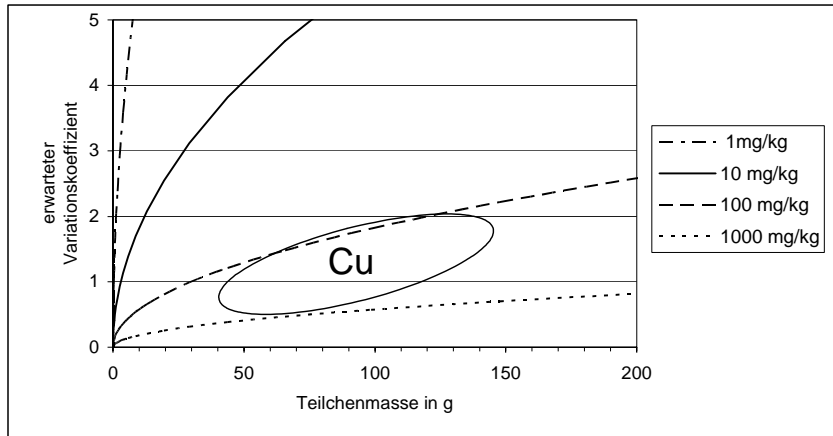


Abbildung 4-5: Erwartete Streuung der Stoffkonzentration (Stoffkonzentration, die durch Trägerpartikel verursacht wird) beim Ziehen von Proben mit 300 kg. Abhängigkeit des Variationskoeffizienten von der Masse der Trägerpartikel und dem mittleren Beitrag der Trägerpartikel zur Stoffkonzentration. Trägerpartikel bestehen zu 100 % aus dem gesuchten Stoff. Eingetragen ist der erwartete Bereich für Cu.

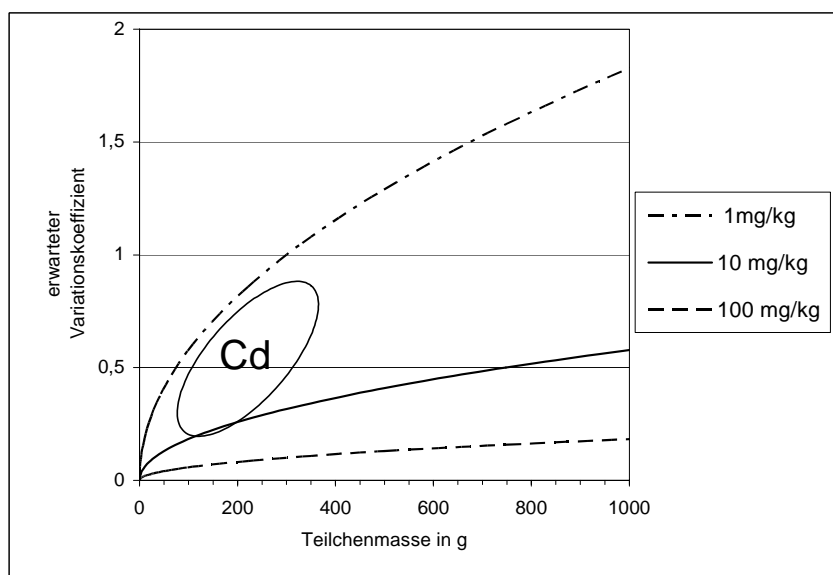


Abbildung 4-6: Erwartete Streuung der Stoffkonzentration (Stoffkonzentration, die durch Trägerpartikel verursacht wird) beim Ziehen von Proben mit 300 kg. Abhängigkeit des Variationskoeffizienten von der Masse der Trägerpartikel und dem mittleren Beitrag der Trägerpartikel zur Stoffkonzentration. Trägerpartikel enthalten den gesuchten Stoff in einer Konzentration von 1.000 mg/kg (Cd/Ba-stabilisiertes PVC). Eingetragen ist der erwartete Bereich für Cd.

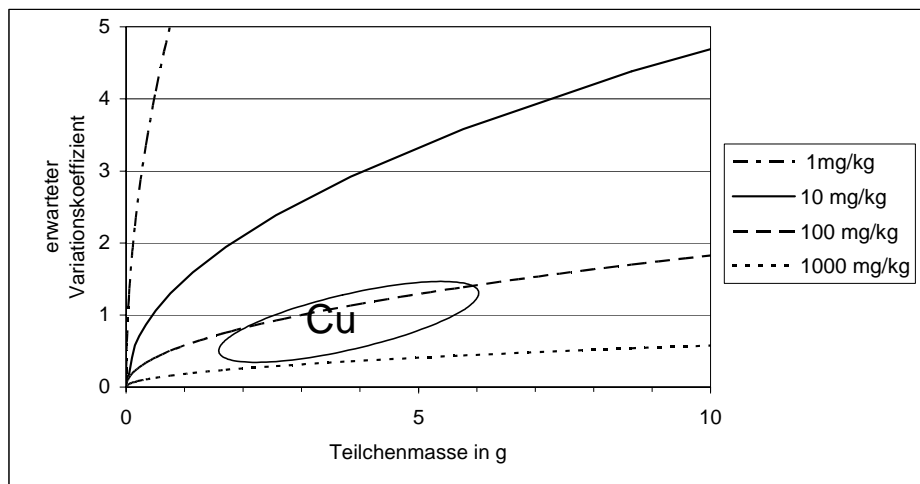
Die Abbildungen zeigen, dass Proben von 300 kg noch eine relativ hohe Streuung allein bei der Probenahme erwarten lassen. Bei einer größeren Anzahl von Proben (>20) wird trotzdem



mit dem Mittelwert der Durchschnitt gut bestimmt (die Varianz des Mittelwerts sinkt proportional zur Probenzahl, der Variationskoeffizient proportional zur Wurzel aus der Probenzahl). Das angestrebte Ziel für Probenmassen aus heizwertreichen Fraktionen wurde auf einige hundert kg festgelegt.

#### *Laborproben, Probenmasse 30 kg*

Die Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8 sind Analoga der Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6 in einem kleineren Massenbereich. Diese Diagramme sind anwendbar auf die Verjüngung von vorzerkleinerten und danach durchmischten Proben heizwertreicher Fraktionen sowie auf Materialien mit geringerer Korngröße z.B. den Rotteinput. Aufgrund der hohen erwarteten Streuung bei Kupfer (real wäre die Streuung kleiner ausgefallen, weil der Kupfergehalt in der Vorabschätzung fast eine Größenordnung zu tief angenommen wurde) wurde entschieden, metallisches Kupfer bei der Voraufbereitung noch vor dem Shredder auszusortieren und den Beitrag des aussortierte Kupfers zum Kupfergehalt der Feldproben durch Wägen und Beziehen auf die Feldprobenmasse zu bestimmen. Dadurch wird die Streuung des Verjüngungsschritts ausgeschaltet.



*Abbildung 4-7: Erwartete Streuung der Stoffkonzentration (Stoffkonzentration, die durch Trägerpartikel verursacht wird) beim Ziehen von Proben mit 30 kg. Abhängigkeit des Variationskoeffizienten von der Masse der Trägerpartikel und dem mittleren Beitrag der Trägerpartikel zur Stoffkonzentration. Trägerpartikel bestehen zu 100 % aus dem gesuchten Stoff. Eingezeichnet ist der erwartete Bereich für Cu bei heizwertreichen Fraktionen.*

Abbildung 4-8 zeigt, dass bei Cadmium die Streuung beim Verjüngen auf Proben zu 30 kg in vertretbarem Rahmen bleibt (Variationskoeffizienten um 0,3). Für die Teilung der voraufbereiteten Proben aus heizwertreichen Fraktionen wurde daher diese Menge als Richtwert fixiert.

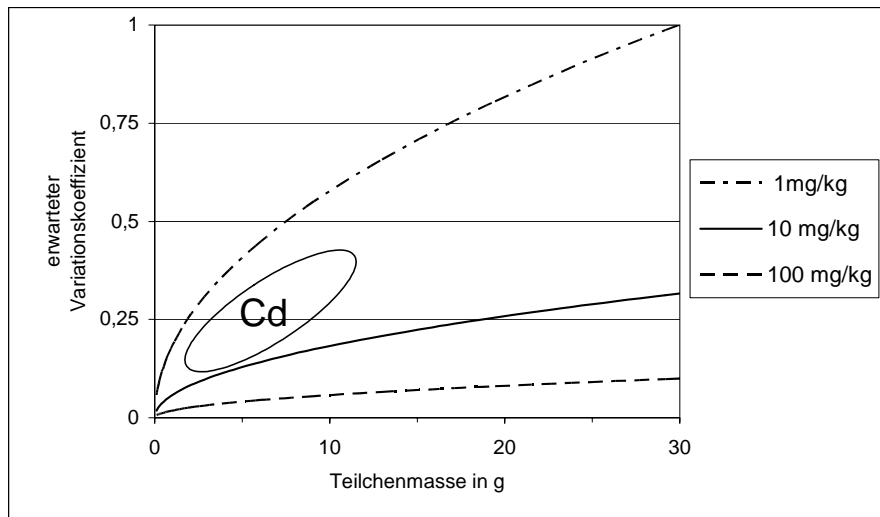


Abbildung 4-8: Erwartete Streuung der Stoffkonzentration (Stoffkonzentration, die durch Trägerpartikel verursacht wird) beim Ziehen von Proben mit 30 kg. Abhängigkeit des Variationskoeffizienten von der Masse der Trägerpartikel und dem mittleren Beitrag der Trägerpartikel zur Stoffkonzentration. Trägerpartikel enthalten den gesuchten Stoff in einer Konzentration von 1.000 mg/kg (Cd/Ba-stabilisiertes PVC). Eingetragen ist der erwartete Bereich für Cd.

#### Proben vom Eisenschrott

Für die Probenmassenbestimmung beim Eisenschrott wurde die erwartete Menge und Verteilung von NiCd-Akkus herangezogen. Bei einem erwarteten Gehalt von 220 mg/kg FS und einer Masse von 18 g Cadmium pro Portion (eine einzelne AA-Zelle wiegt ca. 25 g entsprechen einer Cd-Menge von ca. 4,5 g, ein Akku-Pack kann 0,5 kg und mehr wiegen) ergibt die Abschätzung nach Bunge und Bunge (1999) eine minimale Probenmasse von ca. 80 kg, wenn ein Variationskoeffizient von 100 % angestrebt wird und von ca. 300 kg, bei einem Variationskoeffizienten von 50 %.

#### Feinheit der analysenfertigen Proben

Die Feinheit der analysenfertigen Proben hat direkte Auswirkung auf die Streuung der Messwerte d.h. auf die Varianzkomponente der letzten Ebene. Zu grob aufbereitete Proben verursachen große Streuungen, Linksschiefe der Verteilungen und damit die Gefahr die durchschnittliche Konzentration zu unterschätzen. Die Abschätzung der im Zuge der Einwaage von partikulären Trägern verursachten Varianz liefert Vorgaben für die Probenaufbereitung. In Abbildung 4-9 und Abbildung 4-10 sind wie in den vorangegangenen Abbildungen die Abhängigkeiten der Variationskoeffizienten von den Trägerpartikelmassen und den erwarteten mittleren Stoffkonzentrationen dargestellt. Abbildung 4-9 beschreibt das Vorkommen von reinen Partikeln des gesuchten Stoffs, Abbildung 4-10 den Fall der Stoffkonzentration von 1.000 mg/kg des gesuchten Stoffs in den Trägerpartikeln.

Die Abbildung 4-9 zeigt, dass Partikel im mg-Bereich (entspricht Körnungen im Bereich von Zehntel mm) bei Metallen ungeeignet sind, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Die Proben sind in diesem Sinn nicht als analysenfertig zu bezeichnen, wenn für die Bestimmung Einwaagen von 300 mg verwendet werden. Für die richtige Bestimmung von Kupfer wären

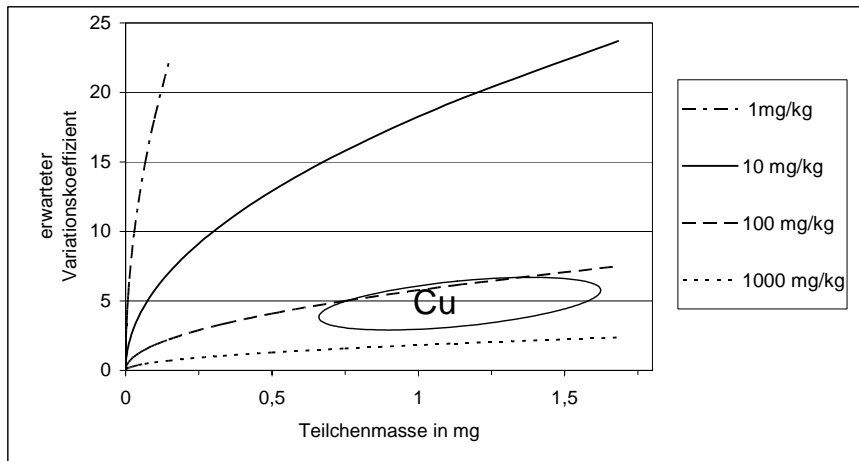


Abbildung 4-9: Erwartete Streuung der Stoffkonzentration (Stoffkonzentration, die durch Trägerpartikel verursacht wird) beim Analysieren von Einwaagen mit 300 mg. Abhängigkeit des Variationskoeffizienten von der Masse der Trägerpartikel und dem mittleren Beitrag der Trägerpartikel zur Stoffkonzentration. Trägerpartikel bestehen zu 100 % aus dem gesuchten Stoff. Eingezeichnet ist der erwartete Bereich für Cu bei heizwertreichen Fraktionen.

für die zunächst erwarteten Gehalte von einigen 100 mg/kg in metallischer Form Kornmassen im Bereich von hundertstel mg erforderlich. Diese Tatsache ist ein weiterer Grund, metallisches Kupfer ehestmöglich aus den Proben zu entfernen und separat zu bestimmen.

Für Cadmium aus Cd/Ba-stabilisiertem PVC ist die Streuung geringer, die Anforderungen an die Korngröße nicht so hoch (geringer Dichte). Für die Korngröße zwischen 0,5 und 1 mm wurde mit einem Variationskoeffizienten von ca. 1 gerechnet. Eine richtige Bestimmung wurde als machbar angenommen in Hinblick auf die relativ große Probenzahl.

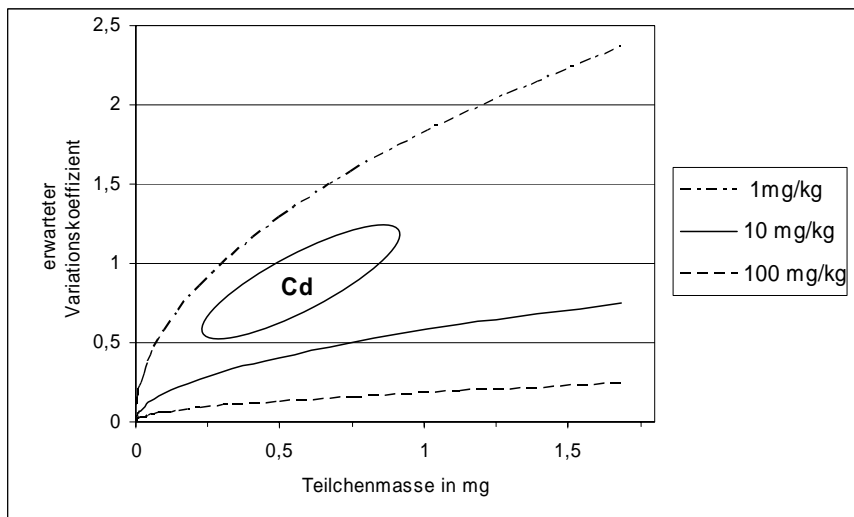


Abbildung 4-10: Erwartete Streuung der Stoffkonzentration (Stoffkonzentration, die durch Trägerpartikel verursacht wird) beim Analysieren von Einwaagen mit 300 mg. Abhängigkeit des Variationskoeffizienten von der Masse der Trägerpartikel und dem mittleren Beitrag der Trägerpartikel zur Stoffkonzentration. Trägerpartikel enthalten den gesuchten Stoff in einer Konzentration von 1.000 mg/kg (Cd/Ba-stabilisiertes PVC). Eingezeichnet ist der erwartete Bereich für Cd.



### *Folgerungen für die Probenaufbereitung*

Es ist zu folgern, dass mit der konventionellen Bestimmung über Zerkleinern und chemisches Analysieren die richtige Bestimmung der Anteile aus metallischen Trägern nicht möglich ist. Wie bei Kupfer exemplarisch gezeigt, sollen daher stofflich identifizierbare, hochkonzentrierte Teile oder Partikel, die sich schlecht zerkleinern lassen, bei jedem Schritt aussortiert, gewogen und bei der Auswertung mit ihrem Beitrag zur Konzentration mitberücksichtigt werden. Für die Feinzerkleinerung der Analysenproben sollte eine Korngröße um oder unter 0,5 mm angestrebt werden, um die Analysenstreuung bei Cd, das aus Cd/Ba-stabilisiertem PVC stammt, in Grenzen zu halten.

#### 4.2.3.3 Verteilung der Proben

Die Probenverteilung im Versuchsplan richtet sich nach drei Vorgaben:

- Möglichkeit der Bestimmung der Varianzkomponenten
- Minimum an Unsicherheit der Ergebnisse unter den gegebenen Umständen
- Praktische Durchführbarkeit bei Probenahme und Probenaufbereitung

Die Bestimmung der Varianzkomponenten erfordert eine gewisse Anzahl an Proben auf erster Ebene (Probenahmeebene). Für die untersuchten Güter wird das unterste Limit zwischen 10 und 20 geschätzt (vergl. 3.3.2).

Die Proben werden als Einzelproben entnommen, um die gesamte Probenahmestreuung zu erfassen inklusive Variabilität. Diese Vorgangsweise wird als unkritisch hinsichtlich der Vergrößerung der Unsicherheit der Bilanzen angesehen, weil in den Dano-Trommeln große Mengen von Abfällen vermischt werden. Die kurzfristige Variabilität in den Outputgütern ist deswegen gering, daher kann eine Mischprobenbildung wenig zur Reduzierung der Probenahmestreuung beitragen.

Die Optimierung zwischen Aufwand und Sicherheit der Ergebnisse war vor dem ersten Versuch unbefriedigend anwendbar, weil die wichtigsten Eingangsdaten (Varianzkomponenten) fehlten. Zudem verlangt die große Zahl an zu untersuchenden Stoffen (mit unterschiedlichen Transferkoeffizienten) einen Kompromiss beim Beprobungsplan, weil für jeden Stoff eine andere Probenverteilung die optimale ist.

Die praktische Durchführbarkeit bezieht sich auf die Anzahl der täglich genommenen (voraufbereiteten) Proben und die Probenmassen im Hinblick auf die Aufbereitung im Labor.

In Tabelle 4-65 ist angegeben, wie der Probenahmeplan als Kompromiss aus allen Planungsgrundlagen festgesetzt wurde.

Für die Bilanzierung unter „geänderten Bedingungen“ (kein Klärschlamm) sollte für zwei weitere Tage die Probenahme in selber Intensität betrieben werden. Die Probenaufbereitung wäre mit den Ergebnissen aus dem Grundversuch (v. a. Varianzkomponenten) auf die Zahl an analysenfertigen Proben von 50 optimiert worden.



Tabelle 4-65: Anzahl der Proben für den ursprünglich geplanten Grundversuch, gezogene und aufbereitete Proben. In Klammer ist die geplante Masse einer Probe in kg angegeben.

| Gut          | primär gezogene Proben | 1. Aufbereitungsstufe | 2. Aufbereitungsstufe | analysenfertige Proben |
|--------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| Klärschlamm  | 12 (1-2)               | -                     | -                     | 12                     |
| >65 mm       | 20 (300-500)           | 40                    | 80                    | 80                     |
| Fe-Schrott   | 10 (100)               | 25                    | -                     | 25                     |
| NFe-Schrott  | 10 (50)                | 25                    | -                     | 25                     |
| BASEP leicht | 15 (30)                | 30                    | -                     | 30                     |
| BASEP schwer | 25 (30)                | 50                    | -                     | 50                     |
| Rotteinput   | 24 (30)                | 48                    | -                     | 48                     |
| Rotteoutput  | 15 (30)                | 30                    | -                     | 30                     |
| <b>Summe</b> |                        |                       |                       | <b>300</b>             |

#### 4.2.4 Ausgeführter Probenahmeplan nach Anlagenausfall

Die Versuche in Oberpullendorf wurden im Zeitraum von 16. bis 31. Oktober 2002 durchgeführt. An den jeweils ersten Arbeitstagen nach Wochenenden bzw. Feiertagen wurden keine Proben gezogen, um nicht Material mit unterschiedlichen Verweildauern in den Dano-Trommeln als Proben zu verwenden.

In Tabelle 4-66 und Tabelle 4-67 sind die nach dem Maschinenausfall am zweiten Versuchstag erstellten neuen Versuchspläne dargestellt.

Tabelle 4-66: Anzahl der Proben für den Grundversuch „Oberpullendorf I“ nach der Umplanung am 2. Versuchstag, gezogene und aufbereitete Proben

| Gut          | primär gezogene Proben | 1. Aufbereitungsstufe | 2. Aufbereitungsstufe | analysenfertige Proben |
|--------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| >25 mm       | 24                     | 48                    | 96                    | 96                     |
| Fe-Schrott   | 12                     | 24                    | -                     | 24                     |
| Rotteinput   | 24                     | 48                    | -                     | 48                     |
| Rotteoutput  | 24                     | 48                    | -                     | 48                     |
| <b>Summe</b> |                        |                       |                       | <b>216</b>             |

Tabelle 4-67: Anzahl der Proben beim Versuch unter geänderten Bedingungen „Oberpullendorf II“

| Gut          | primär gezogene Proben | 1. Aufbereitungsstufe | 2. Aufbereitungsstufe | analysenfertige Proben |
|--------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| >65 mm       | 7                      | 14                    | 28                    | 28                     |
| Fe-Schrott   | 5                      | 10                    | -                     | 10                     |
| NFe-Schrott  | 7                      | 14                    | -                     | 14                     |
| BASEP leicht | 6                      | 12                    | -                     | 12                     |
| BASEP schwer | 14                     | 28                    | -                     | 28                     |
| Rotteinput   | 14                     | 28                    | -                     | 28                     |
| <b>Summe</b> |                        |                       |                       | <b>120</b>             |



#### 4.2.5 Probenahme und Aufbereitung

Die in den Versuchsplänen (Tabelle 4-66 und Tabelle 4-67) festgehaltene Planung der Probenaufbereitung bezüglich der Anzahl Analysenproben pro Feldprobe und Anzahl Analysen pro Analysenprobe wurde später geändert, weil es notwendig war, die Probenaufbereitung zu beschleunigen. Im Folgenden ist beschrieben, welche Vorgangsweise letztlich praktiziert wurde. Im Anhang ist die Probenahme dokumentiert. Die durchschnittlichen Probenmassen sind bei den Analyseergebnissen mit angegeben (Punkt 4.2.7).

Alle Feldproben wurden als Einzelproben angelegt, weil (1) die Heterogenität des Materials als vorrangiges Problem vor der Variabilität gesehen wurde (und wird), d.h. der Mischprobenbildung wenig Einfluss auf die Dämpfung der Probenahmestreuung zugeschrieben wurde (vergl. dazu 4.4.5.3), (2) die Durchmischung großer Abfallmengen in den Dano-Trommeln schon anlagenbedingt keine kurzfristige Variabilität der Outputzusammensetzung erwarten lässt und (3) bei Nichtzutreffen der Punkte 1 und 2 (Sichtbarwerden von Trends) die Variabilität zur Planung der Versuche 2 und 3 abgeschätzt werden hätte können.

Die Probenaufbereitung erfolgte im Wesentlichen wie unter 3.4 beschrieben. Im Folgenden sind nur die davon abweichenden Vorgangsweisen angeführt.

##### 4.2.5.1 Heizwertreiche Fraktionen >25 mm und >65 mm

###### *Probenahme*

Die Proben wurden mit dem Radlader beim Bandabwurf als Einzelproben gezogen und mit dem Fahrzeug auf der Brückenwaage gewogen. Die Teilung nach dem Shreddern erfolgte durch Aufsetzen in dünnen Schichten zu niedrigen Mieten (max. 40 cm), vertikales Durchmischen der Mieten durch Umschaufeln und schaufelweise Entnahme an vielen Stellen. Die Mengen und Zeitpunkte der Probenahmen sind in im Anhang in Tabelle 11-23 und Tabelle 11-24 dokumentiert.

###### *Laboraufbereitung*

Die Laboraufbereitung wurde, wie in Punkt 3.4.3 beschrieben, ausgeführt. Im Folgenden ist jeweils die Struktur an Parallelproben sowie das Aufbereitungsschema für eine Einzelaufbereitung dargestellt.

In Abbildung 4-11 ist der systematische Aufbau von Probenahme und Probenaufbereitung für die Fraktion >25 mm angegeben. Bei der Verjüngung während der Voraufbereitung (nach dem Shreddern) wurden zwei parallele Proben erzeugt. Bei der Verjüngung im Labor wird auf eine zusätzliche Wiederholung verzichtet, zugunsten der Doppelbestimmung bei der chemischen Analyse. Diese Änderung gegenüber dem Plan hatte den Zweck Aufbereitungsaufwand zu sparen (Feinaufbereitung bei 48 Proben) und die Analysenstreuung in die Varianzkomponentenanalyse aufzunehmen.

In Abbildung 4-12 ist der systematische Aufbau von Probenahme und Probenaufbereitung für die Fraktion >65 mm angegeben. Bei der Verjüngung während der Voraufbereitung (nach dem Shreddern) werden zwei parallele Proben erzeugt, bei der Verjüngung im Labor ebenfalls. Die Analysenproben werden bei der chemischen Analyse nur einfach bestimmt.



Der Zweck dieser Vorgangsweise war, bei einer heizwertreichen Fraktion die Probenentteilung im Labor in die Varianzkomponentenanalyse aufzunehmen.

In Abbildung 4-13 ist das Aufbereitungsschema für die beiden heizwertreichen Fraktionen wiedergegeben, ohne die Parallelaufbereitungen in den Aufbereitungsebenen 2 und 3 darzustellen.

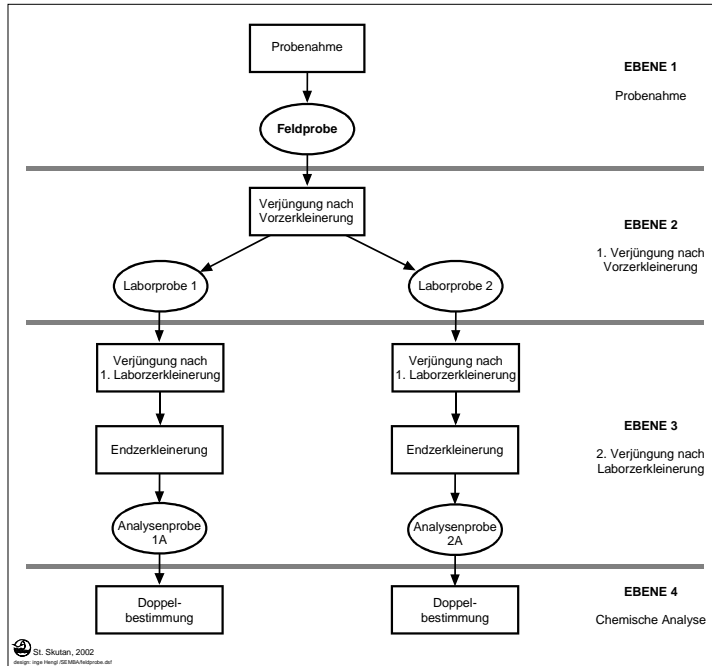


Abbildung 4-11: Probenahme- und Aufbereitungsschema für die Proben der Fraktion >25 mm

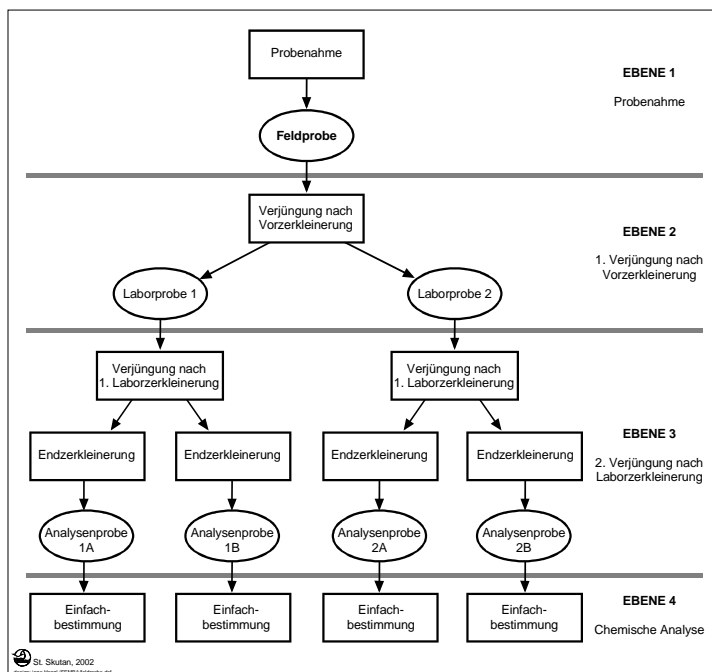


Abbildung 4-12: Probenahme- und Aufbereitungsschema für die Proben der Fraktion >65 mm.



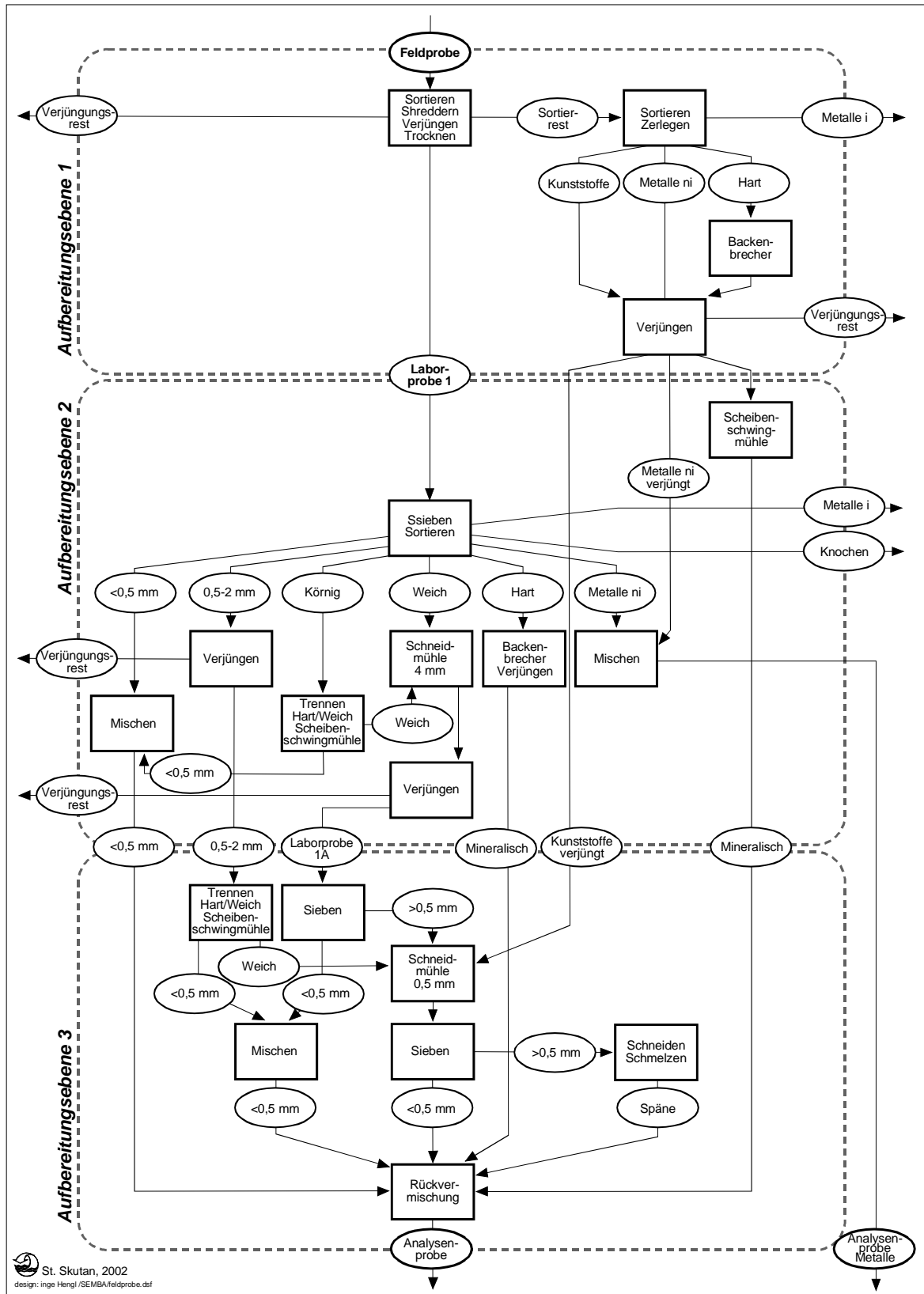


Abbildung 4-13: Schema der Aufbereitung für die Proben der heizwertreichen Fraktionen  $>25\text{ mm}$  und  $>65\text{ mm}$  der MBA Oberpullendorf. (Der Einfachheit halber sind hier entgegen den Regeln der SFA manche Güter- und Prozessnamen mehrfach verwendet.) “i” bezeichnet identifizierbare, „ni“ nicht identifizierbare Metalle und Verbunde.



#### 4.2.5.2 Rotteinput (Fraktion <25 mm) und Rotteoutput

##### Probenahme

Die Feldproben des Rotteinputs und Rotteoutputs wurden als Einzelproben mit einer Schaufel vom laufenden Förderband gezogen, wobei der gesamte Querschnitt erfasst wurde. Die Mengen und Zeitpunkte der Probenahmen sind in im Anhang in Tabelle 11-25 dokumentiert.

##### Probenaufbereitung

In Abbildung 4-14 ist der systematische Aufbau von Probenahme und Probenaufbereitung für Rotteinput und Rotteoutput angegeben. Jeweils zwei Feldproben werden nach der Trocknung (im Zuge der Voraufbereitung mit der Walze) zu einer Mischprobe vereint. Bei der Verjüngung bei der Laboraufbereitung werden zwei Parallelen gebildet. Die nachträgliche Vereinigung zu Mischproben hatte den Zweck, (1) Laboraufbereitungsaufwand zu sparen (die Feldproben wurden unverjüngt der Voraufbereitung vor Ort unterzogen) und (2) bei unveränderter Zahl an Analysen zwei parallele Proben durch die Feinaufbereitung im Labor zu führen, um die Varianzkomponenten der Laborprobenteilung zu bestimmen.

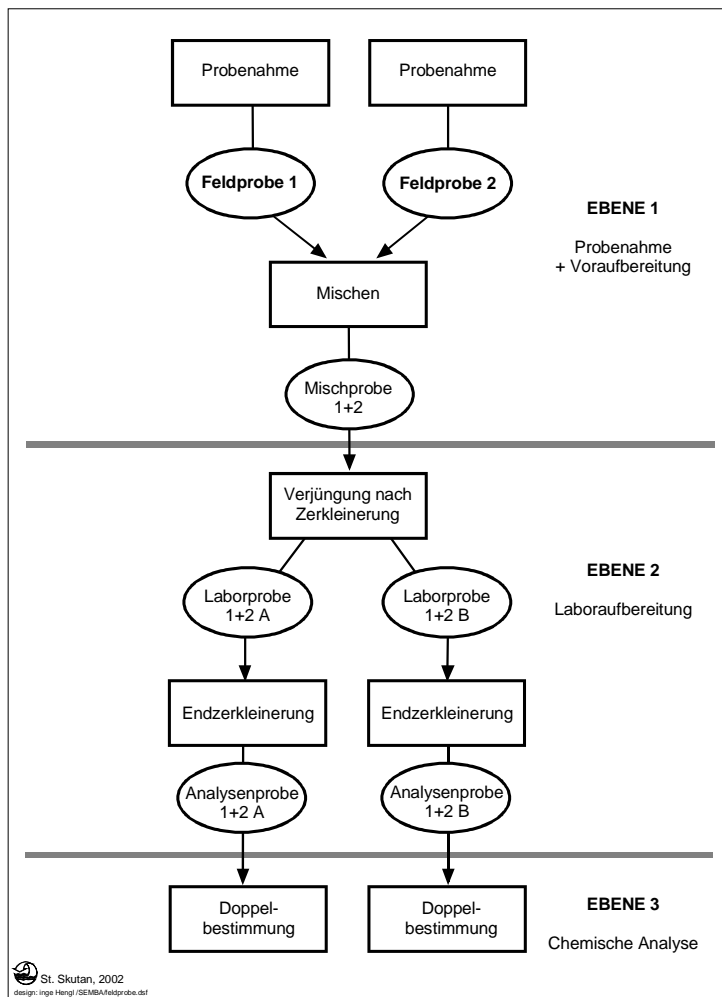


Abbildung 4-14: Probenahme- und Aufbereitungsschema für die Proben vom Rotteoutput und Rotteinput



In Abbildung 4-15 ist das Aufbereitungsschema der Proben von Rotteinput und Rotteoutput dargestellt. Auf die Darstellung der Parallelen (A und B, vergl. Abbildung 4-14) ab dem Verjüngungsschritt im Labor wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

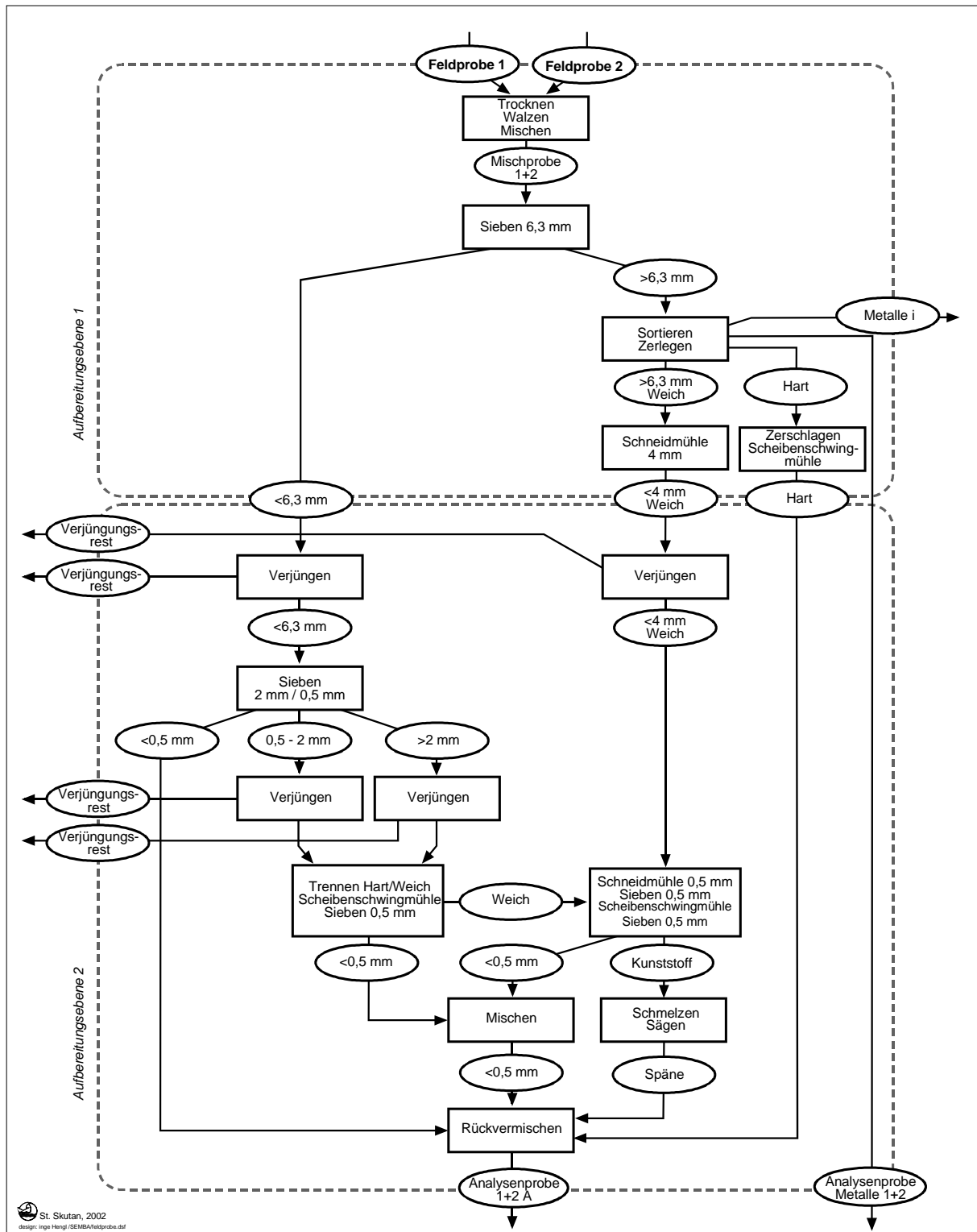


Abbildung 4-15: Schema der Aufbereitung für Proben von Rotteinput und Rotteoutput. „i“ bezeichnet identifizierbare, „ni“ nicht identifizierbare Metalle und Verbunde.



#### 4.2.5.3 Fraktionen 25-65 mm Leicht „BasL“ und Schwer „BasS“

##### *Probenahme*

Die Probenahme der Leichtfraktion des ballistischen Separators „BasL“ erfolgte durch Abstechen des Materials von gepressten Ballen, wobei das Material über den ganzen Querschnitt eines Ballens entnommen wurde. Die Feldproben wurden als Einzelproben angelegt. Die Feldproben der Schwerfraktion des ballistischen Separators „BasS“ wurden als Einzelproben direkt vom Bandabwurf genommen. Zeitpunkte und Mengen sind in Tabelle 11-27 und Tabelle 11-28 dokumentiert.

##### *Probenaufbereitung*

Nur die Proben der Fraktion BasS wurden (nach der Trocknung) einer Voraufbereitung durch Walzen unterzogen. Bei beiden Fraktionen wurde aus jeder Feldprobe je eine Analysenprobe erzeugt. Die Laboraufbereitung erfolgte bei der Fraktion BasS nach dem Schema für mineralstoffreiche Fraktionen, bei BasL nach dem Schema für heizwertreiche Fraktionen.

#### 4.2.5.4 Metallschrotte: Fe-Schrott I, Fe-Schrott II, NFe-Schrott

Die Metallschrottproben wurden jeweils vom Bandabwurf als Einzelproben genommen. Beim Fe-Schrott I war es notwendig, das Probenmaterial mit dem Radlader aufzufangen. In Tabelle 11-29, Tabelle 11-30 und Tabelle 11-31 sind Zeitpunkte und Probenmengen dokumentiert.



## 4.2.6 Güterbilanzen

Die Massenbilanzierung gestaltete sich bedingt durch den Anlagenausfall schwierig. Die rechnerische Ermittlung der Menge des Rotteinputs erwies sich als großes Manko unter den unregelmäßigen Betriebsbedingung mit öfteren Stillständen der Aufbereitungsmaschinen. Erhebliche Schwankungen der Füllstände in den Dano-Trommeln traten auf, die auf Grund der Unmessbarkeit der Menge des Rotteinputs nicht quantifiziert werden konnten.

In Abbildung 4-16 ist für jeden Versuchstag der gewogene Input der Summe der gewogenen Outputs (alle Outputs der mechanischen Behandlung ausgenommen Rotteinput) gegenübergestellt. Die Differenz entspricht der Menge an Rotteinput zuzüglich Füllstandsänderungen der Dano-Trommeln.

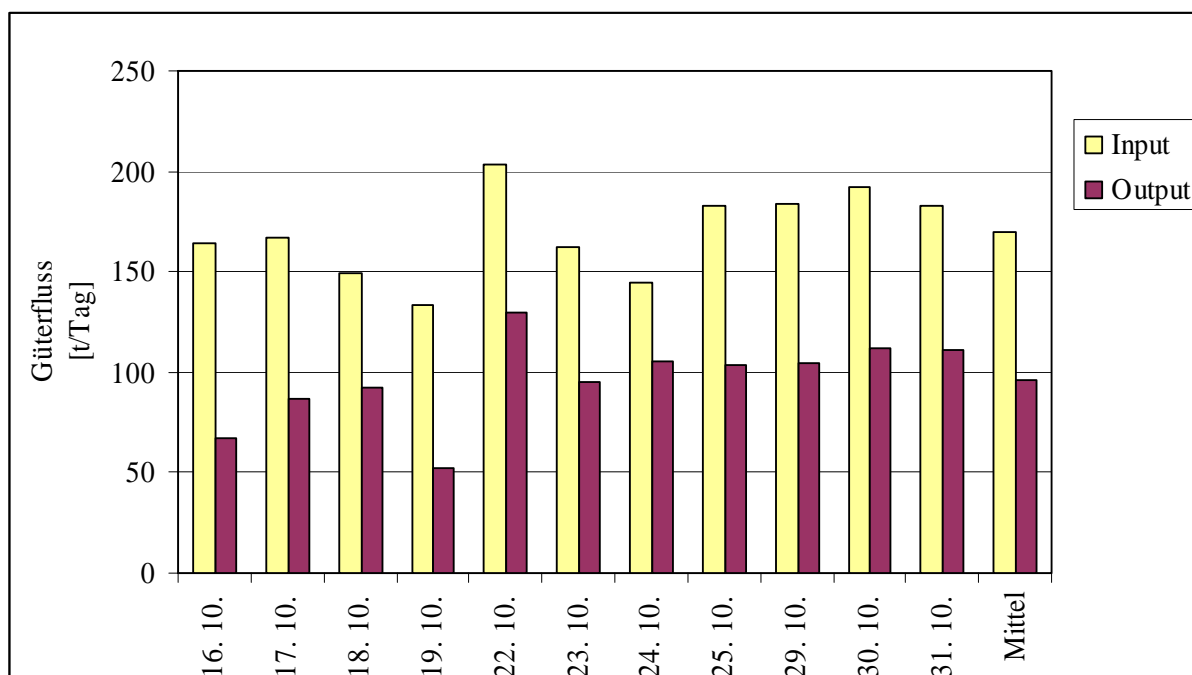


Abbildung 4-16: Gegenüberstellung der Massen der gewogenen In- und Outputs während der Versuchszeit

### 4.2.6.1 Hauptversuch „Oberpullendorf I“

In die Massenbilanz des Hauptversuchs (Oberpullendorf I) ist die Massenbilanz des Versuchs unter geänderten Bedingungen (Oberpullendorf II) einbezogen. Zu diesem Zweck wurden für die Zeit der Betriebsweise „geänderte Bedingungen“ die Massen der Fraktionen BasS, BasL und NFe-Schrott rechnerisch zur heizwertreichen Fraktion >25 mm zusammengeführt.

#### Begründung:

An den Versuchstagen mit Anlagenbetriebsweise „Oberpullendorf II“ traten wiederholt Stillstände in der mechanischen Aufbereitung nach den Dano-Trommeln auf. Während dieser Stillstände wurden die Trommeln allerdings weiter befüllt, d.h. die Trommelfüllung wurde erhöht. An den Tagen mit Betriebsweise „Oberpullendorf I“ war die Betriebsleitung bemüht, den Füllstand auf das Normalmaß zu reduzieren. Nachdem in vereinfachter Betriebsweise höhere Durchsatzleistungen möglich sind, ist im Schnitt der Durchsatz durch die Mechanik



nach den Dano-Trommeln bei Betriebsweise „Oberpullendorf I“ gegenüber Betriebsweise „Oberpullendorf II“ erhöht. Die Auswirkung ist in Abbildung 4-16 sichtbar. An den Tagen 16., 17. und 19. 10. in Betriebsweise „Oberpullendorf II“ treten die geringsten Outputmassen und die größten relativen Differenzen zum Input auf. Die Tagesbilanzen können daher durch die Unbestimmtheit des Trommelinhalts nicht zur Berechnung der Rotteinputmenge herangezogen werden. Der Güterfluss des Rotteinputs würde an den Tagen „Oberpullendorf II“ systematisch im Ausmaß der Erhöhung des Trommelinhalts überschätzt. Zu den anderen Versuchstagen wirkt der Fehler in die entgegengesetzte Richtung. Es gibt keine Möglichkeit, die Massenbilanzen von „Oberpullendorf I“ und „Oberpullendorf II“ unabhängig sinnvoll auszuwerten. Sie wurden daher zusammengefasst.

Die Rotteinputmasse wurde aus der Summe der Massenflüsse beider Versuchsvarianten berechnet unter der Annahme, dass sich der Transferkoeffizient für den Güterfluss des Rotteinputs in den beiden Varianten nicht unterscheidet. Dazu wurden an den Tagen „Oberpullendorf II“ die Massen der Fraktionen >65 mm, 25-65 mm Leicht und Schwer sowie des NFe-Schrotts zusammengefasst und die Summe als Masse der Fraktion >25 mm betrachtet. Auf diese Weise werden zwar mögliche reale, tägliche Schwankungen des Transferkoeffizienten ignoriert, dafür werden die etwaigen Füllstandsveränderungen nicht auf Tagesdurchsätze sondern den Gesamtdurchsatz während der Versuchsdauer umgelegt und damit der daraus resultierende Fehler drastisch verkleinert.

Die Unsicherheit der Massenbilanz wurde aus der Wägungenauigkeit und dem möglichen Fehler verursacht durch Füllstandsveränderungen der Dano-Trommeln abgeschätzt. Für jede Wägung wurde entsprechend der Teilung der Anzeige an der Brückenwaage  $33 \text{ kg}^2$  als Beitrag zur Varianz des Güterflusses addiert (vergl. dazu 6.1.4). Für die mögliche Füllstandsveränderung wurde von der Betriebsleitung abgeschätzt, dass dieser zwischen Zeitpunkt Versuchsbeginn und Zeitpunkt Versuchsende nicht größer war als 50 t. Um diese Aussage in Zahlen einer Varianzursache ausdrücken zu können, wurde folgende Vorgangsweise gewählt: Die Aussage der Betriebsleitung wurde mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % bewertet. Weiters wurde angenommen, dass die Angaben der Betriebsleitung gegenüber der Realität normalverteilte Abweichungen aufweisen. Die Annahme der Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ergibt mit der Normalverteilungsstatistik, dass der angegebene Vertrauensbereich von real 50 t dem 1,96-fachen der Standardabweichung entspricht. Die Standardabweichung des Trommelfüllstandes ist daher mit ca. 25 t, anzugeben, die Varianz mit  $625 \text{ t}^2$ . Diese Varianz ist der durch die Ungewissheit beim Trommelfüllstand verursachte Varianzbeitrag bei der Bestimmung der gesamten Rotteinputmasse.

#### 4.2.6.2 Versuch mit geänderten Bedingungen „Oberpullendorf II“

Für die Massenbilanz der Versuchs „Oberpullendorf II“ wird der Transferkoeffizient für den Rotteinput vom Versuch „Oberpullendorf I“ übernommen. Mit diesem und den Massen der gewogenen Outputs (Fraktion >65 mm, BasS, BasL, NFe-Schrott und beide Fe-Schrotte) wurde die Masse des Rotteinputs errechnet, die während der Versuchszeit „Oberpullendorf II“ angefallen sein musste. Die Unsicherheiten der Güterflüsse wurden aus der Wägungenauigkeit berechnet (vergl. 6.1.4). Als zusätzliche Unsicherheit wurden  $175 \text{ t}^2$  als Varianzbeitrag beim Rotteinput für die Ungewissheit über die Füllstandsveränderung addiert. Diese Varianz entspricht der Annahme, dass die Rotteinputmenge während des Versuchs Oberpullendorf II mit 95 %-iger Wahrscheinlichkeit nicht weiter als 30 t von der berechneten Menge abweicht.



#### 4.2.6.3 Rotte

Nachdem die Masse des Rotteinputs nicht direkt gemessen wurde und die Beschickung der beiden Versuchsfelder von den Problemen der Aufbereitung betroffen war, ist die Massenbilanz mit einer unerwartet hohen Unsicherheit behaftet. Die Menge des Rotteinputs für jedes Versuchsfeld wurde aus dem Transferkoeffizienten und den während des Aufsetzens produzierten Massen der anderen Outputgüter berechnet. Die Unsicherheit der Masse des Rotteoutputs ist aus der Wägeungenauigkeit berechnet (vergl. 6.1.4). Für die Ungenauigkeit der Rotteinputmasse bei der Rottebilanz musste erneut eine Abschätzung verwendet werden. Es wurden  $100 \text{ t}^2$  für die Varianz eingesetzt entsprechend einem Fehler von nicht mehr als 20 t der Masse eines Rottefeldes bei 95 %-iger Wahrscheinlichkeit dieser Annahme.



#### 4.2.7 Zusammensetzung der Güter

Im Folgenden sind für jedes Gut der beiden oberpullendorfer Versuche die Ergebnisse der Analysen mit einigen statistischen Parametern dargestellt. Die Zeile „Anteil aus Metallteilen“ beschreibt jene Metallfracht, die als Bestandteil von konzentrierten Trägerpartikeln (-stücken) in den Gütern auftritt. In der Regel handelt es sich dabei um Metallpartikel (-stücke) oder identifizierbare Verbunde z.B. Batterien. Der „Anteil aus Metallteilen“ ist der Beitrag, der durch Separatbestimmung ermittelt wurde (Aussortieren und Wägen bzw. Lösen in Säure mit anschließender separater, quantitativer chemischer Analyse; zum Lösen der Metalle siehe Kapitel 3.4.3.4). Es ist zu beachten, dass die Bestandteile der Proben, die für den „Anteil aus Metallteilen“ verantwortlich sind, in der Regel nicht gemeinsam mit den anderen Bestandteilen der Proben aufbereitet werden können, weil sie nicht ausreichend zerkleinerbar sind (siehe Kapitel 6.1.5.3). In der Analysenpraxis werden solche Probenbestandteile meistens als „Störstoffe“ eingestuft und aus der Analyse ausgeschossen, was die systematische Unterschätzung von Metallgehalten nach sich zieht. Das ist hier ausdrücklich nicht der Fall, alle in den Proben enthaltenen Gemengteile wurden berücksichtigt. Der Anteil metallischer Partikel, der bei praxisüblicher Aufbereitung und Analyse der Störstoffauslese entgeht, tritt in Form von „Ausreißern“, welche gegenüber parallelen Analysenwerten um ein Vielfaches überhöht sein können, in Erscheinung. Die gewählte Probenaufbereitung hatte zum Ziel, die Menge an Metallpartikeln in den Analysenproben möglichst zu reduzieren, um diese Problematik zu entschärfen. Die Sortierung kann nicht vollkommen sein, und so traten auch hier „Ausreißer“ auf. Nachdem diese „systembedingt“ sind, ist es nicht gerechtfertigt, diese Werte aus der Auswertung auszuschließen, da sonst die durchschnittlichen Metallgehalte systematisch unterschätzt werden. („Systembedingt“ soll heißen, dass es nicht Fehler sind, die zu solchen „Ausreißern“ führen, sondern dass das Probenaufbereitungs- und Analysesystem mit gewisser Häufigkeit automatisch solche Werte produziert.) Außer bei der Auswertung von Quecksilber im Rotteinput (Hg\*, siehe 4.1.2.22) wurden keinerlei Werte als Ausreißer bewertet und ausgeschlossen.

Die hier angegebenen Werte für die „Anteile aus Metallteilen“ stellen Minima dar, da eine 100 %-ige Sortierung nicht möglich ist. Eine Interpretation der „Anteile aus Metallteilen“ ist in Kapitel 4.5 enthalten.

Die Einzelwerte, mit welchen die statistischen Auswertungen der folgenden Tabellen berechnet wurden, sind immer die Werte, welche die Feldproben beschreiben. Die Feldproben stellen die Stichprobenelemente dar, die von einander unabhängig sind. Jeder dieser Einzelwerte ist zwar seinerseits ein Mittelwert aus mehreren Bestimmungen (je nach Anzahl von Parallelen in Aufbereitung und Analyse), doch ist dieser Umstand für die Auswertung der Feldprobenwerte irrelevant. Die Standardabweichung des Mittelwerts wird daher berechnet aus der Standardabweichung der Einzelwerteverteilung gebrochen durch die Wurzel der Feldprobenanzahl.





#### 4.2.7.1 Heizwertreiche Fraktion >25 mm (Oberpullendorf I)

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt. Wm Weiteren sind die Analysnergebnisse dargestellt.

*Tabelle 4-68: Daten zur Probenahme und Aufbereitung bei der Fraktion >25 mm*

|   |          |
|---|----------|
| Charakterisierte Gütermenge                     | 1.021 t  |
| Anzahl Feldproben<br>(Stichprobenumfang)        | 24       |
| mittlere Feldprobenmasse                        | 180 kg   |
| Feldprobenmasse insgesamt                       | 4.320 kg |
|   |          |
| Anzahl Laborproben                              | 48       |
| mittlere Laborprobenmasse (feucht) <sup>1</sup> | 22 kg    |
| Laborprobenmasse insgesamt                      | 1.056 kg |
|   |          |
| Anzahl Analysenproben                           | 48       |
| Anzahl Analysen                                 | 96       |
| Anzahl eliminierter Ausreißer                   | 0        |

<sup>1</sup> zerkleinert auf <40 mm

*Tabelle 4-69: Zusammensetzung der heizwertreichen Fraktion >25 mm: Ausgewählte Summenparameter*

|                                    | TM<br>g/100g FS | Wasser<br>g/100g FS | Glühverlust<br>g/100g TS | Asche<br>g/100g TS |
|------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|--------------------|
| Mittelwert                         | 66,3            | 33,7                | 58,6                     | 41,4               |
| Standardabweichung                 | 3,6             | 3,6                 | 6,61                     | 6,61               |
| Minimum                            | 58,3            | 27,9                | 40,3                     | 34,0               |
| Maximum                            | 72,1            | 41,7                | 66,0                     | 59,7               |
| Median                             | 66,3            | 33,7                | 60,3                     | 39,7               |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 0,74            | 0,74                | 1,3                      | 1,3                |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                 |                     |                          |                    |
| untere Schranke                    | 64,8            | 32,3                | 56,0                     | 38,7               |
| obere Schranke                     | 67,7            | 35,2                | 61,3                     | 44,0               |

*Tabelle 4-70: Zusammensetzung der heizwertreichen Fraktion >25 mm: Ausgewählte Summenparameter und Nichtmetalle*

|                                    | TC<br>g/100g TS | TOC<br>g/100g TS | TIC<br>g/100g TS | N<br>g/100g TS | P<br>mg/kg TS | S<br>mg/kg TS |
|------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|---------------|---------------|
| Mittelwert                         | 41,0            | 39,6             | 1,35             | 1,11           | 2.100         | 4.200         |
| Standardabweichung                 | 30,0            | 3,46             | 0,146            | 0,16           | 210           | 600           |
| Minimum                            | 33,3            | 31,8             | 1,14             | 0,80           | 1.800         | 3.100         |
| Maximum                            | 46,2            | 45,1             | 1,63             | 1,42           | 2.600         | 5.600         |
| Median                             | 41,8            | 40,5             | 1,33             | 1,12           | 2.100         | 4.200         |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 0,69            | 0,71             | 0,030            | 0,033          | 43            | 120           |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                 |                  |                  |                |               |               |
| untere Schranke                    | 39,6            | 38,2             | 1,29             | 1,05           | 2.100         | 4.000         |
| obere Schranke                     | 42,3            | 41,0             | 1,41             | 1,17           | 2.200         | 4.400         |



Tabelle 4-71: Zusammensetzung der heizwertreichen Fraktion >25 mm: Ausgewählte Metalle

|                                    | Al<br>mg/kg TS | Cd<br>mg/kg TS | Cr<br>mg/kg TS | Cu<br>mg/kg TS | Fe<br>mg/kg TS |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Mittelwert                         | 28.000         | 6,5            | 510            | 5.300          | 42.000         |
| Anteil aus Metallteilen            | 14.000         | ---            | 300            | 4.700          | 32.000         |
| Standardabweichung                 | 7.600          | 2,8            | 410            | 2.400          | 19.000         |
| Minimum                            | 19.000         | 2,5            | 190            | 2.300          | 21.000         |
| Maximum                            | 52.000         | 16,2           | 2.100          | 12.000         | 93.000         |
| Median                             | 28.000         | 5,8            | 360            | 4.700          | 40.000         |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 1.600          | 0,6            | 83             | 480            | 3.900          |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                |                |                |                |                |
| untere Schranke                    | 25.000         | 5,4            | 350            | 4.300          | 34.000         |
| obere Schranke                     | 31.000         | 7,6            | 670            | 6.200          | 50.000         |

Tabelle 4-72: Zusammensetzung der heizwertreichen Fraktion >25 mm: Ausgewählte Metalle

|                                    | Ni<br>mg/kg TS | Pb<br>mg/kg TS | Zn<br>mg/kg TS | Hg<br>mg/kg TS |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Mittelwert                         | 180            | 690            | 3.300          | 0,78           |
| Anteil aus Metallteilen            | 140            | 340            | 2.300          | ---            |
| Standardabweichung                 | 160            | 900            | 2.300          | 0,52           |
| Minimum                            | 52             | 200            | 1.600          | 0,28           |
| Maximum                            | 630            | 4.600          | 13.000         | 2,39           |
| Median                             | 110            | 380            | 2.700          | 0,64           |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 33             | 180            | 470            | 0,11           |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                |                |                |                |
| untere Schranke                    | 110            | 330            | 2.400          | 0,57           |
| obere Schranke                     | 240            | 1.100          | 4.200          | 0,99           |

#### 4.2.7.2 Heizwertreiche Fraktion >65 mm (Oberpullendorf II)

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt, danach sind die Analysenergebnisse angeführt..

Tabelle 4-73: Daten zur Probenahme und Aufbereitung bei der Fraktion >65 mm

|                                    |          |
|------------------------------------|----------|
| Charakterisierte Gütermenge        | 114 t    |
| Anzahl Feldproben                  | 10       |
| mittlere Feldprobenmasse           | 210 kg   |
| Feldprobenmasse insgesamt          | 2.100 kg |
|                                    |          |
| Anzahl Laborproben                 | 20       |
| mittlere Laborprobenmasse (feucht) | 21 kg    |
| Laborprobenmasse insgesamt         | 420 kg   |
|                                    |          |
| Anzahl Analysenproben              | 40       |
| Anzahl Analysen                    | 40       |
| Anzahl eliminiertes Ausreißer      | 0        |

<sup>†</sup> zerkleinert auf <40 mm



Tabelle 4-74: Zusammensetzung der heizwertreichen Fraktion >65 mm: Ausgewählte Summenparameter

|                                    | TM<br>g/100g FS | Wasser<br>g/100g FS | Glühverlust<br>g/100g TS | Asche<br>g/100g TS |
|------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|--------------------|
| Mittelwert                         | 65,8            | 34,2                | 69,4                     | 30,6               |
| Standardabweichung                 | 3,64            | 3,64                | 2,70                     | 2,70               |
| Minimum                            | 61,1            | 26,3                | 63,8                     | 27,2               |
| Maximum                            | 73,7            | 38,9                | 72,8                     | 36,2               |
| Median                             | 65,4            | 34,6                | 69,9                     | 30,1               |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 1,15            | 1,15                | 0,9                      | 0,85               |
| 95% Konfidenzi. für den Mittelwert |                 |                     |                          |                    |
| untere Schranke                    | 63,5            | 32,0                | 67,7                     | 28,9               |
| obere Schranke                     | 68,0            | 36,5                | 71,1                     | 32,3               |

Tabelle 4-75: Zusammensetzung der heizwertreichen Fraktion >65 mm: Ausgewählte Summenparameter und Nichtmetalle

|                                    | TC<br>g/100g TS | TOC<br>g/100g TS | TIC<br>g/100g TS | N<br>g/100g TS | P<br>mg/kg TS | S<br>mg/kg TS |
|------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|---------------|---------------|
| Mittelwert                         | 45,1            | 43,9             | 1,20             | 1,30           | 1.900         | 3.500         |
| Standardabweichung                 | 1,85            | 1,97             | 0,19             | 0,12           | 490           | 320           |
| Minimum                            | 42,2            | 40,7             | 0,87             | 1,07           | 1.200         | 2.900         |
| Maximum                            | 47,9            | 46,6             | 1,50             | 1,45           | 2.700         | 3.800         |
| Median                             | 44,9            | 43,8             | 1,20             | 1,33           | 1.900         | 3.600         |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 0,58            | 0,62             | 0,060            | 0,038          | 160           | 100           |
| 95% Konfidenzi. für den Mittelwert |                 |                  |                  |                |               |               |
| untere Schranke                    | 43,9            | 42,6             | 1,09             | 1,22           | 1.600         | 3.300         |
| obere Schranke                     | 46,2            | 45,1             | 1,32             | 1,37           | 2.200         | 3.700         |

Tabelle 4-76: Zusammensetzung der heizwertreichen Fraktion >65 mm: Ausgewählte Metalle

|                                    | Al<br>mg/kg TS | Cd<br>mg/kg TS | Cr<br>mg/kg TS | Cu<br>mg/kg TS | Fe<br>mg/kg TS |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Mittelwert                         | 18.000         | 14             | 400            | 4.700          | 37.000         |
| Anteil aus Metallteilen            | 6.100          | 4,4            | 60             | 3.400          | 26.000         |
| Standardabweichung                 | 3.500          | 14             | 110            | 3.200          | 8.600          |
| Minimum                            | 14.000         | 2,5            | 260            | 1.900          | 27.000         |
| Maximum                            | 25.000         | 52             | 630            | 11.000         | 55.000         |
| Median                             | 18.000         | 10             | 380            | 3.300          | 36.000         |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 1.100          | 4,6            | 34             | 1.000          | 2.700          |
| 95% Konfidenzi. für den Mittelwert |                |                |                |                |                |
| untere Schranke                    | 16.000         | 4,7            | 340            | 2.700          | 32.000         |
| obere Schranke                     | 21.000         | 23             | 470            | 6.700          | 42.000         |



Tabelle 4-77: Zusammensetzung der heizwertreichen Fraktion >65 mm: Ausgewählte Metalle

|                                    | Ni<br>mg/kg TS | Pb<br>mg/kg TS | Zn<br>mg/kg TS | Hg<br>mg/kg TS |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Mittelwert                         | 150            | 300            | 2.100          | 1,2            |
| Anteil aus Metallteilen            | 110            | 18             | 580            | ---            |
| Standardabweichung                 | 140            | 90             | 710            | 2,3            |
| Minimum                            | 58             | 220            | 1.200          | 0,32           |
| Maximum                            | 520            | 490            | 3.200          | 7,8            |
| Median                             | 100            | 250            | 2.100          | 0,52           |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 44             | 28             | 220            | 0,73           |
| 95% Konfidenzi. für den Mittelwert |                |                |                | 0              |
| untere Schranke                    | 67             | 250            | 1.700          | -0,20          |
| obere Schranke                     | 240            | 360            | 2.600          | 2,7            |

#### 4.2.7.3 Leichtfraktion 25-65 mm vom ballistischen Separator BasL (Oberpullendorf II)

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt.

Tabelle 4-78: Daten zur Probenahme und Aufbereitung bei der Fraktion BasL

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| Charakterisierte Gütermenge   | 19 t   |
| Anzahl Feldproben             | 6      |
| mittlere Feldprobenmasse      | 23 kg  |
| Feldprobenmasse insgesamt     | 138 kg |
|                               |        |
| Anzahl Analysenproben         | 6      |
| Anzahl Analysen               | 12     |
| Anzahl eliminierter Ausreißer | 0      |

<sup>1</sup> zerkleinert auf <40 mm

Tabelle 4-79: Zusammensetzung der heizwertreichen Fraktion BasL: Ausgewählte Summenparameter

|                                    | TM<br>g/100g FS | Wasser<br>g/100g FS | Glühverlust<br>g/100g TS | Asche<br>g/100g TS |
|------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|--------------------|
| Mittelwert                         | 57,6            | 42,4                | 73,0                     | 27,0               |
| Standardabweichung                 | 1,51            | 1,51                | 7,04                     | 7,04               |
| Minimum                            | 55,8            | 44,2                | 68,1                     | 13,0               |
| Maximum                            | 59,6            | 40,4                | 87,0                     | 31,9               |
| Median                             | 57,5            | 42,5                | 70,5                     | 29,5               |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 0,617           | 0,617               | 2,88                     | 2,88               |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                 |                     |                          |                    |
| untere Schranke                    | 56,4            | 41,2                | 67,4                     | 21,3               |
| obere Schranke                     | 58,8            | 43,6                | 78,7                     | 32,6               |



*Tabelle 4-80: Zusammensetzung der heizwertreichen Fraktion BasL: Ausgewählte Summenparameter und Nichtmetalle*

|                                    | <b>TC</b><br>g/100g TS | <b>TOC</b><br>g/100g TS | <b>TIC</b><br>g/100g TS | <b>N</b><br>g/100g TS | <b>P</b><br>mg/kg TS | <b>S</b><br>mg/kg TS |
|------------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Mittelwert                         | 45,9                   | 44,6                    | 1,28                    | 1,08                  | 1.900                | 3.900                |
| Standardabweichung                 | 0,93                   | 0,97                    | 0,16                    | 0,12                  | 280                  | 220                  |
| Minimum                            | 44,5                   | 43,0                    | 1,05                    | 1,00                  | 1.400                | 3.600                |
| Maximum                            | 46,9                   | 45,5                    | 1,45                    | 1,30                  | 2.300                | 4.200                |
| Median                             | 46,1                   | 44,8                    | 1,33                    | 1,05                  | 1.900                | 3.900                |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 0,38                   | 0,40                    | 0,067                   | 0,05                  | 110                  | 89                   |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                        |                         |                         |                       |                      |                      |
| untere Schranke                    | 45,1                   | 43,8                    | 1,14                    | 0,99                  | 1.700                | 3.700                |
| obere Schranke                     | 46,6                   | 45,4                    | 1,41                    | 1,18                  | 2.100                | 4.100                |

*Tabelle 4-81: Zusammensetzung der heizwertreichen Fraktion BasL: Ausgewählte Metalle*

|                                    | <b>Al</b><br>mg/kg TS | <b>Cd</b><br>mg/kg TS | <b>Cr</b><br>mg/kg TS | <b>Cu</b><br>mg/kg TS | <b>Fe</b><br>mg/kg TS |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mittelwert                         | 18.000                | 6,4                   | 300                   | 1.000                 | 11.000                |
| Anteil aus Metallteilen            | 1.200                 | 0,0                   | 34                    | 530                   | 2.500                 |
| Standardabweichung                 | 3.000                 | 4,3                   | 250                   | 300                   | 3.000                 |
| Minimum                            | 14.000                | 2,9                   | 97                    | 760                   | 8.700                 |
| Maximum                            | 23.000                | 14,8                  | 810                   | 1.500                 | 17.000                |
| Median                             | 17.000                | 5,6                   | 240                   | 940                   | 9.700                 |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 1.200                 | 1,8                   | 100                   | 120                   | 1.200                 |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                       |                       |                       |                       |                       |
| untere Schranke                    | 16.000                | 3,0                   | 100                   | 810                   | 8.400                 |
| obere Schranke                     | 21.000                | 9,9                   | 510                   | 1.300                 | 13.200                |

*Tabelle 4-82: Zusammensetzung der heizwertreichen Fraktion BasL: Ausgewählte Metalle*

|                                    | <b>Ni</b><br>mg/kg TS | <b>Pb</b><br>mg/kg TS | <b>Zn</b><br>mg/kg TS | <b>Hg</b><br>mg/kg TS |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mittelwert                         | 74                    | 160                   | 1.800                 | 0,51                  |
| Anteil aus Metallteilen            | 39                    | 13                    | 170                   | ---                   |
| Standardabweichung                 | 36                    | 53                    | 590                   | 0,088                 |
| Minimum                            | 47                    | 120                   | 1.200                 | 0,36                  |
| Maximum                            | 130                   | 270                   | 2.400                 | 0,62                  |
| Median                             | 56                    | 140                   | 1.800                 | 0,51                  |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 15                    | 22                    | 240                   | 0,036                 |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert | 0                     | 0                     | 0                     | 0                     |
| untere Schranke                    | 45                    | 118                   | 1.300                 | 0,49                  |
| obere Schranke                     | 100                   | 200                   | 2.300                 | 0,58                  |



#### 4.2.7.4 Schwerfraktion 25-65 mm vom ballistischen Separator BasS (Oberpullendorf II)

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt.

*Tabelle 4-83: Daten zur Probenahme und Aufbereitung bei der Fraktion BasS*

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| Charakterisierte Gütermenge   | 22 t   |
| Anzahl Feldproben             | 14     |
| mittlere Feldprobenmasse      | 37 kg  |
| Feldprobenmasse insgesamt     | 518 kg |
|                               |        |
| Anzahl Analysenproben         | 14     |
| Anzahl Analysen               | 28     |
| Anzahl eliminierter Ausreißer | 0      |

<sup>1</sup> zerkleinert auf <40 mm

*Tabelle 4-84: Zusammensetzung der Fraktion BasS: Ausgewählte Summenparameter*

|                                    | TM<br>g/100g FS | Wasser<br>g/100g FS | Glühverlust<br>g/100g TS | Asche<br>g/100g TS |
|------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|--------------------|
| Mittelwert                         | 78,0            | 22,0                | 36,5                     | 63,5               |
| Standardabweichung                 | 3,0             | 3,0                 | 5,91                     | 5,91               |
| Minimum                            | 71,1            | 28,9                | 26,9                     | 73,1               |
| Maximum                            | 82,7            | 17,3                | 47,5                     | 52,5               |
| Median                             | 78,6            | 21,4                | 35,7                     | 64,3               |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 0,80            | 0,80                | 1,58                     | 1,58               |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                 |                     |                          |                    |
| untere Schranke                    | 76,5            | 20,4                | 33,4                     | 60,4               |
| obere Schranke                     | 79,6            | 23,5                | 39,6                     | 66,6               |

*Tabelle 4-85: Zusammensetzung der Fraktion BasS: Ausgewählte Summenparameter und Nichtmetalle*

|                                    | TC<br>g/100g TS | TOC<br>g/100g TS | TIC<br>g/100g TS | N<br>g/100g TS | P<br>mg/kg TS | S<br>mg/kg TS |
|------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|---------------|---------------|
| Mittelwert                         | 25,2            | 23,5             | 1,70             | 0,59           | 3.000         | 3.900         |
| Anteil aus Knochen                 | ---             | ---              | ---              | ---            | 890           | ---           |
| Standardabweichung                 | 4,38            | 4,39             | 0,26             | 0,090          | 820           | 1.000         |
| Minimum                            | 17,6            | 16,1             | 1,20             | 0,40           | 1.600         | 2.100         |
| Maximum                            | 33,5            | 32,3             | 2,15             | 0,75           | 4.400         | 5.600         |
| Median                             | 25,0            | 23,3             | 1,73             | 0,60           | 3.100         | 3.900         |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 1,17            | 1,17             | 0,070            | 0,024          | 220           | 270           |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                 |                  |                  |                |               |               |
| untere Schranke                    | 22,9            | 21,2             | 1,56             | 0,55           | 2.800         | 3.600         |
| obere Schranke                     | 27,5            | 25,8             | 1,84             | 0,64           | 3.200         | 4.200         |



Tabelle 4-86: Zusammensetzung der Fraktion BasS: Ausgewählte Metalle

|                                    | Al<br>mg/kg TS | Cd<br>mg/kg TS | Cr<br>mg/kg TS | Cu<br>mg/kg TS | Fe<br>mg/kg TS |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Mittelwert                         | 25.000         | 6,2            | 240            | 8.400          | 26.000         |
| Anteil aus Metallteilen            | 5.800          | ---            | 130            | 8.000          | 14.000         |
| Standardabweichung                 | 3.900          | 2,1            | 280            | 4.200          | 4.900          |
| Minimum                            | 19.000         | 2,8            | 60             | 3.800          | 18.000         |
| Maximum                            | 32.000         | 9,4            | 1.100          | 20.000         | 36.000         |
| Median                             | 25.000         | 5,8            | 140            | 7.100          | 25.000         |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 1.000          | 0,55           | 76             | 1.100          | 1.300          |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                |                |                |                |                |
| untere Schranke                    | 24.000         | 5,1            | 170            | 7.300          | 25.000         |
| obere Schranke                     | 26.100         | 7,3            | 320            | 9.500          | 27.000         |

Tabelle 4-87: Zusammensetzung der Fraktion BasS: Ausgewählte Metalle

|                                    | Ni<br>mg/kg TS | Pb<br>mg/kg TS | Zn<br>mg/kg TS | Hg<br>mg/kg TS |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Mittelwert                         | 150            | 1.200          | 5.200          | 0,89           |
| Anteil aus Metallteilen            | 87             | 590            | 4.200          | ---            |
| Standardabweichung                 | 130            | 1.700          | 1.900          | 2,0            |
| Minimum                            | 33             | 260            | 2.800          | 0,14           |
| Maximum                            | 570            | 5.200          | 8.800          | 8,0            |
| Median                             | 120            | 400            | 4.800          | 0,34           |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 35             | 440            | 500            | 0,55           |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                |                |                |                |
| untere Schranke                    | 120            | 780            | 4.700          | -0,18          |
| obere Schranke                     | 190            | 1.700          | 5.700          | 2,0            |

#### 4.2.7.5 Rotteinput <25 mm (Oberpullendorf I und II)

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt.

Tabelle 4-88: Daten zur Probenahme und Aufbereitung beim Rotteinput

|   |          |
|---|----------|
| Charakterisierte Gütermenge                   | 806 t    |
| Anzahl Mischproben<br>(=jeweils 2 Feldproben) | 19       |
| mittlere Mischprobenmasse                     | 75 kg    |
| Mischprobenmasse insgesamt                    | 1.425 kg |
|   |          |
| Anzahl Laborproben                            | 38       |
| mittlere Laborprobenmasse (lutro)             | 710 g    |
| Laborprobenmasse insgesamt                    | 30 kg    |
|   |          |
| Anzahl Analysenproben                         | 38       |
| Anzahl Analysen                               | 76       |
| Anzahl eliminiertes Ausreißer                 | 1*       |

\*bei Hg wurde eine Mischprobe in der Variante Hg\* aus der Auswertung ausgeschlossen (vergl. 4.5.13)



*Tabelle 4-89: Zusammensetzung des Rotteinputs: Ausgewählte Summenparameter*

|                                    | <b>TM</b><br>g/100g FS | <b>Wasser</b><br>g/100g FS | <b>Glühverlust</b><br>g/100g TS | <b>Asche</b><br>g/100g TS |
|------------------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Mittelwert                         | 56,1                   | 43,9                       | 52                              | 48                        |
| Standardabweichung                 | 3,3                    | 3,3                        | 5,7                             | 5,7                       |
| Minimum                            | 50,0                   | 38,9                       | 44                              | 33                        |
| Maximum                            | 61,1                   | 50,0                       | 67                              | 56                        |
| Median                             | 55,2                   | 44,8                       | 52                              | 48                        |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 0,75                   | 0,75                       | 1,1                             | 1,1                       |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                        |                            |                                 |                           |
| untere Schranke                    | 54,6                   | 42,5                       | 50                              | 46                        |
| obere Schranke                     | 57,5                   | 45,4                       | 54                              | 50                        |

*Tabelle 4-90: Zusammensetzung des Rotteinputs: Ausgewählte Summenparameter und Nichtmetalle*

|                                    | <b>TC</b><br>g/100g TS | <b>TOC</b><br>g/100g TS | <b>TIC</b><br>g/100g TS | <b>N</b><br>g/100g TS | <b>P</b><br>g/100g TS | <b>S</b><br>mg/kg TS |
|------------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Mittelwert                         | 29,2                   | 27,5                    | 1,65                    | 1,04                  | 2.400                 | 4.900                |
| Standardabweichung                 | 2,5                    | 2,6                     | 0,18                    | 0,153                 | 380                   | 630                  |
| Minimum                            | 29,3                   | 27,7                    | 1,57                    | 1,048                 | 2.400                 | 4.900                |
| Maximum                            | 33,4                   | 32,1                    | 1,95                    | 1,390                 | 3.700                 | 6.500                |
| Median                             | 29,3                   | 27,7                    | 1,60                    | 1,018                 | 2.300                 | 4.800                |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 0,56                   | 0,60                    | 0,041                   | 0,0350                | 90                    | 150                  |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                        |                         |                         |                       |                       |                      |
| untere Schranke                    | 28,0                   | 26,3                    | 1,57                    | 0,97                  | 2.300                 | 4.600                |
| obere Schranke                     | 30,3                   | 28,7                    | 1,73                    | 1,11                  | 2.600                 | 5.200                |

*Tabelle 4-91: Zusammensetzung des Rotteinputs: Ausgewählte Metalle*

|                                    | <b>Al</b><br>mg/kg TS | <b>Cd</b><br>mg/kg TS | <b>Cr</b><br>mg/kg TS | <b>Cu</b><br>mg/kg TS | <b>Fe</b><br>mg/kg TS |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mittelwert                         | 16.800                | 2,0                   | 130                   | 1.000                 | 14.400                |
| Anteil aus Metallteilen            | 370                   | ---                   | 31                    | 720                   | 2.600                 |
| Standardabweichung                 | 840                   | 0,50                  | 37                    | 310                   | 1.500                 |
| Minimum                            | 15.000                | 1,5                   | 88                    | 430                   | 12.500                |
| Maximum                            | 18.400                | 3,5                   | 220                   | 1.700                 | 18.800                |
| Median                             | 16.700                | 2,0                   | 110                   | 980                   | 14.500                |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 190                   | 0,11                  | 8,5                   | 70                    | 338                   |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                       |                       |                       |                       |                       |
| untere Schranke                    | 16.400                | 1,8                   | 110                   | 880                   | 13.700                |
| obere Schranke                     | 17.200                | 2,3                   | 140                   | 1.200                 | 15.100                |





Tabelle 4-92: Zusammensetzung des Rotteinputs: Ausgewählte Metalle

|                                    | Ni<br>mg/kg TS | Pb<br>mg/kg TS | Zn<br>mg/kg TS | Hg<br>mg/kg TS | Hg *<br>mg/kg TS |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|------------------|
| Mittelwert                         | 130            | 410            | 1.500          | 6,36           | 1,37             |
| Anteil aus Metallteilen            | 92             | 130            | 480            | ---            | ---              |
| Standardabweichung                 | 250            | 230            | 770            | 21,8           | 1,45             |
| Minimum                            | 35             | 160            | 800            | 0,44           | 0,44             |
| Maximum                            | 1.200          | 950            | 4.000          | 96             | 6,55             |
| Median                             | 66             | 380            | 1.300          | 0,95           | 0,93             |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 58             | 52             | 180            | 4,99           | 0,33             |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                |                |                |                |                  |
| untere Schranke                    | 18             | 300            | 1.200          | -3,43          | 0,72             |
| obere Schranke                     | 250            | 510            | 1.900          | 16,14          | 2,02             |

\* Elimination eines „Ausreißers“ (1 von 18 Mischproben) beim Rotteinput

#### 4.2.7.6 Rotteoutput <25 mm (Oberpullendorf Rottebilanz)

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt.

Tabelle 4-93: Daten zur Probenahme und Aufbereitung beim Rotteoutput

|   |        |
|---|--------|
| Charakterisierte Gütermenge                   | 183 t  |
| Anzahl Mischproben<br>(=jeweils 2 Feldproben) | 12     |
| mittlere Mischprobenmasse                     | 79 kg  |
| Mischprobenmasse insgesamt                    | 948 kg |
|   |        |
| Anzahl Laborproben                            | 24     |
| mittlere Laborprobenmasse (lutro)             | 700 g  |
| Laborprobenmasse insgesamt                    | 17 kg  |
|   |        |
| Anzahl Analysenproben                         | 24     |
| Anzahl Analysen                               | 48     |
| Anzahl eliminierter Ausreißer                 | 0      |

Tabelle 4-94: Zusammensetzung des Rotteoutputs: Ausgewählte Summenparameter

|                                    | TM<br>g/100g FS | Wasser<br>g/100g FS | Glühverlust<br>g/100g TS | Asche<br>g/100g TS |
|------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|--------------------|
| Mittelwert                         | 67,6            | 32,4                | 35,9                     | 64,1               |
| Standardabweichung                 | 1,88            | 1,88                | 2,62                     | 2,62               |
| Minimum                            | 64,8            | 29,4                | 32,0                     | 41,1               |
| Maximum                            | 70,6            | 35,2                | 58,9                     | 68,0               |
| Median                             | 67,3            | 32,7                | 35,5                     | 64,5               |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 0,543           | 0,543               | 0,756                    | 0,756              |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                 |                     |                          |                    |
| untere Schranke                    | 66,5            | 31,3                | 34,4                     | 62,6               |
| obere Schranke                     | 68,7            | 33,5                | 37,4                     | 65,6               |



*Tabelle 4-95: Zusammensetzung des Rotteoutputs: Ausgewählte Summenparameter und Nichtmetalle*

|                                    | <b>TC</b><br>g/100g TS | <b>TOC</b><br>g/100g TS | <b>TIC</b><br>g/100g TS | <b>N</b><br>g/100g TS | <b>P</b><br>g/100g TS | <b>S</b><br>mg/kg TS |
|------------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| Mittelwert                         | 21,3                   | 19,1                    | 2,18                    | 1,08                  | 4.100                 | 5.900                |
| Standardabweichung                 | 1,53                   | 1,59                    | 0,13                    | 0,051                 | 190                   | 260                  |
| Minimum                            | 19,2                   | 17,1                    | 1,92                    | 0,998                 | 3.800                 | 5.500                |
| Maximum                            | 23,8                   | 21,7                    | 2,41                    | 1,165                 | 4.400                 | 6.400                |
| Median                             | 20,9                   | 18,7                    | 2,19                    | 1,066                 | 4.200                 | 5.800                |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 0,44                   | 0,46                    | 0,038                   | 0,0148                | 54                    | 76                   |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                        |                         |                         |                       |                       |                      |
| untere Schranke                    | 20,5                   | 18,2                    | 2,10                    | 1,05                  | 4.000                 | 5.800                |
| obere Schranke                     | 22,2                   | 20,0                    | 2,25                    | 1,11                  | 4.200                 | 6.100                |

*Tabelle 4-96: Zusammensetzung des Rotteoutputs: Ausgewählte Metalle*

|                                    | <b>Al</b><br>mg/kg TS | <b>Cd</b><br>mg/kg TS | <b>Cr</b><br>mg/kg TS | <b>Cu</b><br>mg/kg TS | <b>Fe</b><br>mg/kg TS |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mittelwert                         | 21.500                | 3,0                   | 210                   | 1.600                 | 22.300                |
| Anteil aus Metallteilen            | 390                   | ---                   | 81                    | 970                   | 3.500                 |
| Standardabweichung                 | 970                   | 0,57                  | 92                    | 410                   | 1.300                 |
| Minimum                            | 20.200                | 2,1                   | 140                   | 980                   | 20.600                |
| Maximum                            | 23.200                | 4,1                   | 490                   | 2.400                 | 24.900                |
| Median                             | 21.300                | 3,0                   | 190                   | 1.600                 | 22.000                |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 280                   | 0,16                  | 27                    | 120                   | 390                   |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                       |                       |                       |                       |                       |
| untere Schranke                    | 20.900                | 2,66                  | 160                   | 1.400                 | 21.600                |
| obere Schranke                     | 22.000                | 3,30                  | 270                   | 1.900                 | 23.100                |

*Tabelle 4-97: Zusammensetzung des Rotteoutputs: Ausgewählte Metalle*

|                                    | <b>Ni</b><br>mg/kg TS | <b>Pb</b><br>mg/kg TS | <b>Zn</b><br>mg/kg TS | <b>Hg</b><br>mg/kg TS |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mittelwert                         | 140                   | 720                   | 2.000                 | 3,2                   |
| Anteil aus Metallteilen            | 68                    | 370                   | 650                   | ---                   |
| Standardabweichung                 | 44                    | 320                   | 290                   | 3,6                   |
| Minimum                            | 100                   | 290                   | 1.400                 | 1,1                   |
| Maximum                            | 270                   | 1.200                 | 2.500                 | 14                    |
| Median                             | 130                   | 630                   | 2.000                 | 1,7                   |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 13                    | 91                    | 82,5                  | 1,0                   |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                       |                       |                       |                       |
| untere Schranke                    | 110                   | 540                   | 1.900                 | 1,2                   |
| obere Schranke                     | 160                   | 900                   | 2.200                 | 5,3                   |



#### 4.2.7.7 Fe-Schrott I (Magnetabscheider vor den Dano-Trommeln) (Oberpullendorf I und II)

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt.

Tabelle 4-98: Daten zur Probenahme und Aufbereitung beim Fe-Schrott I

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| Charakterisierte Gütermenge     | 17 t   |
| Anzahl Feldproben               | 17     |
| mittlere Feldprobenmasse        | 35 kg  |
| Feldprobenmasse insgesamt       | 597 kg |
|                                 |        |
| Anzahl Laborproben              | 17     |
|                                 |        |
| Anzahl Analysenproben (flüssig) | 17     |
| Anzahl Analysen                 | 17     |
| Anzahl eliminierter Ausreißer   | 0      |

Tabelle 4-99: Zusammensetzung des Fe-Schrotts I: Ausgewählte Summenparameter

|                                    | TM<br>g/100g FS | Wasser<br>g/100g FS | Glühverlust<br>g/100g TS | Asche<br>g/100g TS |
|------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|--------------------|
| Mittelwert                         | 84,9            | 15,1                | 13,1                     | 86,9               |
| Standardabweichung                 | 6,6             | 6,6                 | 2,52                     | 2,52               |
| Minimum                            | 75,2            | 2,6                 | 9,0                      | 81,0               |
| Maximum                            | 97,4            | 24,8                | 19,0                     | 91,0               |
| Median                             | 86,2            | 13,8                | 12,6                     | 87,4               |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 1,61            | 1,61                | 0,6                      | 0,6                |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                 |                     |                          |                    |
| untere Schranke                    | 81,8            | 18,2                | 11,9                     | 88,1               |
| obere Schranke                     | 88,1            | 11,9                | 14,3                     | 85,7               |

Tabelle 4-100: Zusammensetzung des Fe-Schrotts I: Ausgewählte Summenparameter und Nichtmetalle

|                                    | TC<br>g/100g TS | TOC<br>g/100g TS | TIC<br>g/100g TS | N<br>g/100g TS | P<br>mg/kg TS | S<br>mg/kg TS |
|------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|---------------|---------------|
| Mittelwert                         | 8,5             | 7,9              | 0,56             | 0,22           | 730           | 800           |
| Standardabweichung                 | 1,6             | 1,53             | 0,072            | 0,038          | 71            | 140           |
| Minimum                            | 5,9             | 5,4              | 0,47             | 0,16           | 600           | 560           |
| Maximum                            | 12,2            | 11,6             | 0,76             | 0,32           | 890           | 1.200         |
| Median                             | 8,2             | 7,6              | 0,56             | 0,21           | 720           | 770           |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 0,38            | 0,37             | 0,018            | 0,0092         | 17            | 35            |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                 |                  |                  |                |               |               |
| untere Schranke                    | 7,7             | 7,2              | 0,53             | 0,20           | 700           | 730           |
| obere Schranke                     | 9,2             | 8,6              | 0,59             | 0,24           | 770           | 860           |



Tabelle 4-101: Zusammensetzung des Fe-Schrotts I: Ausgewählte Metalle

|                                    | Al<br>mg/kg TS | Cd<br>mg/kg TS | Cr<br>mg/kg TS | Cu<br>mg/kg TS | Fe<br>g/100g TS |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Mittelwert                         | 7.600          | 77             | 1.500          | 2.200          | 70              |
| Standardabweichung                 | 2.000          | 99             | 1.100          | 1.800          | 6,1             |
| Minimum                            | 5.600          | 2,3            | 150            | 240            | 59              |
| Maximum                            | 13.000         | 280            | 4.100          | 6.600          | 79              |
| Median                             | 6.900          | 6,6            | 1.400          | 1.500          | 70              |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 490            | 24             | 260            | 440            | 1,5             |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                |                |                |                |                 |
| untere Schranke                    | 6.600          | 30             | 1.000          | 1.300          | 67,1            |
| obere Schranke                     | 8.600          | 124            | 2.100          | 3.000          | 72,9            |

Tabelle 4-102: Zusammensetzung des Fe-Schrotts I: Ausgewählte Metalle

|                                    | Ni<br>mg/kg TS | Pb<br>mg/kg TS | Zn<br>mg/kg TS | Hg<br>mg/kg TS |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Mittelwert                         | 860            | 250            | 3.500          | 0,50           |
| Standardabweichung                 | 880            | 190            | 4.100          | 1,2            |
| Minimum                            | 120            | 91             | 720            | 0,10           |
| Maximum                            | 3.600          | 920            | 18.000         | 5,1            |
| Median                             | 640            | 210            | 2.300          | 0,20           |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 210            | 46             | 990            | 0,3            |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                |                |                |                |
| untere Schranke                    | 440            | 160            | 1.600          | -0,1           |
| obere Schranke                     | 1.300          | 340            | 5.400          | 1,1            |

#### 4.2.7.8 Fe-Schrott II (Magnetabscheidung aus der Fraktion <65 mm nach den Dano-Trommeln) (Oberpullendorf I und II)

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt.

Tabelle 4-103: Daten zur Probenahme und Aufbereitung beim Fe-Schrott II

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| Charakterisierte Gütermenge     | 22 t   |
| Anzahl Feldproben               | 17     |
| mittlere Feldprobenmasse        | 41 kg  |
| Feldprobenmasse insgesamt       | 697 kg |
|                                 |        |
| Anzahl Laborproben              | 17     |
|                                 |        |
| Anzahl Analysenproben (flüssig) | 17     |
| Anzahl Analysen                 | 17     |
| Anzahl eliminierter Ausreißer   | 0      |



Tabelle 4-104: Zusammensetzung des Fe-Schrotts II: Ausgewählte Summenparameter

|                                    | TM<br>g/100g FS | Wasser<br>g/100g FS | Glühverlust<br>g/100g TS | Asche<br>g/100g TS |
|------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|--------------------|
| Mittelwert                         | 85,8            | 14,2                | 16,7                     | 83,3               |
| Standardabweichung                 | 6,2             | 6,2                 | 0,59                     | 0,59               |
| Minimum                            | 71,4            | 6,7                 | 15,4                     | 82,4               |
| Maximum                            | 93,3            | 28,6                | 17,6                     | 84,6               |
| Median                             | 88,0            | 12,0                | 16,6                     | 83,4               |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 1,50            | 1,50                | 0,1                      | 0,1                |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                 |                     |                          |                    |
| untere Schranke                    | 82,9            | 17,1                | 16,4                     | 83,6               |
| obere Schranke                     | 88,8            | 11,2                | 17,0                     | 83,0               |

Tabelle 4-105: Zusammensetzung des Fe-Schrotts II: Ausgewählte Summenparameter und Nichtmetalle

|                                    | TC<br>g/100g TS | TOC<br>g/100g TS | TIC<br>g/100g TS | N<br>g/100g TS | P<br>mg/kg TS | S<br>mg/kg TS |
|------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|----------------|---------------|---------------|
| Mittelwert                         | 10,4            | 9,8              | 0,60             | 0,31           | 930           | 1.380         |
| Standardabweichung                 | 0,3             | 0,32             | 0,023            | 0,013          | 38            | 60            |
| Minimum                            | 9,6             | 9,1              | 0,53             | 0,28           | 840           | 1.240         |
| Maximum                            | 11,0            | 10,4             | 0,63             | 0,33           | 970           | 1.500         |
| Median                             | 10,4            | 9,8              | 0,60             | 0,31           | 940           | 1.390         |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 0,08            | 0,08             | 0,006            | 0,0032         | 9,1           | 14            |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                 |                  |                  |                |               |               |
| untere Schranke                    | 10,3            | 9,7              | 0,59             | 0,31           | 910           | 1.360         |
| obere Schranke                     | 10,6            | 10,0             | 0,61             | 0,32           | 950           | 1.410         |

Tabelle 4-106: Zusammensetzung des Fe-Schrotts II: Ausgewählte Metalle

|                                    | Al<br>mg/kg TS | Cd<br>mg/kg TS | Cr<br>mg/kg TS | Cu<br>mg/kg TS | Fe<br>g/100g TS |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Mittelwert                         | 6.100          | 420            | 1.600          | 3.600          | 64,0            |
| Standardabweichung                 | 950            | 320            | 400            | 1.600          | 2,6             |
| Minimum                            | 4.900          | 2,4            | 900            | 1.230          | 59,0            |
| Maximum                            | 8.400          | 1.300          | 2.200          | 6.500          | 69,8            |
| Median                             | 5.800          | 310            | 1.600          | 3.400          | 64,1            |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 230            | 78             | 100            | 380            | 0,64            |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                |                |                |                |                 |
| untere Schranke                    | 5.700          | 270            | 1.400          | 2.900          | 62,7            |
| obere Schranke                     | 6.600          | 570            | 1.800          | 4.400          | 65,2            |



Tabelle 4-107: Zusammensetzung des Fe-Schrotts II: Ausgewählte Metalle

|                                    | Ni<br>mg/kg TS | Pb<br>mg/kg TS | Zn<br>mg/kg TS | Hg<br>mg/kg TS |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Mittelwert                         | 860            | 190            | 3.400          | 0,24           |
| Standardabweichung                 | 430            | 140            | 2.000          | 0,18           |
| Minimum                            | 110            | 100            | 1.100          | 0,13           |
| Maximum                            | 1.900          | 600            | 8.700          | 0,77           |
| Median                             | 810            | 150            | 3.700          | 0,15           |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 100            | 35             | 480            | 0,043          |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                |                |                |                |
| untere Schranke                    | 660            | 130            | 2.500          | 0,15           |
| obere Schranke                     | 1.100          | 260            | 4.300          | 0,32           |

#### 4.2.7.9 NFe-Schrott (Wirbelstromabscheidung aus der Fraktion 25-65 mm nach den Dano-Trommeln) (Oberpullendorf II)

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt.

Tabelle 4-108: Daten zur Probenahme und Aufbereitung beim NFe-Schrott

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| Charakterisierte Gütermenge     | 1,6 t  |
| Anzahl Feldproben               | 7      |
| mittlere Feldprobenmasse        | 31 kg  |
| Feldprobenmasse insgesamt       | 219 kg |
|                                 |        |
| Anzahl Laborproben              | 7      |
|                                 |        |
| Anzahl Analysenproben (flüssig) | 7      |
| Anzahl Analysen                 | 7      |
| Anzahl eliminierter Ausreißer   | 0      |

Tabelle 4-109: Zusammensetzung des NFe-Schrotts: Ausgewählte Summenparameter

|                                    | TM<br>g/100g FS | Wasser<br>g/100g FS | Glühverlust<br>g/100g TS | Asche<br>g/100g TS |
|------------------------------------|-----------------|---------------------|--------------------------|--------------------|
| Mittelwert                         | 80,8            | 19,2                | 26,8                     | 73,2               |
| Standardabweichung                 | 4,0             | 4,0                 | 2,03                     | 2,03               |
| Minimum                            | 74,8            | 12,8                | 23,6                     | 70,9               |
| Maximum                            | 87,2            | 25,2                | 29,1                     | 76,4               |
| Median                             | 81,4            | 18,6                | 27,2                     | 72,8               |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 1,52            | 1,52                | 0,8                      | 0,8                |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                 |                     |                          |                    |
| untere Schranke                    | 77,8            | 22,2                | 25,3                     | 71,7               |
| obere Schranke                     | 83,8            | 16,2                | 28,3                     | 74,7               |



*Tabelle 4-110: Zusammensetzung des NFe-Schrotts: Ausgewählte Summenparameter und Nichtmetalle*

|                                    | <b>TC</b><br>g/100g TS | <b>TOC</b><br>g/100g TS | <b>TIC</b><br>g/100g TS | <b>N</b><br>g/100g TS | <b>P</b><br>mg/kg TS | <b>S</b><br>mg/kg TS |
|------------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| Mittelwert                         | 16,5                   | 15,4                    | 1,08                    | 0,51                  | 1.500                | 2.900                |
| Standardabweichung                 | 1,5                    | 1,39                    | 0,072                   | 0,028                 | 100                  | 320                  |
| Minimum                            | 14,2                   | 13,2                    | 0,95                    | 0,45                  | 1.300                | 2.600                |
| Maximum                            | 18,4                   | 17,3                    | 1,17                    | 0,55                  | 1.600                | 3.600                |
| Median                             | 16,9                   | 15,8                    | 1,08                    | 0,50                  | 1.500                | 2.800                |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 0,55                   | 0,52                    | 0,027                   | 0,0105                | 39                   | 120                  |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                        |                         |                         |                       |                      |                      |
| untere Schranke                    | 15,6                   | 14,6                    | 1,00                    | 0,48                  | 1.400                | 2.700                |
| obere Schranke                     | 17,7                   | 16,6                    | 1,11                    | 0,52                  | 1.500                | 3.200                |

*Tabelle 4-111: Zusammensetzung des NFe-Schrotts: Ausgewählte Metalle*

|                                    | <b>Al</b><br>g/100g TS | <b>Cd</b><br>mg/kg TS | <b>Cr</b><br>mg/kg TS | <b>Cu</b><br>mg/kg TS | <b>Fe</b><br>mg/kg TS |
|------------------------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mittelwert                         | 41,4                   | 2,4                   | 59                    | 21.000                | 6.300                 |
| Standardabweichung                 | 3,0                    | 0,46                  | 17                    | 14.000                | 430                   |
| Minimum                            | 38,8                   | 1,8                   | 54                    | 16.000                | 5.800                 |
| Maximum                            | 46,8                   | 3,3                   | 110                   | 57.000                | 7.100                 |
| Median                             | 41,1                   | 2,4                   | 61                    | 31.000                | 6.100                 |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 1,1                    | 0,17                  | 6,4                   | 5.200                 | 160                   |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                        |                       |                       |                       |                       |
| untere Schranke                    | 39,7                   | 2,1                   | 54                    | 24.000                | 5.900                 |
| obere Schranke                     | 44,2                   | 2,8                   | 79                    | 44.000                | 6.600                 |

*Tabelle 4-112: Zusammensetzung des NFe-Schrotts: Ausgewählte Metalle*

|                                    | <b>Ni</b><br>mg/kg TS | <b>Pb</b><br>mg/kg TS | <b>Zn</b><br>mg/kg TS | <b>Hg</b><br>mg/kg TS |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mittelwert                         | 310                   | 1200                  | 28.000                | 0,28                  |
| Standardabweichung                 | 250                   | 450                   | 12.000                | 0,084                 |
| Minimum                            | 100                   | 610                   | 13.000                | 0,21                  |
| Maximum                            | 740                   | 2.000                 | 52.000                | 0,47                  |
| Median                             | 180                   | 1.100                 | 26.000                | 0,25                  |
| Standardabw. des Mittelwerts       | 95                    | 170                   | 4.600                 | 0,032                 |
| 95%-Konfidenzi. für den Mittelwert |                       |                       |                       |                       |
| untere Schranke                    | 120                   | 870                   | 19.000                | 0,22                  |
| obere Schranke                     | 500                   | 1.500                 | 37.000                | 0,34                  |



#### 4.2.8 Varianzkomponentenanalysen über die Bestimmung der durchschnittlichen Güterzusammensetzungen

Für eine aussagekräftige Varianzkomponentenanalyse sind hohe Stichprobenumfänge notwendig, wenn die Streuungen (insbesondere auf letzter Ebene, der Ebene an der tatsächlich gemessen wird), groß sind. Die große Streuung auf Analyseebene ergab sich in dieser Arbeit nicht aus der Fehleranfälligkeit der Messmethoden sondern aus der Aufbereitungsqualität der Analysenproben. Eine ausreichend feine Vermahlung ist, speziell für die Bestimmung der Metallgehalte, in der Regel nicht möglich. (Siehe dazu Kapitel 3.4.3.) In Kapitel 3.3.2 ist eine Simulation beschrieben, mit der die Genauigkeit von Varianzkomponentenanalysen bei vorgegebenen Werten für mittlere Stoffkonzentration, Varianzkomponenten und Stichprobenumfänge auf allen Ebenen abgeschätzt werden kann.

Die Unsicherheit der Bestimmung, die bei (zu) kleinen Stichprobenumfängen auftritt, ist Ursache für das Zustandekommen negativer Varianzkomponenten. Bei Erwartungswerten für Varianzkomponenten, die um Null liegen, kann der Bestimmungsfehler groß genug sein, um negative Werte zu erzeugen. Negative Varianzkomponenten bedeuten, dass im konkreten Fall die Streuung einer Ebene in der Streuung der nachfolgenden Ebene „untergeht“, d.h. die Streuung der nachfolgenden Ebene so groß ist, dass deren Wirkung auf die betrachtete Ebene stärker ist als die eigentliche Streuungsursache der betrachteten Ebene. Ist beispielsweise die Streuung der Analyse groß, so ist es nicht möglich mit wenigen Messungen pro Analyseprobe tatsächliche Unterschiede an (ähnlichen) Analysenproben festzustellen. Die gemessenen Unterschiede sind dann Zufallsprodukte der Analysenstreuung und nicht Qualitätsunterschiede der Analysenproben.

Die im folgenden dargestellten Varianzkomponenten liefern wegen der (zu) geringen Stichprobenumfänge nur Anhaltspunkte und Größenordnungen für die Streuungsursachen. Dementsprechend sind Interpretationen mit Bedacht auf die nicht bestimmten Unsicherheiten der Varianzkomponenten vorsichtig vorzunehmen. Auch die zu geringen Feldprobenmassen, vor allem bei den heizwertreichen Fraktionen >25 mm und >65 mm, tragen zum Bestimmungsfehler der Varianzkomponenten bei, da die Voraussetzung der Unabhängigkeit der Streuungsursachen auf den verschiedenen Ebenen nicht vollständig erfüllt wird. Feldproben mit niedrigeren Gehalten (solche die wenige Trägerstücke, -teilchen enthalten) werden Labor- und Analysenproben ergeben, deren Zusammensetzungen anders streuen als solche aus Feldproben mit hohen Gehalten.

Es ist zu beachten, dass die Summe der Varianzkomponenten (z.B. bei drei Ebenen)

$$s_x^2 = s_{\text{Ebene1}}^2 + s_{\text{Ebene2}}^2 + s_{\text{Ebene3}}^2 \quad (4-1)$$

nur dann die Varianz der Einzelmesswerte ergibt, wenn alle Einzelmesswerte unabhängig von einander sind, d.h. von jeder Feldprobe nur eine Labor- und Analysenprobe erzeugt und diese in Einfachbestimmung gemessen wird. Bestehen Abhängigkeiten zwischen den Einzelmesswerten z.B. durch parallele Laborproben aus einer Feldprobe oder Mehrfachmessungen an einer Analysenprobe, gilt die Summenbildung der Varianzkomponenten nicht für die Berechnung der Streuung der Einzelmesswerte. In diesem Zusammenhang wird auf die Berechnung der Varianz des Stichprobenmittelwerts verwiesen, die mit





$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_1 \cdot n_2} + \frac{\sigma_3^2}{n_1 \cdot n_2 \cdot n_3} + \dots \quad (4-2)$$

immer möglich ist.

Für die Varianzkomponentenbestimmung müssen alle Äste im hierarchischen Versuchsplan gleich aufgebaut sein. Für die Analyse wurden bei den Proben der Fraktion >65 mm Einfachbestimmungen ansonsten Doppelbestimmungen vorgesehen. Die über die Einfachbestimmung bzw. Doppelbestimmung hinaus durchgeführten Analysen sind für die Varianzkomponentenanalyse nicht verwertbar. Bei Proben mit überzähligen Messwerten wurde jeweils nur der erste Wert bzw. die beiden ersten Werte zur Varianzkomponentenanalyse verwendet. Beim Vergleich mit der Auswertung für die Stoffbilanzierung ist dieser Umstand, dass bei den Varianzkomponentenberechnungen nicht alle Messwerte verwendet werden konnten, zu beachten. Weiters ist zu beachten, dass die Varianz auf erster Stufe (Probenahme) bei allen Fraktionen mit Ausnahme von BasS und BasL für Ni, Cr und Zn geringfügig auf Kosten der Varianz der zweiten Stufe (Probenaufbereitung) überschätzt sein kann. Die Ursache dafür ist eine Vereinfachung bei der separaten Bestimmung der ausgeklaubten, unidentifizierbaren Metalle, die aus Zeitgründen notwendig wurde (siehe Kapitel 3.4.3). Die auf der Laboraufbereitungsebene ausgeklaubten, unidentifizierbaren Metalle wurden nicht pro Laborprobe getrennt in Säure gelöst und bestimmt, sondern je Laborprobenpaar gemischt und gemeinsam gelöst. Diese Lösungen wurden jeweils im Probenteilungsverhältnis (Massenverhältnis Feldprobe/Laborprobenpaar) den zugehörigen Lösungen aus den „Feldproben-Metallen“ zugesetzt. In dieser Weise wurden die unidentifizierbaren Metalle, egal ob sie aus den Feld- oder Laborproben aussortiert wurden, den Feldproben zugerechnet. Durch diese Vorgangsweise wurde z.B. bei der Aufarbeitung der Fraktion >25 mm die separate Bereitung und Analyse von 48 Lösungen gespart.

#### 4.2.8.1 Heizwertreiche Fraktionen >25 mm und >65mm

Zur Verdeutlichung der Zuordnung der Arbeitsschritte zu den Ebenen der Varianzkomponentenanalyse sind in Abbildung 4-17 und Abbildung 4-18 nochmals die Gliederungen dargestellt.

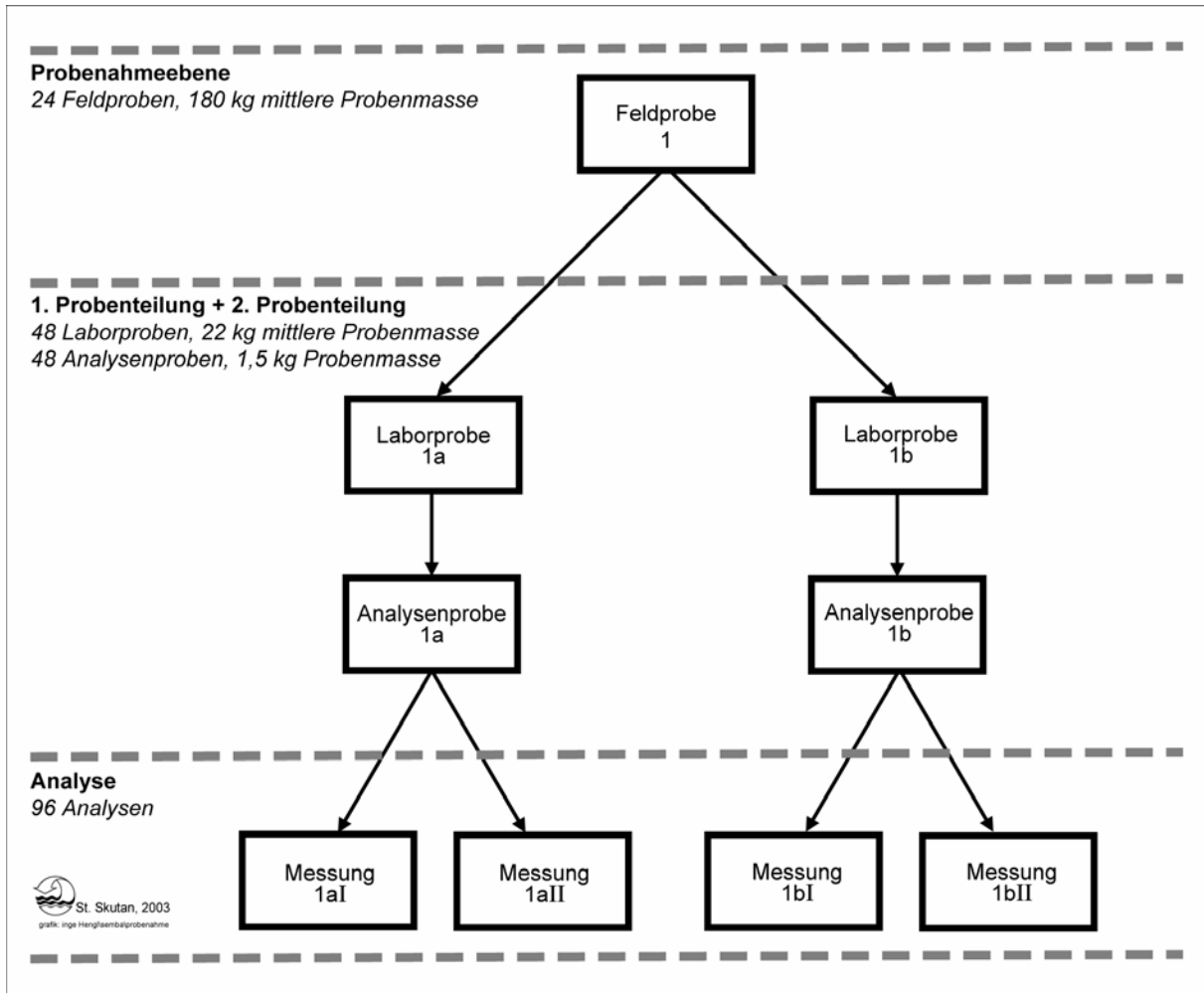


Abbildung 4-17: Versuchsschema bei der Untersuchung der heizwertreichen Fraktion >25 mm. Zur Vereinfachung ist nur für die erste Feldprobe die Aufgliederung bis zu den Analysen dargestellt, wie sie für alle 24 Feldproben identisch ist. Bei der 2. Probenteilung (Laboraufbereitung) wurde, anders als bei der Fraktion >65 mm, auf die Entnahme von zweiten parallelen Teilmengen verzichtet.

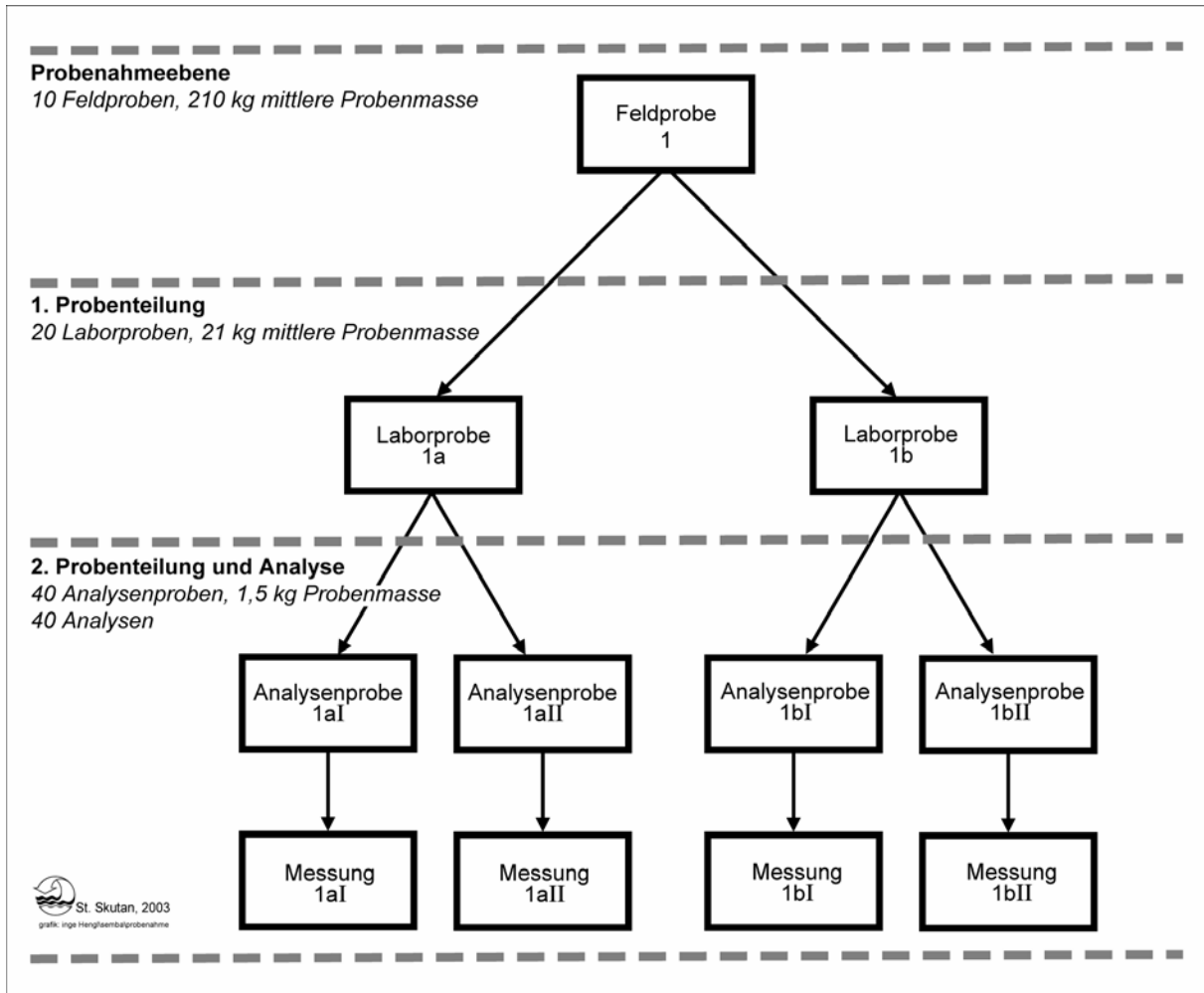


Abbildung 4-18: Versuchsaufbau bei der Untersuchung der heizwertreichen Fraktion  $>65$  mm. Zur Vereinfachung ist nur für die erste Feldprobe die Aufgliederung bis zu den Analysen dargestellt, wie sie für alle 10 Feldproben identisch ist. Die Laborproben wurden in Einfachbestimmungen gemessen, weshalb eine Trennung der Varianzursachen „2. Probenteilung“ und „Analyse“ nicht möglich ist.

Zum besseren Verständnis sind von der Fraktion  $>65$  mm Cadmium und Kupfer als Beispiele herausgegriffen. In Abbildung 4-19 sind Einzelmesswerte, Mittelwerte für Laborproben und Feldproben dargestellt. Am Beispiel Cadmium ist zu erkennen, dass die Hauptursache der Streuung in der Verschiedenheit der Feldproben begründet ist. Die parallelen Laborproben aus einer Feldprobe zeigen untereinander jeweils vergleichsweise geringe Abweichungen, ebenso die parallelen Analysenwerte, die einer Laborprobe zuzuordnen sind. Beim Beispiel Kupfer ist die Streuung auf Analysenebene relativ größer (insbesondere auch wegen des „Ausreißers“ bei 8aI).



## Cadmium

| Feldproben |       | Laborproben |       | Analysen |       |
|------------|-------|-------------|-------|----------|-------|
| Nr.        | Konz. | Nr.         | Konz. | Nr.      | Konz. |
| 1          | 2,6   | 1a          | 2,6   | 1a I     | 2,6   |
|            |       |             |       | 1a II    | 2,6   |
|            |       | 1b          | 2,6   | 1b I     | 2,6   |
|            |       |             |       | 1b II    | 2,6   |
| 2          | 9,4   | 2a          | 10,3  | 2a I     | 9,0   |
|            |       |             |       | 2a II    | 11,6  |
|            |       | 2b          | 8,4   | 2b I     | 8,5   |
|            |       |             |       | 2b II    | 8,4   |
| 3          | 12,9  | 3a          | 13,1  | 3a I     | 13,3  |
|            |       |             |       | 3a II    | 13,0  |
|            |       | 3b          | 12,6  | 3b I     | 12,8  |
|            |       |             |       | 3b II    | 12,4  |
| 4          | 22,0  | 4a          | 19,2  | 4a I     | 20,5  |
|            |       |             |       | 4a II    | 17,9  |
|            |       | 4b          | 24,7  | 4b I     | 23,2  |
|            |       |             |       | 4b II    | 26,3  |
| 5          | 3,8   | 5a          | 3,6   | 5a I     | 3,8   |
|            |       |             |       | 5a II    | 3,3   |
|            |       | 5b          | 4,1   | 5b I     | 4,7   |
|            |       |             |       | 5b II    | 3,5   |
| 6          | 57,3  | 6a          | 59,0  | 6a I     | 58,8  |
|            |       |             |       | 6a II    | 59,1  |
|            |       | 6b          | 55,7  | 6b I     | 55,9  |
|            |       |             |       | 6b II    | 55,5  |
| 7          | 6,7   | 7a          | 6,7   | 7a I     | 7,0   |
|            |       |             |       | 7a II    | 6,4   |
|            |       | 7b          | 6,6   | 7b I     | 6,1   |
|            |       |             |       | 7b II    | 7,2   |
| 8          | 11,3  | 8a          | 11,1  | 8a I     | 11,2  |
|            |       |             |       | 8a II    | 11,1  |
|            |       | 8b          | 11,4  | 8b I     | 11,7  |
|            |       |             |       | 8b II    | 11,1  |
| 9          | 6,0   | 9a          | 6,3   | 9a I     | 6,0   |
|            |       |             |       | 9a II    | 6,6   |
|            |       | 9b          | 5,7   | 9b I     | 6,1   |
|            |       |             |       | 9b II    | 5,3   |
| 10         | 11,4  | 10a         | 9,5   | 10a I    | 10,3  |
|            |       |             |       | 10a II   | 8,7   |
|            |       | 10b         | 13,2  | 10b I    | 13,2  |
|            |       |             |       | 10b II   | 13,2  |

## Kupfer

| Feldproben |        | Laborproben |        | Analysen |        |
|------------|--------|-------------|--------|----------|--------|
| Nr.        | Konz.  | Nr.         | Konz.  | Nr.      | Konz.  |
| 1          | 3.001  | 1a          | 3.578  | 1a I     | 4.948  |
|            |        |             |        | 1a II    | 2.207  |
|            |        | 1b          | 2.424  | 1b I     | 2.934  |
|            |        |             |        | 1b II    | 1.913  |
| 2          | 2.196  | 2a          | 1.863  | 2a I     | 1.934  |
|            |        |             |        | 2a II    | 1.791  |
|            |        | 2b          | 2.530  | 2b I     | 3.079  |
|            |        |             |        | 2b II    | 1.980  |
| 3          | 2.829  | 3a          | 3.044  | 3a I     | 3.077  |
|            |        |             |        | 3a II    | 3.011  |
|            |        | 3b          | 2.614  | 3b I     | 2.481  |
|            |        |             |        | 3b II    | 2.747  |
| 4          | 3.267  | 4a          | 3.210  | 4a I     | 2.810  |
|            |        |             |        | 4a II    | 3.610  |
|            |        | 4b          | 3.323  | 4b I     | 2.724  |
|            |        |             |        | 4b II    | 3.923  |
| 5          | 1.926  | 5a          | 1.914  | 5a I     | 1.945  |
|            |        |             |        | 5a II    | 1.883  |
|            |        | 5b          | 1.938  | 5b I     | 1.951  |
|            |        |             |        | 5b II    | 1.924  |
| 6          | 1.971  | 6a          | 1.788  | 6a I     | 1.799  |
|            |        |             |        | 6a II    | 1.778  |
|            |        | 6b          | 2.153  | 6b I     | 2.143  |
|            |        |             |        | 6b II    | 2.163  |
| 7          | 3.536  | 7a          | 3.359  | 7a I     | 3.020  |
|            |        |             |        | 7a II    | 3.698  |
|            |        | 7b          | 3.713  | 7b I     | 3.678  |
|            |        |             |        | 7b II    | 3.749  |
| 8          | 11.127 | 8a          | 15.525 | 8a I     | 25.374 |
|            |        |             |        | 8a II    | 5.675  |
|            |        | 8b          | 6.730  | 8b I     | 6.302  |
|            |        |             |        | 8b II    | 7.158  |
| 9          | 9.912  | 9a          | 9.314  | 9a I     | 9.313  |
|            |        |             |        | 9a II    | 9.315  |
|            |        | 9b          | 10.510 | 9b I     | 9.557  |
|            |        |             |        | 9b II    | 11.464 |
| 10         | 5.787  | 10a         | 5.655  | 10a I    | 5.673  |
|            |        |             |        | 10a II   | 5.638  |
|            |        | 10b         | 5.919  | 10b I    | 5.842  |
|            |        |             |        | 10b II   | 5.997  |

Abbildung 4-19: Aufgliederung der Messergebnisse für Cadmium und Kupfer auf die Ebenen der Varianzkomponentenanalyse bei der Fraktion >65 mm. (Konzentrationsangaben in mg/kg TS)

In Tabelle 4-113 sind die Varianzkomponenten der Untersuchungen zusammengestellt. In Tabelle 4-114 sind die Varianzkomponenten in Variationskoeffizienten umgerechnet (= Wurzel der Varianzkomponente gebrochen durch den Mittelwert der Stoffkonzentration, angegeben in %). Die Verwendung von Anführungszeichen bei der Bezeichnung „Komponenten“ der Variationskoeffizienten ist damit begründet, dass die einzelnen „Komponenten“ nicht addiert werden können, um den Variationskoeffizienten der gesamten Bestimmung zu erhalten. Dazu ist es notwendig, die Varianzkomponenten zuerst zu addieren und erst die Wurzel der Summe auf den Mittelwert zu beziehen (vergleiche dazu Kapitel 3.3.1).



Tabelle 4-113: Varianzkomponenten bei der Bestimmung ausgewählter Parameter in den heizwertreichen Fraktionen >65 mm und >25 mm. Die Zeile „2. Probenteilung errechnet“ gibt die Differenz zwischen „2. Probenteilung (Labor) und Analyse“ bei >65 mm und „Analyse“ bei >25 mm an.

| Varianzkomponenten                   | Glühverlust    | Asche          | TC             | TOC            |
|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>&gt;65 mm</b>                     | % <sup>2</sup> | % <sup>2</sup> | % <sup>2</sup> | % <sup>2</sup> |
| Probenahme                           | 6,7            | 6,7            | 2,8            | 3,2            |
| 1. Probenteilung (am Probenahmeort)  | 1,0            | 1,0            | 0,83           | 1,0            |
| 2. Probenteilung (Labor) und Analyse | 0,35           | 0,35           | 0,81           | 0,82           |
| <b>&gt;25 mm</b>                     |                |                |                |                |
| Probenahme                           | 42             | 42             | 9,6            | 10             |
| 1.+ 2. Probenteilung                 | 2,6            | 2,6            | 3,2            | 3,3            |
| Analyse                              | 0,28           | 0,28           | 0,73           | 0,69           |
| 2. Probenteilung errechnet           | 0,065          | 0,065          | 0,080          | 0,12           |

Fortsetzung Tabelle 4-113:

| Varianzkomponenten                   | TIC            | N              | P                    | S                    |
|--------------------------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|
| <b>&gt;65 mm</b>                     | % <sup>2</sup> | % <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> |
| Probenahme                           | 0,030          | 0,013          | 230.000              | 99.000               |
| 1. Probenteilung (am Probenahmeort)  | 0,0084         | 0,0019         | 20.000               | 5.200                |
| 2. Probenteilung (Labor) und Analyse | 0,0078         | 0,00090        | 3.300                | 3.400                |
| <b>&gt;25 mm</b>                     |                |                |                      |                      |
| Probenahme                           | 0,018          | 0,019          | 34.000               | 340.000              |
| 1.+ 2. Probenteilung                 | 0,0060         | 0,012          | 16.000               | 19.000               |
| Analyse                              | 0,0010         | 0,00092        | 14.000               | 52.000               |
| 2. Probenteilung errechnet           | 0,0068         | -0,000020      | -11.000              | -49.000              |

Fortsetzung Tabelle 4-113:

| Varianzkomponenten                   | Al                   | Cd                   | Cr                   | Cu                   | Fe                   |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>&gt;65 mm</b>                     | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> |
| Probenahme                           | 10.000.000           | 260                  | 6.600                | 9.200.000            | 71.000.000           |
| 1. Probenteilung (am Probenahmeort)  | -300.000             | 2,6                  | 2.700                | -1.000.000           | 250.000              |
| 2. Probenteilung (Labor) und Analyse | 5.300.000            | 0,76                 | 13.000               | 10.000.000           | 8.900.000            |
| <b>&gt;25 mm</b>                     |                      |                      |                      |                      |                      |
| Probenahme                           | 58.000.000           | 6,1                  | 170.000              | 4.900.000            | 360.000.000          |
| 1.+ 2. Probenteilung                 | 1.500.000            | 2,1                  | 190                  | -14.000              | 1.700.000            |
| Analyse                              | 690.000              | 3,0                  | 500                  | 2.800.000            | 52.000.000           |
| 2. Probenteilung errechnet           | 4.600.000            | -2,3                 | 13.000               | 7.200.000            | -43.000.000          |



Fortsetzung Tabelle 4-113:

| Varianzkomponenten                   | Ni                   | Pb                   | Zn                   | Hg                   |
|--------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                                      | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> |
| <b>&gt;65 mm</b>                     |                      |                      |                      |                      |
| Probenahme                           | 7.600                | 1.600                | 310.000              | 5,7                  |
| 1. Probenteilung (am Probenahmeort)  | 33.000               | 3.500                | -85.000              | -0,8                 |
| 2. Probenteilung (Labor) und Analyse | 720                  | 35.000               | 950.000              | 2,2                  |
|                                      |                      |                      |                      |                      |
| <b>&gt;25 mm</b>                     |                      |                      |                      |                      |
| Probenahme                           | 26.000               | 730.000              | 4.900.000            | 0,082                |
| 1.+ 2. Probenteilung                 | 300                  | 180.000              | 19.000               | 0,11                 |
| Analyse                              | 180                  | 4.400                | 1.200.000            | 0,057                |
|                                      |                      |                      |                      |                      |
| 2. Probenteilung errechnet           | 540                  | 31.000               | -250.000             | 2,1                  |

Tabelle 4-114: Ursachen der Streuung bei der Bestimmung ausgewählter Parameter in den heizwertreichen Fraktionen &gt;65 mm und &gt;25 mm angegeben als „Komponenten“ der Variationskoeffizienten.

| "Komponenten" der Variationskoeffizienten | Glühverlust      | Asche | TC  | TOC |
|---|------------------|-------|-----|-----|
|   | <b>&gt;65 mm</b> | %     | %   | %   |
| Probenahme                                | 3,7              | 8,5   | 3,7 | 4,1 |
| 1. Probenteilung (am Probenahmeort)       | 1,4              | 3,2   | 2,0 | 2,3 |
| 2. Probenteilung (Labor) und Analyse      | 0,85             | 1,9   | 2,0 | 2,1 |
|   |                  |       |     |     |
| <b>&gt;25 mm</b>                          | Glühverlust      | Asche | TC  | TOC |
| Probenahme                                | 11               | 16    | 7,5 | 8,0 |
| 1.+ 2. Probenteilung                      | 2,8              | 3,9   | 4,3 | 4,6 |
| Analyse                                   | 0,91             | 1,3   | 2,1 | 2,1 |

Fortsetzung Tabelle 4-114:

| "Komponenten" der Variationskoeffizienten | TIC              | N   | P   | S   |
|---|------------------|-----|-----|-----|
|   | <b>&gt;65 mm</b> | %   | %   | %   |
| Probenahme                                | 14               | 8,9 | 26  | 9,0 |
| 1. Probenteilung (am Probenahmeort)       | 7,6              | 3,3 | 7,5 | 2,1 |
| 2. Probenteilung (Labor) und Analyse      | 7,4              | 2,3 | 3,1 | 1,7 |
|   |                  |     |     |     |
| <b>&gt;25 mm</b>                          | TIC              | N   | P   | S   |
| Probenahme                                | 10               | 13  | 8,6 | 14  |
| 1.+ 2. Probenteilung                      | 5,7              | 9,8 | 5,9 | 3,2 |
| Analyse                                   | 2,3              | 2,7 | 5,6 | 5,5 |



Fortsetzung Tabelle 4-114:

| "Komponenten" der Variationskoeffizienten | Al     | Cd  | Cr | Cu     | Fe  |
|---|--------|-----|----|--------|-----|
|   | >65 mm | %   | %  | %      | %   |
| Probenahme                                | 18     | 110 | 20 | 64     | 23  |
| 1. Probenteilung (am Probenahmeort)       | nahe 0 | 12  | 13 | nahe 0 | 1,3 |
| 2. Probenteilung (Labor) und Analyse      | 12     | 6,4 | 28 | 67     | 8   |
| >25 mm                                    | Al     | Cd  | Cr | Cu     | Fe  |
| Probenahme                                | 27     | 38  | 80 | 42     | 45  |
| 1.+ 2. Probenteilung                      | 4,3    | 22  | 3  | nahe 0 | 3,1 |
| Analyse                                   | 2,9    | 27  | 4  | 32     | 17  |

Fortsetzung Tabelle 4-114:

| "Komponenten" der Variationskoeffizienten | Ni     | Pb  | Zn     | Hg     |
|---|--------|-----|--------|--------|
|   | >65 mm | %   | %      | %      |
| Probenahme                                | 58     | 13  | 26     | 200    |
| 1. Probenteilung (am Probenahmeort)       | 120    | 20  | nahe 0 | nahe 0 |
| 2. Probenteilung (Labor) und Analyse      | 18     | 62  | 46     | 120    |
| >25 mm                                    | Ni     | Pb  | Zn     | Hg     |
| Probenahme                                | 90     | 120 | 67     | 37     |
| 1.+ 2. Probenteilung                      | 10     | 61  | 4,1    | 42     |
| Analyse                                   | 7      | 10  | 33     | 31     |

Beim Vergleich der beiden heizwertreichen Fraktionen zeigen die Daten eine schlechte Übereinstimmung der Varianzkomponenten. Es ist nicht möglich, die Ursache dafür realen Unterschieden oder der Bestimmungsungenauigkeit (zu geringe Stichprobenumfänge) zuzuordnen. Der Informationsgehalt beschränkt sich auf die Größenordnungen der Varianzen und qualitative Aussagen.

Bei Summenparametern und Nichtmetallen verursacht die Probenahme stets, meist sogar mit Abstand die größte Streuung, gefolgt von der Probenteilung (Ausnahme S bei Fraktion >25 mm). Bei den Metallen ist in der Fraktion >25 mm ebenfalls durchgehend zu beobachten, dass die Probenahme die größte Streuung verursacht. Bei der Fraktion >65 mm gibt es allerdings Ausnahmen mit höheren Streuungen bei Analyse (Cr, Cu, Pb, Zn) oder Probenaufbereitung (Ni). Die hohen Streuungen der Analyse bei den Metallen verglichen mit den Summenparametern und Nichtmetallen (einfacherer Vergleich anhand der „Komponenten“ der Variationskoeffizienten) spiegelt die Problematik der ungenügend feinen Vermahlung (Analysenproben mit zu großer Körnung) wieder. Diese Problematik trifft in erster Linie die Metalle, da die trotz Sortierung verbliebenen Metallpartikel in den Analysenproben (metallisches Cu, Zn, Messing, Al, Fe, Edelmetalle u.a.) nicht ausreichend zerkleinerbar sind. PVC, welches wegen der Cd-Stabilisatoren bei Cadmium große Heterogenität verursacht, konnte ebenfalls nicht zur Gänze unter die gewünschte Korngröße zerkleinert werden. Das Auftreten negativer Varianzkomponenten für die Probenaufbereitung bestätigt, dass die gewählte Probenaufbereitung in vielen Fällen nur geringe Streuungen verursachte.



Auf Grund der schlechten Vergleichbarkeit der Varianzkomponenten der Fraktionen  $>65$  mm und  $>25$  mm ist die Berechnung der Varianzkomponenten der 2. Proben teilung als Differenz aus Werten beider Fraktionen wenig aussagekräftig. Es bleibt die qualitative Aussage, dass auf Grund der häufigen negativen Werte generell auf kleine Streuungen bei diesem Schritt geschlossen werden kann.

#### *Vergleich der Varianzkomponenten bei den Fraktionen $>65$ mm und $>25$ mm*

Die Varianzkomponenten der Probenahme sind bei den meisten Parametern bei  $>25$  mm höher als bei  $>65$  mm. Erklärbar ist das einerseits mit der geringeren durchschnittlichen Feldprobenmasse (180 gegenüber 210 kg), andererseits ist zwar die durchschnittliche Kornmasse bei  $>25$  mm geringer (geringeres Potential für Heterogenität), dafür weist die Fraktion  $>25$  mm an der Probenahmestelle eine optisch erkennbare Variabilität auf, die auf das Anlagenkonzept zurückzuführen ist. Die Fraktion  $>25$  mm entsteht durch Zusammenführen der Fraktion  $>65$  mm und der Mittelfraktion 25-65 mm (vergl. Abbildung 4-2). Während die Mittelfraktion 25-65 mm gleichmäßig ausgetragen wird, kommt es bei der Fraktion  $>65$  mm immer wieder dazu, dass zusammenhängende Aggregate (verzopftes, verheddertes Material) von einigen zig kg auf einmal vom Band fallen, während in anderen Momenten kein Austrag stattfindet. Der Unterschied in der Probenahmestreuung bei Asche und Glühverlust zwischen den Fraktionen  $>65$  mm und  $>25$  mm ist vermutlich darauf zurückzuführen.





#### 4.2.8.2 Rotteinput und Rotteoutput

Die Einteilung der Arbeitsschritte zu den Ebenen der Varianzkomponentenanalyse ist in Abbildung 4-20 und Abbildung 4-21 dargestellt. Der Aufbau ist bei Rotteinput und Rotteoutput identisch, Unterschiede bestehen nur in den Probengrößen.

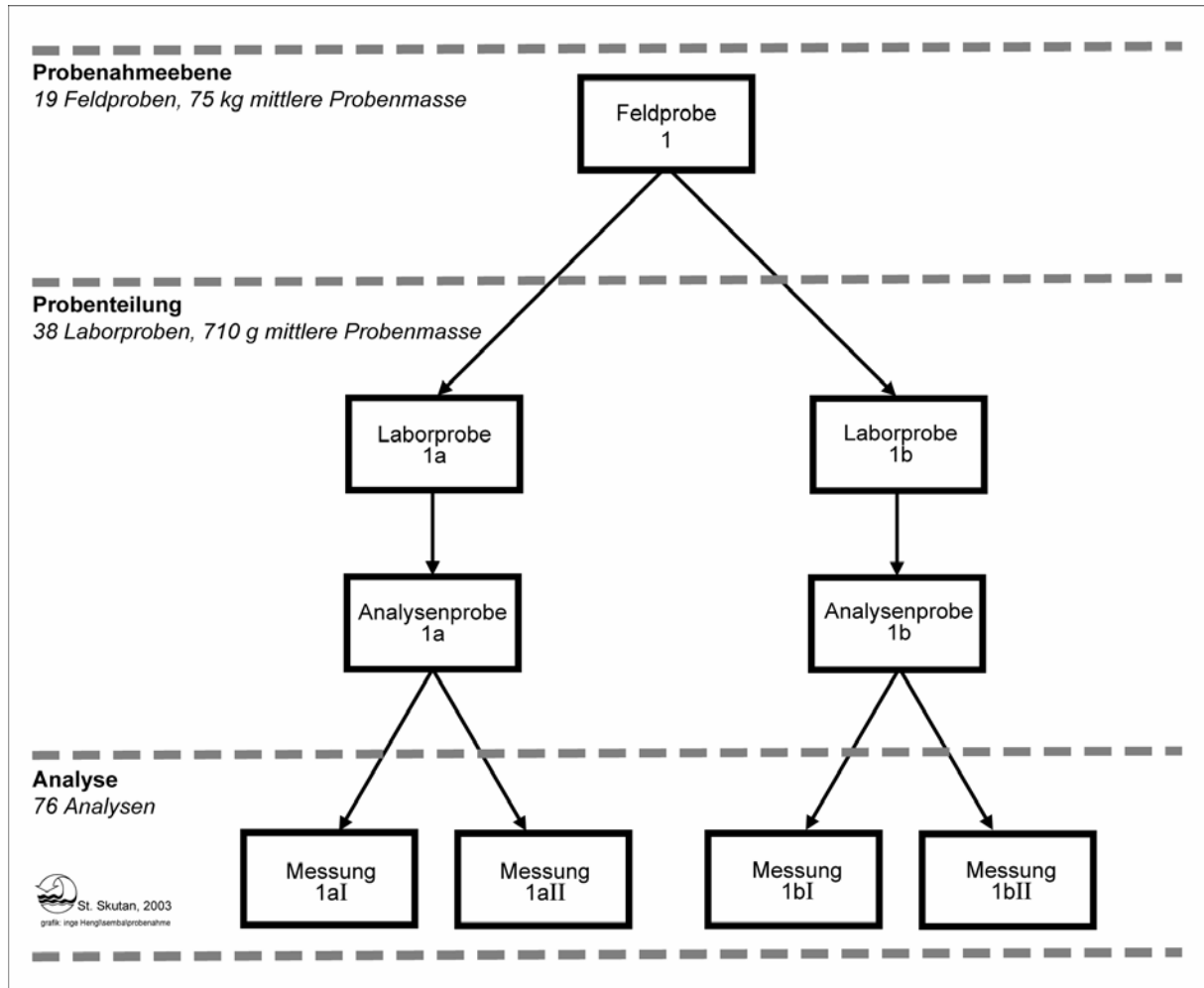


Abbildung 4-20: Versuchsschema bei der Untersuchung des Rotteinputs (Fraktion <25 mm). Zur Vereinfachung ist nur für die erste Feldprobe die Aufgliederung bis zu den Analysen dargestellt. Die Aufgliederung ist für alle 19 Feldproben identisch.

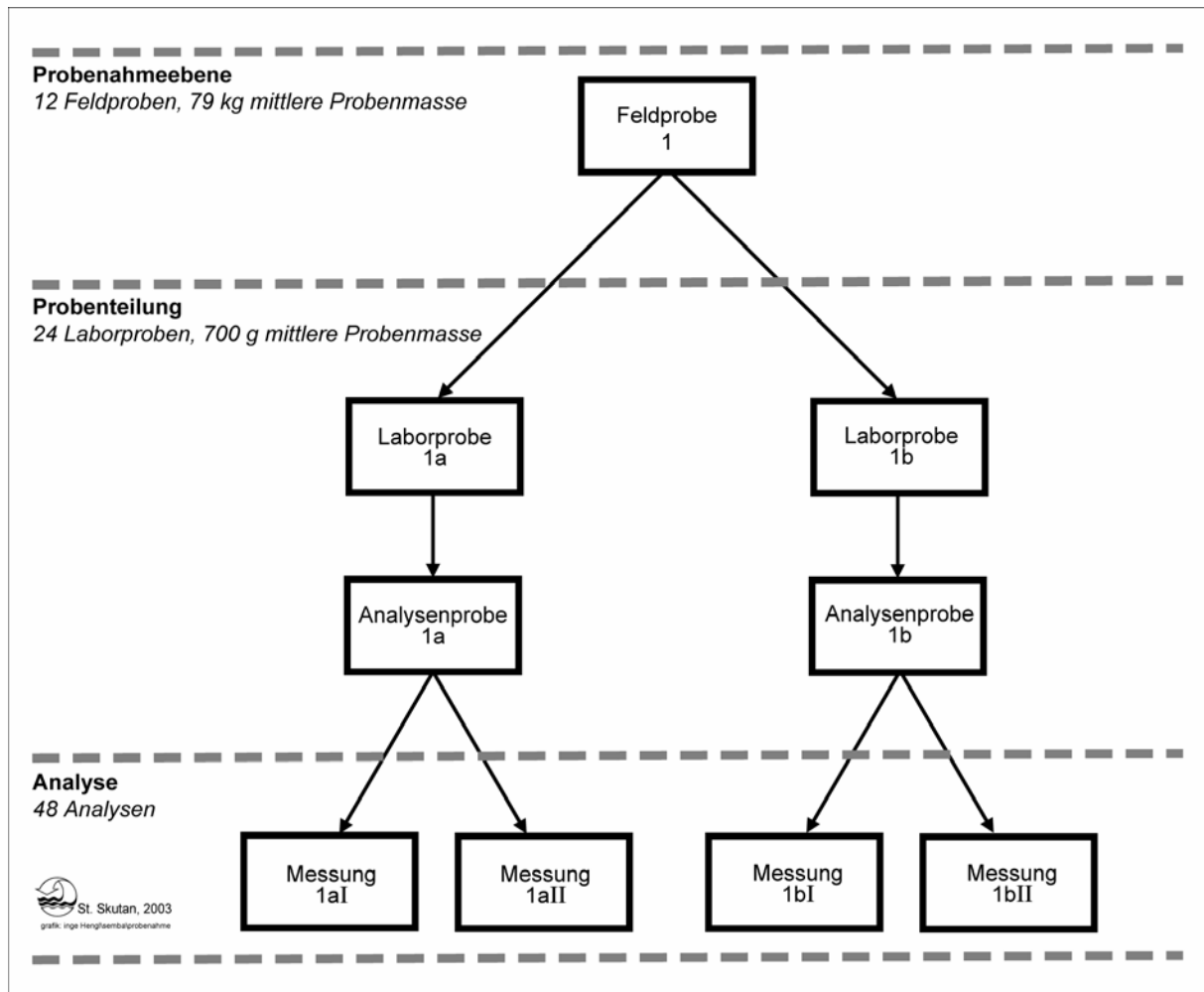


Abbildung 4-21: Versuchsschema bei der Untersuchung des Rotteoutputs. Zur Vereinfachung ist nur für die erste Feldprobe die Aufgliederung bis zu den Analysen dargestellt. Die Aufgliederung ist für alle 12 Feldproben identisch.

Die Ergebnisse der Varianzkomponentenanalysen für die Untersuchungen an Rotteinput und Rotteoutput sind in Tabelle 4-115 zusammengefasst.

Bei Summenparametern und Nichtmetallen ist zu erkennen, dass die Probenahmestreuung beim Rotteinput (erwartungsgemäß) höher ist als beim Rotteoutput. Das deutet auf eine Variabilität im Rotteinput an der Probenahmestelle hin, die durch das Mischen beim Durchlaufen der Rotte vermindert wird. Zudem wurden beim Rotteoutput etwas schwerere Proben gezogen. Bei den Metallen ist der Trend kleinerer Probenahmestreungen beim Rotteoutput nicht durchgängig erkennbar. Die Probenahmestreuung bei den meisten Metallen (vor allem Cu, Pb, Zn, Cr und Ni) ist durch die Heterogenität bedingt und daher durch Mischen nicht vermindert (vergl. dazu den „Anteil aus Metallen“ als Beitrag zum Gesamtgehalt).



Tabelle 4-115: Varianzkomponenten bei der Bestimmung ausgewählter Parameter in Rotteinput und Rotteoutput

| Varianzkomponenten            |                |                |                |                |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                               | Glühverlust    | Asche          | TC             | TOC            |
| <b>Rotteinput (&lt;25 mm)</b> | % <sup>2</sup> | % <sup>2</sup> | % <sup>2</sup> | % <sup>2</sup> |
| Probenahme                    | 31             | 31             | 5,5            | 6,2            |
| Probenteilung (Labor)         | 3,3            | 3,3            | 0,94           | 1,0            |
| Analyse                       | 2,6            | 2,6            | 0,29           | 0,27           |
|                               |                |                |                |                |
| <b>Rotteoutput</b>            |                |                |                |                |
| Probenahme                    | 5,8            | 5,8            | 1,8            | 1,9            |
| Probenteilung (Labor)         | 1,8            | 1,8            | 1,1            | 1,3            |
| Analyse                       | 0,55           | 0,55           | 0,23           | 0,20           |

Fortsetzung Tabelle 4-115:

| Varianzkomponenten            |                |                |                      |                      |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|
|                               | TIC            | N              | P                    | S                    |
| <b>Rotteinput (&lt;25 mm)</b> | % <sup>2</sup> | % <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> |
| Probenahme                    | 0,028          | 0,022          | 140.000              | 380.000              |
| Probenteilung (Labor)         | 0,0070         | 0,0013         | 5.700                | 28.000               |
| Analyse                       | 0,0012         | 0,00065        | 5.000                | 26.000               |
|                               |                |                |                      |                      |
| <b>Rotteoutput</b>            |                |                |                      |                      |
| Probenahme                    | 0,010          | 0,0016         | 21.000               | 50.000               |
| Probenteilung (Labor)         | 0,013          | 0,0019         | 20.000               | 29.000               |
| Analyse                       | 0,0025         | 0,00053        | 15.000               | 22.000               |

Fortsetzung Tabelle 4-115:

| Varianzkomponenten            |                      |                      |                      |                      |                      |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                               | Al                   | Cd                   | Cr                   | Cu                   | Fe                   |
| <b>Rotteinput (&lt;25 mm)</b> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> |
| Probenahme                    | 650.000              | 0,13                 | 1.200                | 62.000               | 1.400.000            |
| Probenteilung (Labor)         | -3.100               | -0,031               | 150                  | -78                  | 1.200.000            |
| Analyse                       | 240.000              | 0,55                 | 380                  | 130.000              | 640.000              |
|                               |                      |                      |                      |                      |                      |
| <b>Rotteoutput</b>            |                      |                      |                      |                      |                      |
| Probenahme                    | 670.000              | -0,0013              | 8.300                | 130.000              | 640.000              |
| Probenteilung (Labor)         | 480.000              | 0,37                 | 59                   | 56.000               | 2.100.000            |
| Analyse                       | 110.000              | 0,55                 | 670                  | 31.000               | 400.000              |



Fortsetzung Tabelle 4-115:

| <b>Varianzkomponenten</b>     | <b>Ni</b>            | <b>Pb</b>            | <b>Zn</b>            | <b>Hg</b>            |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>Rotteinput (&lt;25 mm)</b> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> |
| Probenahme                    | 65.000               | 38.000               | 570.000              | -3,6                 |
| Probenteilung (Labor)         | 28                   | 6.500                | 32.000               | 640                  |
| Analyse                       | 130                  | 39.000               | 13.000               | 640                  |
|                               |                      |                      |                      |                      |
| <b>Rotteoutput</b>            |                      |                      |                      |                      |
| Probenahme                    | 1.900                | 12.000               | 30.000               | 12                   |
| Probenteilung (Labor)         | -2,8                 | 170.000              | 86.000               | 1,6                  |
| Analyse                       | 220                  | 11.000               | 34.000               | 1,5                  |

Tabelle 4-116: Ursachen der Streuung bei der Bestimmung ausgewählter Parameter in Rotteinput und Rotteoutput angegeben als „Komponenten“ der Variationskoeffizienten.

| <b>"Komponenten" der Variationskoeffizienten</b> | <b>Glühverlust</b>            | <b>Asche</b> | <b>TC</b> | <b>TOC</b> |
|--|-------------------------------|--------------|-----------|------------|
|  | <b>Rotteinput (&lt;25 mm)</b> | %            | %         | %          |
| Probenahme                                       | 11                            | 11           | 8,1       | 9,1        |
| Probenteilung (Labor)                            | 3,5                           | 3,8          | 3,3       | 3,7        |
| Analyse  | 3,1                           | 3,3          | 1,9       | 1,9        |
|  |                               |              |           |            |
| <b>Rotteoutput</b>                               |                               |              |           |            |
| Probenahme                                       | 6,7                           | 3,8          | 6,2       | 7,1        |
| Probenteilung (Labor)                            | 3,7                           | 2,1          | 4,9       | 5,9        |
| Analyse  | 2,1                           | 1,2          | 2,2       | 2,3        |

Fortsetzung Tabelle 4-116:

| <b>"Komponenten" der Variationskoeffizienten</b> | <b>TIC</b>                    | <b>N</b> | <b>P</b> | <b>S</b> |
|--|-------------------------------|----------|----------|----------|
|  | <b>Rotteinput (&lt;25 mm)</b> | %        | %        | %        |
| Probenahme                                       | 10                            | 14       | 15       | 13       |
| Probenteilung (Labor)                            | 5,1                           | 3,5      | 3,1      | 3,4      |
| Analyse  | 2,1                           | 2,5      | 2,9      | 3,3      |
|  |                               |          |          |          |
| <b>Rotteoutput</b>                               |                               |          |          |          |
| Probenahme                                       | 4,6                           | 3,7      | 3,5      | 3,8      |
| Probenteilung (Labor)                            | 5,3                           | 4,0      | 3,4      | 2,9      |
| Analyse  | 2,3                           | 2,1      | 3,0      | 2,5      |



Fortsetzung Tabelle 4-116:

| "Komponenten" der<br>Variationskoeffizienten | Al                            | Cd     | Cr  | Cu     | Fe  |
|--|-------------------------------|--------|-----|--------|-----|
|  | <b>Rotteinput (&lt;25 mm)</b> | %      | %   | %      | %   |
| Probenahme                                   | 4,8                           | 18     | 28  | 24     | 8,2 |
| Probenteilung (Labor)                        | nahe 0                        | nahe 0 | 10  | nahe 0 | 7,6 |
| Analyse                                      | 2,9                           | 36     | 16  | 35     | 5,6 |
|  |                               |        |     |        |     |
| <b>Rotteoutput</b>                           |                               |        |     |        |     |
| Probenahme                                   | 3,8                           | nahe 0 | 43  | 22     | 3,6 |
| Probenteilung (Labor)                        | 3,2                           | 20     | 3,6 | 14     | 6,5 |
| Analyse                                      | 1,5                           | 25     | 12  | 11     | 2,8 |

Fortsetzung Tabelle 4-116:

| "Komponenten" der<br>Variationskoeffizienten | Ni                            | Pb | Zn  | Hg     |
|--|-------------------------------|----|-----|--------|
|  | <b>Rotteinput (&lt;25 mm)</b> | %  | %   | %      |
| Probenahme                                   | 191                           | 48 | 49  | nahe 0 |
| Probenteilung (Labor)                        | 4,0                           | 20 | 12  | 397    |
| Analyse                                      | 8,7                           | 49 | 7,4 | 398    |
|  |                               |    |     |        |
| <b>Rotteoutput</b>                           |                               |    |     |        |
| Probenahme                                   | 32                            | 15 | 8,6 | 108    |
| Probenteilung (Labor)                        | nahe 0                        | 57 | 15  | 39     |
| Analyse                                      | 11                            | 15 | 9,1 | 38     |



#### 4.2.8.3 Schwer- und Leichtfraktion vom ballistischen Separator (BasS und BasL)

Die Einteilung der Arbeitsschritte zu den Ebenen der Varianzkomponentenanalyse ist in Abbildung 4-22 und Abbildung 4-23 dargestellt. Der Aufbau ist bei BasS und BasL identisch, Unterschiede bestehen nur in den Probengrößen und -zahlen.

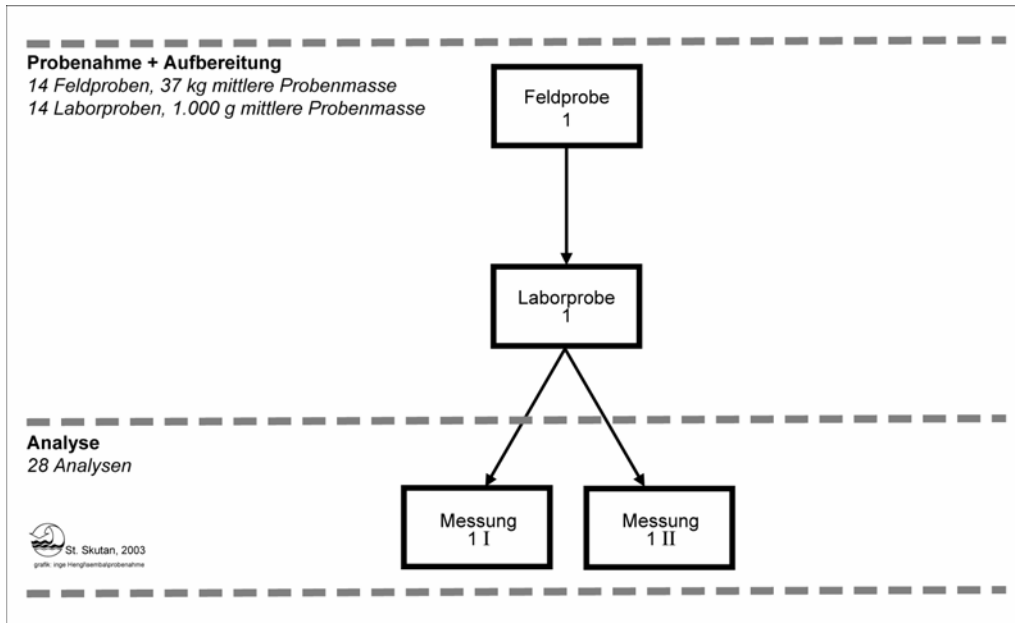


Abbildung 4-22: Versuchsschema bei der Untersuchung der Schwerfraktion des ballistischen Separators (BasS). Zur Vereinfachung ist nur für die erste Feldprobe die Aufgliederung bis zu den Analysen dargestellt. Die Aufgliederung ist für alle 14 Feldproben identisch.

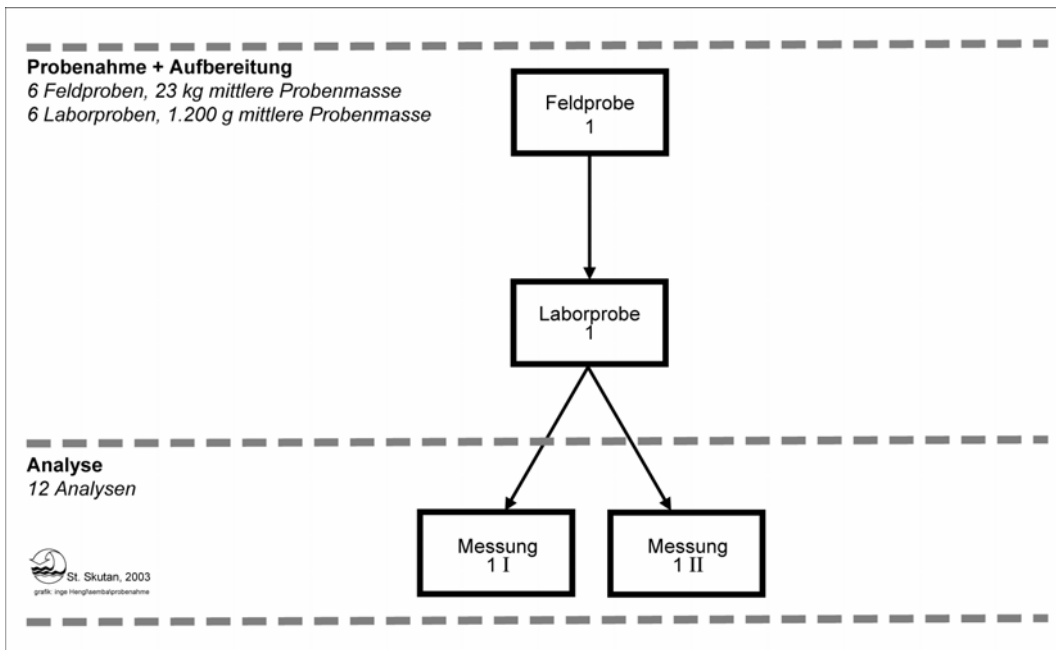


Abbildung 4-23: Versuchsschema bei der Untersuchung der Leichtfraktion des ballistischen Separators (BasL). Zur Vereinfachung ist nur für die erste Feldprobe die Aufgliederung bis zu den Analysen dargestellt. Die Aufgliederung ist für alle 6 Feldproben identisch.



Die Ergebnisse der Varianzkomponentenanalysen der Untersuchungen an den Fraktionen BasL und BasS sind in Tabelle 4-117 zusammengestellt.

Bei allen Parametern außer Cadmium und Stickstoff ist die Probenahmestreuung bei BasS größer als bei BasL, obwohl die Probenmassen bei BasS größer gewählt waren. Dieser Sachverhalt spiegelt den augenfälligen Unterschied in der Zusammensetzung (darin enthaltene Gemeineteile) wieder. Während sich BasL überwiegend aus flächigen Kunststoffteilen und Textilien (selten Kabel) zusammensetzt, sind in BasS häufig auch Batterien und Metallstücke jeder Art zu finden. Generell ist die Kornmasse in BasS wesentlich höher als in BasL.

Tabelle 4-117: Varianzkomponenten bei der Bestimmung ausgewählter Parameter in Schwer- und Leichtfraktion des ballistischen Separators (BasS und BasL)

| Varianzkomponenten          | Glühverlust    | Asche          | TC             | TOC            |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>BasS</b>                 | % <sup>2</sup> | % <sup>2</sup> | % <sup>2</sup> | % <sup>2</sup> |
| Probenahme und Aufbereitung | 36             | 36             | 19             | 19             |
| Analyse                     | 0,31           | 0,31           | 0,13           | 0,13           |
| <b>BasL</b>                 |                |                |                |                |
| Probenahme und Aufbereitung | 5,1            | 5,1            | 0,83           | 0,90           |
| Analyse                     | 0,20           | 0,20           | 0,073          | 0,085          |

Fortsetzung Tabelle 4-117:

| Varianzkomponenten          | TIC            | N              | P                    | S                    |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------------|----------------------|
| <b>BasS</b>                 | % <sup>2</sup> | % <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> |
| Probenahme und Aufbereitung | 0,067          | 0,0077         | 650.000              | 1.000.000            |
| Analyse                     | 0,0021         | 0,00071        | 20.000               | 65.000               |
| <b>BasL</b>                 |                |                |                      |                      |
| Probenahme und Aufbereitung | 0,026          | 0,014          | 77.000               | 45.000               |
| Analyse                     | 0,0025         | 0,0            | 2.200                | 4.600                |

Fortsetzung Tabelle 4-117:

| Varianzkomponenten          | Al                   | Cd                   | Cr                   | Cu                   | Fe                   |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <b>BasS</b>                 | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> |
| Probenahme und Aufbereitung | 14.000.000           | 3,7                  | 79.000               | 18.000.000           | 18.000.000           |
| Analyse                     | 2.200.000            | 1,1                  | 3.400                | 160.000              | 10.000.000           |
| <b>BasL</b>                 |                      |                      |                      |                      |                      |
| Probenahme und Aufbereitung | 8.400.000            | 19                   | 63.000               | -220.000             | 8.500.000            |
| Analyse                     | 1.200.000            | 0,073                | 4.900                | 610.000              | 1.500.000            |



Fortsetzung Tabelle 4-117:

| Varianzkomponenten          | Ni                   | Pb                   | Zn                   | Hg                   |
|-----------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                             | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> | (mg/kg) <sup>2</sup> |
| <b>BasS</b>                 |                      |                      |                      |                      |
| Probenahme und Aufbereitung | 16.000               | 2.700.000            | 3.300.000            | 4,2                  |
| Analyse                     | 1.300                | 93.000               | 62.000               | 0,040                |
|                             |                      |                      |                      |                      |
| <b>BasL</b>                 |                      |                      |                      |                      |
| Probenahme und Aufbereitung | 1.200                | -290                 | 270.000              | 0,0070               |
| Analyse                     | 260                  | 6.200                | 160.000              | 0,0013               |

Tabelle 4-118: Ursachen der Streuung bei der Bestimmung ausgewählter Parameter in Schwer- und Leichtfraktion des ballistischen Separators (BasS und BasL) angegeben als „Komponenten“ der Variationskoeffizienten.

| "Komponenten" der Variationskoeffizienten | Glühverlust | Asche | TC   | TOC  |
|---|-------------|-------|------|------|
|   |             | %     | %    | %    |
| <b>BasS</b>                               |             |       |      |      |
| Probenahme und Aufbereitung               | 16          | 9,4   | 17   | 19   |
| Analyse                                   | 1,5         | 0,87  | 1,4  | 1,5  |
|   |             |       |      |      |
| <b>BasL</b>                               |             |       |      |      |
| Probenahme und Aufbereitung               | 3,1         | 8,4   | 2,0  | 2,1  |
| Analyse                                   | 0,61        | 1,6   | 0,59 | 0,65 |

Fortsetzung Tabelle 4-118:

| "Komponenten" der Variationskoeffizienten | TIC | N   | P   | S   |
|---|-----|-----|-----|-----|
|   |     | %   | %   | %   |
| <b>BasS</b>                               |     |     |     |     |
| Probenahme und Aufbereitung               | 15  | 15  | 27  | 26  |
| Analyse                                   | 2,7 | 4,5 | 4,7 | 6,6 |
|   |     |     |     |     |
| <b>BasL</b>                               |     |     |     |     |
| Probenahme und Aufbereitung               | 13  | 11  | 15  | 5,5 |
| Analyse                                   | 3,9 | 0,0 | 2,5 | 1,7 |





Fortsetzung Tabelle 4-118:

| "Komponenten" der<br>Variationskoeffizienten |     |     |     |        |    |
|--|-----|-----|-----|--------|----|
|  | Al  | Cd  | Cr  | Cu     | Fe |
| <b>BasS</b>                                  | %   | %   | %   | %      | %  |
| Probenahme und Aufbereitung                  | 15  | 31  | 120 | 50     | 17 |
| Analyse                                      | 5,9 | 17  | 24  | 4,7    | 12 |
|  |     |     |     |        |    |
| <b>BasL</b>                                  |     |     |     |        |    |
| Probenahme und Aufbereitung                  | 16  | 67  | 83  | nahe 0 | 27 |
| Analyse                                      | 6,0 | 4,2 | 23  | 78     | 11 |

Fortsetzung Tabelle 4-118:

| "Komponenten" der<br>Variationskoeffizienten |    |        |     |     |
|--|----|--------|-----|-----|
|  | Ni | Pb     | Zn  | Hg  |
| <b>BasS</b>                                  | %  | %      | %   | %   |
| Probenahme und Aufbereitung                  | 85 | 130    | 35  | 230 |
| Analyse                                      | 24 | 25     | 4,8 | 22  |
|  |    |        |     |     |
| <b>BasL</b>                                  |    |        |     |     |
| Probenahme und Aufbereitung                  | 46 | nahe 0 | 29  | 17  |
| Analyse                                      | 22 | 49     | 22  | 7,0 |



#### 4.2.9 Zuordnung der Cadmiumfracht in der Fraktion >65 mm zu Trägern aus Kunststoff

Dieser Aspekt wurde untersucht, um die Annahme zu untermauern, dass ein relevanter Teil der Cadmiumfracht einer heizwertreichen Fraktion auf Cd-stabilisiertes PVC zurückzuführen ist. Der Versuch sollte die Hypothese prüfen, ob die Cadmiumfracht einer Probe, die über die „Hintergrundbelastung“ von ca. 2 mg/kg TS hinausgeht, im Kunststoffanteil einer Probe zu finden ist. Für die Charakterisierung der „Hintergrundbelastung“ wurden die niedrigsten in der Fraktion >65 mm gemessenen Werte herangezogen. Diese decken sich mit häufig in der Literatur angegebenen Werten für heizwertreiche Fraktionen, von denen man annehmen kann, dass sie auf Grund unzureichender Probenmassen und Aufbereitungsverfahren Hintergrundgehalten entsprechen.

Im Zuge der Feinaufbereitung der Proben fällt als Zwischenprodukt eine Siebfraktion >0,5 mm an, die überwiegend aus Kunststoffen besteht (diese Fraktion wird geschmolzen, gepresst und gesägt, vergl. Kapitel 3.4.3.1). Von drei Proben der Fraktion >65 mm wurde diese Kunststofffraktion (Sägespäne) separat auf Cadmium analysiert. In Tabelle 4-119 sind die Analysenergebnisse und die daraus berechneten Frachtanteile (Beiträge zum Gesamtgehalt) zusammengestellt.

*Tabelle 4-119: Ergebnisse der Versuche zur Zuordnung der Cadmiumfracht der heizwertreichen Fraktion >65 mm zum Kunststoffanteil (Angaben in mg/kg TS)*

| Probe  | 10 A | 13 B | 16 B |
|--|------|------|------|
| Cd-Gehalt der Analysenprobe                          | 13,3 | 25,3 | 9,6  |
| Cd-Gehalt der "Teilfraktion Kunststoffe"             | 36,8 | 92,2 | 34,1 |
|  |      |      |      |
| Konzentrationsbeitrag der "Teilfraktion Kunststoffe" | 10,2 | 24,8 | 8,9  |
| Hintergrundgehalt berechnet                          | 3,1  | 0,5  | 0,7  |

Die hohen Gehalte in den „Teilfraktionen Kunststoff“ zeigen, dass der größte Teil der Cadmiumfracht bei den ausgewählten Proben in den Kunststoffen steckt. Die berechneten Hintergrundgehalte treffen etwa den erwarteten Bereich.



## 4.2.10 Stoffbilanzen

### 4.2.10.1 Mechanische Aufbereitung

Die Stoffbilanzen wurden wie unter 3.3.8 beschrieben berechnet. Die Ergebnisse der Bilanzen der mechanischen Aufbereitung (Oberpullendorf I und Oberpullendorf II) sind in Kapitel 4.5 im Vergleich mit den Versuchen Wien und Kirchdorf dargestellt.

Für die Charakterisierung der Güter Rotteinput <25 mm, Fe-Schrott I und Fe-Schrott II wurden die Proben und Messergebnisse aus beiden Versuchsvarianten zusammengefasst und in beiden Varianten mit dem Mittelwert daraus gerechnet. Diese Vorgangsweise wird damit begründet, dass die gemeinsamen Mittelwerte mit großer Wahrscheinlichkeit das Material in beiden Versuchsvarianten besser charakterisieren als die beiden Mittelwerte innerhalb der Varianten. Die Variantenmittelwerte sind im Mittelwertvergleich auch nicht signifikant unterscheidbar. Das heißt, die durch die Probenahme bedingte Streuung ist größer als die Variabilität unter den beiden Versuchsvarianten.

### 4.2.10.2 Rotte

Die Rottebilanz ist für die Parameter, die nicht über den Abluftpfad ausgetragen werden können, ein Test für die Richtigkeit der Bestimmung der festen In- und Outputflüsse. Abweichungen zwischen In- und Output können bei diesen Parametern nur Bestimmungsfehler sein.

Beide Versuchsrottefelder wurden in der Auswertung sowohl bei der Güterbilanz als auch den Stoffbilanzen zusammengefasst, weil keine signifikanten Unterschiede in Güterflüssen bzw. Stoffkonzentrationen auftreten.

Ein relativ hoher Anteil an der Unsicherheit der Stoffbilanzen ergibt sich aus der Unsicherheit der Güterbilanz, die wegen der Schwierigkeiten der Massenerfassung des Rotteinputs groß ist (vergl. 4.2.6).

In den folgenden Tabellen sind die Transferkoeffizienten samt Unsicherheiten (untere und obere Schranken eines 95 %-Konfidenzintervalls) zusammengestellt.

#### *Aufbau der Tabellen*

Für die Rottebilanzen wird der Rotteinput gleich 1 gesetzt und dazu der Rotteoutput in Relation gesetzt. Der Rotteverlust errechnet sich als der Differenz Rotteinput - Rotteoutput. Auch die Spannen der Konfidenzintervalle sind relativ zum Input, der gleich 1 gesetzt ist, angegeben.



Tabelle 4-120: Transferkoeffizienten für Güter, Trockensubstanz und Wasser für die Rotte

| INPUT            | Güter                 |             |             | Trockensubstanz TS    |             |             | Wasser                |             |             |
|------------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|
|                  | Güterfluss relativ    |             |             | Stofffluss relativ    |             |             | Stofffluss relativ    |             |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    |
| Rotteinput       | 1,0                   | 0,94        | 1,1         | 1,0                   | 0,93        | 1,1         | 1,0                   | 0,93        | 1,1         |
| OUTPUT           | Transferkoeffizienten |             |             | Transferkoeffizienten |             |             | Transferkoeffizienten |             |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    |
| Rotteoutput      | 0,60                  | 0,56        | 0,64        | 0,72                  | 0,67        | 0,77        | 0,44                  | 0,41        | 0,48        |
| Rotteverlust     | 0,40                  | 0,36        | 0,44        | 0,28                  | 0,23        | 0,33        | 0,56                  | 0,52        | 0,59        |
| <b>Summe Out</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,95</b> | <b>1,05</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,93</b> | <b>1,07</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,95</b> | <b>1,05</b> |

Tabelle 4-121: Transferkoeffizienten für Asche und Glühverlust für die Rotte

| INPUT            | Asche                 |             |             | Glühverlust GV        |             |             |
|------------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|
|                  | Güterfluss relativ    |             |             | Stofffluss relativ    |             |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    |
| Rotteinput       | 1,0                   | 0,92        | 1,1         | 1,0                   | 0,92        | 1,1         |
| OUTPUT           | Transferkoeffizienten |             |             | Transferkoeffizienten |             |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    |
| Rotteoutput      | 0,96                  | 0,88        | 1,04        | 0,46                  | 0,37        | 0,56        |
| Rotteverlust     | 0,041                 | -0,037      | 0,12        | 0,54                  | 0,44        | 0,63        |
| <b>Summe Out</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,89</b> | <b>1,11</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,87</b> | <b>1,13</b> |

Tabelle 4-122: Transferkoeffizienten für TC, TOC und TIC für die Rotte

| INPUT            | TC                    |             |             | TOC                   |             |             | TIC                   |             |             |
|------------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|
|                  | Güterfluss relativ    |             |             | Stofffluss relativ    |             |             | Stofffluss relativ    |             |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    |
| Rotteinput       | 1,0                   | 0,92        | 1,1         | 1,0                   | 0,92        | 1,1         | 1,0                   | 0,92        | 1,1         |
| OUTPUT           | Transferkoeffizienten |             |             | Transferkoeffizienten |             |             | Transferkoeffizienten |             |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    |
| Rotteoutput      | 0,53                  | 0,48        | 0,58        | 0,50                  | 0,45        | 0,55        | 0,95                  | 0,87        | 1,04        |
| Rotteverlust     | 0,47                  | 0,42        | 0,52        | 0,50                  | 0,45        | 0,55        | 0,047                 | -0,040      | 0,13        |
| <b>Summe Out</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,93</b> | <b>1,07</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,93</b> | <b>1,07</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,88</b> | <b>1,12</b> |

Tabelle 4-123: Transferkoeffizienten für N, S und P für die Rotte

| INPUT            | N                     |             |             | S                     |             |             | P                     |             |             |
|------------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|
|                  | Güterfluss relativ    |             |             | Stofffluss relativ    |             |             | Stofffluss relativ    |             |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    |
| Rotteinput       | 1,0                   | 0,91        | 1,1         | 1,0                   | 0,90        | 1,1         | 1,0                   | 0,90        | 1,1         |
| OUTPUT           | Transferkoeffizienten |             |             | Transferkoeffizienten |             |             | Transferkoeffizienten |             |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    |
| Rotteoutput      | 0,75                  | 0,67        | 0,83        | 0,86                  | 0,77        | 0,95        | 1,21                  | 1,08        | 1,34        |
| Rotteverlust     | 0,25                  | 0,17        | 0,33        | 0,14                  | 0,05        | 0,23        | -0,21                 | -0,34       | -0,083      |
| <b>Summe Out</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,89</b> | <b>1,11</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,87</b> | <b>1,13</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,82</b> | <b>1,18</b> |



Tabelle 4-124: Transferkoeffizienten für Al, Cd, und Cr für die Rotte

|                  | Al                    |             |             | Cd                    |             |             | Cr                    |             |             |
|------------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|
| INPUT            | Güterfluss relativ    |             |             | Stofffluss relativ    |             |             | Stofffluss relativ    |             |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    |
| Rotteinput       | 1,0                   | 0,93        | 1,1         | 1,0                   | 0,87        | 1,1         | 1,0                   | 0,85        | 1,1         |
|                  |                       |             |             |                       |             |             |                       |             |             |
| OUTPUT           | Transferkoeffizienten |             |             | Transferkoeffizienten |             |             | Transferkoeffizienten |             |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    |
| Rotteoutput      | 0,92                  | 0,85        | 1,00        | 1,05                  | 0,88        | 1,23        | 1,2                   | 0,87        | 1,6         |
| Rotteverlust     | 0,078                 | 0,0032      | 0,15        | -0,051                | -0,23       | 0,12        | -0,22                 | -0,57       | 0,13        |
| <b>Summe Out</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,89</b> | <b>1,11</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,75</b> | <b>1,25</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,51</b> | <b>1,49</b> |

Tabelle 4-125: Transferkoeffizienten für Cu und Hg für die Rotte

|                  | Cu                    |             |             | Hg                    |             |             | Hg *                  |              |             |
|------------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|--------------|-------------|
| INPUT            | Stofffluss relativ    |             |             | Stofffluss relativ    |             |             | Stofffluss relativ    |              |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |              |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.    | obere G.    |
| Rotteinput       | 1,0                   | 0,84        | 1,2         | 1,0                   | -0,53       | 2,5         | 1,0                   | 0,53         | 1,5         |
|                  |                       |             |             |                       |             |             |                       |              |             |
| OUTPUT           | Transferkoeffizienten |             |             | Transferkoeffizienten |             |             | Transferkoeffizienten |              |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |              |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.    | obere G.    |
| Rotteoutput      | 1,2                   | 0,90        | 1,4         | 0,39                  | -0,26       | 1,0         | 1,7                   | 0,34         | 3,1         |
| Rotteverlust     | -0,15                 | -0,40       | 0,10        | 0,61                  | -0,03       | 1,3         | -0,73                 | -2,12        | 0,66        |
| <b>Summe Out</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,65</b> | <b>1,35</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,09</b> | <b>1,91</b> | <b>1,00</b>           | <b>-0,97</b> | <b>2,97</b> |

\* Elimination eines „Ausreißers“ (1 von 18) beim Rotteinput

Tabelle 4-126: Transferkoeffizienten für Fe, Ni und Pb für die Rotte

|                  | Fe                    |             |             | Ni                    |             |             | Pb                    |             |             |
|------------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|-------------|
| INPUT            | Güterfluss relativ    |             |             | Güterfluss relativ    |             |             | Stofffluss relativ    |             |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    |
| Rotteinput       | 1,0                   | 0,92        | 1,1         | 1,0                   | 0,17        | 1,8         | 1,0                   | 0,74        | 1,3         |
|                  |                       |             |             |                       |             |             |                       |             |             |
| OUTPUT           | Transferkoeffizienten |             |             | Transferkoeffizienten |             |             | Transferkoeffizienten |             |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             | 95% Konf.-I.          |             |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    |
| Rotteoutput      | 1,1                   | 1,0         | 1,2         | 0,75                  | 0,11        | 1,4         | 1,3                   | 0,82        | 1,7         |
| Rotteverlust     | -0,12                 | -0,22       | -0,019      | 0,25                  | -0,39       | 0,89        | -0,28                 | -0,74       | 0,18        |
| <b>Summe Out</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,86</b> | <b>1,14</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,10</b> | <b>1,90</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,35</b> | <b>1,65</b> |



*Tabelle 4-127: Transferkoeffizient für Zn für die Rotte*

|                  | Zn                    |             |             |
|------------------|-----------------------|-------------|-------------|
| <b>INPUT</b>     | Stofffluss relativ    |             |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    |
| Rotteinput       | 1,0                   | 0,78        | 1,2         |
|                  |                       |             |             |
| <b>OUTPUT</b>    | Transferkoeffizienten |             |             |
|                  | 95% Konf.-I.          |             |             |
|                  | Mittelw.              | untere G.   | obere G.    |
| Rotteoutput      | 0,95                  | 0,73        | 1,2         |
| Rotteverlust     | 0,05                  | -0,18       | 0,27        |
| <b>Summe Out</b> | <b>1,00</b>           | <b>0,68</b> | <b>1,32</b> |



## 4.3 Versuch Kirchdorf an der Krems

### 4.3.1 Anlagenbeschreibung

Die Anlage hat eine Kapazität von 50 t Restmüll pro Tag. Im Folgenden ist das Schema der Anlage abgebildet.

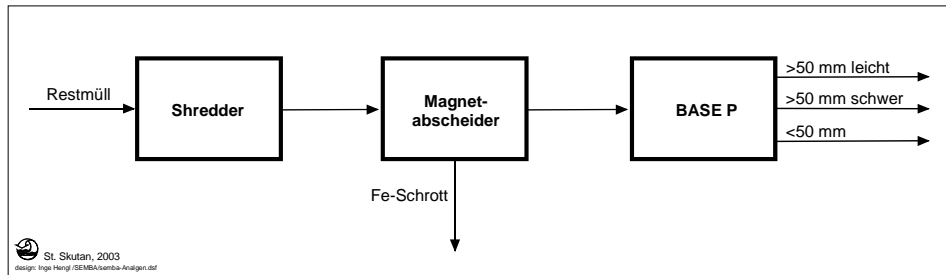


Abbildung 4-24: Schema der Anlage Kirchdorf an der Krems

Der Magnetabscheider war zur Versuchszeit relativ schwach eingestellt, Batterien, Elektro- und Elektronikgeräte wurden nur in geringem Ausmaß von ihm erfasst.

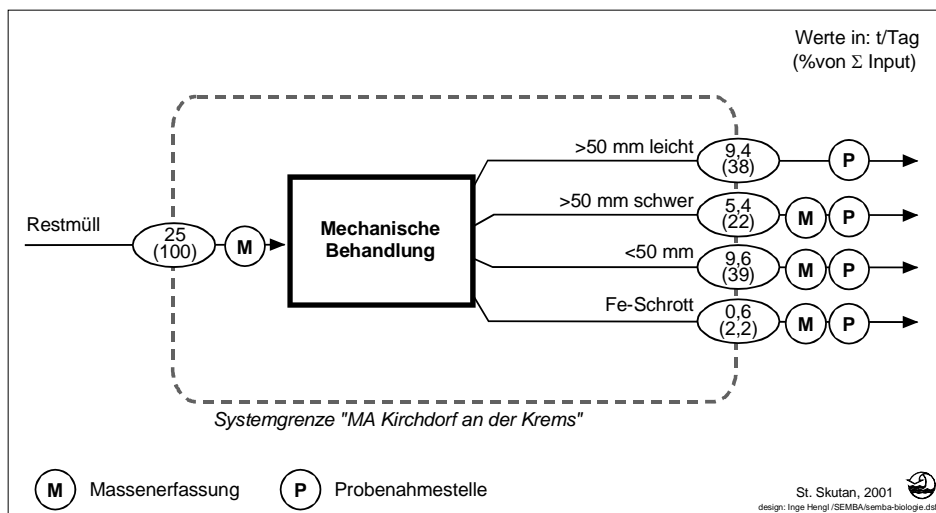


Abbildung 4-25: Systembild für die Stoffflussanalyse an der MA Kirchdorf an der Krems: Vorabschätzung der Güterflüsse für die Versuchsplanung in t/Tag bzw. % von der Summe Input. Ebenfalls eingezeichnet sind die Stellen für Massenerfassung und Probenahme.

### 4.3.2 Versuchsplanung

#### 4.3.2.1 Randbedingungen

Aus den Ergebnissen der Versuche Oberpullendorf I und II ergaben sich für die Planung folgende Voraussetzungen:

Probenahme und Messung (oberste und unterste Ebene) verursachten bei den oberpullendorfer Versuchen den Großteil der Streuung. Die Teilung der vorzerkleinerten Feldproben und die Teilung im Labor waren unkritisch. Daraus ergibt sich Handlungsbedarf bei den Feldprobenmassen und der Güte der Feinaufbereitung. Die Probenmassen wurden daraufhin durch Simulation mit der Binomialverteilungsstatistik und Hochrechnungen auf höhere



Probenmassen aus den oberpullendorfer Ergebnissen bestimmt. Bei der Feinaufbereitung im Labor sind keine Verbesserungen (Herabsetzung der Korngröße der Analysenproben, Vermeidung von Metallpartikeln) möglich. Dieses Manko kann durch Steigerung der Messwiederholungen oder Vergrößern der Analysenportionen (Zusammenmischen mehrerer Aufschlüsse zu einer Messlösung) ausgeglichen werden. Eine exakte Vorausplanung der Messungen ist nicht notwendig, da flexibel auf die auftretenden Messstreuungen reagiert werden kann, d.h., bei Bedarf die Zahl an Wiederholungen (Aufschlüsse pro Probe) aufgestockt wird.

Die Laboraufbereitung verursacht, verglichen mit den anderen Schritten von der Probenahme bis zur Analyse, den größten Aufwand, ist am anfälligsten für Störungen (Maschinenausfälle) und liefert kleine Beiträge zur Streuung. Wiederholungen auf dieser Ebene (Aufbereitung von mehreren Analysenproben aus dem Material einer Feldprobe) haben daher keinen Sinn. Die Streuung der Messungen kann mit vertretbarem Aufwand auf ein niedriges Niveau gebracht werden, wenn die Zahl an Analysenproben klein ist. Es wurden daher Probenzahlen von jeweils fünf Stück für Leicht-, Schwerfraktion und Fraktion <50 mm festgelegt und mit Hilfe von synthetischen Bilanzen, d.h., Auswertungen mit erfundenen oder simulierten Messwerten die maximal zulässigen Streuungen bei der Gütercharakterisierung bestimmt, die eine Bilanzunsicherheit innerhalb von 20 bis 30 % ermöglichen. In Abbildung 4-26 ist die Tabellenkalkulation für eine synthetische Cd-Bilanz beschrieben.

| Gut          | TK           |               |               |            | Eingabebereich |         |               |       |              |   |              |            |       |
|--------------|--------------|---------------|---------------|------------|----------------|---------|---------------|-------|--------------|---|--------------|------------|-------|
|              | 95% Konf.-I. |               |               |            | Stofffluss     |         | Konzentration |       |              |   |              | Güterfluss |       |
|              | Mittelw.     | untere G.     | obere G.      | Var von TK | Mittelw.       | Var     | Mittelw.      | Var   | s Mittelwert | n | s Einzelwert | Mittelw.   | Var   |
| Leicht       | 0,143        | 0,0916        | 0,1951        | 0,00069712 | 168            | 515     | 4,00          | 0,288 | 0,537        | 5 | 1,2          | 42         | 0,42  |
| Schwer       | 0,143        | 0,0915        | 0,1952        | 0,00069974 | 168            | 520     | 7,00          | 0,882 | 0,939        | 5 | 2,1          | 24         | 0,24  |
| <50 mm       | 0,073        | 0,0459        | 0,1008        | 0,00019639 | 86             | 135     | 2             | 0,072 | 0,268        | 5 | 0,6          | 43         | 0,43  |
| Fe           | 0,640        | 0,5335        | 0,7464        | 0,00295019 | 750            | 27562,5 | 300           | 4050  | 63,640       | 2 | 90           | 2,5        | 0,025 |
| <b>SUMME</b> | <b>1,000</b> | <b>0,7625</b> | <b>1,2375</b> |            |                |         |               |       |              |   |              |            |       |

Abbildung 4-26: Tabellenkalkulation zur Auswertung und Erstellung von synthetischen Stoffbilanzen (hier Cd) für die Anlage Kirchdorf. Die Eingabefelder sind hinterlegt. Ganz rechts sind die Vorabschätzungen der Güterflüsse einzusetzen. Im Eingabebereich der Konzentration ist der erwartete Mittelwert die erwartete Streuung der Einzelwerte und die Zahl an Wiederholungen (Feldproben) einzusetzen.

Zu den maximal zulässigen Streuungen wurden mit Hilfe der Probenahmesimulation die notwendigen Probenmassen abgeschätzt (Abbildung 4-28). Die fünf Proben werden jeweils als Mischproben angelegt, wobei pro Versuchstag mehrere Teilmengen zu jeder Probe hinzukommen, um etwaige zeitliche Schwankungen in der Zusammensetzung auszugleichen (Abbildung 4-27).



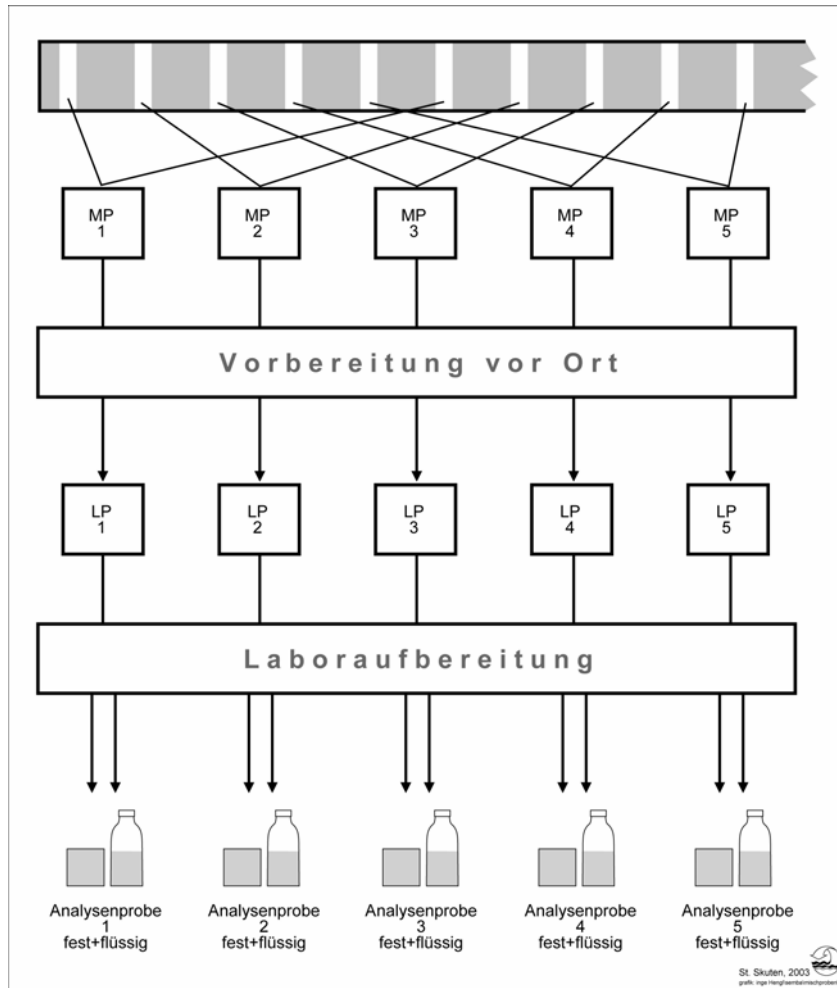


Abbildung 4-27: Mischprobenkonzept für die Feldproben der Fraktionen  $>50$  mm L,  $>50$  mm S und  $<50$  mm. Jede Mischprobe (MP) wird aus Teilmengen gebildet, die über die Zeit verteilt gezogen werden. Aus jeder Mischprobe wird letztlich ein Paar Analysenproben (fest und flüssig) bereitet. Es gibt keine parallel im Labor aufbereiteten Proben aus einer Feldprobe. MP Mischprobe, LP Laborprobe

In Abbildung 4-28 ist das Ergebnis einer Simulation für Probenahme und Aufbereitung von Proben aus der Schwerfraktion  $>50$  mm zur Analyse von Cd dargestellt. Es wird dabei angenommen, dass Cd-hältiges PVC in Stücken zu 300 g im Material verteilt ist. 300 g werden festgesetzt als Rechenwert auf Basis von Voruntersuchungen und der Tatsache, dass diese Partikelmasse die Probenahmestreuung bei den heizwertreichen Fraktionen  $>65$  mm und  $>25$  mm gut erklärt. Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden die Output-Fractionen in Kirchdorf nach Metallträgern durchsucht und „Cd-verdächtige“ PVC-Teile (Gartenschläuche, Bodenbeläge, Sesselleisten, Kabel entsprechenden Alters, etc.) gewogen. (zur Beurteilung dieser Abschätzungen siehe 4.5.9)

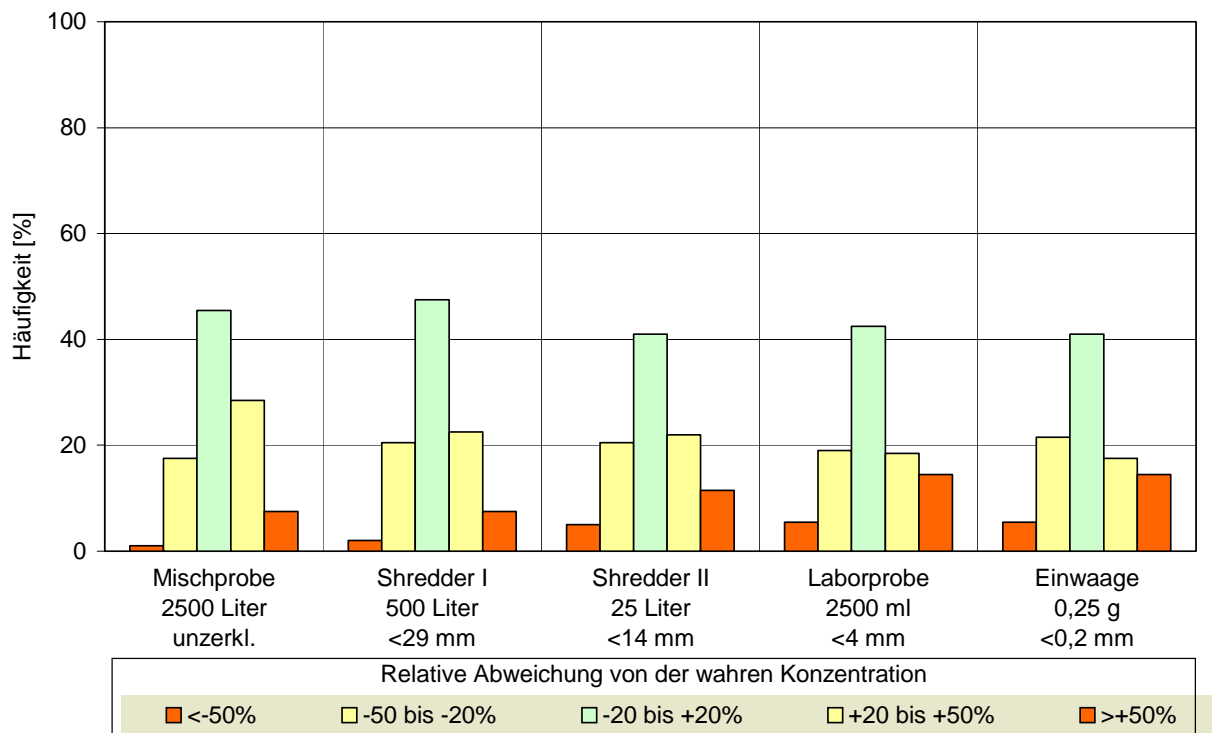


Abbildung 4-28: Probenahmesimulation für Cd. Annahmen: 300 g schwere PVC-Teile mit 0,3 % Cd als Cd-Träger, 1.500 kg Probe als Ausgangspunkt

Um die geforderten Streuungen einhalten zu können, wurden folgende Probenmassen für die Mischproben im Feld auf Basis der oben beschriebenen Abschätzungen für notwendig erachtet.

Tabelle 4-128: Probenanzahl und angestrebte Feldprobenmassen beim Versuch in Kirchdorf

| Outputgut     | Probenzahl | angestrebte Probenmasse [kg] |
|---------------|------------|------------------------------|
| >50 mm Leicht | 5          | 600                          |
| >50 mm Schwer | 5          | 1.000                        |
| <50 mm        | 5          | 150                          |
| Fe-Schrott    | 2          | 500                          |

### 4.3.3 Probenahme und Probenaufbereitung

#### 4.3.3.1 Probenahme

Alle Proben wurden im Zeitraum von 14. bis 18. April 2003 gezogen, die Probenaufbereitung vor Ort erfolgte im gleichen Zeitraum.

Bei Leicht- und Schwerfraktion wurden die im Plan festgelegten Massen weit verfehlt. Bei der Schwerfraktion um ca. Faktor 2 bei der Leichtfraktion um ca. Faktor 3. Die Hochrechnung des Arbeitszeitbedarfs ausgehend von den Erfahrungen beim Versuch Ober-



pullendorf und Vorversuchen schlug fehl. Ein Grund dafür ist, dass die Geschwindigkeit beim Sortieren der Proben individuell stark verschieden ist.

Alle Proben wurden vom Bandabwurf gezogen. Die Mengen und Zeitpunkte der Probenahmen sind im Anhang in Tabelle 11-32 bis Tabelle 11-35 dokumentiert.

Die Voraufbereitung der Proben wurde wie im Punkt 3.4.2 beschrieben durchgeführt.

#### 4.3.3.2 Probenaufbereitung – Voraufbereitung vor Ort

Gegenüber dem Versuch in Oberpullendorf wurden folgende Änderungen vorgenommen:

##### *Leicht- und Schwerfraktion BASEP*

Gegenstände aus Aluminium und Eisen (nicht aber verzinkte, verchromte oder vernickelten Teile) wurden bei Leicht- und Schwerfraktion aus dem BASEP nicht aussortiert, wenn es sich um stark verschmutzte dünne Bleche oder Drähte mit <3 mm Durchmesser handelte. Diese Teile sind mit dem Shredder problemlos zerkleinerbar. Die Verschmutzung wird bei der Zerkleinerung stark reduziert. Die Gehalte an Eisen und Aluminium sind in der Regel so hoch, dass beim Probenteilen genug Stücke erfasst werden, somit der Probenahmefehler akzeptabel ist. Die Schwerfraktion aus dem BASEP wurde im frischen Zustand gewalzt. Das Walzen ermöglichte die rasche Trennung von weichen und mineralischen Bestandteilen.

Die Proben wurden nicht mit dem Radlader auf die Brückenwaage gefahren. Um die Masse mit größerer Genauigkeit zu bestimmen, wurden erst die sortierten bzw. geshredderten Massen scheidtruheweise auf der Dezimalwaage gewogen. Die aussortierten Gegenstände wurden extra gewogen.

In Abbildung 4-29 und Abbildung 4-30 ist das jeweilige Schema der Voraufbereitung dargestellt.

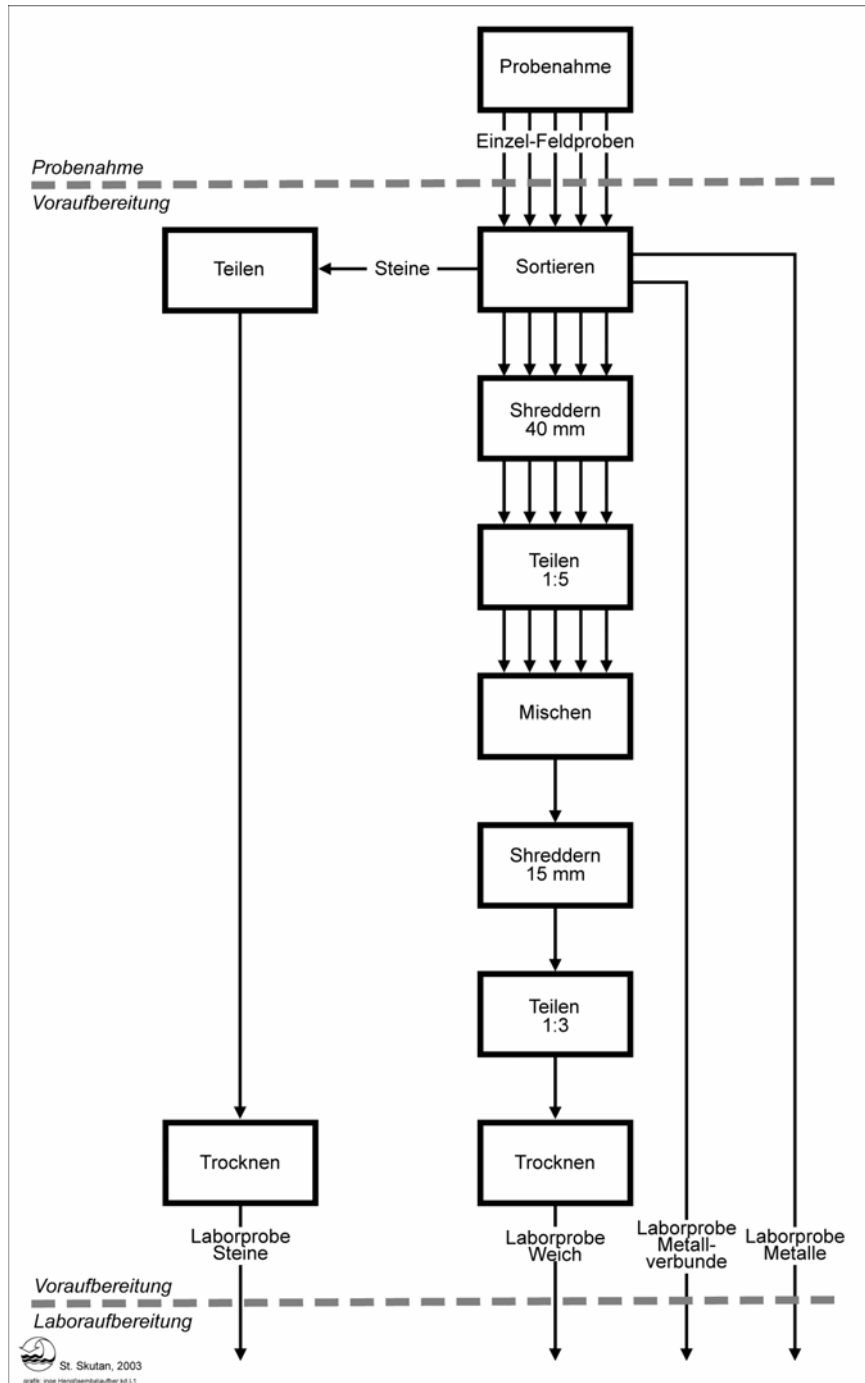


Abbildung 4-29: Schema der Voraufbereitung für eine Probe der Leichtfraktion >50 mm aus dem BASEP. Die jeweils fünf parallelen Pfeile geben nicht eine Probenanzahl wieder, sondern symbolisieren, dass die Schritte bis zum Mischen mit vielen Einzelproben (in zeitlichem Abstand) separat durchlaufen werden. In diesem System wird physisch keine Mischprobe als Summe aller gezogenen Einzel-Feldproben erzeugt, sondern die Mischprobenbildung erfolgt erst mit den voraufbereiteten und geteilten Einzelproben.

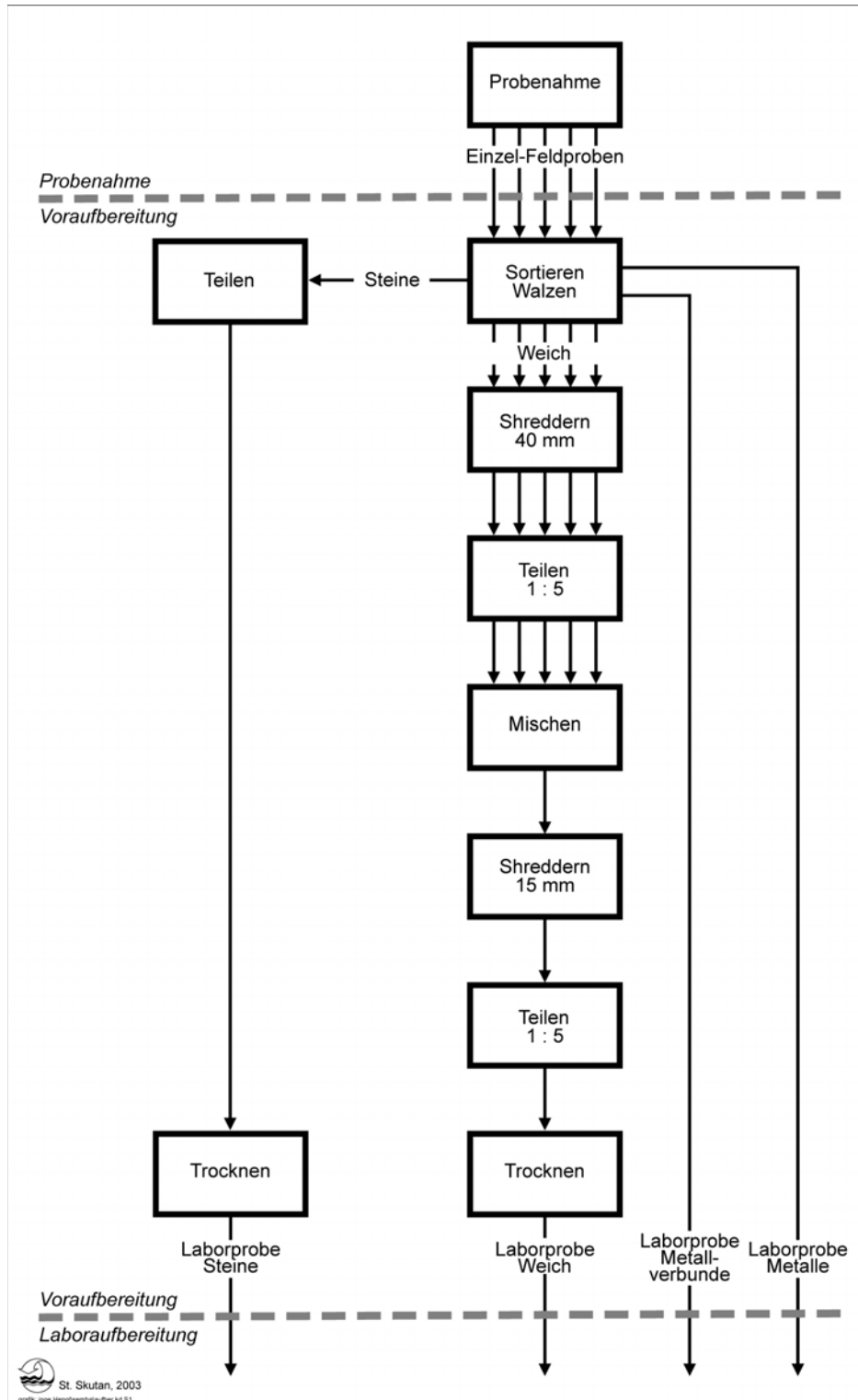


Abbildung 4-30: Schema der Voraufbereitung für eine Probe der Schwerfraktion >50 mm aus dem BASEP. Die jeweils fünf parallelen Pfeile geben nicht eine Probenanzahl wieder, sondern symbolisieren, dass die Schritte bis zum Mischen mit vielen Einzelproben (in zeitlichem Abstand) separat durchlaufen werden. In diesem System wird physisch keine Mischprobe als Summe aller gezogenen Einzel-Feldproben erzeugt, sondern die Mischprobenbildung erfolgt erst mit den voraufbereiteten und geteilten Einzelproben.



### Feinfraktion <50 mm

Die Zerkleinerung mit der Walze wurde an den frischen Proben vorgenommen. Es wurde vor dem Walzen gesiebt, um den größten Teil des feuchten Feinmaterials (<6,3 mm) abzutrennen. Beim Walzen auf saugfähigem Untergrund kann vor allem bei Sonnenschein durch Wasserverlust der Trockensubstanzgehalt verfälscht werden. Das gewalzte Material wurde noch einmal gesiebt. Bei jeder Siebung wurden Metalle ausgeklaut. In der folgenden Abbildung ist das Schema der Voraufbereitung abgebildet:

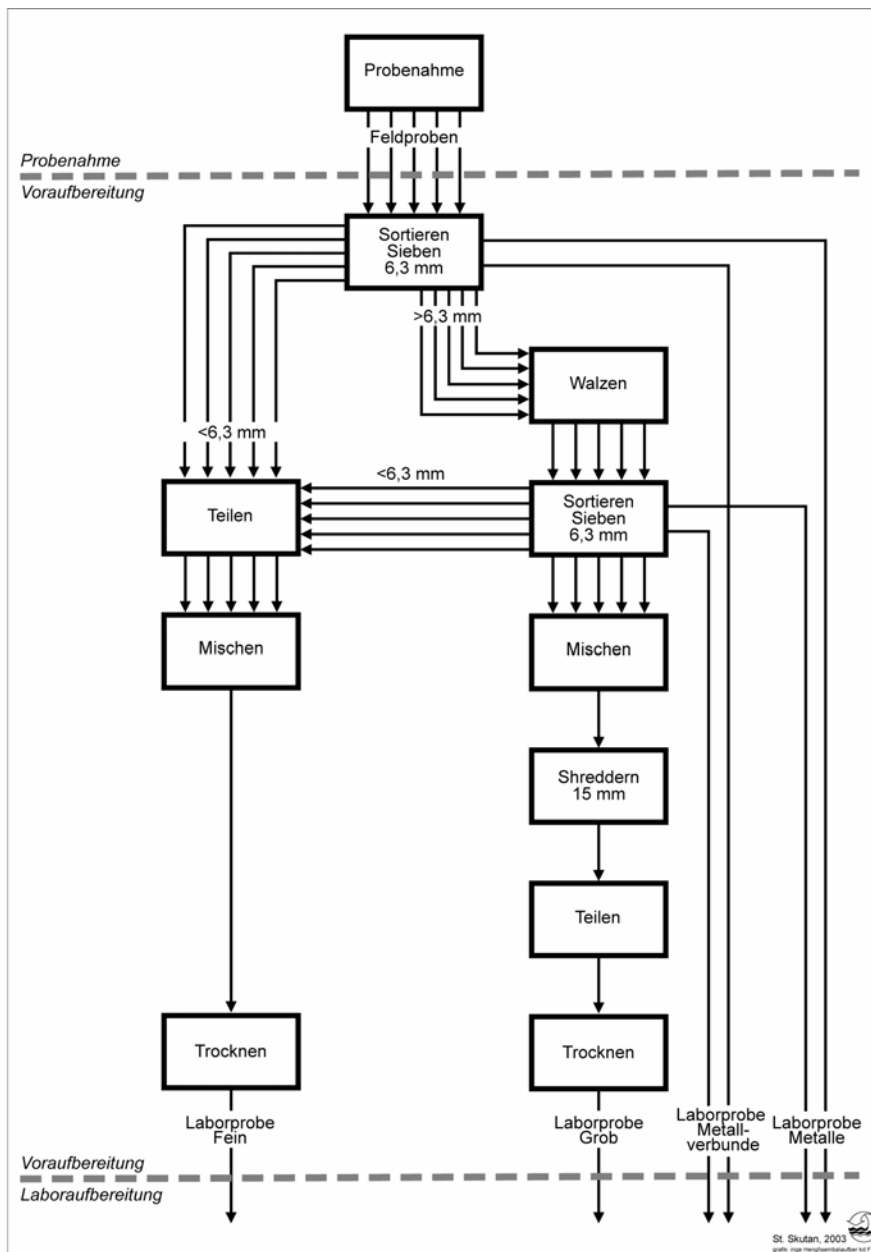


Abbildung 4-31: Schema der Voraufbereitung für die Proben der Feinfraktion <50 mm. Die jeweils fünf parallelen Pfeile geben nicht eine Probenanzahl wieder, sondern symbolisieren, dass die Schritte bis zum Mischen mit vielen Einzelproben (in zeitlichem Abstand) separat durchlaufen werden. In diesem System wird physisch keine Mischprobe als Summe aller gezogenen Einzel-Feldproben erzeugt, sondern die Mischprobenbildung erfolgt erst mit den voraufbereiteten und geteilten Einzelproben.



#### 4.3.3.3 Probenaufbereitung - Laboraufbereitung

##### *Leichtfraktion >50 mm L*

Das Ablaufschema ist in Abbildung 4-32 dargestellt. Folgende Änderungen wurden gegenüber der Aufbereitung von heizwertreichen Fraktionen aus Oberpullendorf vorgenommen:

Die Siebfractionen <0,5 mm und 0,5-2 mm vom Sortieren und Sieben werden nicht getrennt weitergeführt, sondern beim Mahlen der Hauptmenge (Siebfraction >6,3 mm) wieder zugemischt. Dadurch wird die getrennte Aufbereitung und das Einwiegen zum Rückvermischen am Ende eingespart. Auf die Siebung wurde deswegen nicht verzichtet, weil das Aussortieren von Metallen, Steinen und Glas aus dem klassierten Material wesentlich einfacher ist. Die Zumischung erfolgt in kleinen Portionen verteilt über die gesamte Mahldauer einer Probe. Die Vereinfachung ist möglich, weil die Fraktion 2-6,3 mm bei dieser Leichtfraktion nur geringe Anteile mineralischer Verunreinigungen aufweist, d.h. die Mühle kaum mehr belastet wird und kein wesentlicher Nachteil beim späteren Sägen entsteht.

Die bei der Voraufbereitung ausgeklaubten und separat zerkleinerten mineralischen Bestandteile werden nicht erst beim Rückvermischen zugegeben, sondern schon eine Stufe vorher in der Feinerzkleinerung. Das Einwiegen ist dadurch einfacher, weil eine größere Menge verwendet wird.

Die Laborproben hatten lufttrocken Massen von je ca. 8 kg. Nach der ersten Vermahlung in der Schneidmühle mit 4 mm Siebeinsatz wurden Teilmengen von 1.200 g entnommen.

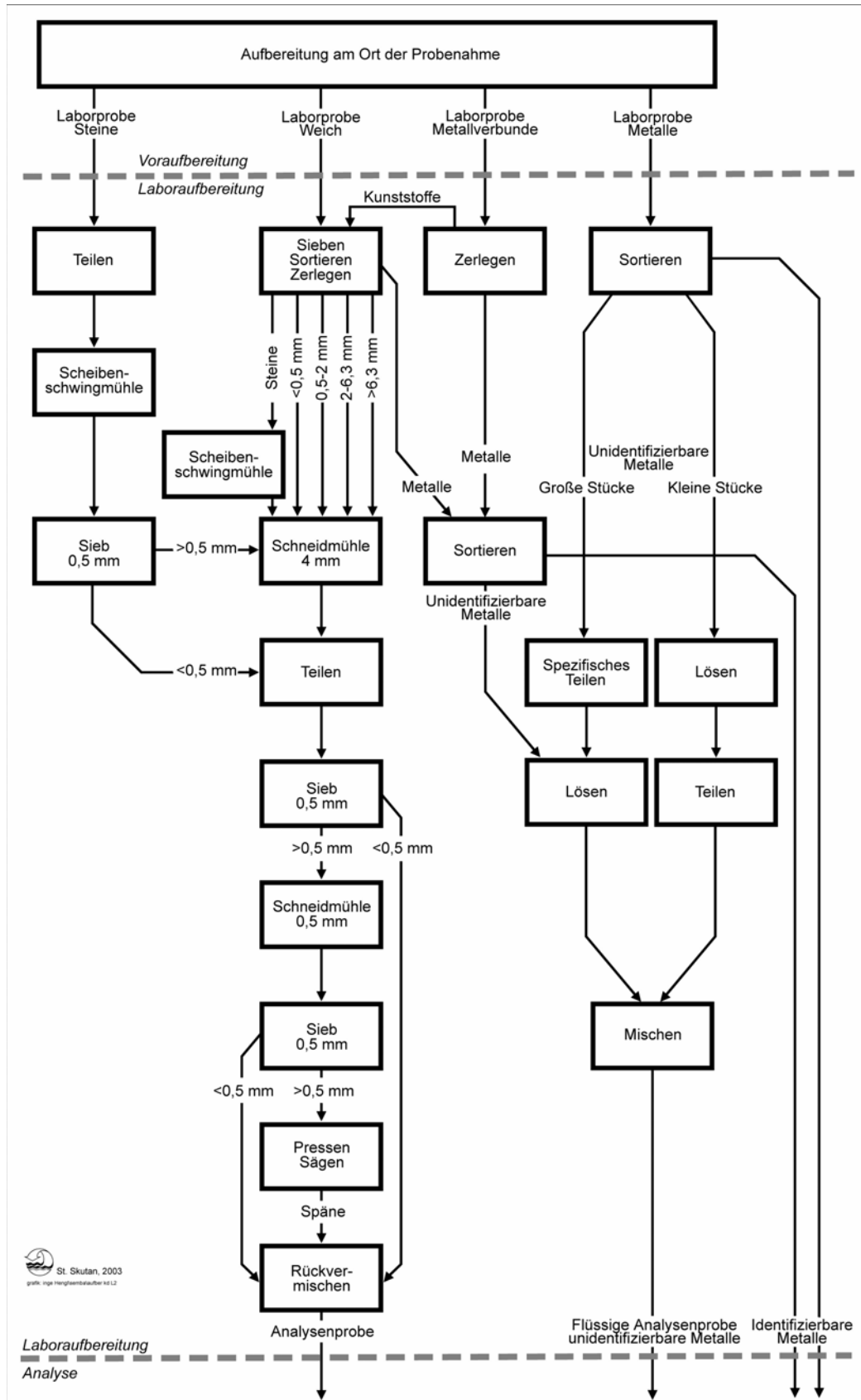


Abbildung 4-32: Schema der Laboraufbereitung für die Proben der Leichtfraktion >50 mm L.





### Schwerfraktion >50 mm S

Das Grundkonzept ist das selbe wie bei der Leichtfraktion.

Die Laborproben hatten lufttrocken je ca. 14 kg Masse. Nach der ersten Vermahlung in der Schneidmühle mit 4 mm Siebeinsatz wurden Teilmengen von 1.200 g entnommen.

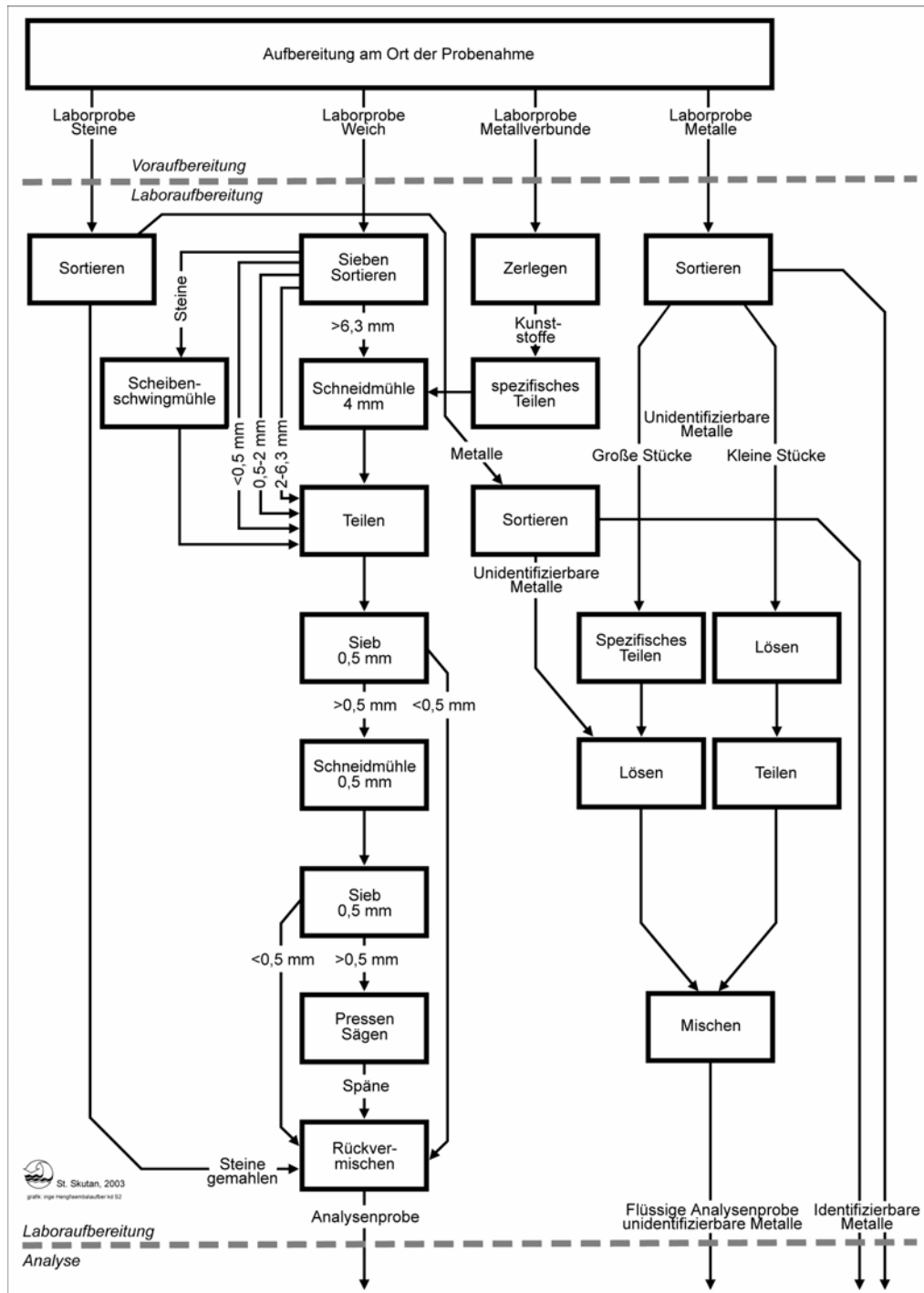


Abbildung 4-33: Aufbereitungsschema der Laboraufbereitung für die Proben der Schwerfraktion >50 mm S.



### Feinfraktion <50 mm

Die Proben der geshredderten Anteile („Laborprobe Grob“) wogen lufttrocken je ca. 4 kg, die Feianteile <6,3 mm („Laborprobe Fein“) ebenfalls ca.4 kg. Die „Laborproben Grob“ wurden nach der Vermahlung in der Schneidmühle mit 4 mm Siebeinsatz in dem Verhältnis geteilt, dass die zusammengehörigen Laborproben (Grob und Fein) wieder zusammengeführt werden konnten.

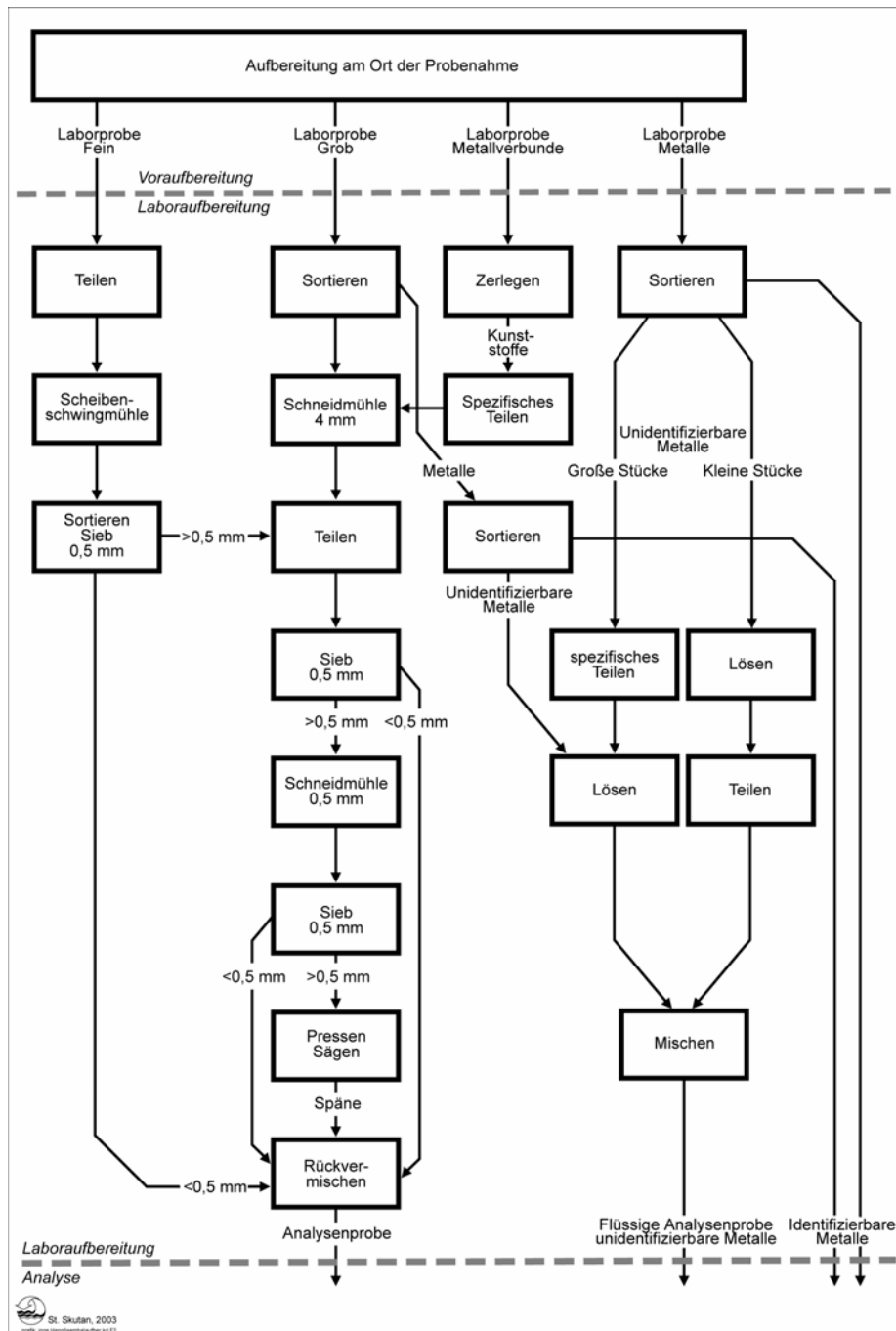


Abbildung 4-34: Schema der Laboraufbereitung für die Proben der Feinfraktion <50 mm.



2.000 g der „Laborproben Fein“ wurden mit der Scheibenschwingmühle pro Probe vermahlen, obwohl dieser Arbeitsschritt alleine pro Probe ca. einen Tag in Anspruch nimmt. Diese großen Mengen wurden wegen der schlechten Repräsentativität bei Quecksilber gewählt, die an den ca. 500 g schweren Proben aus Oberpullendorf auftrat.

#### 4.3.3.4 Analytik

Die Analysenverfahren sind beschrieben unter Punkt 3.5. Die Analysen wurden vom IWA-Labor durchgeführt.

Um die Analysenstreuung zu reduzieren, wurden für jede Messung drei Aufschlüsse erzeugt und gemischt. Die Einwaagen bewegten sich zwischen 250 und 300 mg pro Aufschluss.



#### 4.3.4 Güterbilanz

In Tabelle 4-129 ist die Güterbilanz des Versuchs zusammengestellt.

*Tabelle 4-129: Güterbilanz vom Versuch Kirchdorf*

| Input    |       |     | Output         |     |      |
|----------|-------|-----|----------------|-----|------|
|          | t     | %   |                | t   | %    |
| Restmüll | 118,0 | 100 | Leichtfraktion | 47  | 40,1 |
|          |       |     | Schwerfraktion | 17  | 14,3 |
|          |       |     | <50 mm         | 52  | 44,3 |
|          |       |     | Fe-Schrott     | 1,5 | 1,27 |

Gegenüber den Angaben, welche zur Versuchsplanung verwendet wurden, ist im Versuch die Menge an Schwerfraktion stark zurückgeblieben. 25 % Massentransfer in die Schwerfraktion wurden erwartet. Die Bedeutung der Schwerfraktion für die Stoffbilanzen wurde daher auf den ersten Blick auf Grund des Güterflusses überschätzt. Die unerwartet hohen Metallkonzentrationen in der Schwerfraktion stärken andererseits die Bilanzwirksamkeit in einem Ausmaß, dass die Fehleinschätzung beim Güterfluss kompensiert wird.

#### 4.3.5 Zusammensetzung der Güter

##### 4.3.5.1 Leichtfraktion >50 mm L

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt. Anschließend sind die Analysenergebnisse dargestellt.

*Tabelle 4-130: Daten zur Probenahme und Aufbereitung bei der Leichtfraktion >50 mm L*

|   |        |
|---|--------|
| Charakterisierte Gütermenge                     | 47 t   |
| Anzahl Mischproben<br>(jeweils 8 Feldproben)    | 5      |
| mittlere Mischprobenmasse                       | 192 kg |
| Mischprobenmasse insgesamt                      | 960 kg |
|   |        |
| Anzahl Laborproben                              | 5      |
| mittlere Laborprobenmasse (feucht) <sup>1</sup> | 10 kg  |
| Laborprobenmasse insgesamt                      | 51 kg  |
|   |        |
| Anzahl Analysenproben                           | 5      |
| Anzahl Analysen <sup>2</sup>                    | 10     |
| Anzahl eliminiertes Ausreißer                   | 0      |

<sup>1</sup> zerkleinert auf <15 mm

<sup>2</sup> für eine Analyse wurden jeweils 3 Aufschlüsse (ca. 250 mg/Aufschluss) gemischt



Tabelle 4-131: Zusammensetzung der Leichtfraktion &gt;50 mm L

|   | TM        | Wasser    | Glühverlust | Asche     | TC        | N         |
|---|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|   | g/100g FS | g/100g FS | g/100g TS   | g/100g TS | g/100g TS | g/100g TS |
| Mittelwert                                | 73,8      | 26,2      | 78,0        | 22,0      | 49,3      | 0,99      |
| Standardabweichung                        | 1,6       | 1,6       | 1,4         | 1,4       | 0,58      | 0,087     |
| Minimum                                   | 71,4      | 24,6      | 76,2        | 20,0      | 48,4      | 0,84      |
| Maximum                                   | 75,4      | 28,6      | 80,0        | 23,8      | 49,8      | 1,1       |
| Median                                    | 74,3      | 25,7      | 78,0        | 22,0      | 49,7      | 1,0       |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 0,71      | 0,71      | 0,60        | 0,60      | 0,26      | 0,039     |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |           |           |             |           |           |           |
| untere Schranke                           | 72,4      | 24,8      | 76,8        | 20,8      | 48,8      | 0,92      |
| obere Schranke                            | 75,2      | 27,6      | 79,2        | 23,2      | 49,9      | 1,07      |

Fortsetzung Tabelle 4-131:

|   | Al       | Cd       | Cr       | Cu       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 19.000   | 14       | 330      | 5.500    |
| Anteil aus Metallteilen                   | 3.900    | 0,0      | 200      | 5.000    |
| Standardabweichung                        | 2.300    | 17       | 170      | 3.400    |
| Minimum                                   | 16.000   | 2,7      | 140      | 1.600    |
| Maximum                                   | 22.000   | 41       | 540      | 11.000   |
| Median                                    | 18.000   | 3,0      | 360      | 4.700    |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 1.000    | 7,5      | 75       | 1.500    |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 17.000   | -1,2     | 190      | 2.500    |
| obere Schranke                            | 21.000   | 28       | 480      | 8.400    |

Fortsetzung Tabelle 4-131:

|   | Fe       | Ni       | Pb       | Zn       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 28.000   | 130      | 240      | 1.600    |
| Anteil aus Metallteilen                   | 20.000   | 93       | 54       | 600      |
| Standardabweichung                        | 7.200    | 68       | 67       | 490      |
| Minimum                                   | 22.000   | 31       | 180      | 1.100    |
| Maximum                                   | 38.000   | 220      | 350      | 2.300    |
| Median                                    | 23.000   | 140      | 220      | 1.700    |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 3.200    | 30       | 30       | 220      |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 21.000   | 68       | 190      | 1.200    |
| obere Schranke                            | 34.000   | 190      | 300      | 2.000    |

#### 4.3.5.2 Schwerfraktion >50 mm S

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt. Anschließend sind die Analysenergebnisse dargestellt.



Tabelle 4-132: Daten zur Probenahme und Aufbereitung bei der Schwerfraktion &gt;50 mm S

|  |          |
|--|----------|
| Charakterisierte Gütermenge                                | 17 t     |
| Anzahl Mischproben<br>(aus jeweils 8 Feldproben)           | 5        |
| mittlere Mischprobenmasse                                  | 576 kg   |
| Mischprobenmasse insgesamt                                 | 2.878 kg |
|  |          |
| Anzahl Laborproben   | 5        |
| mittlere Laborprobenmasse „weich“ <sup>1</sup><br>(feucht) | 17 kg    |
| Laborprobenmasse „weich“ insgesamt                         | 86 kg    |
| mittlere Laborprobenmasse „hart“ <sup>2</sup><br>(feucht)  | 3,4 kg   |
| Laborprobenmasse „hart“ insgesamt                          | 17 kg    |
|  |          |
| Anzahl Analysenproben                                      | 5        |
| Anzahl Analysen <sup>3</sup>                               | 10       |
| Anzahl eliminiertes Ausreißer                              | 0        |

<sup>1</sup> zerkleinert auf <15 mm

<sup>2</sup> zerkleinert auf <6,3 mm

<sup>3</sup> für eine Analyse wurden jeweils 3 Aufschlüsse (ca. 250 mg/Aufschluss) gemischt

Tabelle 4-133: Zusammensetzung der Schwerfraktion &gt;50 mm S

|   | TM        | Wasser    | Glühverlust | Asche     | TC        | N         |
|---|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|   | g/100g FS | g/100g FS | g/100g TS   | g/100g TS | g/100g TS | g/100g TS |
| Mittelwert                                | 79,6      | 20,4      | 60          | 40        | 43        | 1,0       |
| Standardabweichung                        | 0,97      | 0,97      | 3,0         | 3,0       | 2,0       | 0,18      |
| Minimum                                   | 78,6      | 19,2      | 56          | 37        | 41        | 0,79      |
| Maximum                                   | 80,8      | 21,4      | 63          | 44        | 46        | 1,3       |
| Median                                    | 79,4      | 20,6      | 61,9        | 38        | 43        | 1,0       |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 0,44      | 0,44      | 1,4         | 1,4       | 0,89      | 0,081     |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |           |           |             |           |           |           |
| untere Schranke                           | 78,7      | 19,6      | 58          | 37        | 42        | 0,85      |
| obere Schranke                            | 80,4      | 21,3      | 63          | 42        | 45        | 1,17      |

Fortsetzung Tabelle 4-136:

|   | Al       | Cd       | Cr       | Cu       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 21.000   | 21       | 840      | 7.400    |
| Anteil aus Metallteilen                   | 5.500    | 14       | 470      | 6.300    |
| Standardabweichung                        | 2.300    | 7,5      | 290      | 2.400    |
| Minimum                                   | 18.000   | 8,9      | 650      | 4.800    |
| Maximum                                   | 23.000   | 28       | 1.400    | 11.000   |
| Median                                    | 22.000   | 21       | 710      | 7.500    |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 1.000    | 3,3      | 130      | 1.100    |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 19.000   | 14       | 580      | 5.200    |
| obere Schranke                            | 23.000   | 27       | 1.100    | 9.500    |



Fortsetzung Tabelle 4-136:

|   | Fe       | Ni       | Pb       | Zn       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 98.000   | 320      | 790      | 5.300    |
| Anteil aus Metallteilen                   | 88.000   | 270      | 550      | 3.700    |
| Standardabweichung                        | 4.900    | 150      | 640      | 1.700    |
| Minimum                                   | 93.000   | 200      | 320      | 4.100    |
| Maximum                                   | 110.000  | 560      | 1.800    | 8.300    |
| Median                                    | 96.000   | 290      | 490      | 4.800    |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 2.200    | 66       | 290      | 770      |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 93.000   | 190      | 230      | 9.700    |
| obere Schranke                            | 100.000  | 450      | 1.400    | 11.000   |

#### 4.3.5.3 Fraktion <50 mm

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt. Anschließend sind die Analysenergebnisse dargestellt.

Tabelle 4-134: Daten zur Probenahme und Aufbereitung bei der Fraktion <50 mm

|   |        |
|---|--------|
| Charakterisierte Gütermenge                                   | 52 t   |
| Anzahl Mischproben<br>(aus jeweils 8 Feldproben)              | 5      |
| mittlere Mischprobenmasse                                     | 141 kg |
| Mischprobenmasse insgesamt                                    | 704 kg |
|   |        |
| Anzahl Laborproben<br>(jeweils Probenteil „weich“ und „hart“) | 5      |
| mittlere Laborprobenmasse „weich“ <sup>1</sup><br>(feucht)    | 6,1 kg |
| Laborprobenmasse „weich“ insgesamt                            | 30 kg  |
| mittlere Laborprobenmasse „hart“ <sup>2</sup><br>(feucht)     | 6,7 kg |
| Laborprobenmasse „hart“ insgesamt                             | 33 kg  |
|   |        |
| Anzahl Analysenproben   | 5      |
| Anzahl Analysen <sup>3</sup>                                  | 10     |
| Anzahl eliminierter Ausreißer                                 | 0      |

<sup>1</sup> zerkleinert auf <15 mm

<sup>2</sup> zerkleinert auf <6,3 mm

<sup>3</sup> für eine Analyse wurden jeweils 3 Aufschlüsse (ca. 250 mg/Aufschluss) gemischt



Tabelle 4-135: Zusammensetzung der Feinfraktion &lt;50 mm

|   | TM        | Wasser    | Glühverlust | Asche     | TC        | N         |
|---|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|   | g/100g FS | g/100g FS | g/100g TS   | g/100g TS | g/100g TS | g/100g TS |
| Mittelwert                                | 59        | 41        | 38,9        | 61,1      | 24        | 1,0       |
| Standardabweichung                        | 2,2       | 2,2       | 1,1         | 1,1       | 2,2       | 0,10      |
| Minimum                                   | 57        | 38        | 37,7        | 59,8      | 21        | 0,96      |
| Maximum                                   | 62        | 43        | 40,2        | 62,3      | 26        | 1,2       |
| Median                                    | 59        | 41        | 38,8        | 61,2      | 24        | 0,97      |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 0,97      | 0,97      | 0,51        | 0,51      | 1,0       | 0,046     |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |           |           |             |           |           |           |
| untere Schranke                           | 57        | 39        | 37,9        | 60,1      | 22        | 0,95      |
| obere Schranke                            | 61        | 43        | 39,9        | 62,1      | 26        | 1,12      |

Fortsetzung Tabelle 4-136:

|   | Al       | Cd       | Cr       | Cu       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 15.000   | 2,1      | 210      | 3.200    |
| Anteil aus Metallteilen                   | 3.000    | 0,00     | 140      | 3.000    |
| Standardabweichung                        | 1.000    | 0,7      | 76       | 1.200    |
| Minimum                                   | 14.000   | 1,3      | 130      | 1.400    |
| Maximum                                   | 17.000   | 3,1      | 340      | 4.400    |
| Median                                    | 15.000   | 2,2      | 210      | 3.600    |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 470      | 0,32     | 34       | 540      |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 14.000   | 1,4      | 150      | 2.100    |
| obere Schranke                            | 16.000   | 2,7      | 280      | 4.300    |

Fortsetzung Tabelle 4-136:

|   | Fe       | Ni       | Pb       | Zn       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 40.000   | 140      | 910      | 2.900    |
| Anteil aus Metallteilen                   | 27.000   | 92       | 180      | 2.200    |
| Standardabweichung                        | 27.000   | 40       | 630      | 1.100    |
| Minimum                                   | 32.000   | 77       | 340      | 1.200    |
| Maximum                                   | 46.000   | 190      | 1.800    | 4.200    |
| Median                                    | 38.000   | 140      | 570      | 3.000    |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 2.600    | 18       | 280      | 490      |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 35.000   | 100      | 360      | 2.000    |
| obere Schranke                            | 45.000   | 170      | 1.500    | 3.900    |





#### 4.3.5.4 Fe-Schrott

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt. Anschließend sind die Analysenergebnisse dargestellt.

Tabelle 4-136: Daten zur Probenahme und Aufbereitung beim Fe-Schrott

|  |        |
|--|--------|
| Charakterisierte Gütermenge                  | 1,5 t  |
| Anzahl Mischproben<br>(jeweils 3 Feldproben) | 2      |
| mittlere Mischprobenmasse                    | 420 kg |
| Mischprobenmasse insgesamt                   | 840 kg |
|  |        |
| Anzahl Analysenproben                        | 2      |
| Anzahl Analysen                              | 2      |
| Anzahl eliminierter Ausreißer                | 0      |

Tabelle 4-137: Zusammensetzung des Fe-Schrotts

|            | TM        | Wasser    | Glühverlust | Asche     | TC        | N         |
|------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|            | g/100g FS | g/100g FS | g/100g TS   | g/100g TS | g/100g TS | g/100g TS |
| Mittelwert | 95,9      | 4,1       | 25,2        | 74,8      | 3,0       | 0,085     |

Fortsetzung Tabelle 4-142:

|   | Al       | Cd       | Cr       | Cu       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 2.900    | 54       | 540      | 787      |
| Standardabweichung                        | 20       | 18       | 94       | 177      |
| Minimum                                   | 2.800    | 41       | 480      | 662      |
| Maximum                                   | 2.900    | 66       | 610      | 912      |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 14       | 13       | 66       | 125      |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 2.800    | 29       | 410      | 540      |
| obere Schranke                            | 2.900    | 78       | 670      | 1.000    |

Fortsetzung Tabelle 4-142:

|   | Fe       | Ni       | Pb       | Zn       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 680.000  | 150      | 120      | 750      |
| Standardabweichung                        | 48.000   | 21       | 3,6      | 120      |
| Minimum                                   | 640.000  | 130      | 115      | 660      |
| Maximum                                   | 710.000  | 160      | 120      | 830      |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 34.000   | 15       | 2,6      | 84       |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 610.000  | 120      | 115      | 580      |
| obere Schranke                            | 740.000  | 180      | 125      | 910      |

#### 4.3.6 Stoffbilanzen

Die Stoffbilanzen wurden wie unter 3.3.8 beschrieben berechnet. Die Ergebnisse sind im Kapitel 4.5 im Vergleich mit den Versuchen Oberpullendorf und Wien dargestellt.

## 4.4 Splittinganlage Wien

### 4.4.1 Anlagenbeschreibung

Die Splittinganlage Wien hat eine Kapazität von 250.000 t/a im 2-Schichtbetrieb. Der Tagesdurchsatz zur Versuchszeit (1-Schichtbetrieb) kann daher mit ca. 550 t angenommen werden. Im Folgenden ist das Schema der Anlage abgebildet.

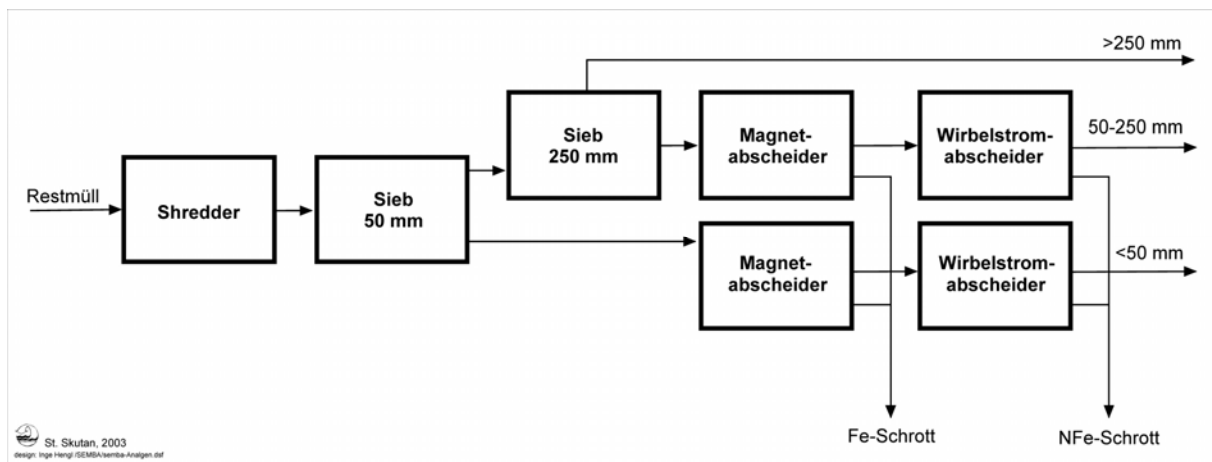


Abbildung 4-35: Schema der Splittinganlage Wien (Anmerkung: Der Übersichtlichkeit wegen ist die doppelte Magnetscheidung mit Kopftrommel- und Überbandmagnet bei der Fraktion <50 mm nicht eingezeichnet.)

Die 50 mm Trommelsiebe sind so ausgelegt, dass mineralische Bestandteile darin weiter zerkleinert werden, um schließlich in die Fraktion <50 mm zu gelangen. Erreicht wird dieser Effekt durch hohe Drehzahl sowie großzügige Dimensionierung in Durchmesser und Länge. Das Material wird im Sieb weit nach oben mitgenommen und schlägt mit entsprechender Wucht auf. Steine, Glas usw. zerbrechen und werden abgesiebt.

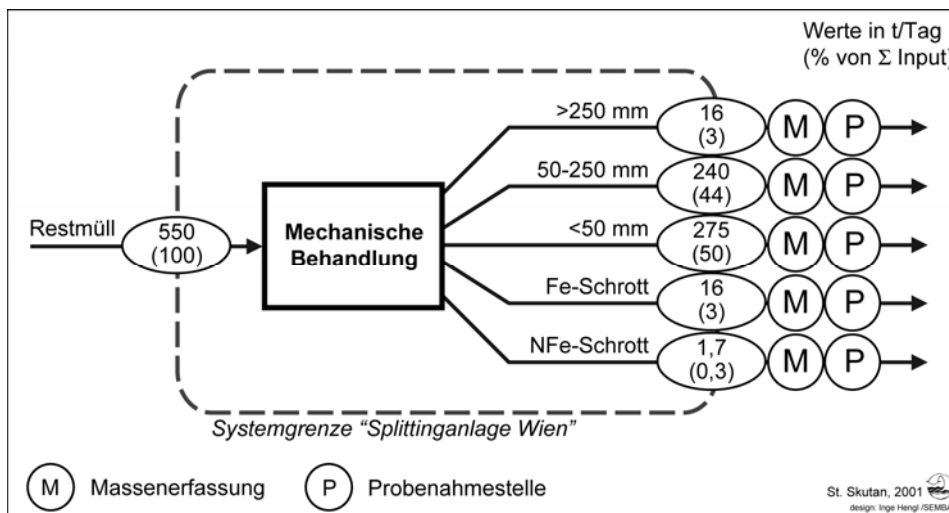


Abbildung 4-36: Systembild für die Stoffflussanalyse an der Splittinganlage Wien: Vorabschätzung der Güterflüsse für die Versuchsplanung in t/Tag bzw. % von der Summe Input; ebenfalls eingezeichnet sind die Stellen für Massenerfassung und Probenahme



#### 4.4.2 Versuchsplanung

Wie beim Versuch Kirchdorf wurde zuerst die Anzahl der Laborproben festgelegt und mit den Massen der Feldproben die Unsicherheiten der Stoffbilanzen reguliert (siehe dort unter 4.3.2). Der Aufwand der Laboraufbereitung ist so hoch, dass Wiederholungen auf dieser Ebene nicht in Frage kommen. Für die Probenmasse beim NFe-Schrott wurden anhand der Massen und Häufigkeiten von Kupfer-, Messing- und Zink-Stücken in den NFe-Proben aus Oberpullendorf in der Binomialverteilungs-Simulation Probenmasse von einigen hundert kg ermittelt.

*Tabelle 4-138: Probenanzahl und angestrebte Feldprobenmassen beim Versuch in Wien*

| <b>Outputgut</b> | <b>Probenzahl</b> | <b>angestrebte Probenmasse [kg]</b> |
|------------------|-------------------|-------------------------------------|
| >250 mm          | 3                 | 1.000                               |
| 50-250 mmr       | 10*               | 750*                                |
| <50 mm           | 5                 | 250                                 |
| Fe-Schrott       | 2                 | 500                                 |
| NFe-Schrott      | 2                 | 300                                 |

\*rechnerische Zusammenfassung zu 5 Proben zu je 1.500 kg (siehe 4.4.3.1)

#### 4.4.3 Probenahme und Probenaufbereitung

##### 4.4.3.1 Probenahme

Die Proben wurden im Zeitraum vom 20. Juni bis 27. Juni 2003 gezogen. Alle Proben wurden vom Bandabwurf durch das Anlagenpersonal mit Hilfe eines Radladers genommen.

Die fünf Proben der Fraktion 50-250 mm sind jeweils zweigeteilt: Die erste Hälfte ist jeweils aus vier vollen Radladerschaufeln zusammengesetzt (4 mal ca. 200 kg) und stammt aus dem Bilanzabschnitt, der dem Verbrennungsversuch MVA Spittelau zugeordnet ist. Die zweite Hälfte wurde jeweils aus einem gepressten Ballen entnommen, der dem Verbrennungsversuch WSO 4 zugeordnet ist. (Im Rahmen eines anderen Forschungsprojekts „ALV – Analyse einer Leichtfraktion durch Verbrennungsversuche“ wurden zur gleichen Zeit mit der Fraktion 50-250 mm Verbrennungsversuche durchgeführt.) Die Probenhälften wurden getrennt aufgearbeitet und analysiert, um festzustellen, ob die Streuungen bei den als Mischproben zusammengesetzten ersten Hälften geringer sind als bei den zweiten Hälften, die als Einzelproben anzusehen sind. Für die Bilanzierung wurden die Proben zusammengefasst, als wären erste und zweite Hälften gemeinsam aufbereitet und analysiert worden.

##### 4.4.3.2 Probenaufbereitung

Die Probenaufbereitung vor Ort lief von 20. Juni bis 4. Juli 2003.

Bei den Fraktionen >250 mm und 50-250 mm wurde abgesehen von den Teilungsverhältnissen genauso verfahren wie beim Versuch Kirchdorf mit der Leichtfraktion. Nach dem 1. Zerkleinerungsschritt (40 mm Sieb) wurden 5 % der Probenmasse als Teilprobe entnommen (entsprechend ca. 100 Liter bei >250 mm bzw. ca. 200 Liter bei 50-250 mm). Nach dem 2. Zerkleinerungsschritt wurden pro Probe fix 8 kg bei >250 mm und 10 kg bei 50-



250 mm für die Trocknung und Weiterbehandlung im Labor entnommen (entspricht ca. 40 bis 60 Liter).



Abbildung 4-37: Aussortierte Gegenstände von der Voraufbereitung der Fraktion 50-250 mm

Das Material <50 mm wurde wie unter 3.4.2.2 beschrieben behandelt. Geteilt wurde die Fraktion <6,3 mm im Verhältnis 10:1, die Fraktion >6,3 mm nach dem Shreddern mit dem 15 mm Lochgitter 20:1.

Die Proben vom Fe-Schrott und NFe-Schrott wurden wie unter 3.4.3.4 beschrieben sortiert. Von den Sortierfraktionen „Fe+Verunreinigungen“ bzw. „Al+Verunreinigungen“ wurden jeweils zwei Proben zur Bestimmung des Schmutzanteils rückgestellt, der Rest gewogen und verworfen.

Die Laboraufbereitung erfolgte wie unter 3.4.3 beschrieben.

#### 4.4.4 Güterbilanz

In Tabelle 4-139 ist die Güterbilanz des Versuchs zusammengestellt.

Tabelle 4-139: Güterbilanz vom Versuch Splittinganlage Wien

|          | Input |     | Output      |      |       |
|----------|-------|-----|-------------|------|-------|
|          | t     | %   |             | t    | %     |
| Restmüll | 1.975 | 100 | >250 mm     | 115  | 5,82  |
|          |       |     | 50-250 mm   | 802  | 40,6  |
|          |       |     | <50 mm      | 995  | 50,4  |
|          |       |     | Fe-Schrott  | 60,8 | 3,08  |
|          |       |     | NFe-Schrott | 2,40 | 0,122 |



#### 4.4.5 Zusammensetzung der Güter

##### 4.4.5.1 Fraktion >250 mm „Überkorn“

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt. Anschließend sind die Analysergebnisse dargestellt.

Tabelle 4-140: Daten zur Probenahme und Aufbereitung der Fraktion >250 mm

|                                    |          |
|------------------------------------|----------|
| Charakterisierte Gütermenge        | 115 t    |
| Anzahl Mischproben                 | 3        |
| mittlere Mischprobenmasse          | 536 kg   |
| Mischprobenmasse insgesamt         | 1.608 kg |
|                                    |          |
| Anzahl Laborproben <sup>1</sup>    | 3        |
| mittlere Laborprobenmasse (feucht) | 8,2 kg   |
| Laborprobenmasse insgesamt         | 24,7 kg  |
|                                    |          |
| Anzahl Analysenproben              | 3        |
| Anzahl Analysen <sup>2</sup>       | 6        |
| Anzahl eliminierter Ausreißer      | 0        |

<sup>1</sup> zerkleinert auf <1,5 mm

<sup>2</sup> für eine Analyse wurden jeweils 3 Aufschlüsse (ca. 250 mg/Aufschluss) gemischt

Tabelle 4-141: Zusammensetzung der Fraktion >250 mm

|   | TM        | Wasser    | Glühverlust | Asche     | TC        | N         |
|---|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|   | g/100g FS | g/100g FS | g/100g TS   | g/100g TS | g/100g TS | g/100g TS |
| Mittelwert                                | 87,6      | 12,4      | 82          | 18        | 58        | 1,15      |
| Standardabweichung                        | 0,76      | 0,76      | 2,6         | 2,6       | 1,9       | 0,09      |
| Minimum                                   | 87,0      | 11,5      | 80          | 15        | 56        | 1,05      |
| Maximum                                   | 88,5      | 13,0      | 85          | 20        | 60        | 1,21      |
| Median                                    | 87,3      | 12,7      | 82          | 18        | 58        | 1,19      |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 0,439     | 0,439     | 1,5         | 1,5       | 1,1       | 0,05      |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |           |           |             |           |           |           |
| untere Schranke                           | 86,7      | 11,5      | 79          | 15        | 56        | 1,05      |
| obere Schranke                            | 88,5      | 13,3      | 85          | 21        | 60        | 1,25      |

Fortsetzung Tabelle 4-141:

|   | Al       | Cd       | Cr       | Cu       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 7.000    | 11       | 85       | 3.600    |
| Anteil aus Metallteilen                   | 2.400    | 0,0      | 7,2      | 3.400    |
| Standardabweichung                        | 1.500    | 3,2      | 29       | 1.900    |
| Minimum                                   | 5.400    | 8,1      | 65       | 1.600    |
| Maximum                                   | 8.300    | 14       | 120      | 5.300    |
| Median                                    | 7.400    | 10       | 71       | 4.000    |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 850      | 1,9      | 17       | 1.100    |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 5.300    | 7,3      | 52       | 1.500    |
| obere Schranke                            | 8.700    | 15       | 120      | 5.800    |



Fortsetzung Tabelle 4-141:

|   | Fe       | Ni       | Pb       | Zn       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 55.000   | 55       | 400      | 720      |
| Anteil aus Metallteilen                   | 51.000   | 20       | 91       | 190      |
| Standardabweichung                        | 19.000   | 25       | 120      | 290      |
| Minimum                                   | 36.000   | 27       | 280      | 520      |
| Maximum                                   | 73.000   | 76       | 510      | 1.100    |
| Median                                    | 55.000   | 63       | 420      | 580      |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 11.000   | 15       | 67       | 170      |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 34.000   | 27       | 270      | 390      |
| obere Schranke                            | 76.000   | 84       | 540      | 1.000    |

## 4.4.5.2 Fraktion 50-250 mm „Leichtfraktion“

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt. Anschließend sind die Analysenergebnisse dargestellt.

Tabelle 4-142: Daten zur Probenahme und Aufbereitung der Fraktion 50-250 mm

|   |          |
|---|----------|
| Charakterisierte Gütermenge                     | 802 t    |
| Anzahl Mischproben                              | 10       |
| mittlere Mischprobenmasse                       | 808 kg   |
| Mischprobenmasse insgesamt                      | 8.078 kg |
|   |          |
| Anzahl Laborproben                              | 10       |
| mittlere Laborprobenmasse (feucht) <sup>1</sup> | 5,4 kg   |
| Laborprobenmasse insgesamt                      | 54 kg    |
|   |          |
| Anzahl Analysenproben                           | 10       |
| Anzahl Analysen <sup>2</sup>                    | 20       |
| Anzahl eliminiertes Ausreißer                   | 0        |

<sup>1</sup> zerkleinert auf <15 mm

<sup>2</sup> für eine Analyse wurden jeweils 3 Aufschlüsse (ca. 250 mg/Aufschluss) gemischt

Tabelle 4-143: Zusammensetzung der Fraktion 50-250 mm

|   | TM        | Wasser    | Glühverlust | Asche     | TC        | N         |
|---|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|   | g/100g FS | g/100g FS | g/100g TS   | g/100g TS | g/100g TS | g/100g TS |
| Mittelwert                                | 76,6      | 23,4      | 80,6        | 19,4      | 49,6      | 0,79      |
| Standardabweichung                        | 2,00      | 2,00      | 1,37        | 1,37      | 1,36      | 0,11      |
| Minimum                                   | 74,6      | 21,2      | 78,4        | 18,2      | 48,2      | 0,67      |
| Maximum                                   | 78,8      | 25,4      | 81,8        | 21,6      | 51,6      | 0,95      |
| Median                                    | 76,1      | 23,9      | 81,2        | 18,8      | 49,5      | 0,79      |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 0,894     | 0,894     | 0,611       | 0,611     | 0,610     | 0,05      |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |           |           |             |           |           |           |
| untere Schranke                           | 74,8      | 21,7      | 79,4        | 18,2      | 48,4      | 0,69      |
| obere Schranke                            | 78,3      | 25,2      | 81,8        | 20,6      | 50,8      | 0,88      |



Fortsetzung Tabelle 4-143:

|   | Al       | Cd       | Cr       | Cu       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 22.000   | 6,4      | 240      | 3.100    |
| Anteil aus Metallteilen                   | 10.000   | 2,2      | 140      | 2.200    |
| Standardabweichung                        | 2.000    | 4,7      | 110      | 1.700    |
| Minimum                                   | 20.000   | 2,9      | 100      | 1.800    |
| Maximum                                   | 25.000   | 14       | 380      | 6.100    |
| Median                                    | 23.000   | 4,8      | 200      | 2.600    |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 890      | 2,1      | 50       | 780      |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 20.000   | 2,2      | 150      | 1.600    |
| obere Schranke                            | 24.000   | 11       | 340      | 4.600    |

Fortsetzung Tabelle 4-143:

|   | Fe       | Ni       | Pb       | Zn       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 11.000   | 110      | 400      | 1.500    |
| Anteil aus Metallteilen                   | 8.000    | 80       | 230      | 670      |
| Standardabweichung                        | 1.500    | 58       | 340      | 550      |
| Minimum                                   | 9.200    | 52       | 100      | 1.000    |
| Maximum                                   | 13.000   | 170      | 920      | 2.300    |
| Median                                    | 11.000   | 97       | 330      | 1.300    |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 670      | 26       | 150      | 250      |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 10.000   | 59       | 100      | 1.100    |
| obere Schranke                            | 12.000   | 160      | 700      | 2.000    |

#### 4.4.5.3 Vergleich der Einzel- und Mischproben der Fraktion 50-250 mm

Zur Charakterisierung der Fraktion 50-250 mm wurden insgesamt 10 Proben untersucht, wovon die ersten fünf Mischproben, die letzten fünf Einzelproben waren (vgl. Tabelle 4-144). Diese Vorgangsweise wurde gewählt, um die Wirkung der Mischprobenbildung auf die Streuung der Stoffkonzentrationen zu untersuchen. Es war das Ziel, große Unterschiede zu erkennen, so solche zwischen Misch- und Einzelproben bei dieser Fraktion auftreten. Die Mischprobenbildung kann Streuungen als Folge zeitlicher Schwankungen in der Abfallzusammensetzung (Variabilität) mindern, ist aber wirkungslos gegenüber Streuungen auf Grund von Heterogenität.

Die Mischproben waren aus losem Material zusammengesetzt (Probenahme mit Radlader vom Bandabwurf), als Einzelproben wurden jeweils ganze gepresste Ballen genommen. Das Probenmaterial wurde von den Ballen senkrecht abgestochen, wodurch bei den nicht zur Gänze verarbeiteten Ballen keine Durchmischung innerhalb des Ballens gegeben war.

(Für die Auswertung der Güterzusammensetzung und Stoffbilanzierung wurde jeweils eine Mischprobe und eine Einzelprobe rechnerisch zu einer „berechneten Mischprobe“ zusammen gefasst, da es nur zulässig ist, „gleichwertige“ Proben, nämlich die „berechneten Mischproben“, gemeinsam auszuwerten.)



Tabelle 4-144: Proben zur Charakterisierung der Fraktion 50-250 mm: Aufteilung in Misch- und Einzelproben. Angabe der Mengen in kg FS

| Mischproben |       |                      | Einzelproben |       | rechnerische Mischproben |       |
|-------------|-------|----------------------|--------------|-------|--------------------------|-------|
| Probe       | Masse | Anzahl Teilmengen/MP | Probe        | Masse | Probe                    | Masse |
| 1           | 983   | 4                    | 6            | 945   | 1+6                      | 1.928 |
| 2           | 777   | 4                    | 7            | 870   | 2+7                      | 1.647 |
| 3           | 465   | 3                    | 8            | 837   | 3+8                      | 1.302 |
| 4           | 768   | 4                    | 9            | 896   | 4+9                      | 1.664 |
| 5           | 639   | 4                    | 10           | 967   | 5+10                     | 1.606 |

In Tabelle 4-145 sind die Ergebnisse der Mischproben denen der Einzelproben gegenübergestellt. Für Aluminium, Eisen, Kupfer und Zink ist in den mit „Stücke“ bezeichneten Spalten die Auswertung für die Konzentrationsbeiträge angegeben, die in Form von Trägerstücken aus den Feldproben aussortiert wurden. Bei Chrom und Nickel wird mit „Lsg.“ der Beitrag bezeichnet, der durch Auflösen und Analysieren nicht eindeutig identifizierbarer Metallstücke gemessen wurde (die aufgelösten Metallstücke stammten hauptsächlich aus der Sortierung der Feldproben, der Anteil aus Laborproben ist zu vernachlässigen). Bei Cadmium ist in der „Variante \*“ der Beitrag des in Probe 4 gefundenen NiCd-Akku-Packs unberücksichtigt.

Tabelle 4-145: Vergleich der Ergebnisse (Mittelwerte und Streuungen) von Mischproben und Einzelproben der Fraktion 50-250 mm. In den Zeilen mit den Standardabweichungen sind jeweils in der mittleren Spalte fett die Werte der Standardabweichungen, links und rechts davon die Schranken der 95 %-Konfidenzintervalle für die Standardabweichungen angegeben. Die Variationskoeffizienten wurden für alle drei Streuungsangaben berechnet.

|                          | TM        |             |      | N         |              |      | TC        |             |     |
|--------------------------|-----------|-------------|------|-----------|--------------|------|-----------|-------------|-----|
|                          | g/100g FS |             |      | g/100g TS |              |      | g/100g TS |             |     |
| <b>Mischproben 1-5</b>   |           |             |      |           |              |      |           |             |     |
| Mittelwert               | 74,7      |             |      | 0,79      |              |      | 50,1      |             |     |
| St.abw.                  | 2,9       | <b>4,9</b>  | 14,1 | 0,048     | <b>0,080</b> | 0,23 | 1,4       | <b>2,3</b>  | 6,5 |
| Var.koeff. %             | 3,9       | <b>6,6</b>  | 18,9 | 6,1       | <b>10</b>    | 29   | 2,7       | <b>4,5</b>  | 13  |
| <b>Einzelproben 6-10</b> |           |             |      |           |              |      |           |             |     |
| Mittelwert               | 78,1      |             |      | 0,78      |              |      | 49,3      |             |     |
| St.abw.                  | 0,57      | <b>0,95</b> | 2,7  | 0,10      | <b>0,17</b>  | 0,49 | 0,77      | <b>1,29</b> | 3,7 |
| Var.koeff. %             | 0,73      | <b>1,2</b>  | 3,5  | 13        | <b>22</b>    | 63   | 1,57      | <b>2,6</b>  | 7,5 |

Fortsetzung Tabelle 4-145

|                          | Al       |              |       | Al       |              |        | Cd       |            |     | Cd*      |            |     |
|--------------------------|----------|--------------|-------|----------|--------------|--------|----------|------------|-----|----------|------------|-----|
|                          | mg/kg TS |              |       | mg/kg TS |              |        | mg/kg TS |            |     | mg/kg TS |            |     |
| <b>Mischproben 1-5</b>   |          |              |       |          |              |        |          |            |     |          |            |     |
| Mittelwert               | 23.000   |              |       | 7.300    |              |        | 8,1      |            |     | 3,4      |            |     |
| St.abw.                  | 480      | <b>800</b>   | 2.300 | 2.300    | <b>3.800</b> | 11.000 | 6,3      | <b>11</b>  | 30  | 0,77     | <b>1,3</b> | 3,7 |
| Var.koeff. %             | 2,1      | <b>3,5</b>   | 10    | 31       | <b>52</b>    | 150    | 78       | <b>130</b> | 380 | 23       | <b>38</b>  | 110 |
| <b>Einzelproben 6-10</b> |          |              |       |          |              |        |          |            |     |          |            |     |
| Mittelwert               | 21.000   |              |       | 5.200    |              |        | 4,7      |            |     | 4,7      |            |     |
| St.abw.                  | 2.020    | <b>3.400</b> | 9.700 | 1.200    | <b>2.000</b> | 5.800  | 1,4      | <b>2,3</b> | 6,5 | 1,4      | <b>2,3</b> | 6,5 |
| Var.koeff. %             | 9,5      | <b>16</b>    | 45    | 23       | <b>38</b>    | 110    | 29       | <b>49</b>  | 140 | 29       | <b>49</b>  | 140 |





Fortsetzung Tabelle 4-145

|                          | Cr       |            |     | Cr       |            |     | Cu       |              |       | Cu       |              |       |
|--------------------------|----------|------------|-----|----------|------------|-----|----------|--------------|-------|----------|--------------|-------|
|                          | mg/kg TS |            |     | Lsg.     |            |     | mg/kg TS |              |       | Stücke   |              |       |
|                          | mg/kg TS |            |     | mg/kg TS |            |     | mg/kg TS |              |       | mg/kg TS |              |       |
| <b>Mischproben 1-5</b>   |          |            |     |          |            |     |          |              |       |          |              |       |
| Mittelwert               | 350      |            |     | 200      |            |     | 2.700    |              |       | 1.600    |              |       |
| St.abw.                  | 130      | <b>220</b> | 630 | 140      | <b>230</b> | 650 | 680      | <b>1.100</b> | 3.300 | 690      | <b>1.100</b> | 3.300 |
| Var.koeff. %             | 38       | <b>63</b>  | 180 | 67       | <b>110</b> | 320 | 25       | <b>42</b>    | 120   | 43       | <b>72</b>    | 210   |
| <b>Einzelproben 6-10</b> |          |            |     |          |            |     |          |              |       |          |              |       |
| Mittelwert               | 150      |            |     | 48       |            |     | 3.400    |              |       | 1.800    |              |       |
| St.abw.                  | 33       | <b>55</b>  | 160 | 22       | <b>36</b>  | 100 | 1.600    | <b>2.600</b> | 7.600 | 330      | <b>550</b>   | 1.600 |
| Var.koeff. %             | 21       | <b>35</b>  | 100 | 45       | <b>76</b>  | 220 | 46       | <b>77</b>    | 220   | 19       | <b>31</b>    | 90    |

Fortsetzung Tabelle 4-145

|                          | Fe       |              |       | Fe       |              |       | Ni       |            |     | Ni       |            |     |
|--------------------------|----------|--------------|-------|----------|--------------|-------|----------|------------|-----|----------|------------|-----|
|                          | mg/kg TS |              |       | Stücke   |              |       | mg/kg TS |            |     | Lsg.     |            |     |
|                          | mg/kg TS |              |       | mg/kg TS |              |       | mg/kg TS |            |     | mg/kg TS |            |     |
| <b>Mischproben 1-5</b>   |          |              |       |          |              |       |          |            |     |          |            |     |
| Mittelwert               | 12.000   |              |       | 2.200    |              |       | 170      |            |     | 110      |            |     |
| St.abw.                  | 1.300    | <b>2.100</b> | 6.200 | 780      | <b>1.300</b> | 3.800 | 69       | <b>110</b> | 330 | 74       | <b>120</b> | 360 |
| Var.koeff. %             | 11       | <b>18</b>    | 52    | 36       | <b>60</b>    | 170   | 41       | <b>69</b>  | 200 | 68       | <b>110</b> | 330 |
| <b>Einzelproben 6-10</b> |          |              |       |          |              |       |          |            |     |          |            |     |
| Mittelwert               | 10.299   |              |       | 3.200    |              |       | 58       |            |     | 26       |            |     |
| St.abw.                  | 1.400    | <b>2.300</b> | 6.700 | 920      | <b>1.500</b> | 4.400 | 20       | <b>33</b>  | 94  | 10       | <b>17</b>  | 49  |
| Var.koeff. %             | 14       | <b>23</b>    | 65    | 28       | <b>47</b>    | 140   | 34       | <b>56</b>  | 160 | 40       | <b>66</b>  | 190 |

Fortsetzung Tabelle 4-145

|                          | Pb       |            |       | Zn       |              |       | Zn       |            |     |
|--------------------------|----------|------------|-------|----------|--------------|-------|----------|------------|-----|
|                          | mg/kg TS |            |       | mg/kg TS |              |       | Stücke   |            |     |
|                          | mg/kg TS |            |       | mg/kg TS |              |       | mg/kg TS |            |     |
| <b>Mischproben 1-5</b>   |          |            |       |          |              |       |          |            |     |
| Mittelwert               | 400      |            |       | 1.000    |              |       | 290      |            |     |
| St.abw.                  | 260      | <b>430</b> | 1.200 | 160      | <b>270</b>   | 760   | 160      | <b>270</b> | 790 |
| Var.koeff. %             | 65       | <b>110</b> | 310   | 15       | <b>25</b>    | 73    | 57       | <b>96</b>  | 270 |
| <b>Einzelproben 6-10</b> |          |            |       |          |              |       |          |            |     |
| Mittelwert               | 430      |            |       | 1.900    |              |       | 410      |            |     |
| St.abw.                  | 380      | <b>640</b> | 1.800 | 600      | <b>1.000</b> | 2.900 | 49       | <b>82</b>  | 240 |
| Var.koeff. %             | 90       | <b>150</b> | 430   | 31       | <b>52</b>    | 150   | 12       | <b>20</b>  | 57  |

Das Niveau der Streuung ist bei Misch- wie Einzelproben allgemein hoch, dass (1) der Vergleich der Streuungen problematisch ist, weil sich die Mittelwerten vor allem bei Chrom, Nickel und Zink (vermutlich zufällig) unterscheiden und (2) durch den geringen Stichprobenumfang die Werte der Standardabweichungen selbst in hohem Maß zufallsbeeinflusst sind. Um die Unsicherheit des Streuungsmaßes zu zeigen, sind die Schranken der 95 %-Konfidenzintervalle der Standardabweichungen angegeben (die Konfidenzintervalle für Standardabweichungen sind nicht symmetrisch!). Die Konfidenzintervalle überlappen einander weit, sodass kein signifikanter Unterschied zwischen Misch- und Einzelproben aus diesem Ansatz ablesbar ist. Bei Aluminium, „Cadmium“, Kupfer, Eisen, Blei und Zink errechnen sich bei den Mischproben kleinere Streuungen als bei den Einzelproben, bei „Aluminium Stücke“, Cadmium, Chrom, „Chrom Lsg.“, „Kupfer Stücke“, Nickel, „Nickel Lsg.“ und „Zink Stücke“ ist es umgekehrt. Bei Kupfer, Chrom und Nickel, deren heterogene



Verteilung im Abfall augenscheinlich ist, sind die Streuungen bei Misch- und Einzelproben eindeutig auf die Trägerstücke zurückzuführen. Für Kupfer ist das Ausmaß der Heterogenität im nächsten Abschnitt beschrieben. Für Chrom und Nickel ist das seltene Auftreten von großen Edelstahlteilen (Kochgeschirr, Blechstücke), die den überwiegenden Teil der Fracht ausmachen, Hauptursache der Streuung. Der Unterschied in den Mittelwerten (und den Streuungen) zwischen Misch- und Einzelproben resultiert aus dem Auftreten einiger weniger großer Kochtöpfe in den Mischproben 1-5. Diese Kochtöpfe wurden bei der Probenaufbereitung dem Lösen in Säure zugeordnet, weil die Stahlsorten nicht identifiziert werden konnten. Das Verhältnis Nickel/Chrom von 0,55 in den aufgelösten Metallstücken im Durchschnitt der Proben 1-5 und 0,54 im Durchschnitt der Proben 6-10 entspricht etwa dem eines 18/10-Edelstahls (0,556).

Zusammenfassend dargestellt konnte unter den gegebenen Bedingungen mit diesem Versuch kein eindeutiger Vorteil der Mischprobenbildung gegenüber der Einzelprobenentnahme festgestellt werden. Die Streuung auf Grund der Heterogenität überlagert die Variabilität zu stark, um bei gegebener Probenzahl den vorhandenen Effekt der Mischprobenbildung sichtbar zu machen.

#### 4.4.5.4 Heterogenität bei Kupfer - Prüfung der Verteilung von Kupferträgern durch Simulation

Der Zweck dieser Simulation ist, zu prüfen, ob die aus den Feldproben aussortierten Teile, die Kupfer enthalten, zufällig verteilt waren oder ob es bezüglich der Verteilung der Kupferträger Variabilität zwischen den Proben gab. Im Fall des Auftretens von Variabilität wäre eine Mischprobenbildung notwendig, im Fall der zufälligen Verteilung der Kupferträger bietet die Mischprobenbildung keinen Vorteil gegenüber der Einzelprobenentnahme.

Bei der Vor-Ort-Probenaufbereitung der Fraktion 50-250 mm wurden aus den insgesamt 8.150 kg Feldprobenmaterial 224 Kupfer-Trägerstücke (Kupfer und Messing) aussortiert. Abbildung 4-38 zeigt die Verteilung der Massen dieser Kupfer-Portionen. Die Verteilung ist linkssteil, die kleinen Stücke überwiegen in der Häufigkeit beträchtlich. In Abbildung 4-39 ist in einer Summenkurve dargestellt, wie die einzelnen Kupfer-Portionen zur gesamten Kupferfracht beitragen. Auf der x-Achse sind die Teilchen der Größe nach geordnet, die Kurve beginnt links mit den Beiträgen der kleinsten Teilchen (die dargestellte Kurve ist nicht geglättet). Aus der Darstellung ist zu entnehmen, dass die wenigen großen Trägerteilchen einen Großteil der Fracht transportieren, die 10 % größten Teilchen verursachen ca. 50 % der Fracht. Umgekehrt tragen die 50 % kleinsten Teilchen nur 10 % der Kupferfracht.

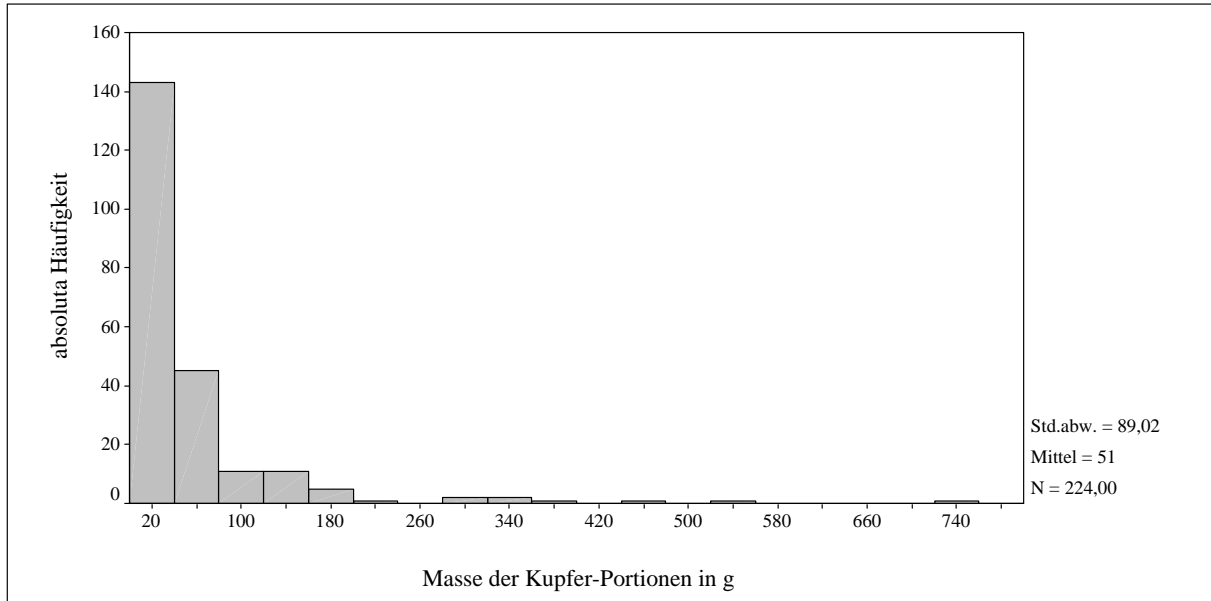


Abbildung 4-38: gemessene Verteilung der Kupferträger in der Fraktion 50-250 mm

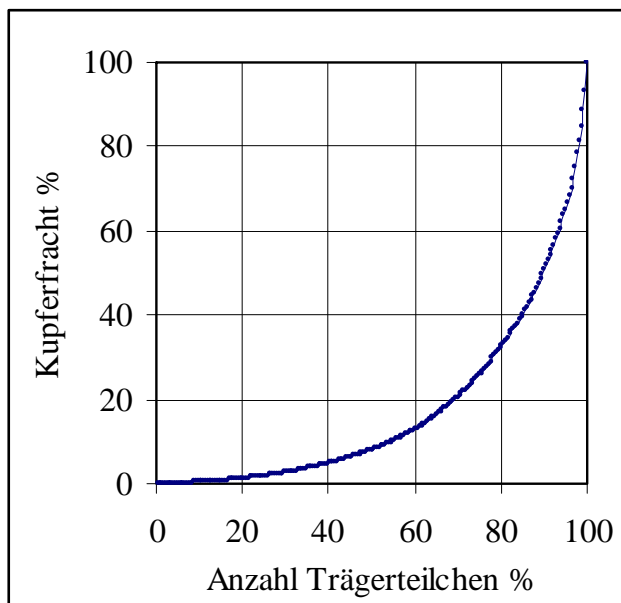


Abbildung 4-39: Summenkurve der Kupfer-Trägerteilchen

In einer Simulation wurde 1000 mal eine zufällige Verteilung der 224 Kupfer-Trägerstücke auf 10 Proben mit den Probenmassen, wie sie tatsächlich gezogen wurden, erzeugt und die Kupferkonzentrationen der Proben berechnet. Abbildung 4-40 zeigt einen kurzen Ausschnitt der Tabelle, in der jede Zeile einem Simulationsdurchgang entspricht. In den beiden Spalten ganz rechts sind jeweils Mittelwert und Standardabweichung über die 10 Proben angegeben.



| Pr. 1 | Pr. 2 | Pr. 3 | Pr. 4 | Pr. 5 | Pr. 6 | Pr. 7 | Pr. 8 | Pr. 9 | Pr. 10 | Mittelw.     | Stabw.       |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------------|--------------|
| 1,752 | 2,118 | 2,645 | 1,335 | 1,812 | 0,739 | 3,574 | 0,476 | 2,563 | 1,942  | <b>1,895</b> | <b>0,917</b> |
| 1,562 | 4,081 | 1,804 | 1,160 | 2,165 | 1,320 | 1,820 | 1,988 | 1,191 | 1,846  | <b>1,894</b> | <b>0,840</b> |
| 1,685 | 2,092 | 0,796 | 0,938 | 1,301 | 2,826 | 1,665 | 4,103 | 1,373 | 1,031  | <b>1,781</b> | <b>1,013</b> |
| 3,077 | 3,876 | 1,204 | 1,437 | 0,872 | 0,832 | 1,137 | 0,977 | 3,202 | 1,632  | <b>1,825</b> | <b>1,122</b> |
| 1,344 | 2,981 | 3,162 | 2,982 | 3,593 | 1,283 | 0,790 | 1,173 | 1,334 | 1,358  | <b>2,000</b> | <b>1,042</b> |
| 3,373 | 1,073 | 0,775 | 1,277 | 1,184 | 2,175 | 1,982 | 2,078 | 1,887 | 1,706  | <b>1,751</b> | <b>0,742</b> |
| 3,026 | 2,342 | 2,726 | 1,225 | 1,065 | 2,356 | 1,173 | 0,950 | 1,568 | 2,192  | <b>1,862</b> | <b>0,754</b> |
| 2,089 | 2,681 | 1,174 | 0,731 | 1,740 | 2,384 | 1,568 | 2,588 | 1,420 | 1,740  | <b>1,811</b> | <b>0,629</b> |
| 1,382 | 1,826 | 0,486 | 1,651 | 4,246 | 1,021 | 2,694 | 0,884 | 1,299 | 2,832  | <b>1,832</b> | <b>1,128</b> |
| 1,683 | 1,871 | 2,148 | 0,714 | 1,921 | 2,071 | 1,951 | 1,536 | 0,576 | 3,860  | <b>1,833</b> | <b>0,896</b> |

Abbildung 4-40: Ausschnitt aus der Simulation über die zufällige Verteilung der Kupferträger auf die 10 Proben: Angegeben sind die Kupferkonzentrationen der Proben in g/kg FS, wie sie durch die zufällig verteilten Träger verursacht werden. Jede Zeile entspricht einem Simulationsdurchlauf, rechts sind Mittelwert und Standardabweichung für das Ergebnis jedes Durchlaufs angegeben.

In Tabelle 4-146 sind die Standardabweichungen der Kupferkonzentrationen und die Schwankungsbreiten der Standardabweichungen bei der Zufallsverteilung der Kupferträger, wie sie aus der Simulation erhalten wurden, angegeben. In der ersten Spalte stehen die Standardabweichungen für die Auswertung über alle 10 Proben (ohne Berücksichtigung der Unterscheidbarkeit in Misch- und Einzelproben), in den beiden anderen Spalten die separaten Auswertungen für die Proben 1-5 und 6-10. Angegeben sind für die Verteilung der 1000 durch Simulation bestimmten Standardabweichungen Median, Minimum, Maximum und die Schranken, innerhalb derer sich 90% aller simulierten Standardabweichungen befinden. Bei der simulierten Zufallsverteilung der 224 Kupferträger auf die 10 Proben spielt die Entstehung als Einzel- oder Mischprobe keine Rolle. Die kleinere Streuung unter den Einzelproben ist auf die größere Probenmasse zurückzuführen.

Tabelle 4-146: Vergleich der simulierten mit der real gemessenen Standardabweichung. Um die Bandbreite, welche die Simulation liefert zu verdeutlichen („Unsicherheit der Unsicherheit“), ist für die 1.000 simulierten Standardabweichungen deren Median, Min und Max, sowie zwei Quantile angegeben.

| <b>Simulierte Standardabweichung</b> |       |             |               |
|--------------------------------------|-------|-------------|---------------|
|                                      | 1-10  | 1-5 (misch) | 6-10 (einzel) |
| Median                               | 0,762 | 0,760       | 0,667         |
| Min                                  | 0,312 | 0,093       | 0,174         |
| Max                                  | 2,112 | 2,997       | 1,742         |
| 5%-Quantil                           | 0,510 | 0,338       | 0,314         |
| 95%-Quantil                          | 1,125 | 1,357       | 1,163         |
| <b>Gemessene Standardabweichung</b>  |       |             |               |
|                                      | 1-10  | 1-5 (misch) | 6-10 (einzel) |
| Std.abw. gemessen                    | 0,734 | 0,946       | 0,551         |

Die real gemessenen Streuungen zeigen gute Übereinstimmung mit den simulierten Werten.

Aus der guten Übereinstimmung der gemessenen mit den simulierten Streuungen kann geschlossen werden, dass die Kupferträger auch real annähernd zufällig verteilt waren. Die



simulierte zufällige Verteilung der Trägerstücke liefert eine Probenahmestreuung, die vergleichbar ist mit der real beobachteten Streuung. Ein bedeutender Beitrag von tatsächlichen Schwankungen in der Materialzusammensetzung auf die Probenahmestreuung ist damit sehr unwahrscheinlich, die real gemessene Streuung müsste dazu größer sein. Die beobachteten Streuungen sind daher in erster Linie Folge der Heterogenität des Materials nicht von Variabilität d.h. tatsächlichen Schwankungen in der Materialzusammensetzung. Die Mischprobenbildung hat unter diesen Bedingungen geringe positive Wirkung. Die einzige Möglichkeit zur Reduktion der Streuung ist die Erhöhung der Probenmasse oder -zahl.



#### 4.4.5.5 Fraktion <50 mm „Schwerfraktion“

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt. Anschließend sind die Analysenergebnisse dargestellt.

Tabelle 4-147: Daten zur Probenahme und Aufbereitung der Fraktion <50 mm

|   |          |
|---|----------|
| Charakterisierte Gütermenge                                   | 995 t    |
| Anzahl Mischproben  | 5        |
| mittlere Mischprobenmasse                                     | 240 kg   |
| Mischprobenmasse insgesamt                                    | 1.198 kg |
|   |          |
| Anzahl Laborproben<br>(jeweils Probenteil „weich“ und „hart“) | 5        |
| mittlere Laborprobenmasse „weich“ <sup>1</sup><br>(feucht)    | 5,7 kg   |
| Laborprobenmasse „weich“ insgesamt                            | 28,6 kg  |
| mittlere Laborprobenmasse „hart“ <sup>2</sup><br>(feucht)     | 11,1 kg  |
| Laborprobenmasse „hart“ insgesamt                             | 55,6 kg  |
|   |          |
| Anzahl Analysenproben   | 5        |
| Anzahl Analysen <sup>3</sup>                                  | 10       |
| Anzahl eliminierter Ausreißer                                 | 0        |

<sup>1</sup> zerkleinert auf <15 mm

<sup>2</sup> zerkleinert auf <6,3 mm

<sup>3</sup> für eine Analyse wurden jeweils 3 Aufschlüsse (ca. 250 mg/Aufschluss) gemischt

Tabelle 4-148: Zusammensetzung der Fraktion <50 mm

|   | TM        | Wasser    | Glühverlust | Asche     | TC        | N         |
|---|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|   | g/100g FS | g/100g FS | g/100g TS   | g/100g TS | g/100g TS | g/100g TS |
| Mittelwert                                | 68,4      | 31,6      | 39,0        | 61,0      | 23        | 1,05      |
| Standardabweichung                        | 1,59      | 1,59      | 0,84        | 0,84      | 2,7       | 0,0903    |
| Minimum                                   | 66,2      | 29,6      | 38,0        | 60,1      | 20        | 0,907     |
| Maximum                                   | 70,4      | 33,8      | 39,9        | 62,0      | 26        | 1,14      |
| Median                                    | 68,1      | 31,9      | 39,2        | 60,8      | 23        | 1,08      |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 0,710     | 0,710     | 0,375       | 0,375     | 1,2       | 0,0404    |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |           |           |             |           |           |           |
| untere Schranke                           | 67,0      | 30,2      | 38,3        | 60,2      | 21        | 0,97      |
| obere Schranke                            | 69,8      | 33,0      | 39,8        | 61,7      | 25        | 1,13      |



Fortsetzung Tabelle 4-148:

|   | Al       | Cd       | Cr       | Cu       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 12.000   | 2,1      | 110      | 1.400    |
| Anteil aus Metallteilen                   | 1.400    | 0,0      | 49       | 1.200    |
| Standardabweichung                        | 1.400    | 1,3      | 20       | 410      |
| Minimum                                   | 11.000   | 1,3      | 81       | 920      |
| Maximum                                   | 14.000   | 4,3      | 140      | 2.000    |
| Median                                    | 12.000   | 1,4      | 100      | 1.300    |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 620      | 0,57     | 9,1      | 180      |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 11.000   | 1,0      | 88       | 1.000    |
| obere Schranke                            | 14.000   | 3,2      | 120      | 1.700    |

Fortsetzung Tabelle 4-148:

|   | Fe       | Ni       | Pb       | Zn       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 8.800    | 63       | 290      | 1.300    |
| Anteil aus Metallteilen                   | 1.500    | 32       | 130      | 820      |
| Standardabweichung                        | 670      | 17       | 140      | 350      |
| Minimum                                   | 8.200    | 42       | 160      | 1.000    |
| Maximum                                   | 9.800    | 86       | 540      | 1.900    |
| Median                                    | 8.500    | 63       | 250      | 1.200    |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 300      | 7,5      | 64       | 160      |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 8.200    | 48       | 160      | 1.000    |
| obere Schranke                            | 9.300    | 78       | 420      | 1.600    |

#### 4.4.5.6 Magnetseparationsschrott „Fe-Schrott“

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt. Anschließend sind die Analysenergebnisse dargestellt.

Tabelle 4-149: Daten zur Probenahme und Aufbereitung beim Fe-Schrott

|                                 |        |
|---------------------------------|--------|
| Charakterisierte Gütermenge     | 61 t   |
| Anzahl Mischproben              | 2      |
| mittlere Mischprobenmasse       | 477 kg |
| Mischprobenmasse insgesamt      | 954 kg |
|                                 |        |
| Anzahl Laborproben              | 2      |
|                                 |        |
| Anzahl Analysenproben (flüssig) | 2      |
| Anzahl Analysen                 | 2      |
| Anzahl eliminiertes Ausreißer   | 0      |



Tabelle 4-150: Zusammensetzung des Fe-Schrotts

|            | TM        | Wasser    | Glühverlust | Asche     | TC        | N         |
|------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|            | g/100g FS | g/100g FS | g/100g TS   | g/100g TS | g/100g TS | g/100g TS |
| Mittelwert | 97,4      | 2,6       | 5,3         | 94,7      | 2,2       | 0,06      |

Fortsetzung Tabelle 4-150:

|   | Al       | Cd       | Cr       | Cu       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 4.800    | 230      | 850      | 4.300    |
| Standardabweichung                        | 1.300    | 77       | 230      | 400      |
| Minimum                                   | 3.900    | 180      | 680      | 4.000    |
| Maximum                                   | 5.700    | 280      | 1.000    | 4.600    |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 900      | 54       | 160      | 280      |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 3.100    | 120      | 540      | 3.800    |
| obere Schranke                            | 6.600    | 340      | 1.160    | 4.900    |

Fortsetzung Tabelle 4-150:

|   | Fe       | Ni       | Pb       | Zn       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 900.000  | 660      | 120      | 4.100    |
| Standardabweichung                        | 9.000    | 120      | 1,4      | 200      |
| Minimum                                   | 900.000  | 580      | 120      | 4.000    |
| Maximum                                   | 910.000  | 740      | 120      | 4.300    |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 6.000    | 83       | 1,0      | 140      |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 890.000  | 500      | 120      | 3.900    |
| obere Schranke                            | 920.000  | 820      | 120      | 4.400    |

#### 4.4.5.7 Wirbelstromabscheidungsschrott „NFe-Schrott“

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Probenahme, Probenaufbereitung und Analysen angeführt. Anschließend sind die Analysenergebnisse dargestellt.

Tabelle 4-151: Daten zur Probenahme und Aufbereitung beim NFe-Schrott

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| Charakterisierte Gütermenge   | 2,4 t  |
| Anzahl Mischproben            | 2      |
| mittlere Mischprobenmasse     | 272 kg |
| Mischprobenmasse insgesamt    | 543 kg |
|                               |        |
| Anzahl Laborproben            | 2      |
|                               |        |
| Anzahl Analysenproben         | 2      |
| Anzahl Analysen               | 2      |
| Anzahl eliminierter Ausreißer | 0      |





Tabelle 4-152: Zusammensetzung des NFe-Schrotts

|            | TM        | Wasser    | Glühverlust | Asche     | TC        | N         |
|------------|-----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|            | g/100g FS | g/100g FS | g/100g TS   | g/100g TS | g/100g TS | g/100g TS |
| Mittelwert | 86,5      | 13,5      | 39,7        | 60,3      | 11,1      | 0,32      |

Fortsetzung Tabelle 4-152:

|   | Al       | Cd       | Cr       | Cu       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 580.000  | 1,6      | 1.200    | 20.000   |
| Standardabweichung                        | 45.000   | 0,12     | 750      | 8.000    |
| Minimum                                   | 550.000  | 1,5      | 710      | 14.000   |
| Maximum                                   | 610.000  | 1,7      | 1.800    | 25.000   |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 32.000   | 0,09     | 530      | 5.500    |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 520.000  | 1,0      | 200      | 8.900    |
| obere Schranke                            | 640.000  | 2,0      | 2.300    | 31.000   |

Fortsetzung Tabelle 4-152:

|   | Fe       | Ni       | Pb       | Zn       |
|---|----------|----------|----------|----------|
|   | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS | mg/kg TS |
| Mittelwert                                | 10.400   | 730      | 270      | 4.400    |
| Standardabweichung                        | 3.400    | 470      | 180      | 3.400    |
| Minimum                                   | 8.000    | 400      | 270      | 4.400    |
| Maximum                                   | 12.700   | 1.100    | 520      | 9.000    |
| Standardabweichung des Mittelwerts        | 2.380    | 340      | 120      | 2.400    |
| 95% Konfidenzintervall für den Mittelwert |          |          |          |          |
| untere Schranke                           | 5.700    | 64       | 150      | 2.100    |
| obere Schranke                            | 15.000   | 1.400    | 640      | 11.000   |

#### 4.4.6 Stoffbilanzen

Die Stoffbilanzen wurden wie unter 3.3.8 beschrieben berechnet. Die Ergebnisse sind im Kapitel 4.5 im Vergleich mit den Versuchen Oberpullendorf und Wien dargestellt.



## 4.5 Anlagenvergleich

Im Folgenden sind für die einzelnen Parameter die Transferkoeffizienten und die Konzentrationen in den Gütern vergleichend dargestellt.

### 4.5.1 Güter

Die Güterbilanzen untermauern die auf Grund der Verschiedenheit der Anlagenkonzepte und der visuellen Beurteilung der Outputgüter qualitativ erwarteten Ergebnisse:

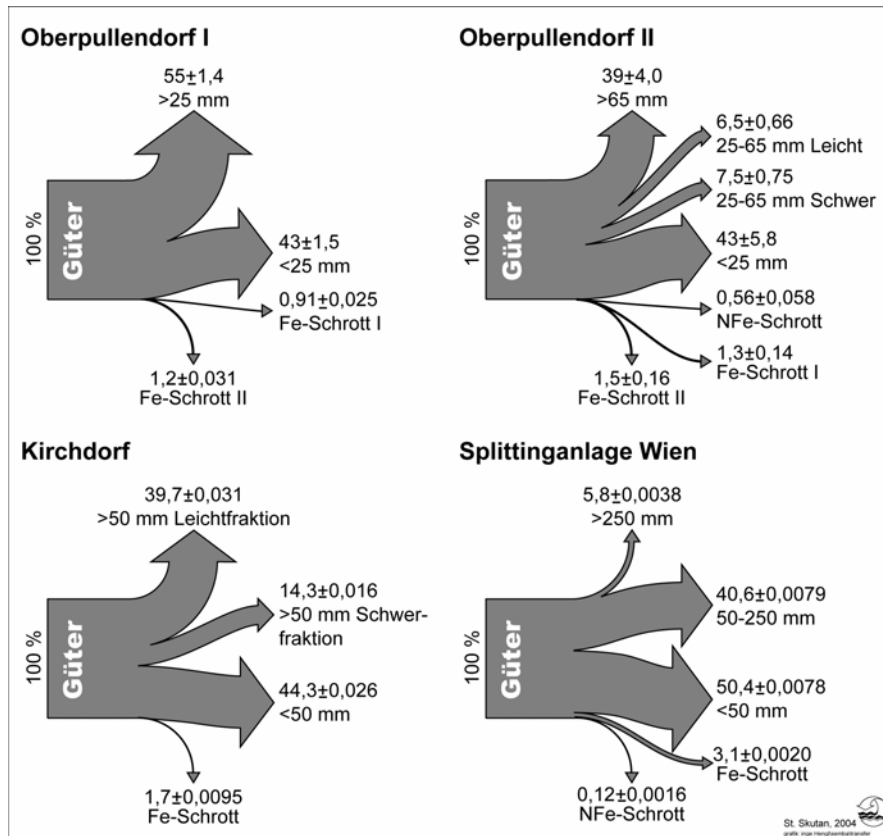


Abbildung 4-41: Güterbilanzen

Tabelle 4-153: Transferkoeffizienten für Güter, Vorerhebung:

|                         | TK   |
|-------------------------|------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,33 |
| Rotteinput              | 0,64 |
| Schrott                 | 0,02 |

Der Massentransfer in die Rotte ist bei der Anlage Oberpullendorf trotz des kleineren Siebschnitts (25 mm gegenüber 50 mm bei den beiden anderen Anlagen) groß, weil bei der etwa eintägigen „Homogenisierung“ in den Dano-Trommeln Papier, Karton, Hygieneartikel etc. zerkleinert werden und deshalb nahezu vollständig in den Rotteinput gelangen. Die heizwertreichen Fraktionen sind abgesehen von anhaftendem Feinmaterial, das zum Teil aus den Fasern der zerkleinerten Celluloseprodukte besteht, frei von Papier, Karton, Pappe und Hygieneartikeln.



Im Vergleich der Anlagen Wien und Kirchdorf wurde aus der visuellen Beurteilung der Fraktionen  $>50$  mm (in Kirchdorf wird diese in eine Leicht- und eine Schwerfraktion getrennt) auf einen höheren Massetransfer in den Siebdurchgang bei der Anlage Wien geschlossen. Die Massenbilanz bestätigt die Erwartung. Der Siebüberlauf der wiener Anlage enthielt im Vergleich mit den beiden anderen Anlagen überraschend wenig Gegenstände aus mineralischen Materialien wie Glas, Haushaltskeramik, Ziegel- und Betonbrocken (0 bis wenige kg/Tonne wurden bei der Voraufbereitung der Proben vor Ort aussortiert). Nach Angaben der MA 48 gelingt diese gute selektive Zerkleinerung mineralischer Bestandteile nicht im Zerkleinerungsaggregat sondern im 50 mm Trommelsieb. Das Material wird auf Grund der hohen Drehzahl und des großen Siebdurchmessers in der Siebtrommel jeweils so weit nach oben gefördert, dass es nach dem freien Fall mit großer Wucht auf der Siebtrommel aufschlägt und mineralische Gemengteile zerbrechen, folglich in den Siebdurchgang gelangen. Im Gegensatz dazu sind Glasflaschen, Haushaltskeramik, Beton- und Ziegelbrocken Hauptbestandteile der Schwerfraktion  $>50$  mm bei der Anlage Kirchdorf.

Mit den in den Vorerhebungen verwendeten Rechenwerten wurde gegenüber den drei untersuchten Anlagen der Transfer in den Rotteinput überschätzt (damit der Transfer in die heizwertreiche Fraktionen unterschätzt). Der Massetransfer in den NFe-Schrott wurde im Vergleich mit den realen Messwerten ebenfalls überschätzt.

#### **4.5.2 Trockensubstanz und Wasser**

Die bei den Güterbilanzen unter 4.5.1 beschriebene Abhängigkeit von Anlagenkonzept und Siebtechnik ist im Trockenmassen-Transfer ebenso sichtbar. Die Differenz Kirchdorf-Wien ist sogar noch ausgeprägter. Die Hochrechnung des Trockenmassegehalts ergibt (jeweils für die Versuchszeit) einen wesentlich feuchteren Restmüll in Oberpullendorf als in Wien. Dazu ist allerdings festzuhalten, dass die Bestimmung des Trockenmassegehalts aus den voraufbereiteten Proben erfolgte. Es ist wahrscheinlich, dass auf Grund der höheren Lufttemperaturen beim Versuch Wien gegenüber Oberpullendorf und Kirchdorf ein Teil dieser Differenz auf den Trocknungsverlust während der Voraufbereitung zurückzuführen ist und somit einen systematischen Fehler darstellt.



## 4.5.2.1 Trockensubstanz

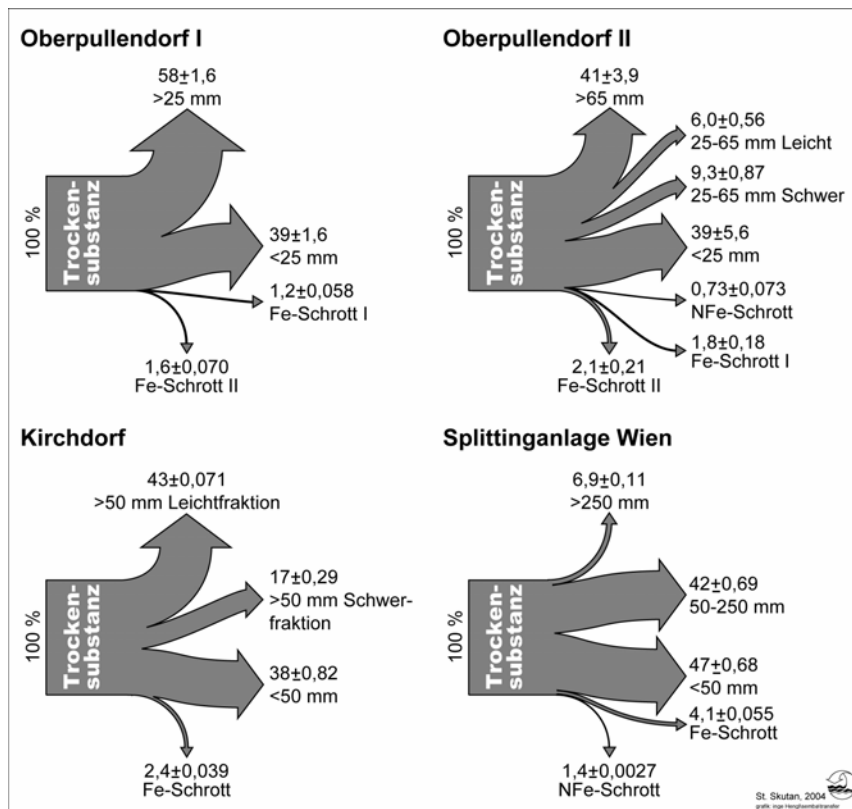


Abbildung 4-42: Bilanzen für Trockensubstanz

Tabelle 4-154: Transferkoeffizienten für Trockensubstanz, Vorerhebung:

|                         | <b>TK</b> |
|-------------------------|-----------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,37      |
| Rotteinput              | 0,60      |
| Schrott                 | 0,03      |

Tabelle 4-155: TS-Gehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg FS:

| <b>Oberpullendorf I</b> | <b>Oberpullendorf II</b> | <b>Kirchdorf</b> | <b>Wien</b> | <b>Vorerh.</b> |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------|
| 624±24                  | 626±86                   | 684±10           | 738±10      | 700            |

Tabelle 4-156: Vergleich der TS-Gehalte aller analysierten Güter; Werte in g/kg FS

|                         | OP I  |                 | OP II   |                 | Kirchdorf |                 | Wien   |                 | Vorerh.<br>C <sub>TS</sub> |
|-------------------------|-------|-----------------|---------|-----------------|-----------|-----------------|--------|-----------------|----------------------------|
|                         | Gut   | C <sub>TS</sub> | Gut     | C <sub>TS</sub> | Gut       | C <sub>TS</sub> | Gut    | C <sub>TS</sub> |                            |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 663             | >65     | 658             | >50 L     | 738             | >250   | 876             | 730                        |
|                         |       |                 | 25-65 L | 576             | >50 S     | 796             | 50-250 | 766             |                            |
|                         |       |                 | 25-65 S | 780             |           |                 |        |                 |                            |
| Rotteinput              | <25   | 560             | <25     | 560             | <50       | 590             | <50    | 684             | 610                        |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 850             | Fe I    | 850             | Fe        | 959             | Fe     | 974             | ~1.000                     |
|                         | Fe II | 860             | Fe II   | 860             |           |                 |        |                 |                            |
| NFe-Schrott             |       |                 | NFe     | 808             |           |                 | NFe    | 865             | ~1.000                     |



4.5.2.2 Wasser

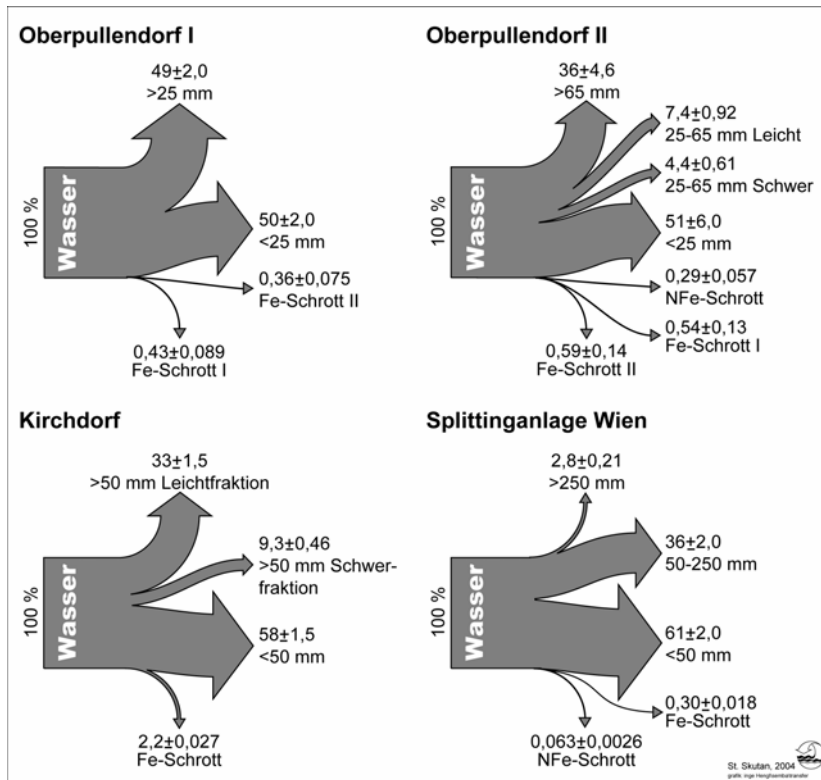


Abbildung 4-43: Bilanzen für Wasser

Tabelle 4-157: Transferkoeffizienten für Wasser, Vorerhebung:

|                         | <b>TK</b> |
|-------------------------|-----------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,24      |
| Rotteinput              | 0,76      |
| Schrott                 | ~0        |

Tabelle 4-158: Wassergehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg FS:

| <b>Oberpullendorf I</b> | <b>Oberpullendorf II</b> | <b>Kirchdorf</b> | <b>Wien</b> | <b>Vorerh.</b> |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------|
| 376 ± 18                | 374 ± 59                 | 316 ± 10         | 262 ± 10    | 300            |

Tabelle 4-159: Vergleich der Wassergehalte aller analysierten Güter; Werte in g/kg FS

|                         | OPI   |                 | OP II   |                 | Kirchdorf |                 | Wien   |                 | Vorerh. |
|-------------------------|-------|-----------------|---------|-----------------|-----------|-----------------|--------|-----------------|---------|
|                         | Gut   | C <sub>Wa</sub> | Gut     | C <sub>Wa</sub> | Gut       | C <sub>Wa</sub> | Gut    | C <sub>Wa</sub> |         |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 337             | >65     | 342             | >50 L     | 262             | >250   | 124             | 270     |
|                         |       |                 | 25-65 L | 424             | >50 S     | 204             | 50-250 | 234             |         |
|                         |       |                 | 25-65 S | 220             |           |                 |        |                 |         |
| Rotteinput              | <25   | 440             | <25     | 440             | <50       | 410             | <50    | 316             | 390     |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 150             | Fe I    | 150             | Fe        | 41              | Fe     | 26              | ~0      |
|                         | Fe II | 140             | Fe II   | 140             |           |                 |        |                 |         |
| NFe-Schrott             |       |                 | NFe     | 192             |           |                 | NFe    | 135             | ~0      |



### 4.5.3 Asche und Glühverlust

Für die Berechnung der Aschegehalte der Güter aus den Labormesswerten und den Anteilen aussortierter Metalle wurde für die Metalle ein Aschegehalt von 100 % festgelegt. D.h. mögliches Verdunsten oder Verbrennen der Metalle wurde nicht rechnerisch berücksichtigt.

Der Vergleich der Transferkoeffizienten und der Aschegehalte der Rotteinputs zeigt die schon bei Güter- und Trockenmassebilanz beschriebene Wirkung der Dano-Trommeln. Der Aschegehalt ist trotz kleineren Siebschnitts beim oberpullendorfer Rotteinput geringer, weil die Aschenbildner durch glühverlustreiches Material (zerfasertes Papier, Karton, Pappe, Hygieneartikel) verdünnt sind. Am Transferkoeffizienten für Asche ist die Wirkung des kleinen Siebschnitts zu erkennen, die sich durch die Beobachtungen hoher Anteile an mineralischen Gemengteilen (Glas, Beton- und Ziegelbrocken, Steine) in den Fraktionen >25 mm und 25-65 mm Schwer („BasS“) bestätigt. Die Verschiebung des Siebschnitts von 50 auf 25 mm bewirkt eine merkliche Umlenkung der Aschenbildner in die heizwertreiche Fraktion.

Beim Vergleich der Aschen-Transferkoeffizienten der Anlagen Kirchdorf und Wien ist die bei Güter- und Trockenmasse-Bilanz beschriebene hervorstechende Abtrennungsleistung der wiener Anlage für mineralische Gemengteile deutlich zu erkennen. Der höhere Transfer in den Rotteinput ist dabei bei sehr ähnlicher Konzentration (etwa 610 g/kg TS Aschegehalt) im unterschiedlichen Gütertransfer begründet.

Die Trennleistung der ballistischen Separatoren bezüglich Asche ist in beiden Fällen (Oberpullendorf II: 25-65 mm Leicht („BasL“) und Schwer („BasS“), Kirchdorf >50 mm Leicht und Schwer) sehr deutlich an den Aschengehalten der Outputfraktionen erkennbar.



## 4.5.3.1 Asche

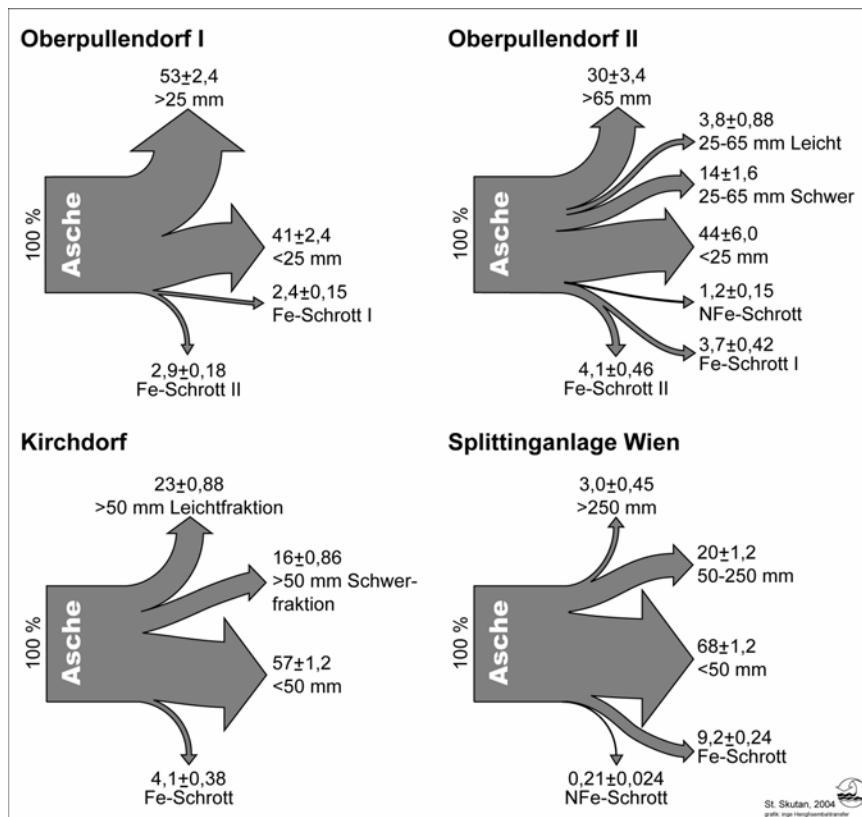


Abbildung 4-44: Bilanzen für Asche

Tabelle 4-160: Transferkoeffizienten für Asche, Vorerhebung:

|                         | <b>TK</b> |
|-------------------------|-----------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,25      |
| Rotteinput              | 0,69      |
| Schrott                 | 0,006     |

Tabelle 4-161: Aschegehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg FS:

| <b>Oberpullendorf I</b> | <b>Oberpullendorf II</b> | <b>Kirchdorf</b> | <b>Wien</b> | <b>Vorerh.</b> |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------|
| 283±16                  | 268±39                   | 281±6,9          | 309±6,7     | 270            |

Tabelle 4-162: Aschegehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg TS:

| <b>Oberpullendorf I</b> | <b>Oberpullendorf II</b> | <b>Kirchdorf</b> | <b>Wien</b> | <b>Vorerh.</b> |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------|
| 453±26                  | 427±60                   | 410±12           | 418±11      | 386            |

Tabelle 4-163: Vergleich der Aschengehalte aller analysierten Güter; Werte in g/kg TS

|                         | OP I  |                | OP II   |                | Kirchdorf |                | Wien   |                | Vorerh.        |
|-------------------------|-------|----------------|---------|----------------|-----------|----------------|--------|----------------|----------------|
|                         | Gut   | C <sub>A</sub> | Gut     | C <sub>A</sub> | Gut       | C <sub>A</sub> | Gut    | C <sub>A</sub> | C <sub>A</sub> |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 410            | >65     | 306            | >50 L     | 220            | >250   | 180            | 270            |
|                         |       |                | 25-65 L | 270            | >50 S     | 400            | 50-250 | 194            |                |
|                         |       |                | 25-65 S | 635            |           |                |        |                |                |
| Rotteinput              | <25   | 480            | <25     | 480            | <50       | 611            | <50    | 610            | 450            |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 870            | Fe I    | 870            | Fe        | 748            | Fe     | 947            | 800            |
|                         | Fe II | 830            | Fe II   | 830            |           |                |        |                |                |
| NFe-Schrott             |       |                | NFe     | 732            |           |                | NFe    | 603            | ---            |

## 4.5.3.2 Glühverlust

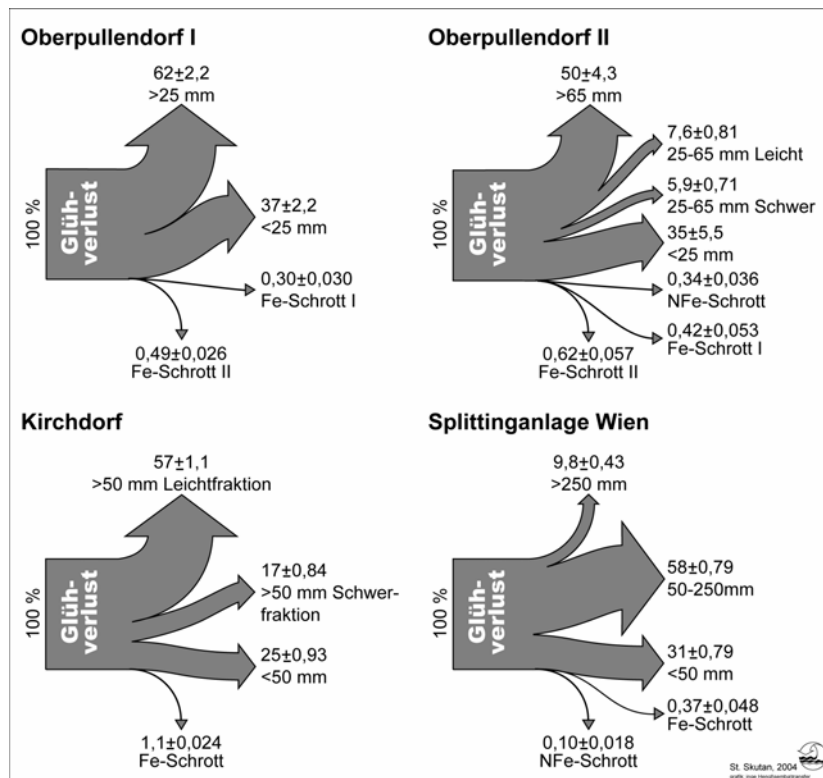


Abbildung 4-45: Bilanzen für Glühverlust

Tabelle 4-164: Transferkoeffizienten für Glühverlust, Vorerhebung:

|                         | TK   |
|-------------------------|------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,45 |
| Rotteinput              | 0,55 |
| Schrott                 | 0,01 |





Tabelle 4-165: Glühverlustgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg FS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien    | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|---------|---------|
| 342±17           | 359±48            | 404±9,3   | 429±7,0 | 430     |

Tabelle 4-166: Glühverlustgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg TS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien   | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|--------|---------|
| 548±28           | 573±72            | 590±16    | 582±12 | 610     |

Tabelle 4-167: Vergleich der GV-Gehalte aller analysierten Güter; Werte in g/kg TS

|                         | OPI   |                 | OP II   |                 | Kirchdorf |                 | Wien   |                 | Vorerh.         |
|-------------------------|-------|-----------------|---------|-----------------|-----------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|
|                         | Gut   | C <sub>GV</sub> | Gut     | C <sub>GV</sub> | Gut       | C <sub>GV</sub> | Gut    | C <sub>GV</sub> | C <sub>GV</sub> |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 590             | >65     | 694             | >50 L     | 780             | >250   | 820             | 750             |
|                         |       |                 | 25-65 L | 730             | >50 S     | 600             | 50-250 | 806             |                 |
|                         |       |                 | 25-65 S | 365             |           |                 |        |                 |                 |
| Rotteinput              | <25   | 520             | <25     | 520             | <50       | 389             | <50    | 390             | 550             |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 130             | Fe I    | 130             | Fe        | 252             | Fe     | 53              | 200             |
|                         | Fe II | 170             | Fe II   | 170             |           |                 |        |                 |                 |
| NFe-Schrott             |       |                 | NFe     | 268             |           |                 | NFe    | 397             | ---             |

#### 4.5.4 Kohlenstoff gesamt (TC), organischer (TOC) und anorganischer Kohlenstoff (TIC)

##### 4.5.4.1 Kohlenstoff gesamt

An den Ergebnissen für Kohlenstoff ist ebenfalls die Wirkung der Dano-Trommel, d.h. die Lenkung von Papier, Karton, Pappe und Hygieneartikel in den Rotteinput zu erkennen. Trotz kleinstem Siebschnitt ist bei der Anlage Oberpullendorf der Kohlenstoff-Transfer in den Rotteinput am höchsten.

Die gute Übereinstimmung der Kohlenstoffgehalte des Restmülls bei allen drei Anlagen überrascht angesichts der Abweichung von den Literaturwerten, auf Grund derer der Rechenwert in den Vorerhebungen festgesetzt wurde.

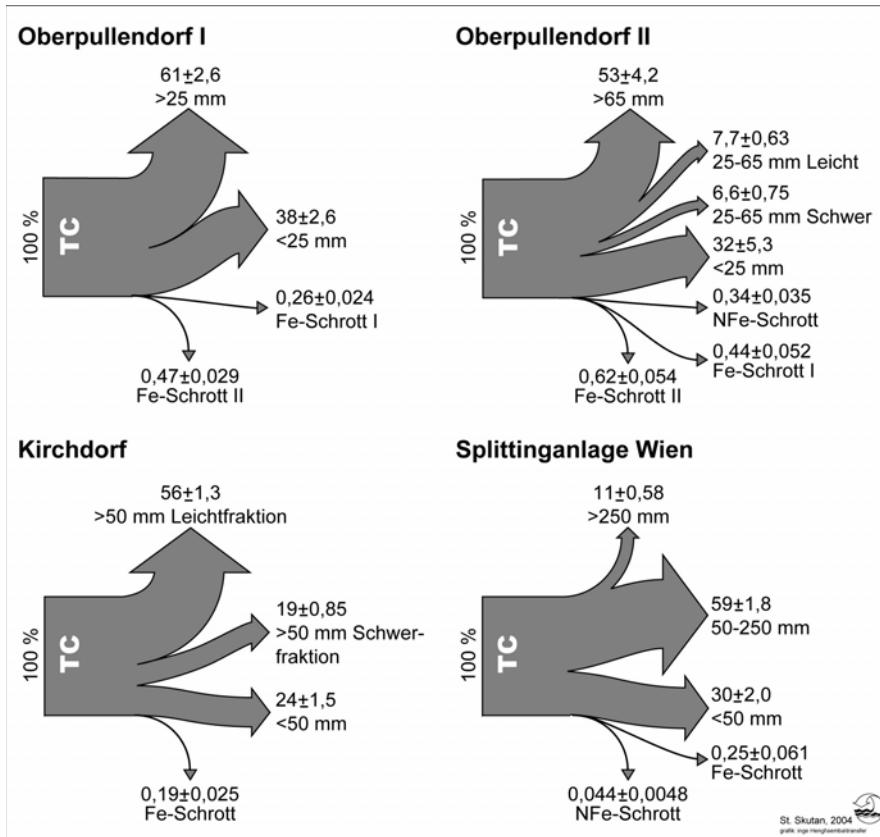


Abbildung 4-46: Stoffbilanzen für TC

Tabelle 4-168: Transferkoeffizienten für TC, Vorerhebung:

|                         | <b>TK</b> |
|-------------------------|-----------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,56      |
| Rotteinput              | 0,44      |
| Schrott                 | ~0        |

Tabelle 4-169: TC-Gehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg FS:

| <b>Oberpullendorf I</b> | <b>Oberpullendorf II</b> | <b>Kirchdorf</b> | <b>Wien</b> | <b>Vorerh.</b> |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------|
| 222±10                  | 222±29                   | 257±6,2          | 264±8,5     | 180            |

Tabelle 4-170: TC-Gehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg TS:

| <b>Oberpullendorf I</b> | <b>Oberpullendorf II</b> | <b>Kirchdorf</b> | <b>Wien</b> | <b>Vorerh.</b> |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------|
| 355±17                  | 355±43                   | 376±11           | 358±12      | 260            |

Tabelle 4-171: Vergleich der TC-Gehalte aller analysierten Güter; Werte in g/kg TS

|                         | OP I  |                 | OP II   |                 | Kirchdorf |                 | Wien   |                 | Vorerh.         |
|-------------------------|-------|-----------------|---------|-----------------|-----------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|
|                         | Gut   | C <sub>TC</sub> | Gut     | C <sub>TC</sub> | Gut       | C <sub>TC</sub> | Gut    | C <sub>TC</sub> | C <sub>TC</sub> |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 410             | >65     | 451             | >50 L     | 493             | >250   | 580             | 400             |
|                         |       |                 | 25-65 L | 459             | >50 S     | 430             | 50-250 | 496             |                 |
|                         |       |                 | 25-65 S | 252             |           |                 |        |                 |                 |
| Rotteinput              | <25   | 290             | <25     | 290             | <50       | 240             | <50    | 230             | 190             |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 85              | Fe I    | 85              | Fe        | 30              | Fe     | 22              | 60              |
|                         | Fe II | 100             | Fe II   | 100             |           |                 |        |                 |                 |
| NFe-Schrott             |       |                 | NFe     | 165             |           |                 | NFe    | 111             | ---             |

#### 4.5.4.2 Organischer Kohlenstoff, TOC

Bei den Versuchen Kirchdorf und Wien wurde der Anteil des organischen Kohlenstoffs nicht bestimmt.

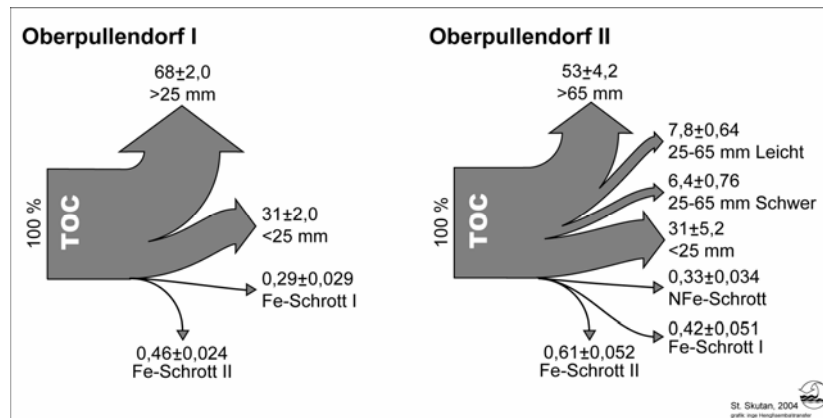


Abbildung 4-47: Stoffbilanzen für TOC

Tabelle 4-172: Transferkoeffizienten für TOC, Vorerhebung:

|                         | TK   |
|-------------------------|------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,56 |
| Rotteinput              | 0,44 |
| Schrott                 | ~0   |

Tabelle 4-173: TOC-Gehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg TS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|------|---------|
| 213±10           | 214±27            | ---       | ---  | 180     |

Tabelle 4-174: TOC-Gehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg TS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|------|---------|
| 341±17           | 341±41            | ---       | ---  | 260     |

Tabelle 4-175: Vergleich der TOC-Gehalte aller analysierten Güter; Werte in g/kg TS

|                         | OP I  |                  | OP II   |                  | Kirchdorf |                  | Wien   |                  | Vorerh.          |
|-------------------------|-------|------------------|---------|------------------|-----------|------------------|--------|------------------|------------------|
|                         | Gut   | C <sub>TOC</sub> | Gut     | C <sub>TOC</sub> | Gut       | C <sub>TOC</sub> | Gut    | C <sub>TOC</sub> | C <sub>TOC</sub> |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 400              | >65     | 440              | >50 L     | ---              | >250   | ---              | 400              |
|                         |       |                  | 25-65 L | 446              | >50 S     | ---              | 50-250 | ---              |                  |
|                         |       |                  | 25-65 S | 235              |           |                  |        |                  |                  |
| Rotteinput              | <25   | 280              | <25     | 280              | <50       | ---              | <50    | ---              | 200              |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 79               | Fe I    | 79               | Fe        | ---              | Fe     | ---              | 60               |
|                         | Fe II | 98               | Fe II   | 98               |           |                  |        |                  |                  |
| NFe-Schrott             |       |                  | NFe     | 154              |           |                  | NFe    | ---              | ---              |

#### 4.5.4.3 Anorganischer Kohlenstoff, TIC

Bei den Versuchen Kirchdorf und Wien wurde der Anteil des anorganischen Kohlenstoffs nicht bestimmt. Die Ergebnisse der Anlage Oberpullendorf bestätigen die Annahme der mengenmäßig geringen Bedeutung des anorganischen Kohlenstoffs im Vergleich zum organischen. Die erwartete Anreicherung des anorganischen Kohlenstoffs (Annahme dass TIC vor allem in mineralischen Teilchen zu finden ist) ist als Trend in der Zusammensetzung der Güter erkennbar. Hohe Gehalte von anorganischem Kohlenstoff treten gemeinsam mit hohen Aschegehalten auf.

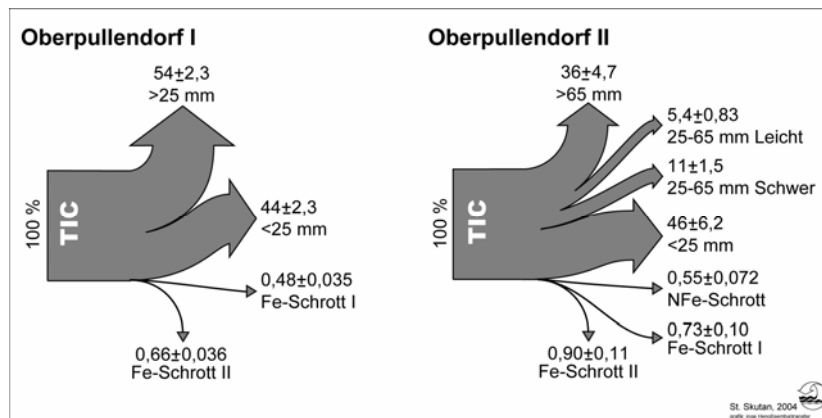


Tabelle 4-176: TIC-Gehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg FS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|------|---------|
| 9,0±0,45         | 8,7±1,4           | ---       | ---  | ---     |

Tabelle 4-177: TIC-Gehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg TS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|------|---------|
| 14,4±0,75        | 14,0±2,1          | ---       | ---  | ---     |

Tabelle 4-178: Vergleich der TIC-Gehalte aller analysierten Güter; Werte in g/kg TS

|                         | OP I  |                  | OP II   |                  | Kirchdorf |                  | Wien   |                  | Vorerh.          |
|-------------------------|-------|------------------|---------|------------------|-----------|------------------|--------|------------------|------------------|
|                         | Gut   | C <sub>TIC</sub> | Gut     | C <sub>TIC</sub> | Gut       | C <sub>TIC</sub> | Gut    | C <sub>TIC</sub> | C <sub>TIC</sub> |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 14               | >65     | 12               | >50 L     | ---              | >250   | ---              | ---              |
|                         |       |                  | 25-65 L | 13               | >50 S     | ---              | 50-250 | ---              |                  |
|                         |       |                  | 25-65 S | 17               |           |                  |        |                  |                  |
| Rotteinput              | <25   | 17               | <25     | 17               | <50       |                  | <50    |                  | 18               |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 5,6              | Fe I    | 5,6              | Fe        | ---              | Fe     | ---              | ---              |
|                         | Fe II | 6,0              | Fe II   | 6,0              |           |                  |        |                  |                  |
| NFe-Schrott             |       |                  | NFe     | 11               |           |                  | NFe    | ---              | ---              |

#### 4.5.5 Stickstoff

Im Folgenden sind die Ergebnisse für Stickstoff dargestellt. Die Messungen konnten den Konzentrationsunterschied zwischen heizwertreicher Fraktion und Rotteinput aus der Vorerhebung nicht bestätigen. Die Transferkoeffizienten für Stickstoff sind sehr ähnlich denen der Güterbilanz.

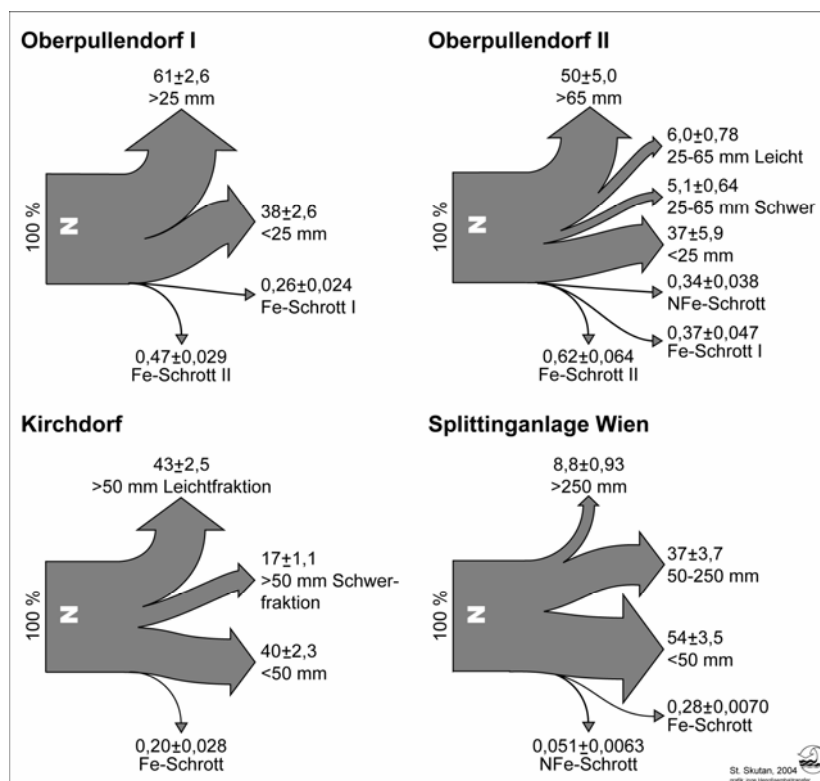


Abbildung 4-48: Stoffbilanzen für Stickstoff

Tabelle 4-179: Transferkoeffizienten für Stickstoff, Vorerhebung:

|                         | TK   |
|-------------------------|------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,51 |
| Rotteinput              | 0,49 |
| Schrott                 | ~0   |

Tabelle 4-180: Stickstoffgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg FS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien     | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|----------|---------|
| 6,6±0,38         | 6,7±0,95          | 6,8±0,33  | 6,7±0,46 | 4,7     |

Tabelle 4-181: Stickstoffgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg TS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien     | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|----------|---------|
| 10,6±0,62        | 10,7±1,4          | 9,9±0,50  | 9,1±0,64 | 6,7     |

Tabelle 4-182: Vergleich der Stickstoffgehalte aller analysierten Güter; Werte in g/kg TS

|                         | OP I  |                | OP II   |                | Kirchdorf |                | Wien   |                | Vorerh. |
|-------------------------|-------|----------------|---------|----------------|-----------|----------------|--------|----------------|---------|
|                         | Gut   | C <sub>N</sub> | Gut     | C <sub>N</sub> | Gut       | C <sub>N</sub> | Gut    | C <sub>N</sub> |         |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 11             | >65     | 13             | >50 L     | 9,9            | >250   | 11,5           | 13      |
|                         |       |                | 25-65 L | 11             | >50 S     | 10             | 50-250 | 7,9            |         |
|                         |       |                | 25-65 S | 5,9            |           |                |        |                |         |
| Rotteinput              | <25   | 10             | <25     | 10             | <50       | 10             | <50    | 10,5           | 7,4     |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 2,2            | Fe I    | 2,2            | Fe        | 0,85           | Fe     | 0,6            | ~0      |
|                         | Fe II | 3,1            | Fe II   | 3,1            |           |                |        |                |         |
| NFe-Schrott             |       |                | NFe     | 5,1            |           |                | NFe    | 3,2            | ---     |

#### 4.5.6 Schwefel

Schwefel wurde bei den Versuchen Kirchdorf und Wien nicht gemessen. Die Ergebnisse aus Oberpullendorf bestätigen die aus den Vorerhebungen errechnete deutliche Entfrachtung der heizwertreichen Fraktion nicht.

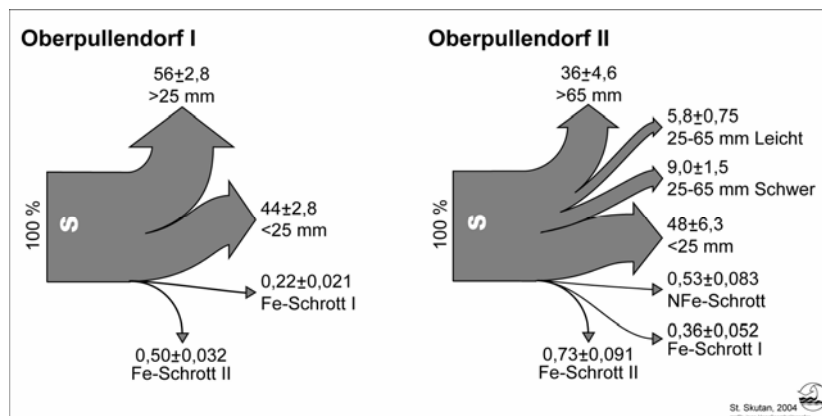


Abbildung 4-49: Stoffbilanzen für Schwefel



Tabelle 4-183: Transferkoeffizienten für Schwefel, Vorerhebung:

|                         | TK   |
|-------------------------|------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,17 |
| Rotteinput              | 0,83 |
| Schrott                 | 0,5  |

Tabelle 4-184: Schwefelgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg FS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|------|---------|
| 2,7±0,17         | 2,5±0,40          | ---       | ---  | 2,9     |

Tabelle 4-185: Schwefelgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg TS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|------|---------|
| 4,4±0,27         | 4,0±0,61          | ---       | ---  | 4,1     |

Tabelle 4-186: Vergleich der Schwefelgehalte aller analysierten Güter; Werte in g/kg TS

|                         | OP I  |                | OP II   |                | Kirchdorf |                | Wien   |                | Vorerh.        |
|-------------------------|-------|----------------|---------|----------------|-----------|----------------|--------|----------------|----------------|
|                         | Gut   | C <sub>s</sub> | Gut     | C <sub>s</sub> | Gut       | C <sub>s</sub> | Gut    | C <sub>s</sub> | C <sub>s</sub> |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 4,2            | >65     | 3,5            | >50 L     | ---            | >250   | ---            | 2,1            |
|                         |       |                | 25-65 L | 3,9            | >50 S     | ---            | 50-250 | ---            |                |
|                         |       |                | 25-65 S | 3,9            |           |                |        |                |                |
| Rotteinput              | <25   | 4,9            | <25     | 4,9            | <50       |                | <50    |                | 6,0            |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 0,80           | Fe I    | 0,8            | Fe        | ---            | Fe     | ---            | 0,8            |
|                         | Fe II | 1,4            | Fe II   | 0,8            |           |                |        |                |                |
| NFe-Schrott             |       |                | NFe     | 2,9            |           |                | NFe    | ---            | ---            |

#### 4.5.7 Phosphor

Die Ergebnisse aus Oberpullendorf bestätigen die aus den Vorerhebungen (auch ohne Klärschlamm) errechnete Anreicherung im Rotteinput nicht. Die Phosphorkonzentrationen sind in Rotteinput und heizwertreichen Fraktionen etwa gleich. Die Schwerfraktion 25-65 mm „BasS“ enthält sehr viele Knochen, etwa 30 % der Phosphorfracht von BasS stammen daraus. Der hohe Knochenanteil erklärt den vergleichsweise hohen Phosphorgehalt dieser Fraktion.

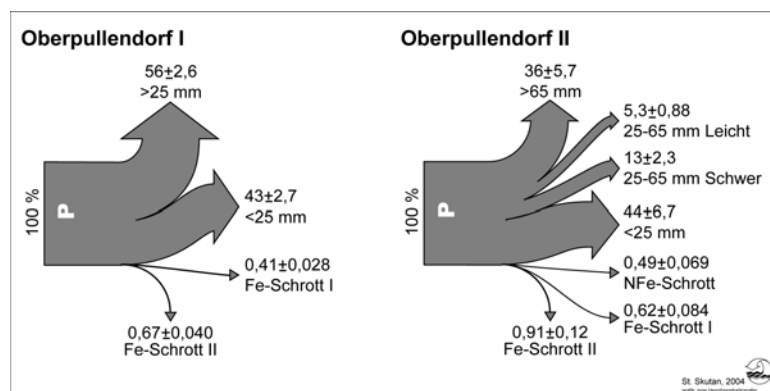


Abbildung 4-50: Stoffbilanzen für Phosphor



Tabelle 4-187: Transferkoeffizienten für Phosphor, Vorerhebung:

|                         | TK   |
|-------------------------|------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,43 |
| Rotteinput              | 0,57 |
| Schrott                 | 0,06 |

Tabelle 4-188: Phosphorgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg FS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|------|---------|
| 1,40±0,080       | 1,40±0,43         | ---       | ---  | 1,0     |

Tabelle 4-189: Phosphorgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg TS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|------|---------|
| 2,20±0,13        | 2,20±0,037        | ---       | ---  | 1,4     |

Tabelle 4-190: Vergleich der Phosphorgehalte aller analysierten Güter; Werte in g/kg TS

|                         | OPI   |                | OP II   |                | Kirchdorf |                | Wien   |                | Vorerh.        |
|-------------------------|-------|----------------|---------|----------------|-----------|----------------|--------|----------------|----------------|
|                         | Gut   | C <sub>p</sub> | Gut     | C <sub>p</sub> | Gut       | C <sub>p</sub> | Gut    | C <sub>p</sub> | C <sub>p</sub> |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 2,1            | >65     | 1,9            | >50 L     | ---            | >250   | ---            | 1,0            |
|                         |       |                | 25-65 L | 1,9            | >50 S     | ---            | 50-250 | ---            |                |
|                         |       |                | 25-65 S | 3,0            |           |                |        |                |                |
| Rotteinput              | <25   | 2,5            | <25     | 2,5            | <50       |                | <50    |                | 3,8            |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 0,73           | Fe I    | 0,73           | Fe        | ---            | Fe     | ---            | 0,03           |
|                         | Fe II | 0,93           | Fe II   | 0,93           |           |                |        |                |                |
| NFe-Schrott             |       |                | NFe     | 1,5            |           |                | NFe    | ---            | ---            |

#### 4.5.8 Aluminium

Die gemessenen Aluminiumbilanzen zeigen im Gegensatz zu den Vorerhebungen eine leichte Anreicherung von Aluminium in den heizwertreichen Fraktionen. Die Wirbelstromabscheider bei den Versuchen Oberpullendorf II und Wien konnten nur ca. 15 % (Oberpullendorf II) bzw. 5 % (Wien) des Aluminiums mit dem NFe-Schrott abtrennen. Bezieht man das abgetrennte Aluminium auf den metallischen Anteil, wie er bei der Probenaufbereitung aussortiert werden konnte, ist der Anteil wenigstens 45 % (Oberpullendorf II) bzw. 14 % (Wien). Das bessere Abschneiden der Anlage Oberpullendorf ist insofern erstaunlich, als nur die Schwerfraktion 25-65 mm über den Wirbelstromabscheider läuft und vielen Leichtmetallgegenständen nach dem Dano-Trommel-Durchlauf ein hoher Schmutzanteil anhaftet. Die schlechte Wirksamkeit der Wirbelstromabscheidung bei der Anlage Wien im Bereich der Fraktion 50-250 mm konnte während der Versuchszeit im laufenden Betrieb beobachtet werden. Allem Anschein nach ist die Schichtdicke des Abfalls am Vereinzelnungs-Förderband im Bereich des Wirbelstromabscheiders zu hoch. Gegenstände (vor allem die zahlreichen Dosen), die nicht zu oberst liegen, werden nicht aus dem Abfallstrom entfernt.







Tabelle 4-194: Vergleich der Aluminiumgehalte aller analysierten Güter; Werte in g/kg TS

|                         | OPI   |                 | OP II   |                 | Kirchdorf |                 | Wien   |                 | Vorerh.         |
|-------------------------|-------|-----------------|---------|-----------------|-----------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|
|                         | Gut   | C <sub>Al</sub> | Gut     | C <sub>Al</sub> | Gut       | C <sub>Al</sub> | Gut    | C <sub>Al</sub> | C <sub>Al</sub> |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 28,3            | >65     | 18,4            | >50 L     | 19,0            | >250   | 7,0             | 21              |
|                         |       |                 | 25-65 L | 18,1            | >50 S     | 21,0            | 50-250 | 22,0            |                 |
|                         |       |                 | 25-65 S | 25,0            |           |                 |        |                 |                 |
| Rotteinput              | <25   | 16,8            | <25     | 16,8            | <50       | 15,0            | <50    | 12,0            | 20              |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 7,6             | Fe I    | 7,6             | Fe        | 2,9             | Fe     | 4,8             | ---             |
|                         | Fe II | 6,1             | Fe II   | 6,1             |           |                 |        |                 |                 |
| NFe-Schrott             |       |                 | NFe     | 414             |           |                 | NFe    | 580             | 800             |

#### 4.5.9 Cadmium

Der in den Vorerhebungen abgeleitete Beitrag der NiCd-Akkus zum Cd-Gehalt des Restmülls und der erwartete Transfer der Akkus in den Fe-Schrott bei effizienter Magnetabscheidung konnte durch die Messungen bestätigt werden. Die Magnetabscheidung stellt eine bedeutende Cadmium-Entfrachtung des Hauptmassenstroms dar.

Der Anlagenvergleich zeigt, dass die Intensität der Magnetabscheidung großen Einfluss auf die Abscheidung der NiCd-Akkus (und Batterien allgemein) hat. Bei der Anlage Kirchdorf ist der Cadmium-Transfer in den Fe-Schrott (parallel mit dem Güter- und Eisentransfer) vergleichsweise klein, die NiCd-Akkus gelangen vornehmlich in die Fraktion >50 mm Schwer. In den Proben der Fraktion <50 mm konnten überraschenderweise keine NiCd-Akkus gefunden werden. Die Ursache dafür ist das seltene Auftreten von einzelnen NiCd-Batterien (die vom Magnetabscheider am besten erfasst werden) im Materialstrom nach dem kirchdorfer Zerkleinerungsaggregat. Akku-Geräte (die in der Regel einen hohen Massenanteil an Kunststoffen aufweisen) bleiben unzerkleinert, die Batterien werden nicht vom Gehäuse getrennt. Akkupacks (meist vier oder sechs Zellen) bleiben am Stück und sind daher in der Korngröße meist über 50 mm. Im Gegensatz dazu ist der „Aufschluss“ der Materialien in der wiener Anlage meist vollständig. Intakte Akkugeräte sind im Schrott kaum zu finden, Batterien, Elektromotoren und Spulen sind in den meisten Fällen einzeln anzutreffen. Die Anlage Oberpullendorf nimmt hinsichtlich „Aufschluss“ der Materialien eine Mittelstellung ein. Auf Grund des defekten Magnetabscheiders am Eingang einer der Dano-Trommeln wurde eine beeinträchtigte Abscheideleistung für Batterien erwartet. Die Versuchsergebnisse zeigen dagegen, dass die Abtrennung der Batterien aus der Fraktion 25-65 mm (Magnetabscheider Fe II) sehr effektiv ist, d.h. den Ausfall im vorderen Anlagenteil kompensiert.

Der Vergleich der Cadmiumgehalte von Rotteinputs und heizwertreichen Fraktionen zeigt eine deutliche Anreicherung in den heizwertreichen Fraktionen, die sich in sehr niedrigen Transferkoeffizienten für die Rotteinputs niederschlägt. Die Anreicherung in den heizwertreichen Fraktionen ist vor allem auf die Anreicherung von Kunststoffen zurückzuführen. Dass ein relevanter Teil der Cadmiumfracht an Kunststoffe gebunden ist (Cd-Stabilisatoren für PVC), wurde für die Versuchsplanung angenommen und konnte an Hand separater Analysen gezeigt werden (vergl. 4.2.9). NiCd-Akkus sind in heizwertreichen Fraktionen spärlich zu finden (Ausnahme: Kirchdorf Fraktion >50 mm Schwer), ihr Beitrag zur Cadmiumfracht wurde in der Fraktion >65 mm (Oberpullendorf) mit 4,4 mg/kg TS, der Fraktion 50-250 mm (Wien) mit 2,2 mg/kg TS und der Schwerfraktion >50 mm (Kirchdorf) mit 14 mg/kg TS



bestimmt. Alle anderen Proben der heizwertreichen Fraktionen (wie auch des Rotteinputs) waren frei von NiCd-Akkus.

Lässt man den Beitrag der NiCd-Akkus außer Acht, sind die gemessenen Cadmiumgehalte trotzdem weit über dem Wert der Vorerhebungen. Dieses Ergebnis untermauert die Vermutung, wonach mit praxisüblichen Methoden der Frachtbeitrag der hoch konzentrierten Träger (Cd-stabilisiertes PVC) auf Grund zu geringer Probenmassen und ungenügender Feinzerkleinerung der Analysenproben nicht erfasst wird, d.h. es sich bei den Literaturdaten über heizwertreiche Fraktionen eher um Hintergrundgehalte als durchschnittliche Gehalte handelt.

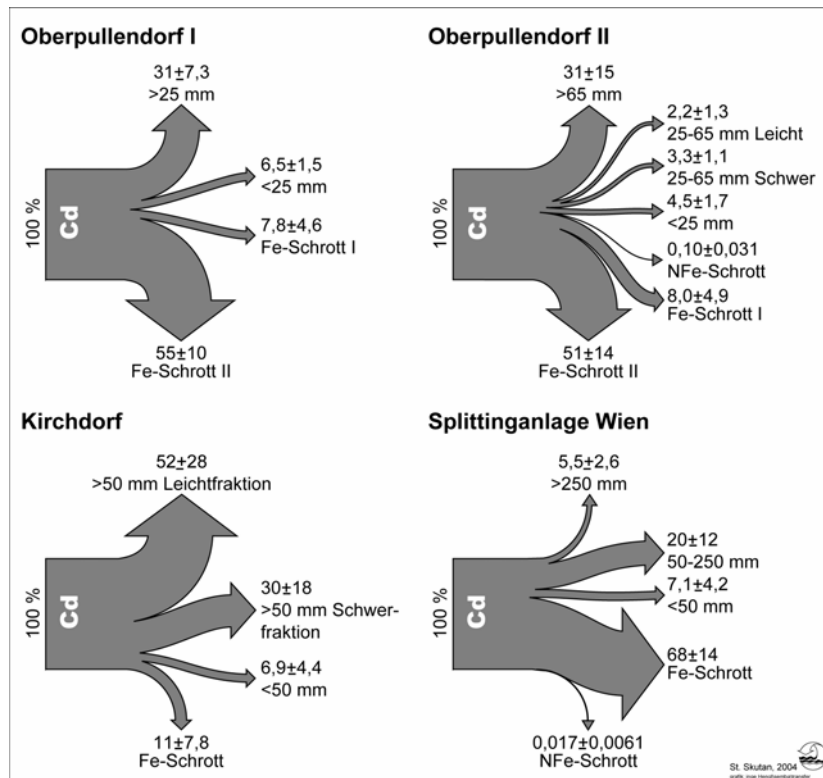


Abbildung 4-52: Stoffbilanzen für Cadmium

Tabelle 4-195: Transferkoeffizienten für Cadmium, Vorerhebung:

|                         | TK   |
|-------------------------|------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,13 |
| Rotteinput              | 0,21 |
| Schrott                 | 0,79 |

Tabelle 4-196: Cadmiumgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet mg/kg FS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien       | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|------------|---------|
| 7,6 ± 1,6        | 11,0 ± 3,2        | 7,8 ± 4,5 | 10,2 ± 3,5 | 6,6     |



Tabelle 4-197: Cadmiumgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet mg/kg TS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien     | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|----------|---------|
| 12,2±2,6         | 17,6±5,1          | 11,4±6,5  | 13,8±4,8 | 9,4     |

Tabelle 4-198: Vergleich der Cadmiumgehalte aller analysierten Güter; Werte in mg/kg TS

|                         | OPI   |                 | OP II   |                 | Kirchdorf |                 | Wien   |                 | Vorerh.         |
|-------------------------|-------|-----------------|---------|-----------------|-----------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|
|                         | Gut   | C <sub>Cd</sub> | Gut     | C <sub>Cd</sub> | Gut       | C <sub>Cd</sub> | Gut    | C <sub>Cd</sub> | C <sub>Cd</sub> |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 6,5             | >65     | 14              | >50 L     | 14              | >250   | 11              | 3,3             |
|                         |       |                 | 25-65 L | 6,4             | >50 S     | 21              | 50-250 | 6,4             |                 |
|                         |       |                 | 25-65 S | 6,2             |           |                 |        |                 |                 |
| Rotteinput              | <25   | 2,0             | <25     | 2,0             | <50       | 2,1             | <50    | 2,1             | 3,0             |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 86              | Fe I    | 86              | Fe        | 45              | Fe     | 230             | 250             |
|                         | Fe II | 470             | Fe II   | 470             |           |                 |        |                 |                 |
| NFe-Schrott             |       |                 | NFe     | 2,4             |           |                 | NFe    | 1,6             | ---             |

#### 4.5.10 Chrom

Im Gegensatz zu den Vorerhebungen wurde in den Hauptmassenströmen eine leichte Anreicherung in den heizwertreichen Fraktionen gemessen. Trotz dem relevante Anteile der Chromfrachten (häufig über 50 %) in metallischer Form vorliegen, sind die gemessenen Werte in vergleichbarer Größe mit den Rechenwerten aus der Vorerhebung. Der Transfer in den Fe-Schrott, der vor allem auf der Magnetabscheidung von rostfreiem Stahl beruht, wurde in der Vorerhebung mit 0,15 gut abgeschätzt. Bei der Anlage Kirchdorf ist wegen der ineffektiven Magnetabscheidung der Transferkoeffizient für den Fe-Schrott kleiner. An den vergleichsweise hohen Konzentrationen in Fraktion >50 mm Schwer (wobei 470 von 840 mg/kg TS in metallischer Form vorliegen) und Fraktion <50 mm (140 von 210 mg/kg TS metallisch) ist zu sehen, wohin die Edelstahlteile hauptsächlich gelangen.

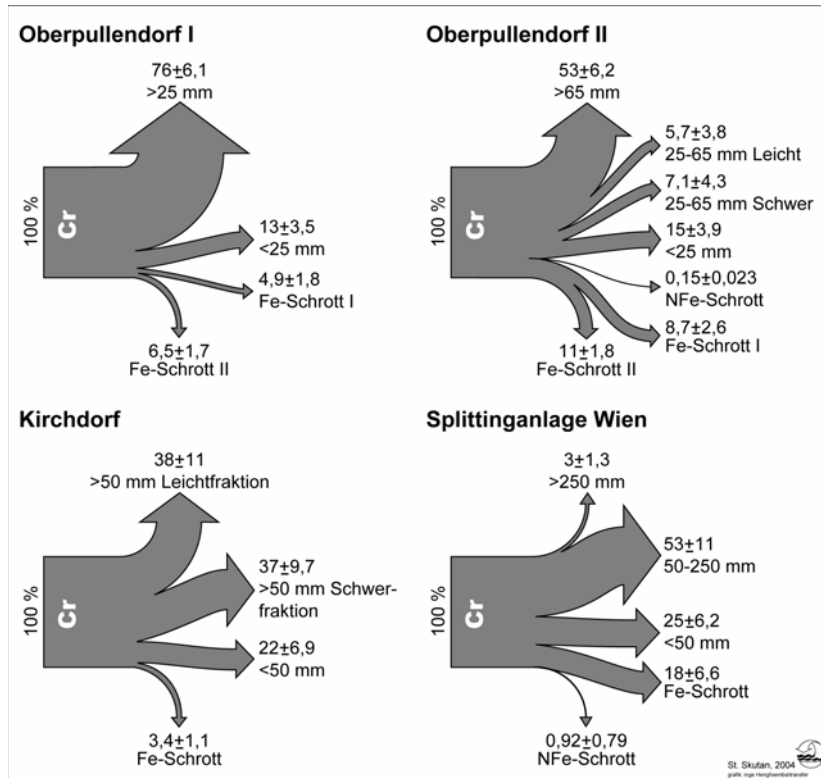


Abbildung 4-53: Stoffbilanzen für Chrom

Tabelle 4-199: Transferkoeffizienten für Chrom, Vorerhebung:

|                         | <b>TK</b> |
|-------------------------|-----------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,33      |
| Rotteinput              | 0,64      |
| Schrott                 | 0,02      |

Tabelle 4-200: Chromgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet mg/kg FS:

| <b>Oberpullendorf I</b> | <b>Oberpullendorf II</b> | <b>Kirchdorf</b> | <b>Wien</b> | <b>Vorerh.</b> |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------|
| 240±60                  | 200±32                   | 260±54           | 140±31      | 91             |

Tabelle 4-201: Chromgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet mg/kg TS:

| <b>Oberpullendorf I</b> | <b>Oberpullendorf II</b> | <b>Kirchdorf</b> | <b>Wien</b> | <b>Vorerh.</b> |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------|
| 390±100                 | 320±50                   | 380±80           | 190±43      | 130            |



Tabelle 4-202: Vergleich der Chromgehalte aller analysierten Güter; Werte in mg/kg TS

|                         | OP I  |                 | OP II   |                 | Kirchdorf |                 | Wien   |                 | Vorerh.         |
|-------------------------|-------|-----------------|---------|-----------------|-----------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|
|                         | Gut   | C <sub>Cr</sub> | Gut     | C <sub>Cr</sub> | Gut       | C <sub>Cr</sub> | Gut    | C <sub>Cr</sub> | C <sub>Cr</sub> |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 510             | >65     | 400             | >50 L     | 330             | >250   | 85              | 220             |
|                         |       |                 | 25-65 L | 300             | >50 S     | 840             | 50-250 | 240             |                 |
|                         |       |                 | 25-65 S | 240             |           |                 |        |                 |                 |
| Rotteinput              | <25   | 130             | <25     | 130             | <50       | 210             | <50    | 110             | 160             |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 1.550           | Fe I    | 1.550           | Fe        | 540             | Fe     | 845             | 1.200           |
|                         | Fe II | 1.600           | Fe II   | 1.600           |           |                 |        |                 |                 |
| NFe-Schrott             |       |                 | NFe     | 59              |           |                 | NFe    | 1.200           |                 |

#### 4.5.11 Kupfer

Die Kupferfrachten werden vor allem von metallischen Teilen verursacht. In Tabelle 4-203 sind die gemessenen Kupfer-Konzentrationen in den Gütern aufgeschlüsselt nach Anteilen, die während der Probenaufbereitung als metallische Anteile separat bestimmt wurden und „Hintergrundgehalten“, die in den Analysenproben durch Aufschluss und chemische Analyse bestimmt wurden.

Tabelle 4-203: Bedeutung metallischen Kupfers in MBA-Outputgütern; Werte in mg/kg TS

| Heizwertreiche Fraktionen |            |                | Rottematerialien    |            |                |
|---------------------------|------------|----------------|---------------------|------------|----------------|
|                           | metallisch | „Hintergrund“* |                     | metallisch | „Hintergrund“* |
| <b>Oberpullend.</b>       |            |                | <b>Oberpullend.</b> |            |                |
| >25 mm                    | 4.700      | 600            | <25 mm              | 700        | 300            |
| >65 mm                    | 3.400      | 1.300          |                     |            |                |
| 25-65 mm L                | 500        | 500            | <b>Kirchdorf</b>    |            |                |
| 25-65 mm S                | 8.000      | 400            | <50 mm              | 3.000      | 200            |
|                           |            |                |                     |            |                |
|                           |            |                | <b>Wien</b>         |            |                |
| <b>Kirchdorf</b>          |            |                | <50 mm              | 1.200      | 200            |
| >50 mm L                  | 5.000      | 500            |                     |            |                |
| >50 mm S                  | 6.300      | 1.100          | <b>Mittelwert</b>   |            | <b>230</b>     |
|                           |            |                |                     |            |                |
| <b>Wien</b>               |            |                |                     |            |                |
| >250 mm                   | 3.400      | 200            |                     |            |                |
| 50-250 mm                 | 2.200      | 900            |                     |            |                |
|                           |            |                |                     |            |                |
| <b>Mittelwert</b>         |            | <b>690</b>     |                     |            |                |

\*Es ist festzuhalten, dass diese Differenzierung auf der Sortierung im Zuge der Probenaufbereitung basiert. Nachdem die Sortierung nicht vollständig sein kann, ist die Aufteilung in Wahrheit noch weiter in Richtung metallischer Teile verschoben, als gemessen wurde.

Im Vergleich der Messwerte mit den Rechenwerten aus der Vorerhebung zeigt sich, dass die Rechenwerte eher mit den Hintergrundwerten als den Durchschnittsgehalten (inklusive der metallischen Anteile) übereinstimmen. Wie beim Cadmiumgehalt heizwertreicher Fraktionen scheint sich die aus den Probenahmesimulationen abgeleiteten Erwartung zu bestätigen, dass mit praxisüblichen Methoden der Anteil aus hoch konzentrierten Trägern (hier: Kabel, Bleche, Rohre aus Kupfer, Erzeugnisse aus Messing) nicht richtig mitbestimmt wird. Die bei



den Vorerhebungen erhobenen Zweifel gegenüber den Literaturdaten werden durch die Messwerte bestätigt. Anders als bei Cadmium ist bei Kupfer die Existenz der konzentrierten Stoffträger sogar visuell wahrnehmbar, deren Relevanz bezüglich Heterogenität ist einfach abzuleiten: Das Auftreten eines einzelnen Teiles, der 100 g Kupfer enthält, verursacht in einer Probe zu 10 kg einen Beitrag von 10.000 mg/kg FS, einer Probe zu 100 kg einen Beitrag von 1.000 mg/kg FS, bei 1.000 kg Probenmasse wenigstens nur noch 100 mg/kg FS. Nur große Probenmassen bieten die Chance, das Auftreten der „großen Stücke“ im Durchschnitt zu erfassen.

Die Ergebnisse zeigen eine Anreicherung von Kupfer in den heizwertreichen Fraktionen, die vor allem auf lange Kabelstücke und große Messingteile (z.B. Sanitärarmaturen) zurückzuführen ist.

Die Abscheidemöglichkeit für Kupfer mit Wirbelstromabscheidern aus den Siebfractionen ist sehr beschränkt. Kabel werden in den seltensten Fällen erfasst. Deren kleiner Querschnitt ist nachteilig für die Wirbelstromabscheidung. Zum Teil sind Kabel auch mit anderen Gemengteilen verheddert und sind daher nicht aus dem Hauptstrom zu entfernen. Wie bei Aluminium ist zu sehen, dass die Abscheidung des NFe-Schrotts bei der Anlage Oberpullendorf größere Wirkung hatte, obwohl nur die Schwerfraktion 25-65 mm über den Wirbelstromabscheider gefahren wird. Bei der wiener Anlage laufen die Fraktionen 50-250 mm und <50 mm über Wirbelstromabscheider.

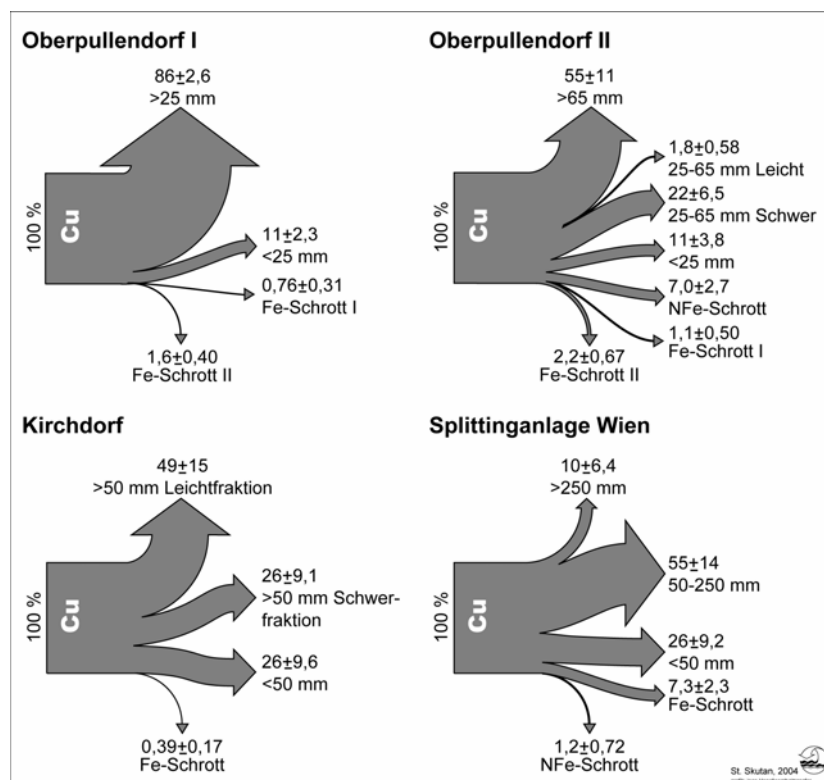


Abbildung 4-54: Stoffbilanzen für Kupfer



Tabelle 4-204: Transferkoeffizienten für Güter, Vorerhebung:

|                         | TK   |
|-------------------------|------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,64 |
| Rotteinput              | 0,25 |
| Schrott                 | 0,11 |

Tabelle 4-205: Kupfergehalt des Inputs (Restmüll) berechnet mg/kg FS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien      | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|-----------|---------|
| 2.200±330        | 2.200±570         | 3.300±950 | 1.800±520 | 500     |

Tabelle 4-206: Kupfergehalt des Inputs (Restmüll) berechnet mg/kg TS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf   | Wien      | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-------------|-----------|---------|
| 3.500±530        | 3.500±900         | 4.800±1.400 | 2.400±710 | 710     |

Tabelle 4-207: Vergleich der Kupfergehalte aller analysierten Güter; Werte in mg/kg TS

|                         | OP I  |                 | OP II   |                 | Kirchdorf |                 | Wien   |                 | Vorerh |
|-------------------------|-------|-----------------|---------|-----------------|-----------|-----------------|--------|-----------------|--------|
|                         | Gut   | C <sub>Cu</sub> | Gut     | C <sub>Cu</sub> | Gut       | C <sub>Cu</sub> | Gut    | C <sub>Cu</sub> |        |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 5.270           | >65     | 4.730           | >50 L     | 5.500           | >250   | 3.600           | 950    |
|                         |       |                 | 25-65 L | 1.100           | >50 S     | 7.400           | 50-250 | 3.100           |        |
|                         |       |                 | 25-65 S | 8.400           |           |                 |        |                 |        |
| Rotteinput              | <25   | 1.020           | <25     | 1.020           | <50       | 3.200           | <50    | 1.400           | 220    |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 2.200           | Fe I    | 2.200           | Fe        | 780             | Fe     | 4.300           | 2.200  |
|                         | Fe II | 3.600           | Fe II   | 3.600           |           |                 |        |                 |        |
| NFe-Schrott             |       |                 | NFe     | 21.000          |           |                 | NFe    | 20.000          | 2.600  |

#### 4.5.12 Eisen

An den Ergebnissen für Eisen ist die schon bei Cadmium (in Zusammenhang mit der Abscheidung von NiCd-Akkus) genannte beste „Aufschluss-“ und Abscheideleistung für ferromagnetische Gemengteile der wiener Anlage unter den drei Anlagen zu sehen. Die wiener Anlage erreicht mit Abstand den höchsten Transferkoeffizienten für Eisen in den Fe-Schrott und den höchsten Eisengehalt im Schrott. Bei der Anlage Kirchdorf lässt sich die Wirkung der ineffektiven Magnetabscheidung auf die Eisengehalte der Fraktion >50 mm Schwer und <50 mm erkennen. Die Überhöhung der Eisengehalte gegenüber den vergleichbaren Gütern der beiden anderen Anlagen ist hauptsächlich Metallstücken zuzuschreiben (>50 mm Schwer: 88 von 98 g/kg TS in metallischer Form, <50 mm: 27 von 40 g/kg TS). Die Vorerhebungen wurden in Bezug auf den Eisengehalt des Inputs bestätigt.



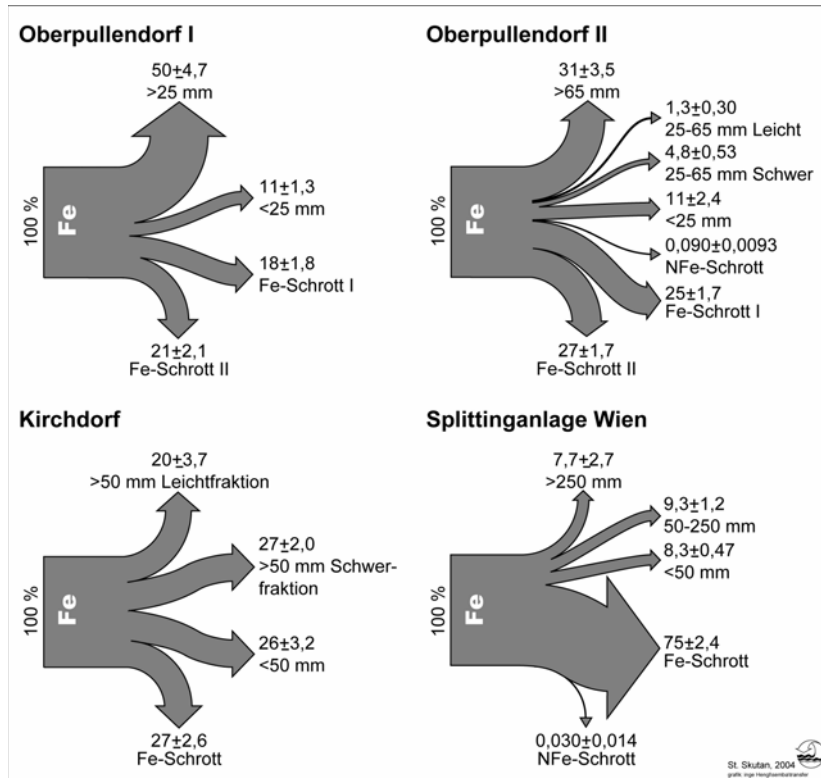


Abbildung 4-55: Stoffbilanzen für Eisen

Tabelle 4-208: Transferkoeffizienten für Eisen, Vorerhebung:

|                         | <b>TK</b> |
|-------------------------|-----------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,26      |
| Rotteinput              | 0,16      |
| Schrott                 | 0,55      |

Tabelle 4-209: Eisengehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg FS:

| <b>Oberpullendorf I</b> | <b>Oberpullendorf II</b> | <b>Kirchdorf</b> | <b>Wien</b> | <b>Vorerh.</b> |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------|
| 30,0±3,0                | 32,0±3,7                 | 40,5±2,7         | 36,0±1,2    | 35             |

Tabelle 4-210: Eisengehalt des Inputs (Restmüll) berechnet g/kg TS:

| <b>Oberpullendorf I</b> | <b>Oberpullendorf II</b> | <b>Kirchdorf</b> | <b>Wien</b> | <b>Vorerh.</b> |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------|
| 49,0±4,8                | 50,0±5,5                 | 59,2±4,1         | 49,0±1,9    | 50             |



Tabelle 4-211: Vergleich der Eisengehalte aller analysierten Güter; Werte in g/kg TS

|                         | OPI   |                 | OP II   |                 | Kirchdorf |                 | Wien   |                 | Vorerh.         |
|-------------------------|-------|-----------------|---------|-----------------|-----------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|
|                         | Gut   | C <sub>Fe</sub> | Gut     | C <sub>Fe</sub> | Gut       | C <sub>Fe</sub> | Gut    | C <sub>Fe</sub> | C <sub>Fe</sub> |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 42              | >65     | 37              | >50 L     | 28,0            | >250   | 5,5             | 29              |
|                         |       |                 | 25-65 L | 11              | >50 S     | 98              | 50-250 | 11,0            |                 |
|                         |       |                 | 25-65 S | 26              |           |                 |        |                 |                 |
| Rotteinput              | <25   | 14              | <25     | 14              | <50       | 40              | <50    | 8,8             | 13              |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 700             | Fe I    | 700             | Fe        | 680             | Fe     | 900             | 800             |
|                         | Fe II | 640             | Fe II   | 640             |           |                 |        |                 |                 |
| NFe-Schrott             |       |                 | NFe     | 6,3             |           |                 | NFe    | 10,4            | ---             |

#### 4.5.13 Quecksilber

Im Folgenden sind die Ergebnisse für Quecksilber dargestellt. Die Richtigkeit der Ergebnisse für Quecksilber sind aus zwei Gründen anzuzweifeln. Für Quecksilber konnte keine Vorausplanung der Probenahme und Aufbereitung anhand von Simulationen erstellt werden, weil nicht bekannt ist, welche konzentrierten Träger für Quecksilber im Abfall zu erwarten sind und welche Rolle diese für den Gesamtgehalt spielen. Doch gerade für Quecksilber ist das Fehlerpotential der Heterogenität besonders hoch, weil die durchschnittlichen Gehalte unter den untersuchten Metallen mit Abstand am kleinsten sind. Hoch konzentrierte Stücke können daher relativ zum Hintergrundgehalt oder durchschnittlichen Gehalt besonders große Auswirkungen haben. Sichtbar wird dieses Problem daran, dass es bei Quecksilber eine einzelne Probe (unter 19 Proben) beim oberpullendorfer Rotteinput gibt, die den Mittelwert des Gehalts mehr als vervierfacht. Für diese Probe wurde ein Gehalt von 96 mg/kg TS errechnet, wobei dieser folgendermaßen zustande kommt:

Tabelle 4-212: Ursprung eines „Ausreißers“ bei Quecksilber (angegeben sind die Hg-Gehalte in mg/kg TS): Die Überhöhung stammt aus einer der beiden parallelen Laborproben.

| Feldprobe | Laborprobe | Messwert |
|-----------|------------|----------|
| 96        | 191        | 82       |
|           |            | 301      |
|           | 1,0        | 1,1      |
|           |            | 0,9      |

Die beiden nach der Voraufbereitung aus der Feldprobe parallel entnommenen Laborproben weisen völlig unterschiedliche Gehalte auf. Während die Laborprobe „B“ (untere Zeile) die „gewohnten“ Gehalte liefert, ist in Laborprobe „A“ (obere Zeile) der Gehalt um zwei Größenordnungen überhöht und noch dazu schlecht bestimmbar, wie die große Streuung der Messwerte (82 und 302) zeigt. Daraus ist abzuleiten, dass ein (scheinbar sehr selten anzutreffender) kompakter Quecksilberträger beim Verjüngen in die Laborprobe „A“ gelangte und vermahlen wurde. Unter der Annahme, dass der unbekannte Quecksilberträger zu 50 % aus Quecksilber bestand, reicht ein Partikel von ca. 50 µg um einen Gehalt von 82 mg/kg TS in der aufgeschlossenen Menge von 300 mg zu verursachen. Scheinbar ist es nicht gelungen, den unbekanntem Träger in Partikel aufzumahlen, die einen Bruchteil von 50 µg wiegen, um eine „homogene“ Verteilung in der Analysenprobe zu erreichen.

Dieser Quecksilberwert ist der einzige Wert in der ganzen Untersuchung (alle Versuche, alle Parameter), der unter dem Verdacht steht, ein Ausreißer zu sein, in dem Sinn, dass seine



Einrechnung in das Ergebnis, den Mittelwert vom unbekanntem wahren Wert (Erwartungswert) eher entfernt als annähert. Es ist nicht möglich abzuleiten, ob die Elimination dieses Werts oder das Beibehalten den „richtigeren“ Mittelwert ergibt. Sollte durchschnittlich alle 20 Proben ein derartiger hoher Wert auftreten, wäre es falsch, diesen Wert aus der Reihe zu eliminieren. Ist dieser Wert wirklich ein „Ausreißer“, der alle 100 Proben oder seltener auftritt (und somit sein Beitrag zum Mittelwert und Erwartungswert vernachlässigbar ist), wäre seine Elimination richtig. Es ist zu prüfen, ob derartige „Ausreißer“ regelmäßig und mit welcher Häufigkeit auftreten, um den Beitrag zum Gesamtgehalt abschätzen zu können.

Auf Grund dieser Ungewissheit wurden zwei Auswertungen für Quecksilber gerechnet. Die Variante, die mit dem Stern versehen ist, wurde unter Elimination des betreffenden Werts gerechnet. Es ist nicht möglich einer Variante den Vorzug zu geben.

Die zweite Unsicherheit für die Ergebnisse bei Quecksilber ist der unbekanntem Beitrag der Batterien zur Quecksilberfracht. Auf Grund der weit gestreuten Herkunft der Batterien, die aus den Proben ausgeklaut wurden, ist es nicht im notwendigen Umfang möglich zu bestimmen, welchen Standards bezüglich Quecksilbergehalt diese Batterien entsprechen sollten bzw. welche sie einhalten. Ein Teil der Batterien im Abfall sind solche, die in Klein geräten (z.B. Spielzeug, Taschenrechner, Uhren) aus dem asiatischen Raum importiert wurden. Es ist unklar, ob diese Batterien die Anforderungen erfüllen. Es war nicht möglich, im Rahmen dieses Projektes auch die Quecksilbergehalte der aussortierten Batterien zu bestimmen. Der Beitrag der Batterien zu den Quecksilberfrachten der Güter wurde daher nicht berücksichtigt.

Auf Grund der beschriebenen Unsicherheiten bei der Bestimmung der Quecksilbergehalte und des unsicheren Beitrags der Batterien wurde bei den Versuchen Kirchdorf und Wien auf die Untersuchung von Quecksilber verzichtet. Für die Bilanzierung von Quecksilber müssten in Voruntersuchungen diese Fragen geklärt werden.

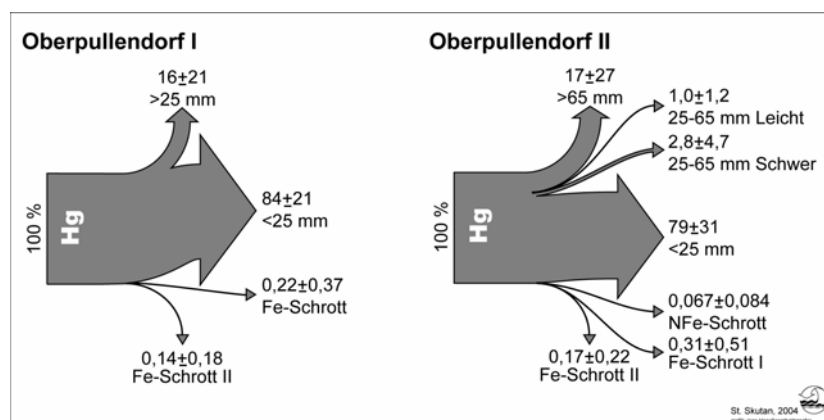


Abbildung 4-56: Stoffbilanzen für Quecksilber ohne „Ausreißer“-Elimination (siehe Text)

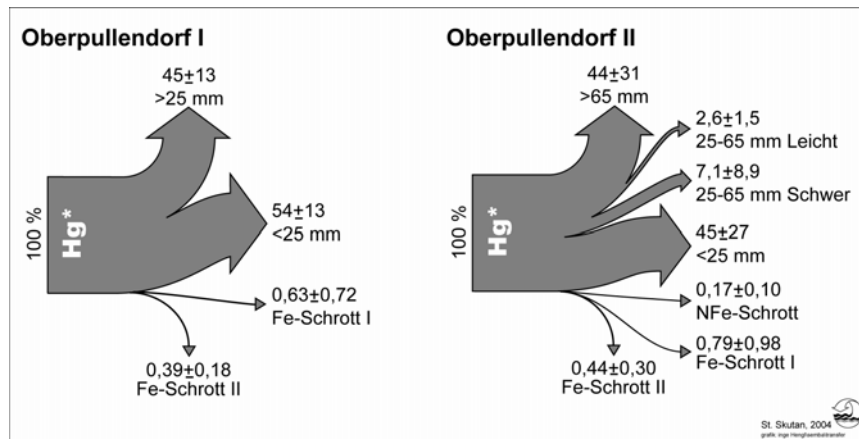


Abbildung 4-57: Stoffbilanzen für Quecksilber mit „Ausreißer“-Elimination (siehe Text)

Tabelle 4-213: Transferkoeffizienten für Quecksilber, Vorerhebung:

|                         | TK    |
|-------------------------|-------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,082 |
| Rotteinput              | 0,30  |
| Schrott                 | 0,04  |

Tabelle 4-214: Quecksilbergehalt des Inputs (Restmüll) berechnet mg/kg FS:

| Oberpullendorf I     | Oberpullendorf II     | Kirchdorf | Wien | Vorerh. |
|----------------------|-----------------------|-----------|------|---------|
| 1,8±2,2<br>0,6±0,17* | 1,9±2,3<br>0,74±0,43* | ---       | ---  | 1,8     |

\* Elimination eines „Ausreißers“ beim Rotteinput

Tabelle 4-215: Quecksilbergehalt des Inputs (Restmüll) berechnet mg/kg TS:

| Oberpullendorf I      | Oberpullendorf II    | Kirchdorf | Wien | Vorerh. |
|-----------------------|----------------------|-----------|------|---------|
| 2,8±3,6<br>1,0±0,27*± | 3,0±3,7<br>1,2±0,68* | ---       | ---  | 2,6     |

\* Elimination eines „Ausreißers“ beim Rotteinput

Tabelle 4-216: Vergleich der Quecksilbergehalte aller analysierten Güter; Werte in mg/kg TS

|                         | OPI   |                 | OP II   |                 | Kirchdorf |                 | Wien   |                 | Vorerh. |
|-------------------------|-------|-----------------|---------|-----------------|-----------|-----------------|--------|-----------------|---------|
|                         | Gut   | C <sub>Hg</sub> | Gut     | C <sub>Hg</sub> | Gut       | C <sub>Hg</sub> | Gut    | C <sub>Hg</sub> |         |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 0,78            | >65     | 1,2             | >50 L     | ---             | >250   | ---             | 0,56    |
|                         |       |                 | 25-65 L | 0,51            | >50 S     | ---             | 50-250 | ---             |         |
|                         |       |                 | 25-65 S | 0,89            |           |                 |        |                 |         |
| Rotteinput              | <25   | 1,4             | <25     | 1,4             | <50       | ---             | <50    | ---             | 1,5     |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 0,50            | Fe I    | 0,50            | Fe        | ---             | Fe     | ---             | 3,3     |
|                         | Fe II | 0,24            | Fe II   | 0,24            |           |                 |        |                 |         |
| NFe-Schrott             |       |                 | NFe     | 0,28            |           |                 | NFe    | ---             | ---     |



#### 4.5.14 Nickel

Bei Nickel ist ähnlich dem Chrom der Transfer in den Fe-Schrott auf Grund der Magnetabscheidung rostfreier Stähle zu erkennen. Verstärkt wird dieser Transfer durch NiCd- und NiMH-Akkus. Die Anlage Kirchdorf fällt dabei wegen ihrer ineffektiven Magnetabscheidung wie bei Cadmium, Chrom und Eisen als Ausnahme auf. Der vergleichsweise hohe Nickelgehalt der Fraktion >50 mm Schwer (270 der 320 mg/kg TS in metallischer Form) ist die Folge.

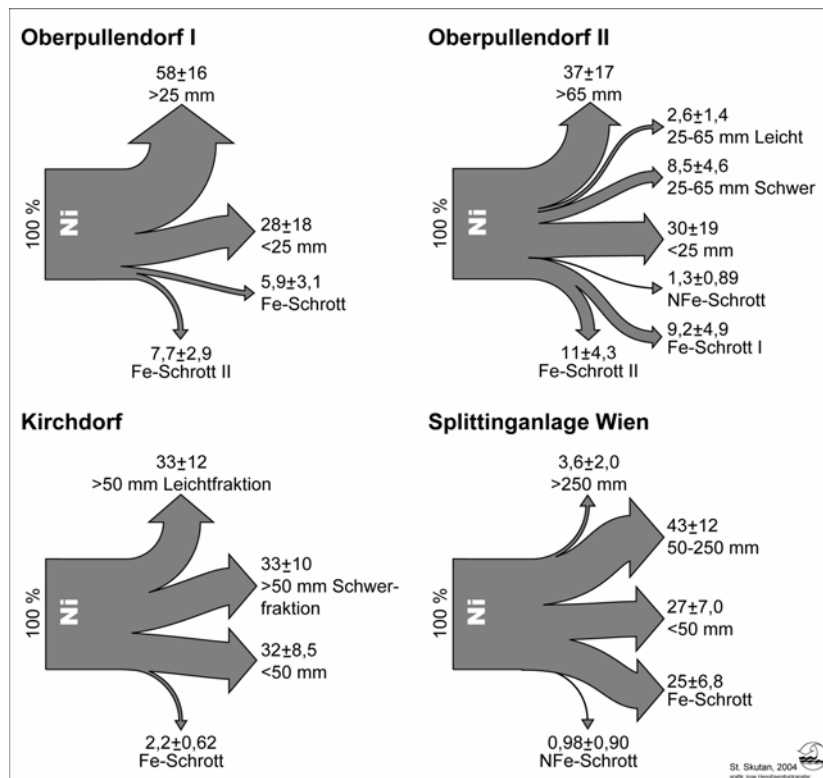


Abbildung 4-58: Stoffbilanzen für Nickel

Tabelle 4-217: Transferkoeffizienten für Nickel, Vorerhebung:

|                         | TK   |
|-------------------------|------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,28 |
| Rotteinput              | 0,42 |
| Schrott                 | 0,32 |

Tabelle 4-218: Nickelgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet mg/kg FS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien    | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|---------|---------|
| 110 ± 35         | 110 ± 37          | 110 ± 24  | 79 ± 17 | 40      |



Tabelle 4-219: Nickelgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet mg/kg TS:

| Oberpullendorf I | Oberpullendorf II | Kirchdorf | Wien   | Vorerh. |
|------------------|-------------------|-----------|--------|---------|
| 180±57           | 170±60            | 160±36    | 110±23 | 57      |

Tabelle 4-220: Vergleich der Nickelgehalte aller analysierten Güter; Werte in mg/kg TS

|                         | OP I  |                 | OP II   |                 | Kirchdorf |                 | Wien   |                 | Vorerh.         |
|-------------------------|-------|-----------------|---------|-----------------|-----------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|
|                         | Gut   | C <sub>Ni</sub> | Gut     | C <sub>Ni</sub> | Gut       | C <sub>Ni</sub> | Gut    | C <sub>Ni</sub> | C <sub>Ni</sub> |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 180             | >65     | 150             | >50 L     | 130             | >250   | 55              | 67              |
|                         |       |                 | 25-65 L | 74              | >50 S     | 320             | 50-250 | 110             |                 |
|                         |       |                 | 25-65 S | 152             |           |                 |        |                 |                 |
| Rotteinput              | <25   | 133             | <25     | 133             | <50       | 140             | <50    | 63              | 63              |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 860             | Fe I    | 860             | Fe        | 150             | Fe     | 660             | 1.000           |
|                         | Fe II | 870             | Fe II   | 870             |           |                 |        |                 |                 |
| NFe-Schrott             |       |                 | NFe     | 310             |           |                 | NFe    | 730             | ---             |

#### 4.5.15 Blei

Die Transferkoeffizienten in die heizwertreichen Fraktionen sind höher als in den Vorerhebungen abgeschätzt. (Der Input-Bezug der Transferkoeffizienten in der Vorerhebung wirkte sich nachteilig auf die Vorhersage aus.) Die Analysenergebnisse der Güter zeigen, dass Überhöhungen der Blei-Konzentrationen gegenüber dem Rechenwert der Vorerhebungen bei den heizwertreichen Fraktionen vor allem auf metallische Anteile zurückzuführen sind. Metallische Anteile von Blei in heizwertreichen Fraktionen sind vor allem Bleisäume von Vorhängen, Teile von Starterbatterien und Wuchtblei, das sich in großen Gemengteilen (meist Textilien) verhakt hat.



Tabelle 4-221: Bedeutung metallischen Bleis in MBA-Outputgütern; Werte in mg/kg TS

| Heizwertreiche Fraktionen |            |                | Rottematerialien    |            |                |
|---------------------------|------------|----------------|---------------------|------------|----------------|
|                           | metallisch | „Hintergrund“* |                     | metallisch | „Hintergrund“* |
| <b>Oberpullend.</b>       |            |                | <b>Oberpullend.</b> |            |                |
| >25 mm                    | 340        | 350            | <25 mm              | 130        | 270            |
| >65 mm                    | 20         | 280            |                     |            |                |
| 25-65 mm L                | 10         | 150            | <b>Kirchdorf</b>    |            |                |
| 25-65 mm S                | 600        | 600            | <50 mm              | 180        | 730            |
|                           |            |                |                     |            |                |
|                           |            |                | <b>Wien</b>         |            |                |
| <b>Kirchdorf</b>          |            |                | <50 mm              | 130        | 160            |
| >50 mm L                  | 50         | 190            |                     |            |                |
| >50 mm S                  | 550        | 240            | <b>Mittelwert</b>   |            | <b>390</b>     |
|                           |            |                |                     |            |                |
| <b>Wien</b>               |            |                |                     |            |                |
| >250 mm                   | 90         | 310            |                     |            |                |
| 50-250 mm                 | 230        | 170            |                     |            |                |
|                           |            |                |                     |            |                |
| <b>Mittelwert</b>         |            | <b>290</b>     |                     |            |                |

\*Es ist festzuhalten, dass diese Differenzierung auf der Sortierung im Zuge der Probenaufbereitung basiert. Nachdem die Sortierung nicht vollständig sein kann, ist die Aufteilung in Wahrheit noch weiter in Richtung metallischer Teile verschoben, als gemessen wurde.

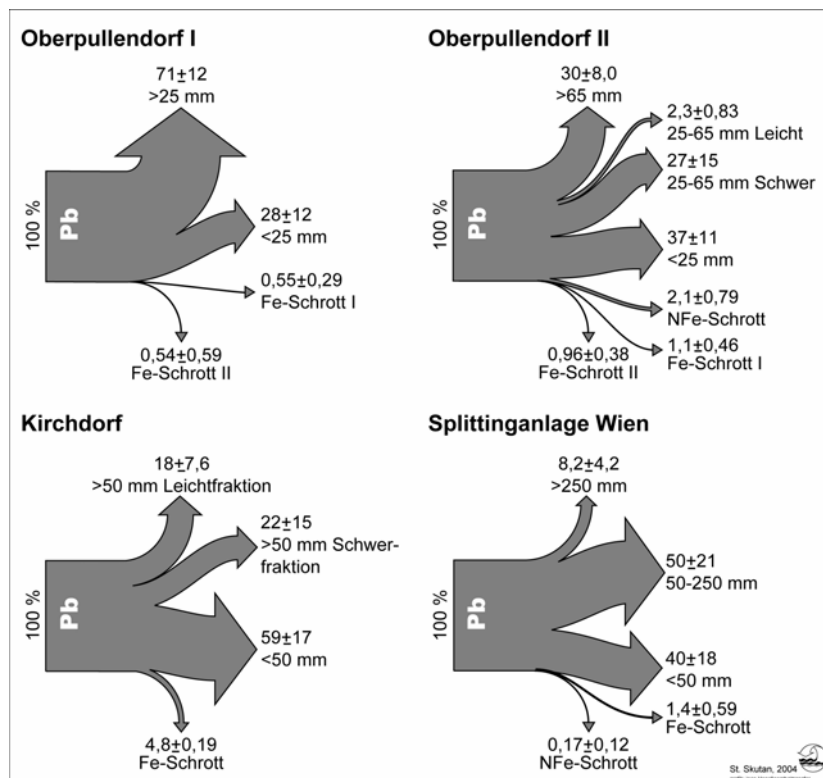


Abbildung 4-59: Stoffbilanzen für Blei



Tabelle 4-222: Transferkoeffizienten für Blei, Vorerhebung:

|                         | <b>TK</b> |
|-------------------------|-----------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,10      |
| Rotteinput              | 0,63      |
| Schrott                 | 0,04      |

Tabelle 4-223: Bleigehalt des Inputs (Restmüll) berechnet mg/kg FS:

| <b>Oberpullendorf I</b> | <b>Oberpullendorf II</b> | <b>Kirchdorf</b> | <b>Wien</b> | <b>Vorerh.</b> |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------|
| 360±140                 | 270±69                   | 400±150          | 250±100     | 540            |

Tabelle 4-224: Bleigehalt des Inputs (Restmüll) berechnet mg/kg TS:

| <b>Oberpullendorf I</b> | <b>Oberpullendorf II</b> | <b>Kirchdorf</b> | <b>Wien</b> | <b>Vorerh.</b> |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------|
| 570±220                 | 420±110                  | 580±230          | 340±140     | 770            |

Tabelle 4-225: Vergleich der Bleigehalte aller analysierten Güter; Werte in mg/kg TS

|                         | OPI   |                 | OP II   |                 | Kirchdorf |                 | Wien   |                 | Vorerh.         |
|-------------------------|-------|-----------------|---------|-----------------|-----------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|
|                         | Gut   | C <sub>Pb</sub> | Gut     | C <sub>Pb</sub> | Gut       | C <sub>Pb</sub> | Gut    | C <sub>Pb</sub> | C <sub>Pb</sub> |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 690             | >65     | 300             | >50 L     | 240             | >250   | 400             | 210             |
|                         |       |                 | 25-65 L | 160             | >50 S     | 790             | 50-250 | 400             |                 |
|                         |       |                 | 25-65 S | 1.200           |           |                 |        |                 |                 |
| Rotteinput              | <25   | 400             | <25     | 400             | <50       | 910             | <50    | 290             | 250             |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 250             | Fe I    | 250             | Fe        | 120             | Fe     | 120             | 350             |
|                         | Fe II | 200             | Fe II   | 200             |           |                 |        |                 |                 |
| NFe-Schrott             |       |                 | NFe     | 1.200           |           |                 | NFe    | 270             | ---             |

#### 4.5.16 Zink

Bei den Zinkgehalten der Güter ist wie bei Kupfer besonders deutlich, dass die Rechenwerte der Vorerhebungen für heizwertreiche Fraktionen und Rottematerialien eher den Hintergrundgehalten als den Durchschnittsgehalten entsprechen.





Tabelle 4-226: Bedeutung metallischen Zinks in MBA-Outputgütern; Werte in mg/kg TS

| Heizwertreiche Fraktionen |            |                | Rottematerialien    |            |                |
|---------------------------|------------|----------------|---------------------|------------|----------------|
|                           | metallisch | „Hintergrund“* |                     | metallisch | „Hintergrund“* |
| <b>Oberpullend.</b>       |            |                | <b>Oberpullend.</b> |            |                |
| >25 mm                    | 2.300      | 1.000          | <25 mm              | 480        | 1.000          |
| >65 mm                    | 580        | 1.500          |                     |            |                |
| 25-65 mm L                | 200        | 1.600          | <b>Kirchdorf</b>    |            |                |
| 25-65 mm S                | 4.200      | 1.000          | <50 mm              | 2.200      | 700            |
|                           |            |                |                     |            |                |
|                           |            |                | <b>Wien</b>         |            |                |
| <b>Kirchdorf</b>          |            |                | <50 mm              | 820        | 500            |
| >50 mm L                  | 600        | 1.000          |                     |            |                |
| >50 mm S                  | 3.700      | 1.600          | <b>Mittelwert</b>   |            | <b>730</b>     |
|                           |            |                |                     |            |                |
| <b>Wien</b>               |            |                |                     |            |                |
| >250 mm                   | 190        | 530            |                     |            |                |
| 50-250 mm                 | 670        | 800            |                     |            |                |
|                           |            |                |                     |            |                |
| <b>Mittelwert</b>         |            | <b>1.200</b>   |                     |            |                |

\*Es ist festzuhalten, dass diese Differenzierung auf der Sortierung im Zuge der Probenaufbereitung basiert. Nachdem die Sortierung nicht vollständig sein kann, ist die Aufteilung in Wahrheit noch weiter in Richtung metallischer Teile verschoben, als gemessen wurde.

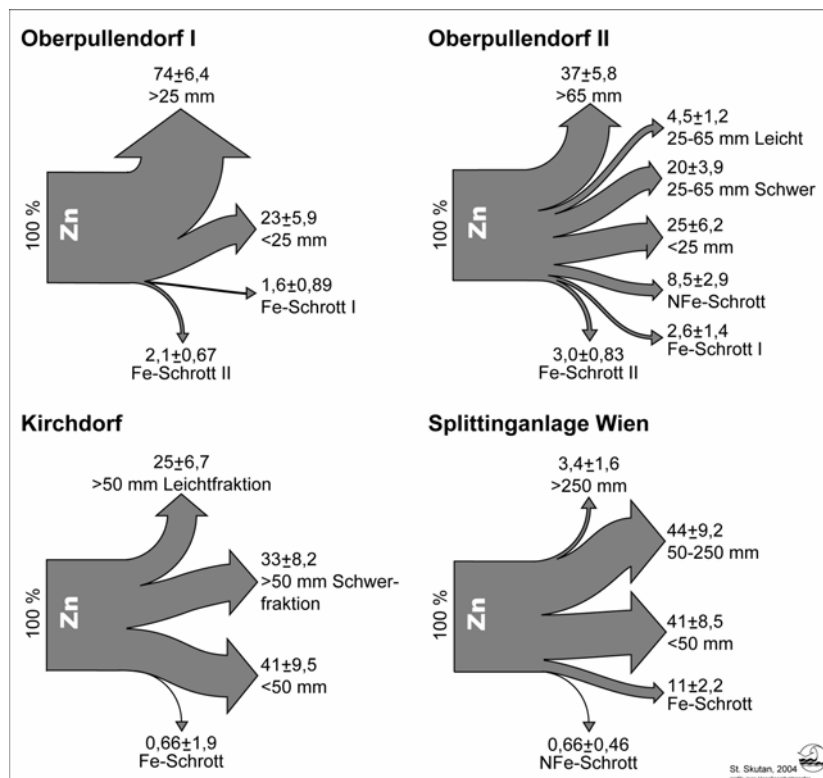


Abbildung 4-60: Stoffbilanzen für Zink



Tabelle 4-227: Transferkoeffizienten für Zink, Vorerhebung:

|                         | <b>TK</b> |
|-------------------------|-----------|
| Heizwertreiche Fraktion | 0,37      |
| Rotteinput              | 0,51      |
| Schrott                 | 0,13      |

Tabelle 4-228: Zinkgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet mg/kg FS:

| <b>Oberpullendorf I</b> | <b>Oberpullendorf II</b> | <b>Kirchdorf</b> | <b>Wien</b> | <b>Vorerh.</b> |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------|
| 1.600±340               | 1.500±230                | 1.900±340        | 1.100±190   | 600            |

Tabelle 4-229: Zinkgehalt des Inputs (Restmüll) berechnet mg/kg TS:

| <b>Oberpullendorf I</b> | <b>Oberpullendorf II</b> | <b>Kirchdorf</b> | <b>Wien</b> | <b>Vorerh.</b> |
|-------------------------|--------------------------|------------------|-------------|----------------|
| 2.600±540               | 2.400±360                | 2.700±500        | 1.500±260   | 860            |

Tabelle 4-230: Vergleich der Zinkgehalte aller analysierten Güter; Werte in mg/kg TS

|                         | OP I  |                 | OP II   |                 | Kirchdorf |                 | Wien   |                 | Vorerh.         |
|-------------------------|-------|-----------------|---------|-----------------|-----------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|
|                         | Gut   | C <sub>Zn</sub> | Gut     | C <sub>Zn</sub> | Gut       | C <sub>Zn</sub> | Gut    | C <sub>Zn</sub> | C <sub>Zn</sub> |
| Heizwertreiche Fraktion | >25   | 3.300           | >65     | 2.100           | >50 L     | 1.600           | >250   | 720             | 790             |
|                         |       |                 | 25-65 L | 1.800           | >50 S     | 5.300           | 50-250 | 1.500           |                 |
|                         |       |                 | 25-65 S | 5.200           |           |                 |        |                 |                 |
| Rotteinput              | <25   | 1.500           | <25     | 1.500           | <50       | 2.900           | <50    | 1.300           | 660             |
| Fe-Schrott              | Fe I  | 3.500           | Fe I    | 3.500           | Fe        | 750             | Fe     | 4.100           | 2.000           |
|                         | Fe II | 3.400           | Fe II   | 3.400           |           |                 |        |                 |                 |
| NFe-Schrott             |       |                 | NFe     | 28.000          |           |                 | NFe    | 4.400           | ---             |



## 4.6 Organische Verbindungen - Indikatorsubstanzen

### 4.6.1 Zusammenstellung von Kriterien für die Auswahl von Substanzen zur Beschreibung der Leistung einer MBA

Die Leistungen einer MBA definieren sich über die Ziele, die mit der Behandlung verfolgt werden. Dementsprechend sind für unterschiedliche Aspekte der MBA und MA verschiedene Kriterien heranzuziehen, um die Leistungen zu beschreiben. Die Bewertung der Leistungen ist standpunktabhängig.

#### 4.6.1.1 Kriterien auf Basis des Abfallwirtschaftsgesetzes 2002 (AWG 2002)

Als Kriterien zur Auswahl von organischen Stoffen und Stoffgruppen des Restmülls und anderer MBA-Inputs auf Basis der Ziele des AWG werden gewählt:

- Toxizität
- Treibhauswirksamkeit
- Ozonzerstörungspotential
- Versauerungspotential
- Eutrophierungspotential
- Geruch
- Unwandelbarkeit in Stoffe mit in vorigen Punkten angeführten Eigenschaften
- Brennwert
- Stabilitätsparameter
- Einfluss auf Lagerungsdichte in Deponien
- Marktwert separierter Fraktionen

Anmerkung: Die Kriterien „Versauerungspotential“ und „Eutrophierungspotential“ werden maßgeblich durch anorganische Stoffe ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_x$ , etc.) bestimmt. Dies werden trotzdem aufgenommen, da z.B.  $\text{NH}_3$  und  $\text{NO}_x$  bei der mechanisch-biologischen Behandlung, einer anschließenden Behandlung oder Ablagerung eines MBA-Outputs aus abfallbürtigen Stickstoffverbindungen entstehen können.

Das Vorhandensein/Freisetzungspotential toxischer Stoffe ist maßgeblich für die Ziele (1) des Schutzes von Mensch und Umwelt, (2) der Vermeidung von Luftschadstoffen, (3) der Unbedenklichkeit des Einsatzes von Abfällen zur stofflichen Verwertung bzw. die Unbedenklichkeit der daraus erzeugten Produkte und (4) der Gefährdung zukünftiger Generationen durch abgelagerte Abfälle. Obwohl sich die Toxizität von Stoffen in verschiedensten Wirkungen äußern kann, wird dieser Aspekt hier nicht zu einer Untergliederung benutzt. In Zusammenhang mit organischen Verbindungen in abgelagerten Abfällen ist neben den zum Zeitpunkt der Ablagerung enthaltenen Stoffen auf Neubildungen Bedacht zu nehmen, die unter den Ablagerungsbedingungen entstehen können (z.B. Monomere von Kunststoffen wie Bisphenol A aus Polycarbonat und Epoxidharzen).

Im Hinblick auf die Vermeidung von Luftschadstoffen inklusive klimarelevanter Gase sind abgesehen von der Toxizität insbesondere ozonzerstörende Gase, Treibhausgase, Gase mit Versauerungs- und Eutrophierungswirkung und geruchsintensive Gase zu berücksichtigen. Von Belang sind die in den Abfällen enthaltenen Schadgase und flüchtige Verbindungen



ebenso wie die bei der mechanisch-biologischen Behandlung und allen nachgeschalteten Behandlungs- oder Verwertungsschritten bzw. der Ablagerung potentiell neu gebildeten.

Für die Beschreibung der Schonung von Ressourcen ist im Zusammenhang mit organischen Substanzen vorrangig der Brennwert (Ressource Energieinhalt) und der Einfluss auf die Einbaudichte des Deponiematerials (Ressource Deponieraum) zu nennen. Die Separation von organischen Stoffen aus Restmüll mit dem Ziel einer stofflichen Verwertung ist derzeit weder für Haupt- noch Spurenbestandteile gängige Praxis in der mechanisch-biologischen Restmüllbehandlung. Einen Parameter für die Schonung von Ressourcen durch stoffliche Verwertung, welcher die Konformität mit den anderen Zielen (Unbedenklichkeit wie die des Primärrohstoffs) einschließt und die Knappheit der Ressource zum Ausdruck bringt, stellte gegebenenfalls der Marktwert einer separierten Fraktion dar.

Tabelle 4-231 gibt Beispiele für stoffliche Parameter, mit welchen die oben ausgewählten Kriterien konkretisiert werden können.

Grundsätzlich sind nach den Zielen des AWG alle organischen Schadstoffe und alle Verbindungen, die unter dem Verdacht stehen, Schadstoffe zu sein, zu berücksichtigen.

*Tabelle 4-231: Beispiele für Parameter, um die aus den Zielen des AWG abgeleiteten Kriterien für die Leistung einer MBA zu konkretisieren*

|   |  |
|---|--|
| Toxizität   | PCDD und PCDF, PCB, Biozide, Flammschutzmittel, PAK, Substanzen mit Hormonwirkung (z.B. Nonylphenol, Bisphenol A), Desinfektionsmittelwirkstoffe |
| Treibhauswirksamkeit  | Methan, FCKW, Halone, H-FCKW   |
| Ozonzerstörungspotential  | FCKW, Halone   |
| Geruch  | Terpene, niedermolekulare Säuren, Alkohole, Thioalkohole, Ketone, Amine, Benzolderivate  |
| Stoffe mit Unwandelbarkeit in Stoffe mit in vorigen Punkten angeführter Wirkung | Substrate für Mikroorganismen speziell methanogene Bakterien, hydrolysierbare Polymere (Polycarbonat, Epoxidharze)                               |
| Brennwert   | Kunststoffe, schwer abbaubare Organik (Huminstoffe, Lignin)  |
| Einfluss auf Einbaudichte in Deponien   | elastische Materialien, Kunststoffe, biologisch abbaubare Substanzen   |
| Marktwert von Fraktionen  | Wertstoffgehalt (z.B. Kunststoffe, Zellstoff und Holzstoff)  |



#### 4.6.1.2 Kriterien zu Gruppenbildung auf Basis physikalischer, chemischer und biologischer Stoffeigenschaften

Die zur Beschreibung der Leistungen einer MBA möglichen Stoffe und Stoffgruppen sind zweckmäßigerweise nach chemischen, physikalischen und biologischen Eigenschaften weiter zusammenzufassen. Eigenschaften zur Gruppierung von Stoffen und Auswahl von Indikatorsubstanzen, die in Zusammenhang mit der mechanisch-biologischen Restmüllbehandlung Bedeutung haben, sind im Folgenden aufgezählt.

- Flüchtigkeit, Dampfdruck<sup>1</sup>
- Wasser-, Fettlöslichkeit (Verteilungskoeffizient Octanol/Wasser)
- Sorptionsverhalten gegenüber lipophilen bzw. polaren Oberflächen
- biolog. Abbaubarkeit (Halbwertszeit)
- Bildungsbedingungen für Neubildung (z.B. Redox-Potential, pH-Wert)
- Möglichkeit zur kurzfristige Neubildung
- Langfristiges Nachlieferungsverhalten
- Persistenz
- häufig beobachtetes Niveau der Konzentration

<sup>1</sup> Nicht immer wird die Flüchtigkeit über die Verdunstungszahlen (nach DIN 53170) beschrieben sondern über Siedepunkt oder Dampfdruck bei 20°C.

Die im Folgenden genannten Gruppen erscheinen für die Beschreibung der Leistungen der MBA relevant. Es ist möglich einzelne Stoffe mehreren Gruppen zuzuordnen.

##### *Sehr leicht flüchtige Verbindungen (Siedepunkt <50°C)*

In dieser Gruppe werden Kohlenwasserstoffe und (teil-) halogenierte Kohlenwasserstoffe zusammengefasst, die Siedepunkte unter 50°C haben. Diese Verbindungen erfahren bei der mechanischen Aufbereitung einen Transfer in die Abluft. Der Verbleib im Feststoffstrom ist nur möglich, wenn die Stoffe adsorbiert, in geschlossenen Behältnissen (Spraydosen, Lackdosen, Flaschen) oder geschlossenzelligen Schaumstoffen vorliegen.

Beispiele sind: Methan, Freone, Halone

Eine weitere Unterteilung dieser Gruppe in halogenierte und nicht halogenierte Verbindungen bzw. die Betrachtung von Einzelsubstanzen ist notwendig, wenn Fragen der Treibhauswirksamkeit bzw. Ozonzerstörung oder das Verhalten bei thermischer Abluftreinigung (mögliche Halogenwasserstoffbildung, PCDD- und PCDF-Bildung) betrachtet werden. Für Fragen der Rotte und Ablagerung ist die Unterteilung in „abfallbürtig“ und „neu gebildet“ (z.B. Methan) zweckmäßig.

##### *Leicht flüchtige organische Verbindungen (Siedepunkt 50-260°C)*

In dieser Gruppe werden Verbindungen zusammengefasst, die in der Gasphase über dem Abfall zu finden sind aber nicht in kurzer Zeit vollständig aus dem Feststoff ausgasen. Diese Verbindungen sind sowohl in der Abluft der mechanischen Behandlung zu finden, wie auch im Feststoffstrom und im Rotteabgas bzw. Deponiegas. Die Möglichkeit zur weiteren Untergliederung wie sie bei den sehr leicht flüchtigen Verbindungen beschrieben ist, kann auch auf diese Gruppe übertragen werden.



Beispiele sind: Lösungsmittel (Benzine d.h. niedere Alkane, Toluol, Xylol, Aceton, Trichlorethan), Terpene, niedrige Alkohole, Säuren, Ketone

#### *Schwer flüchtige Verbindungen*

In dieser Gruppe werden die Verbindungen zusammengefasst, die in der Gasphase nicht oder in geringster Menge zu finden sind. (Trotzdem können diese Verbindungen in Abgasen enthalten sein in Form von Staub.)

Beispiele sind: PCDD, PCDF, PCB, bromierte Flammschutzmittel

#### *Auswaschbare Substanzen*

Auswaschbare Substanzen sind solche, die unter Deponiebedingungen (gebildet werden und) die DOC-Fracht des Sickerwassers verursachen.

Beispiele sind: Vorläufer von Huminstoffen

#### *Persistente Schadstoffe*

In dieser Gruppe finden sich die „klassischen POPs“ und alle Verbindungen mit ähnlichen Eigenschaften. Kennzeichen sind Schwerflüchtigkeit, schlechte Wasserlöslichkeit, gute Fettlöslichkeit und hohe Persistenz. In Tabelle 4-232 sind Größenordnungen der relevanten Eigenschaften angegeben.

*Tabelle 4-232: Ausgewählte Eigenschaften von persistenten organischen Schadstoffen*

| Molmasse | log P <sub>ow</sub> | Löslichkeit in Wasser | Dampfdruck bei 20°C | Geschwindigkeit s-konstante für Abbau im Boden |
|----------|---------------------|-----------------------|---------------------|--|
| [g/mol]  | [1]                 | [g/l]                 | [Pa]                | [s <sup>-1</sup> ]                             |
| 300-600  | >3                  | <10 <sup>-3</sup>     | <10 <sup>-2</sup>   | <10 <sup>-7</sup>                              |

Beispiele sind: POP, PCB, PCDD, PCDF, bromierte Flammschutzmittel

#### *Leicht abbaubare Hauptbestandteile*

Zu den leicht abbaubaren Hauptbestandteilen zählen alle Stoffe, die während der Rotte biologisch abgebaut werden können und beim Abbau zu einem messbaren Schwund an Masse und Volumen des Abfalls führen.

Beispiele sind: Kohlenhydrate, Proteine, Lipide

#### *Nicht abbaubare Hauptbestandteile*

Unter den nicht abbaubaren Hauptbestandteilen werden alle Stoffe zusammengefasst, die weder in der Rotte noch in der Deponie in einem Ausmaß biologisch abgebaut werden, dass ein messbarer Schwund an Masse und Volumen auftritt.

Beispiele sind: Kunststoffe



### *Industriechemikalien*

Unter „Industriechemikalien“ wird eine Gruppe von Verbindungen zusammengefasst, die als Begleiter oder als Bestandteil von Polymeren in vielen Gemengteilen zu finden sind. Es sind Verbindungen, die mengenmäßig die wichtigsten Grundstoffe der chemischen Industrie sind. In die Gruppe aufgenommen werden nur Verbindungen, die auf Grund einer oder mehrerer Eigenschaften als Schadstoffe wirken können z.B. weil diese aus dem Trägermaterial ausdiffundieren oder auf Grund von Polymerspaltung immer wieder nachgeliefert werden können. Charakteristisch ist die Freisetzung über einen langen Zeitraum, die zu einem Fließgleichgewicht führen kann (gleich bleibendes Niveau der Konzentration im Abfall durch stetige Nachlieferung und Abbau).

Beispiele sind: Bisphenol A, Nonylphenol

#### 4.6.1.3 Kriterien zu Auswahl von Indikatorsubstanzen

Die Auswahl von Stoffen oder Stoffgruppen, die als Indikatoren für die jeweilige Gruppe Verwendung finden können, erfolgt nach folgenden Kriterien:

- repräsentative Eigenschaften bezüglich der für die Gruppe charakteristischen Merkmale
- einfache, möglichst kostengünstige Bestimmung

#### **4.6.2 Auswahl von Parametern (Stoffe und Stoffgruppen) und Indikatoren**

Für die Beurteilung der Leistungen einer MBA sind Parameter zu wählen, die mit den Behandlungseffekten der MBA in Zusammenhang zu bringen sind.

Im Folgenden werden für die mechanische Aufbereitung, biologische Behandlung und Deponierung getrennt Parameter gesucht, um die Leistungen zu beschreiben. Es wird auch versucht, nicht nur Stoffe und Stoffgruppen zu betrachten sondern auch Erzeugnisse als Abfallbestandteile, die direkt mit dem Vorkommen bestimmter Stoffe in Zusammenhang stehen. Sind Stoffe direkt an bestimmte visuell erkennbarer Produkte geknüpft, wird es möglich, ohne quantitative chemische Analyse (und damit unter Umgehung wesentlicher Probleme bei der Probenahme und Aufbereitung) die Menge und das Verhalten von Stoffen zu beschreiben. Wie für die Metalle, so gilt auch für die organischen Verbindungen, dass für die Charakterisierung des Verhaltens in einer MBA oder MA sowie für die quantitative chemische Analyse (zur Planung von Probenahme und Probenaufbereitung) die Information über das Vorkommen des betreffenden Stoffes in Menge und Verteilung im Gemenge unerlässlich ist.

##### 4.6.2.1 Mechanische Aufbereitung

In der mechanischen Behandlung findet keine Umwandlung von Stoffen statt, sondern ein indirekt gesteuerter Transfer. Indirekt, weil der Transfer der Stoffe nicht unmittelbar von der chemischen Zusammensetzung der Gemengteile abhängt sondern von den für die mechanische Trennung relevanten Eigenschaften der Gemengteile. Besteht ein Zusammenhang zwischen der relevanten mechanischen Eigenschaft mit der Stoffkonzentration, so ist eine Anreicherung/Abreicherung der Stoffträger und damit der speziell darin enthaltenen Stoffe gegeben. Sind mehrere charakteristische Stoffe in einer Sorte Träger enthalten, kommt es zu einer „Kopplung“ im Transfer. In diesem Fall wäre es möglich einen Stoff als Indikator



sowohl für den Träger als auch für die anderen dafür charakteristischen Stoffe zu benutzen oder umgekehrt den Träger als Indikator für das Auftreten bestimmter Stoffe zu verwenden.

Im Bereich der Metalle kann die Abtrennung der NiCd-Akkus durch Magnetabscheidung als Beispiel gelten. Im Fe-Schrott der mechanischen Restmüllaufbereitung sind sie Indikatorprodukte (weil Träger) für Cadmium und Nickel. Der Transfer der an NiCd-Akkus gebundenen Nickelfracht ist mit der NiCd-Akkufracht des Schrotts und damit dessen Cadmiumfracht gekoppelt (für den Fall, dass sonst keine anderen relevanten Cadmium-Träger auftreten). Durch Sichtkontrolle bzw. Sortieranalyse lässt sich über das Vorkommen des Indikatorprodukts NiCd-Akku auf die Anwesenheit bzw. einen Frachtbeitrag von Cadmium und Nickel schließen. Gelingt eine Elementaranalyse eines Schrotts ohne Sortieren und separater Bestimmung (z.B. über die Stoffbilanz eines Stahlofens), kann umgekehrt ein hoher Cadmiumgehalt Indikator für das Vorhandensein von NiCd-Akkus im Schrott sein.

Für die Betrachtung der mechanischen Behandlung sind die Abfallbestandteile nicht in Stoffgruppen ähnlicher chemischer Eigenschaften sondern in Gruppen von Gemengteilen mit ähnlichen mechanischen Eigenschaften einzuteilen, um Aussagen über das Verhalten treffen zu können. Als Kriterien der Gruppenbildung kommen daher nur definierte Eigenschaften in Hinblick auf die mechanische Behandlung in Frage. Eine Gruppe, die nach stofflichen Kriterien zusammengestellt ist, wird die mechanische Behandlung in den seltensten Fällen einheitlich durchlaufen.

Eine Ausnahme stellen leicht flüchtige Verbindungen dar. Ihr Transfer in die Abluft während der mechanischen Aufbereitung ist, sofern sie nicht in Behältnissen oder geschlossenzelligen Schaumstoffen eingeschlossen sind, abhängig von der Stoffeigenschaft Dampfdruck.

Relevante Eigenschaften für das Verhalten in der mechanischen Behandlung sind:

- Festigkeit, Elastizität, Spröde (Verhalten in schneidenden, schlagenden, quetschenden Zerkleinerungsaggregaten)<sup>1</sup>
- Trennbarkeit von Verbunden, Zerstörbarkeit von Behältnissen
- Korngröße, -masse und -form ev. in Abhängigkeit einer vorgeschalteten Zerkleinerung (Verhalten bei Siebung, Windsichtung, ballistischer Separation)<sup>1</sup>
- Anteil ferromagnetischer Werkstoffe (Abtrennbarkeit mit Magnetscheidern)
- Anteil elektrisch leitender aber nicht ferromagnetischer Werkstoffe (Abtrennbarkeit mit Wirbelstromabscheidern)

<sup>1</sup> Korngröße, -masse und -form hängen unmittelbar zusammen, weshalb sie hier gemeinsam genannt werden. Keine der gängigen Techniken der mechanischen Abfallaufbereitung ist in der Lage, spezifisch nur nach einem der drei Parameter die Gemengteile zu trennen. Beispielsweise ist der größte Durchmesser eines Teiles nicht unbedingt ausschlaggebend bei der Siebung, das Verhalten bei Windsichtung und ballistischer Separation ergibt sich aus dem Zusammenwirken aller drei Parameter.

Die Idee der mechanischen Behandlung (des Müllsplittings) gründet auf der unterschiedlichen Zusammensetzung von verschiedenen Korngrößenklassen bezüglich Brennbarkeit. In Tabelle 4-233 ist angegeben, welche Gemengteile sich welchen Fraktionen zuordnen lassen, wenn nach den oben genannten Kriterien mechanisch getrennt wird. Die Zuordnung ist nicht scharf,





Tabelle 4-233: Trennleistungen von „Abfallsplitting“ und Metallabscheidung

|   |          | Erzeugnisse<br>(Beispiele)   | Werkstoffe<br>(Beispiele)  | Stoffe<br>(Beispiele)  |
|---|----------|--|--|--|
| Zerkleinerbarkeit<br>(schlagend, quetschend)                      | gut      | gläserne, keramische Gegenstände<br>nasses Papier, nasse Pappe<br>Leichtmetall-Druckguss-Metall-<br>teile  | Glas, diverse<br>Keramiken,<br>Papier, Pappe,<br>Leichtmetall-<br>Gusslegierungen                              | diverse<br>silikatische Ver-<br>bindungen,<br>Kohlenhydrate,<br>Lignin             |
|   | schlecht | Kunststoffgegenstände, Textilien,<br>trockenes Papier, trockene Pappe  | Kunststoffe,<br>natürliche und<br>synthetische<br>Textilfasern,<br>Papier, Pappe,<br>Leder                     | PE, PP, PS,<br>PVC, PC und<br>andere Kunst-<br>stoffe,<br>Kohlenhydrate,<br>Lignin |
| Korngröße<br>(nach Vorzerkleinerung)                              | groß     | Textilien, Kunststoff-<br>verpackungen, -folien, andere<br>Kunststoffgegenstände des<br>täglichen Gebrauchs (z.B. Daten-<br>träger, Blumentöpfe), Zeitungen,<br>Zeitschriften, Kartons   | Kunststoffe,<br>natürliche und<br>synthetische<br>Textilfasern,<br>Papier, Pappe,<br>Leder                     | PE, PP, PS,<br>PVC, PC und<br>andere Kunst-<br>stoffe,<br>Kohlenhydrate,<br>Lignin |
|   | klein    | zerbrochene gläserne, keramische<br>Gegenstände, Fetzen von Papier<br>und Pappe, Küchenabfälle, Gras-<br>schnitt, Kehrgut  | Glas, diverse<br>Keramiken,<br>Papier, Pappe,<br>Leichtmetall-<br>Gusslegierungen                              | diverse<br>silikatische Ver-<br>bindungen,<br>Kohlenhydrate,<br>Lignin, Proteine   |
| ferromagnetischer<br>Werkstoffanteil                              | hoch     | Verpackungen und Verschlüsse<br>aus Stahlblech, Küchen- und<br>andere Haushaltsgeräte, Batterien,<br>Werkzeuge, Leiterplatten,<br>Schrauben, Nägel, Scharniere,<br>Uhren   | diverse<br>Stahlsorten und<br>Gusslegierungen<br>oft in Verbund<br>mit anderen<br>Metallen und<br>Kunststoffen | Eisen, Nickel,<br>Zink, Chrom<br>etc.  |
|   | null     | siehe „Korngröße“ „groß“ und<br>„klein“  |  |  |
| elektrisch leitender nicht ferro-<br>magnetischer Werkstoffanteil | hoch     | Verpackungen und Verschlüsse<br>aus Aluminiumblech, Leicht-<br>metallgeschirr, Präzisionsteile aus<br>Messing (z.B. Schüssel, Schalter)<br>Elektrolytkondensatoren, Halb-<br>zeug aus Aluminium, Kupfer,<br>Messing (Profile, Rohre, Bleche) | Aluminium<br>Kupfer<br>div. Leicht-<br>metall-<br>legierungen<br>Messing, Bronze                               | Aluminium,<br>Kupfer, Zink,<br>Zinn  |
|   | null     | siehe „Korngröße“ „groß“ und<br>„klein“  |  |  |



weil (1) die Aufzählungen nicht vollständig sein können und (2) innerhalb jeder aufgezählten Position Ausnahmen auftreten können. (vergl. Zerkleinerbarkeit von Papier, Pappe in Abhängigkeit des Wassergehalts)

Die aufgezählten für die mechanische Behandlung maßgeblichen Eigenschaften der Gemengteile sind die Grundlage für die Wirkungen der mechanischen Behandlung. Die Wirkungen können grundsätzlich zwei Behandlungszwecken zugeordnet werden, dem „Splitting“ und der „Metallabscheidung“. Unter Splitting werden hier alle Behandlungsarten zusammengefasst, welche die Trennung von heizwertreichen und heizwertarmen Bestandteilen zum Ziel haben.

In Tabelle 4-234 werden die beabsichtigten Wirkungen von Splitting und Metallabscheidung beschränkt auf organische Verbindungen mit den Kriterien zur Beurteilung nach den Zielen des AWG zusammengeführt.

*Tabelle 4-234: Beabsichtigte Wirkungen der mechanischen Behandlung im Vergleich mit den Zielen des AWG*

| <b>Kriterien abgeleitet aus Zielen des AWG</b>                     | <b>Splitting</b> | <b>Metallabscheidung</b> |
|--|------------------|--------------------------|
| Toxizität  | -                | -                        |
| Treibhauswirksamkeit   | -                | -                        |
| Ozonzerstörung   | -                | -                        |
| Versauerung  | -                | -                        |
| Eutrophierung  | -                | -                        |
| Geruch   | -                | -                        |
| Potential zur Bildung von Stoffen der oben genannten Eigenschaften | +                | -                        |
| Brennwert  | +                | -                        |
| Stabilitätsparameter   | +                | -                        |
| Einfluss auf Ablagerungsdichte                                     | +                | -                        |
| Marktwert abgetrennter Fraktionen                                  | - <sup>1</sup>   | -                        |

<sup>1</sup> in der derzeitigen Behandlungspraxis

Die Aufstellung zeigt, dass die Behandlungsabsicht der mechanischen Behandlung alleine die Ziele nur eingeschränkt berücksichtigt.

Da kein Abbau von Stoffen in der mechanischen Behandlung stattfindet, ist allein die Stoffverteilung (Transferkoeffizienten) zur Beurteilung geeignet. Die Bedeutung der Transferkoeffizienten ist allerdings nur in Zusammenhang mit den nachgeschalteten Prozessen (Rotte, Verbrennung) möglich. Besitzen die nachgeschalteten Prozesse bei allen Outputs gleiche Wirkung (z.B. vollständige Zerstörung des Stoffes), so ist der Transferkoeffizient bei der mechanischen Behandlung nicht von Belang.

#### *Toxizität, Treibhauswirksamkeit, Ozonzerstörung, und Geruch*

Es ist nicht möglich für diese Kriterien eine Auswahl einiger weniger Stoffe oder Stoffgruppen zu treffen, mit denen die Leistung der mechanischen Aufbereitung beschrieben werden kann. Es ist zu wenig bekannt über den Transfer dieser Stoffe bzw. über Kopplungen im Transfer dieser Stoffen mit anderen Stoffen. Der Transfer (und die Wirkung des nachfolgenden Prozesses auf den Stoff bzw. die Auswirkungen des Stoffes im nachfolgenden



Prozess) der einzelnen Stoffe ist zu prüfen, bis Informationen, die eine Zusammenfassung erlauben, vorliegen. Die Auswahl von Indikatorsubstanzen ist ebenfalls zum jetzigen Zeitpunkt nicht möglich.

An Hand der Verwendung einzelner Stoffe oder Stoffgruppen können wenige qualitative Aussagen getroffen werden. So ist bei der mechanischen Behandlung mit intensiver Vorzerkleinerung mit hohem Transfer von sehr leicht flüchtigen Verbindungen in die Abluft zu rechnen. Mit der Intensität der Zerkleinerung nimmt der Transfer in die Abluft zu, der in Metallschrotte und heizwertreiche Fraktion ab. Die Träger werden aufgerissen, zerplatzen (Spraydosen), oder werden „ausgequetscht“ (aufgeschäumte Kunststoffe). Bei der Abtrennung von Metallschrotten werden Erzeugnisse erfasst, die für diese charakteristische Chemikalien enthalten, z.B. Flammenschutzmittel und Epoxidharze in Leiterplatten, PCBs in Kondensatoren, Lösungsmittel in Lackdosen.

Die Leistung der mechanischen Behandlung ist prinzipiell nicht für organische oder anorganische Parameter getrennt sondern in ihrer Gesamtheit zu sehen. Nachdem die Konzentrationen organischer Schadstoffe in heizwertreichen Fraktionen von geringer Bedeutung sind, da diese bei der Verbrennung in der Regel zerstört werden (außer diese sind Vorläufer für z.B. PCDD und PCDF), ist neben dem Transferkoeffizienten der mechanischen Behandlung das Konzentrationsniveau im Rotteinput ebenfalls von Belang. (Es ist zu beachten, dass die Zerstörung von abfallbürtigen, organischen Schadstoffe bei industriellen Verbrennungsprozessen unvollständig sein kann, weil sehr beständige Verbindungen wie PCB, PCDD und PCDF bei kurzen Verweilzeiten Temperaturen von 1.200°C zur vollständigen Zerstörung benötigen.)

#### *Potential zur Neubildung von Schadstoffen*

Das Potential zur Neubildung von Schadstoffen in der Rotte und auf der Deponie (Methan, NMVOC, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>x</sub>) wird von der mechanischen Behandlung im Zusammenspiel mit den Rottebedingungen beeinflusst. Die mechanische Behandlung bestimmt die Menge biologisch abbaubarer Stoffe im Rotteinput (direkt über den Transfer des biogenen Materials, indirekt über den Transfer der Inertstoffe). Trotz dieses Zusammenhangs ist die Neubildung von Schadstoffen in der Rotte und auf der Deponie eher als Leistung (oder Mangel) der Rotte zu sehen. Der Transfer der biogenen Bestandteile wird abgesehen von Siebschnitt und Input (z.B. Klärschlammzumischung) in hohem Maße von der Vorzerkleinerung oder „Homogenisierung“ (DANO-Trommel) bestimmt. Die „Homogenisierung“ in einer DANO-Trommel bewirkt einen beinahe vollständigen Transfer zell- und holzstoffhaltiger Erzeugnisse (Papier, Karton, Pappe, Hygieneartikel) in die Rotte.

#### *Brennwert*

Der Brennwert der heizwertreichen Fraktion wird hauptsächlich von der mechanischen Behandlung bestimmt, der Brennwert des Rotterests in Zusammenwirkung der mechanischen Behandlung mit der Rotte. (Im Fall einer Siebung nach der Rotte wirkt auch die Rotte auf die mechanische Behandlung.) Die mechanische Behandlung bestimmt über den Transfer nicht biologisch abbaubarer organischer Stoffe den kleinsten erreichbaren Brennwert.



Tabelle 4-235: Parameter zur Beschreibung der Leistung der mechanischen Behandlung

| Kriterien abgeleitet aus Zielen des AWG                            | Parameter  | Indikator   |
|--|--|---|
| Toxizität  | alle nicht biologisch abbaubaren toxischen Stoffe in MBA-Outputs, die nicht thermisch behandelt werden, keine Einschränkung möglich  | -   |
| Treibhauswirksamkeit   | FCKW, H-FCKW, Halone in Abluft und allen festen Outputs, die nicht thermisch behandelt werden, keine Einschränkung möglich   | - <sup>1</sup>  |
| Ozonzerstörung   | FCKW, Halone in Abluft und allen festen Outputs, die nicht thermisch behandelt werden<br>keine Einschränkung möglich   | - <sup>1</sup>  |
| Versauerung  | <sup>4</sup>   | ---   |
| Eutrophierung  | <sup>4</sup>   | ---   |
| Geruch   | ---  | ---   |
| Potential zur Bildung von Stoffen der oben genannten Eigenschaften | Substrate für MO zur Bildung von CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, NO <sub>x</sub> im Rotteinput (Bedeutung nur in Zusammenhang mit Rottebedingungen)<br><br>Hydrolisierbare synthetische Polymere | Kohlenhydrate <sup>2</sup><br><br>PC, Epoxidharze, PVC-Additive |
| Brennwert  | Kunststoffe, schwer abbaubare biogene Stoffe   | Kunststoffe <sup>3</sup><br>Huminstoffe                         |
| Stabilitätsparameter   | Substrate für MO   | ---   |
| Einfluss auf Ablagerungsdichte                                     | TOC, elastische Gemengteile  | ---   |
| Marktwert abgetrennter Fraktionen                                  | (Kunststofffraktionen, Zellstoff, „saubere Brennstoffe“)   | ---   |

<sup>1</sup> Sollten die beobachtbare Mischung der Einzelsubstanzen ein konstantes Muster aufweisen, ist die Auswahl von einigen wenigen davon als Indikatoren möglich. Ist das Vorkommen eindeutig bestimmten Gemengteilen im Abfall zuzuordnen (z.B. Spraydosen, Schaumstoffe, Reinigungsmittelbehälter) so sind diese geeignet, um als Indikatorgüter zu dienen.

<sup>2</sup> Für das Potential von Neubildungen könnten auch die biologischen Parameter Atmungsaktivität oder Gasbildung herangezogen werden.

<sup>3</sup> Eine indirekte Bestimmung des Brennwertes über Indikatoren ist nicht sinnvoll. Der Anteil nicht abbaubarer Stoffe kann aber für die Bestimmung des brennbaren Materials, das dauerhaft auf den Deponien verbleibt, verwendet werden.

<sup>4</sup> Stoffe mit Versauerungs- oder Eutrophierungspotential sind nur als Neubildungen relevant.



### *Einfluss auf Ablagerungsdichte*

Die mechanische Behandlung bestimmt Korngröße und Kornform der zerkleinerten Gemengteile sowie den Gehalt an Gemengteilen, die der Kompaktierung hinderlich sind, wie elastische, hohle oder geschäumte Teile.

### *Marktwert abgetrennter Fraktionen*

Die Abtrennung von Wertstoffen ist im Rahmen einer MBA prinzipiell nur mechanisch möglich. Es ist aber vorstellbar, dass eine biologische Behandlung unterstützend durchgeführt wird z.B. biologische Trocknung, Hygienisierung oder Befreiung von biologisch Abbaubarem durch die Rotte.

In Tabelle 4-235 ist zusammengefasst, welche Stoffe bzw. Stoffgruppen als Parameter ausgewählt wurden und welche Stoffe innerhalb der Gruppen als Indikatorsubstanzen verwendet werden könnten.

#### 4.6.2.2 Biologische Behandlung - Rotte

Die Ziele der aeroben biologischen Behandlung nach der Idee der mechanisch-biologischen Behandlung sind die „Stabilisierung“ des Materials und die Reduktion der Menge. Bezogen auf die Kriterien, die aus den Zielen des AWG abgeleitet wurden bedeutet das (1) ein Reduktion der Stoffe, die zur Treibhausgasneubildung und DOC-Belastung des Deponie-sickerwassers führen, (2) eine ungenutzte Oxidation brennbarer Stoffe, (3) die Verringerung der Menge und verbesserte Kompaktierbarkeit der Deponiefraktion und (4) entgegen den Zielen eine (Neubildung und) Freisetzung von organischen Verbindungen aus dem Feststoff.

Über die Veränderung der Toxizität des Materials bei der Rotte kann keine Aussage getroffen werden.

Relevante Eigenschaften für das Verhalten von Stoffen im Hinblick auf die Leistung der Rotte sind:

- Biologische Abbaubarkeit
- Dampfdruck
- Toxizität gegenüber Mikroorganismen

In Tabelle 4-236 sind Beispiele für Werkstoffe und Stoffe zusammengestellt, die für die Leistung der Rotte maßgeblich sind.

Zuordnung der Leistungen zu den Kriterien, die aus den Zielen des AWG abgeleitet sind:

### *Toxizität, Treibhauswirksamkeit, Ozonzerstörung und Geruch*

Die Reduktion von toxischen, treibhauswirksamen, ozonzerstörenden und geruchsintensiven Stoffen ist nicht primäres Ziel der Rotte. Das Ziel ist die Mengenreduktion und Stabilisierung des Materials bei geringer Neubildung von treibhaus-, versauerungs- und eutrophierungswirksamen, und geruchsintensiven Stoffe. Bei Anlagen mit thermischer Abluftreinigung ist die niedrige Neubildung flüchtiger organischer Verbindungen allerdings nicht notwendig



bzw. sogar unerwünscht, eine hohe Konzentrationen brennbarer Gase in der Abluft reduziert die notwendige Zufeuerung von Erdgas.

Umfangreiche Untersuchungen zum Verhalten verschiedener toxischer Stoffe während der Rotte existieren nicht. Es ist daher nicht möglich, Aussagen über die Relevanz von einzelnen Verbindungen zu machen bzw. deren Eignung zur Beschreibung der Leistung der Rotte zu beurteilen.

#### *Potential zur Neubildung von Schadstoffen*

Die Rotte reduziert die spätere Schadstoffneubildung bei jenen Stoffen, die auf Grund der Mikroorganismenaktivität aus biogenem Material entstehen. Die Nachlieferung von „Industriechemikalien“ aus Kunststoffgegenständen wird durch die Rotte nicht verändert.

*Tabelle 4-236: Beispiele für Werkstoffe und Stoffe, die für die Rotte maßgeblich sind*

|  |          | Erzeugnisse<br>(Beispiele)  | Stoffe<br>(Beispiele)   |
|--|----------|---|---|
| Biologische Abbaubarkeit               | gut      | Küchenabfälle und Speisereste (mit Ausnahme von Knochen) Papier, Pappe<br>lignin- und huminstoffarme Gartenabfälle  | Kohlenhydrate,<br>native Proteine,<br>Lipide                                  |
|  | schlecht | Holz, Knochen, Leder<br>organische Anteile von Erden und Staub (Blumen-<br>erden, Feinanteil von Kehrgut)   | lignifizierte<br>Cellulose, Lignin,<br>Huminstoffe,<br>vernetztes<br>Kollagen |
|  | keine    | Kunststoffe <sup>1</sup>  | PE, PP, PET, PS,<br>PVC u. a.   |
| Dampfdruck                             | hoch     | nicht zuordenbar, meist Neubildungen  | Methan, nieder-<br>molekulare<br>Säuren, Alkohole,<br>Ketone<br>Terpene       |
|  | niedrig  | nicht von Belang, daher keine Aufzählung von Beispielen   |   |
| Toxizität gegenüber<br>Mikroorganismen | hoch     | Antibiotika aus der Human- und Veterinärmedizin<br><br>Fungizide aus Holzschutz<br>Fungizide aus Präparaten für Hobbygärtner<br>Fungizide aus der Oberflächenbehandlung von<br>Früchten | Penicilline,<br>Tetracycline<br>PCP   |
|  | niedrig  | nicht von Belang, daher keine Aufzählung von Beispielen   |   |

<sup>1</sup> Die Frage der Abbaubarkeit der Kunststoffe ist abhängig vom Betrachtungszeitraum. Im Hinblick auf die Bestandesdauer von Deponien wären die meisten Kunststoffe als „abbaubar“ einzustufen. Hier wird der Betrachtungszeitraum kürzer gewählt, daher ist nur ein unbedeutender Teil der Kunststoffe als (wie biogenes Material) „gut“ oder „schlecht“ abbaubar einzustufen.



Tabelle 4-237: Parameter, die zur Beschreibung der Rotte geeignet sind

| Kriterien abgeleitet aus Zielen des AWG                            | Parameter   | Indikator   |
|--|---|---|
| Toxizität  | alle nicht schnell biologisch abbaubaren toxischen Stoffe im Rotte-output<br>keine Einschränkung möglich  | - <sup>1</sup>  |
| Treibhauswirksamkeit   | FCKW,<br>H-FCKW, Freone <sup>2</sup>  | - <sup>1</sup>  |
| Ozonzerstörung   | FCKW, Halone <sup>2</sup>   | - <sup>1</sup>  |
| Versauerung  | 4   | ---   |
| Eutrophierung  | 4   | ---   |
| Geruch   | nur in Zusammenhang mit Art der Abluftreinigung relevant <sup>5</sup>   | -   |
| Potential zur Bildung von Stoffen der oben genannten Eigenschaften | Substrate für MO zur Bildung von CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O, NO <sub>x</sub><br><br>Hydrolysierbare synthetische Polymere | Kohlenhydrate <sup>3</sup><br><br>PC, Epoxidharze, PVC-Additive |
| Brennwert  | Kunststoffe schwer abbaubare biogene Stoffe   | Kunststoffe Huminstoffe   |
| Stabilitätsparameter   | Gasbildung Atmungsaktivität   |   |
| Einfluss auf Ablagerungsdichte                                     | Kunststoffe abbaubare biogene Stoffe  | -   |
| Marktwert abgetrennter Fraktionen                                  | kein Zusammenhang mit Rotte   | -   |

<sup>1</sup> Indikatorsubstanzen unter diesen Stoffen können nur an Hand vergleichender Untersuchungen ausgewählt werden

<sup>2</sup> Reste von FCKW, H-FCKW und Halonen können nur zu Beginn der Rotte entweichen

<sup>3</sup> Für das Potential von Neubildungen könnten auch die biologischen Parameter Atmungsaktivität oder Gasbildung herangezogen werden.

<sup>4</sup> Stoffe mit Versauerungs- oder Eutrophierungspotential sind nur als Neubildungen relevant.

<sup>5</sup> Diffuse Emissionen können durch die Abluftreinigung nicht erfasst werden. Die Reduktion von diffusen Emissionen sollten aber nicht vorrangig durch die Verbesserung der Abgasqualität der Rotte sondern durch bauliche Maßnahmen erfolgen.



### *Brennwert*

Während der Rotte nehmen nur die biologisch abbaubaren Bestandteile am Ab- und Umbau teil. Als Maß für die Leistung der Rotte bezüglich der Reduktion des Brennwertes wäre es daher notwendig, nur biogene Bestandteile zu betrachten. Der Beitrag der Kunststoffe zum Brennwert des Rotterests hat keinen Bezug zur Güte der Rotte, sondern ist abhängig von der mechanischen Behandlung.

### *Einfluss auf Ablagerungsdichte*

Der Einfluss der Rotte auf die Verdichtbarkeit ist ähnlich wie jener auf den Brennwert. Die Rotte kann nur die biologisch abbaubaren Verbindungen erfassen. Für die Verdichtbarkeit ist aber auch der Anteil an Kunststoffen ausschlaggebend.

In Tabelle 4-237 sind die Parameter zusammengestellt, die zur Beschreibung der Leistung der Rotte dienen können.

#### 4.6.2.3 Zusammenfassende Betrachtung von mechanischer Behandlung und Rotte

Die Leistung der mechanischen Behandlung konzentriert sich auf die Trennung der heizwertreichen von den mineralischen und biogenen, stark wasserhaltigen Bestandteilen. Als Parameter, welche die Leistung dafür beschreiben, kommen der Kunststoffanteil in Rotteinput und der Anteil mineralischer Gemengteile in der heizwertreichen Fraktion in Frage. Der Kunststoffanteil im Rotteinput gibt den mindestens erforderlichen Abbau biogener Inhaltsstoffe in der Rotte vor, um die Brennwertobergrenze einzuhalten. Zur Beurteilung der Leistung der Rotte im Hinblick auf die Absenkung des Brennwertes müssen alleine die biogenen Bestandteile betrachtet werden. Wird die Leistung am Brennwert oder Kohlenstoffgehalt gemessen, wird der nicht mit der Rotte beeinflussbare Kunststoffanteil miterfasst. Für die Beschreibung des Stabilisierungszustandes sollten neben den biologischen Parametern Atmungsaktivität und Gasbildung prinzipiell auch Stoffe und Stoffgruppen geeignet sein, die als Substrate für Mikroorganismen, speziell methanogene Bakterien (bzw. jene Bakterien, welche den methanogenen die Substrate bereitstellen) dienen können.

Die Abtrennung oder der Abbau von organischen Schadstoffen ist kein erklärtes Ziel der üblichen mechanisch-biologischen Restmüllbehandlung. Der Wissensstand über den Transfer organischer Schadstoffe in der mechanischen Behandlung und den Abbau von Schadstoffen während der Rotte ist schlecht.

Es ist damit zu rechnen, dass die persistenten Stoffe im Rottematerial mindestens in Größenordnungen auftreten wie sie als Hintergrundbelastung im Hausstaub, Straßenstaub und Oberbodenmaterial zu finden sind. Für heizwertreiche Fraktionen und Metallschrotte lässt sich die Aussage treffen, dass darin Gegenstände enthalten sind, die organische Schadstoffe in konzentrierter Form enthalten z.B. Leiterplatten, Kunststoffgehäuse von Elektro- und Elektronikgeräten. Bestimmte Kunststoffe im Rottematerial kommen als langfristige Emissionsquellen von Industriechemikalien in Frage z.B. Polycarbonat für Bisphenol A, Epoxidharze für Bisphenol A und Nonylphenol (Hydrolyse der Polymere) oder PVC für Phthalate (Diffusion aus dem Kunststoff).





#### 4.6.3 Provisorische Bilanzierung des TOC und N auf Basis von Sortieranalysen

Aus den Ergebnissen klassischer Sortieranalysen von Restmüll und den Zusammensetzungen der Sortierfraktionen, lässt sich grob die Verteilung des Kohlenstoffs auf Fraktionen, die sich in mechanischer und/oder biologischer Behandlung verschieden verhalten, bestimmen. In Tabelle 4-238 sind die aus Daten von Restmüllanalysen von Wien 1998 (MA 48, 1999), Steiermark 1998 (Kührer et al., 1998) und Niederösterreich 2001 (Hauer et al., 2002) festgelegten Rechenwerte für die weiteren Betrachtungen angegeben.

Die Sortierkataloge und Fraktionszuordnungen einzelner Güter im Restmüll sind in den drei verwendeten Analysen unterschiedlich. Bei der Analyse von NÖ 2001 (Hauer et al., 2002) sind 33 % des Mülls außerdem unbestimmt („Rest“ und „<40 mm“). Die Fraktionen, für die Rechenwerte gesucht wurden, wurden so ausgewählt, dass diese stofflich einigermaßen einheitlich sind. Die Sortierfraktion „Verbunde“ wurde aufgelöst und den Fraktionen „Papier, Karton, Pappe“, „Kunststoffe“ und „Windeln“ zugeschlagen. Die Fraktion „Windeln“ enthält auch sonstige Hygieneartikel. Die Fraktion „Inertes“ wurde als letzter Rechenwert aus den anderen Rechenwerten als Differenz auf 100 % errechnet.

*Tabelle 4-238: Literaturwerte und daraus festgesetzte Rechenwerte für die Zusammensetzung von Restmüll nach Fraktionen*

|                              | <b>OÖ 1998</b> | <b>Wien 1999</b> | <b>NÖ 2001</b> | <b>Rechenwert</b> |
|------------------------------|----------------|------------------|----------------|-------------------|
|                              | % (m/m)        | % (m/m)          | % (m/m)        | % (m/m)           |
| <b>Papier, Karton, Pappe</b> | 12             | 16               | 10             | <b>15</b>         |
| <b>Kunststoffe</b>           | 9              | 9                | 10             | <b>12</b>         |
| <b>Verbunde</b>              | 8              | 8                | 2              |                   |
| <b>Glas</b>                  | 5              | 5                | 3              | <b>4</b>          |
| <b>Metalle</b>               | 3              | 3                | 4              | <b>4</b>          |
| <b>Textilien</b>             | 6              | 3                | 5              | <b>5</b>          |
| <b>Holz</b>                  | 1              |                  | 1              | <b>1</b>          |
| <b>Holz, Leder, Gummi</b>    |                | 4                |                |                   |
| <b>Inertes</b>               | 8              | 12               | 5              | <b>15</b>         |
| <b>Organik</b>               | 34             | 38               | 15             | <b>35</b>         |
| <b>Problemstoffe</b>         | 2              | 1                | 1              | <b>1</b>          |
| <b>Windeln</b>               | 10             |                  | 12             | <b>8</b>          |
| <b>Rest</b>                  | 2              |                  | 16             |                   |
| <b>&lt;40</b>                |                |                  | 17             |                   |
| <b>Summe</b>                 | 100            | 100              | 100            | <b>100</b>        |

In Tabelle 4-239 sind mit den TS-Gehalten (eigene Schätzungen), Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten (Kost, 2001) die Beiträge der Sortierfraktionen zur Kohlenstoff- bzw. Stickstofffracht des Restmülls berechnet. Der von Kost (2001) angegebene (hohe) durchschnittliche Stickstoffgehalt von Holz von 1,1 % TS beruht auf dem Anteil an Spanplatten, die mit 2,5 % TS N-Gehalt angegeben werden. Der N-Gehalt der „Organik“ unterscheidet sich nach dem Ursprung des Materials. Kost (2001) gibt bei seiner weiteren Aufschlüsselung für Gartenabfälle 1,4 und für Küchenabfälle 2,6 % TS N-Gehalt an. Der durchschnittliche Kohlenstoffgehalt für Kunststoffe von 65 % TS ist angesichts der Elementar-



zusammensetzung der häufigsten Polymere (z.B. PE, PP mit ca. 85 % C) nur mit anhaftenden Verunreinigungen und dem Gehalt an anorganischen Füllstoffen und Additiven niedrigeren Kohlenstoffgehalts zu erklären. Kost (2001) gibt innerhalb seiner Hauptfraktion Kunststoffe als höchsten Kohlenstoffgehalt 66 % TS für „Folien, Blister“ und als niedrigsten 57 % TS für „Schaumstoffe“ an. Die Gehalte in „wasser- und aschefreiem“ Zustand (C-Gehalt bezogen auf Glühverlust) reichen von 71 bis 74 %.

Demnach sind die Fraktionen „Organik“ und „Kunststoffe“ die beiden größten Träger von Kohlenstoff im Restmüll gefolgt von „Papier, Karton, Pappe“, „Textilien“ und „Windeln“. Bei Stickstoff ist die „Organik“ der wichtigste Träger vor den „Textilien“. Die Aufstellung von Tabelle 4-239 führt zu errechneten Werten für Restmüll von 70 % TS, 23 % TS Kohlenstoff und 0,72 % TS Stickstoff. Diese bewegen sich in einem realistischen Rahmen.

*Tabelle 4-239: Zusammensetzungen der Sortierfraktionen und Beiträge zur C- und N-Fracht des Restmülls*

|                              | Anteil am RM | TS      | C-Gehalt | N-Gehalt | Beitrag zur Fracht im RM |            |
|------------------------------|--------------|---------|----------|----------|--------------------------|------------|
|                              |              |         |          |          | C                        | N          |
|                              | % (m/m)      | % (m/m) | % (TS)   | % (TS)   | %                        | %          |
| <b>Papier, Karton, Pappe</b> | 15           | 70      | 38       | 0,5      | 17                       | 7          |
| <b>Kunststoffe</b>           | 12           | 95      | 62       | 0,7      | 31                       | 11         |
| <b>Glas</b>                  | 4            | 97      | 0        | 0        | 0                        | 0          |
| <b>Metalle</b>               | 4            | 97      | 0        | 0        | 0                        | 0          |
| <b>Textilien</b>             | 5            | 80      | 50       | 3,5      | 9                        | 19         |
| <b>Holz</b>                  | 1            | 90      | 48       | 1,1      | 2                        | 1          |
| <b>Inertes</b>               | 15           | 70      | 0        | 0        | 0                        | 0          |
| <b>Organik</b>               | 35           | 55      | 40       | 2,1      | 33                       | 56         |
| <b>Problemstoffe</b>         | 1            | 80      | 0        | 0        | 0                        | 0          |
| <b>Windeln</b>               | 8            | 50      | 47       | 0,8      | 8                        | 4          |
| <b>Summe</b>                 | <b>100</b>   |         |          |          | <b>100</b>               | <b>100</b> |

Vom Kohlenstoff sind etwa zwei Drittel biologisch abbaubaren Materialien zuzuordnen („Papier, Karton, Pappe“, ein großer Teil der „Textilien“ wegen der Dominanz der Baumwolle, „Holz“, „Organik“ und „Windeln“). Bei Stickstoff sind ebenfalls etwa zwei Drittel abbaubaren Materialien zuzuordnen, wobei die Abgrenzung schwerer fällt, da unklar ist, wie weit die Stickstoffträger in Papier (eventuell synthetische Verbindungen wie Leime, Farbstoffe etc.), Textilien (Nylongewebe zeigen in der Rotte Tendenzen zum „Auflösen“) oder Windeln abbaubar sind.

Im nächsten Schritt werden den Fraktionen Transferkoeffizienten für die mechanische Behandlung zugeordnet. Die verwendeten Transferkoeffizienten richten sich nach den von Soyez (2001) angegebenen Siebdurchgangsanteilen bei Vorzerkleinerung des Restmülls mit einer Hammermühle und Siebung bei 40 mm.



Tabelle 4-240: Transfer der Fraktionen und des darin enthaltenen Kohlenstoffs und Stickstoffs bei der mechanischen Behandlung. Die Kohlenstoff- und Stickstofffrachten sind so angegeben, dass die ursprüngliche Gesamtfracht im Restmüll 100 % entspricht.

|                              | Fracht aus RM in Rotte |           |           | Fracht aus RM in hwr. Fr. |           |           |
|------------------------------|------------------------|-----------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|
|                              | TK Rotte               | C         | N         | TK Hwr. Fr.               | C         | N         |
|                              |                        | %         | %         |                           | %         | %         |
| <b>Papier, Karton, Pappe</b> | 0,2                    | 3         | 1         | 0,8                       | 14        | 6         |
| <b>Kunststoffe</b>           | 0,15                   | 5         | 2         | 0,85                      | 26        | 9         |
| <b>Textilien</b>             | 0,02                   | 0,2       | 0,4       | 0,98                      | 8         | 19        |
| <b>Holz</b>                  | 0,1                    | 0,2       | 0,1       | 0,9                       | 2         | 1         |
| <b>Organik</b>               | 0,8                    | 27        | 45        | 0,2                       | 7         | 11        |
| <b>Windeln</b>               | 0,02                   | 0,2       | 0,1       | 0,98                      | 8         | 4         |
| <b>Summe</b>                 |                        | <b>35</b> | <b>49</b> |                           | <b>65</b> | <b>51</b> |

Die Berechnung der Kohlenstoff- und Stickstofffrachten für Rotteinput und heizwertreiche Fraktion zeigt, dass der Kohlenstoff des Restmülls ca. zu einem Drittel in die Rotte gelangt der Stickstoff ca. zur Hälfte. Die Berechnungen sind etwa in Übereinstimmung mit den gemessenen TK der Splittinganlage Wien (30 % von C, 54 % von N ins Rottematerial). In der Anlage Kirchdorf sind die TK in das Rottematerial kleiner (24 % bei C, 40 % bei N) in Oberpullendorf für Kohlenstoff ähnlich (32 %) für Stickstoff niedriger (38 %). Für die Anlage Oberpullendorf ist die Berechnung schlecht übertragbar, weil durch die Wirkung der Dano-Trommeln „Papier, Karton, Pappe“ und „Windeln“ beinahe vollständig in das Rottematerial transferiert werden.

Von der Kohlenstofffracht in die Rotte ist der größte Teil biologisch abbaubar, der Beitrag der Kunststoffe zum Kohlenstoffgehalt des Rotteinput beträgt ca. 13 %. Beim Stickstoff beträgt der Anteil aus Kunststoffen unter 5 %.

Unter der Annahme, dass 55 % des Kohlenstoffinputs der Rotte mineralisiert werden, verbleiben ca. 15 % des ursprünglichen Restmüll-Kohlenstoffinputs im Rotteoutput, wovon ca. ein Drittel durch Kunststoffe verursacht wird. Die Annahme der Mineralisierung basiert auf den Werten vom Versuch Oberpullendorf, bei dem in 10 Wochen Intensivrotte 50 % abgebaut wurden und Soyez (2001), wonach 62 % der organischen Substanz abgebaut werden (bei Berücksichtigung der Kunststoffe ergibt sich ein Abbaugrad der abbaubaren organischen Substanz von ca. 70 %). Für Stickstoff ist der Rotteverlust kleiner. In der Intensivrotte beim Versuch Oberpullendorf wurden 25 % gemessen. Aus der gemessenen Stickstoffbilanz eines Biofilters (Soyez, 2001) mit einer Bilanzsumme von 620 g Stickstoff in gebundener Form (organisch gebunden, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O und NO) je 1.000 kg Restmüllinput errechnet sich ein Stickstoffaustrag bei der Rotte von 18 % bezogen auf den gesamten Restmüllinput. Bei der Rotte gebildetes N<sub>2</sub> ist bei der genannten Untersuchung naturgenäß unberücksichtigt, weshalb der angegebene Wert den minimalen Rotteverlust darstellt. (Beachtlich dabei ist, dass aus dem gebundenen Stickstoff des Rohgases im Biofilter keine relevanten Mengen N<sub>2</sub> gebildet werden. Der abgebaute Ammoniak scheint hauptsächlich in N<sub>2</sub>O und NO umgesetzt zu werden.)

#### 4.6.4 Aufteilung der Kohlenstoff und Stickstofffrachten auf Stoffgruppen

Im Folgenden wird versucht, die Kohlenstoff- und Stickstofffrachten einzelnen Stoffgruppen, die Hauptbestandteile des Abfalls bilden, zuzuordnen. Die Auswahl und Abgrenzung der



Stoffgruppen richtet sich nach der klassischen Einteilung in chemische Verbindungsklassen und der Abbaubarkeit in der Rotte. Das Verhalten in der mechanischen Behandlung ist nicht von Belang, weil den Gemengteilen einer Stoffgruppe keine einheitlichen mechanischen Eigenschaften zugeordnet werden können. Als Stoffgruppen werden gewählt:

- Kohlenhydrate
- Proteine
- Lipide
- Lignin
- Huminstoffe
- Kunststoffe

#### *Kohlenhydrate*

Diese Gruppe enthält Untergruppen mit sehr ähnlichen Elementarzusammensetzungen, die alle in der Rotte abbaubar sind. Eine weitere Aufgliederung in schnell abbaubare (Zucker und 1,4- $\alpha$ -verknüpfte Polysaccharide d. s. Stärke, Glycogen) und langsamer abbaubare (1,4- $\beta$ -verknüpfte Polysaccharide d.s. Cellulose, Hemicellulose) wird daher nicht getroffen.

#### *Proteine*

Bei den Proteinen wird ebenfalls auf eine weitere Untergliederung verzichtet, da über die gesamte Rottedauer alle Untergruppen (auch das schwer angreifbare Keratin) abgebaut werden können.

#### *Lipide*

Die Lipide sind nicht einheitlich bezüglich der Abbaubarkeit (Kettenlänge, Sättigungsgrad), doch ist ihr Anteil an der organischen Substanz des Restmülls gering, dass keine weitere Unterteilung sinnvoll ist. Es ist zu beachten, dass bei der klassischen Bestimmung durch Extraktion bei der Anwesenheit von Kunststoffen zum Teil Kunststoffadditive miterfasst werden können (Pichler und Kögel-Knabner, 1998).

#### *Lignin, Huminstoffe*

Bei beiden Gruppen wird keine weitere Untergliederung vorgenommen.

#### *Kunststoffe*

Auch die Kunststoffe werden nicht weiter untergliedert, da für den Großteil die Eigenschaft zutrifft, während der Rotte nicht abbaubar zu sein.

In Tabelle 4-241 ist die Zusammensetzung der Sortierfraktionen, wie sie für die TOC-Bilanzierung verwendet wurde, nach den eben definierten Stoffgruppen zusammengestellt. Die Angaben sind übernommen von Neumeyer (1999) bzw. Kost (2001).



Tabelle 4-241: Zusammensetzung der Sortierfraktionen nach Stoffgruppen in % TS

|                              | Kohlenhydrate | Proteine | Lipide | Lignin | Huminstoffe | Kunststoffe | Summe      |
|------------------------------|---------------|----------|--------|--------|-------------|-------------|------------|
| <b>Papier, Karton, Pappe</b> | 55            | 0        | 0      | 5      | 0           | 0           | <b>60</b>  |
| <b>Kunststoffe</b>           | 0             | 0        | 0      | 0      | 0           | 100         | <b>100</b> |
| <b>Textilien</b>             | 46            | 3        | 0      | 0      | 0           | 42          | <b>91</b>  |
| <b>Holz</b>                  | 65            | 1        | 0      | 30     | 0           | 0           | <b>96</b>  |
| <b>Organik</b>               | 68            | 13       | 5      | 6      | 0           | 0           | <b>92</b>  |
| <b>Windeln</b>               | 75            | 0        | 0      | 0      | 0           | 10          | <b>85</b>  |

Die Zusammensetzung von Rotteinput und heizwertreicher Fraktion wurde unter Zugrundelegung der Transferkoeffizienten von Tabelle 4-242 für die Müllfraktionen berechnet (Werte in Anlehnung an Soyez, 2001).

Tabelle 4-242: Transferkoeffizienten für die Sortierfraktionen bei der mechanischen Behandlung.

|                              | TK RotIn | TK hwr. Fr. |
|------------------------------|----------|-------------|
| <b>Papier, Karton, Pappe</b> | 0,2      | 0,8         |
| <b>Kunststoffe</b>           | 0,15     | 0,85        |
| <b>Textilien</b>             | 0,02     | 0,98        |
| <b>Holz</b>                  | 0,1      | 0,9         |
| <b>Organik</b>               | 0,8      | 0,2         |
| <b>Windeln</b>               | 0,02     | 0,98        |
| <b>Glas</b>                  | 0,95     | 0,05        |
| <b>Metalle</b>               | 0,1      | 0,1         |
| <b>Inertes</b>               | 0,98     | 0,02        |
| <b>Problemstoffe</b>         | 0,3      | 0,3         |

In Tabelle 4-243 sind die errechneten Zusammensetzungen von Restmüll, Rotteinput und heizwertreicher Fraktion zusammengestellt. Die Differenzen auf 100 % in der Spalte „Summe“ entsprechen den restlichen Bestandteilen Wasser, Aschenbildnern und sonstigen organischen Substanzen.

Tabelle 4-243: Zusammensetzung von Restmüll, Rotteinput und heizwertreicher Fraktion nach Stoffgruppen. Angaben in % FS

|                       | Kohlenhydrate | Proteine | Lipide | Lignin | Huminstoffe | Kunststoffe | Summe     |
|-----------------------|---------------|----------|--------|--------|-------------|-------------|-----------|
| <b>RESTMÜLL</b>       | 24            | 3        | 1      | 2      | 0           | 13          | <b>43</b> |
| <b>ROTTEINPUT</b>     | 23            | 4        | 1      | 2      | 0           | 3           | <b>33</b> |
| <b>HEIZWERTR. FR.</b> | 28            | 1        | 0      | 2      | 0           | 27          | <b>59</b> |

Die Ergebnisse in Tabelle 4-243 zeigen vor allem den Einfluss der Siebung auf die Verteilung der Fraktionen „Papier, Karton, Pappe“, „Windeln“, „Organik“ und „Kunststoffe“. Bei den Kohlenhydraten ist keine auffällige Differenzierung zwischen Rotteinput und heizwertreicher Fraktion gegeben, weil mit „Papier, Karton, Pappe“ und „Windeln“ kohlenhydratreiches Material in die heizwertreiche Fraktion und mit der „Organik“ in den Rotteinput gelangt. Bei Anlagen mit Dano-Trommel wäre durch das Zerfasern von Papier und Hygieneartikeln eine klare Anreicherung im Rotteinput zu erwarten. Bei Proteinen und Lipiden ist durch das haupt-



sächliche Vorkommen in der „Organik“ die Lenkung in den Rotteinput sichtbar. Bei den Kunststoffen ist die Lenkung in die heizwertreiche Fraktion deutlich zu sehen.

In Tabelle 4-244 sind die von Pichler und Kögel-Knabner (1998) gemessenen Abbaugrade der Stoffgruppen bei der Rotte (gerundet) angegeben.

*Tabelle 4-244: Abbaugrade von Stoffgruppen während der Rotte nach Pichler und Kögel-Knabner (1998). Angaben in %*

| <b>Kohlenhydrate</b> | <b>Proteine</b> | <b>Lipide</b> | <b>Lignin</b> |
|----------------------|-----------------|---------------|---------------|
| 80                   | 55              | 60            | 15            |

Mit den Abbaugraden von Tabelle 4-244, einem angenommenen Gesamtmassenverlust von 40 % bei der Rotte und einem angenommenen Huminstoffanteil von einem Drittel der organischen Substanz (Lechner, 2004) berechnet sich folgende Zusammensetzung für den Rotteoutput:

*Tabelle 4-245: Zusammensetzung des Rotteoutputs nach Stoffgruppen. Angaben in % FS*

|                    | <b>Kohlenhydrate</b> | <b>Proteine</b> | <b>Lipide</b> | <b>Lignin</b> | <b>Huminstoffe</b> | <b>Kunststoffe</b> | <b>Summe</b> |
|--------------------|----------------------|-----------------|---------------|---------------|--------------------|--------------------|--------------|
| <b>ROTTEOUTPUT</b> | 8                    | 3               | 1             | 3             | 11                 | 6                  | 31           |

Zusammenfassend ergeben sich für die betrachteten Stoffgruppen folgende Transferkoeffizienten:

*Tabelle 4-246: Transferkoeffizienten für ausgewählte Stoffgruppen bei der mechanisch-biologischen Restmüllbehandlung*

|              | <b>Kohlenhydrate</b> | <b>Proteine</b> | <b>Lipide</b> | <b>Lignin</b> | <b>Kunststoffe</b> |
|--------------|----------------------|-----------------|---------------|---------------|--------------------|
| Hwr. Fr.     | 0,51                 | 0,24            | 0,20          | 0,46          | 0,87               |
| Rotteoutput  | 0,10                 | 0,34            | 0,32          | 0,46          | 0,13               |
| Rotteverlust | 0,39                 | 0,42            | 0,48          | 0,08          | 0,00               |

#### 4.6.5 Verhalten von PCB und PCDD/PCDF

PCBs und PCDD/PCDF sind von den organischen Schadstoffen im Restmüll am besten untersucht. Die in der Literatur angegebenen Konzentrationen weisen aber eine sehr große Schwankungsbreite auf, sodass quantitative Aussagen über den Effekt der mechanisch-biologischen Behandlung nicht möglich sind.

##### *Verwendung der Stoffe, Verteilung im Abfall*

PCBs haben historisch große Bedeutung als Isolatoren, Flammschutzmittel, Weichmacher etc. Es ist zu vermuten, dass PCB-hältige Produkte im Abfall vor allem Elektro- und Elektronikgeräte sind (Bestandteil von Kondensatoren, als Flammschutzmittel in Leiterplatten und Vergussmassen verschiedener Bauteile, Weichmacher in PVC z.B. Kabel) neben Abfällen



von Dichtungsmassen. Aufgrund der starken Anwendung in der Vergangenheit sind in den Hauptbestandteilen des Mülls im Spurenbereich Hintergrundbelastungen zu vermuten.

Für PCDD und PCDF gibt es keine Anwendungen (außer für wissenschaftliche Zwecke). PCDD und PCDF sind in vielen Abfallbestandteilen in den darin typischen Hintergrundbelastungen zu vermuten (Nahrungsmittel, Staub, Bodenmaterial, einzelne Kunststoffe). Die Belastung stammt einerseits aus ursprünglich durch Deposition eingetragenen PCDD und PCDF aus Verbrennungsprozessen andererseits aus dem Begleiten chemischer Syntheseprodukte durch unerwünschte Bildung bei der Synthese. Als Träger mit höheren Konzentrationen kommen Aschen und Ruß (von der Kaminkehrung) aus dem Hausbrand in Frage.

#### *Messwerte von Abfällen*

In Tabelle 4-247 sind Literaturangaben für den PCB-Gehalt von Restmüll zusammengestellt

*Tabelle 4-247: PCB-Gehalte von Restmüll*

| mg/kg TS | Quelle                       |
|----------|------------------------------|
| 0,064    | Reinhardt, Jager (1996)      |
| 1,04     | Reinhardt, Jager (1996)      |
| 0,4      | Wilken, Zeschmar-Lahl (1997) |
| 9,7      | Wilken, Zeschmar-Lahl (1997) |
| 0,5      | Blume (1996)                 |
| 1,0      | Blume (1996)                 |

Es ist fraglich, ob es den Autoren gelungen ist, auch die PCB in den konzentrierten Trägern zu erfassen, da diese zum Teil schwierig zu zerkleinern sind (Leiterplatten, Kondensatoren). Vergleichsweise fanden Welling et al. (1992) in Toilettenpapier bzw. Briefumschlägen aus Recyclingpapier 0,005 bis 0,47 bzw. 0,08 bis 4 mg/kg PCBs. Sakai et al. (2000) untersuchten Leichtfraktionen von Autoschreddern und fanden 1,8-24 mg/kg.

Es ist demnach davon auszugehen, dass in allen Outputfraktionen einer MBA PCB-haltige Produkte vorkommen. Elektro- und Elektronikschrott findet sich in allen Fraktionen (verschiedene Größenklassen: Uhren und kleine Spielzeuge bis Rundfunkempfangsgeräte)

Die Persistenz im Rotteprozess ist z.B. durch die Arbeiten von Lazzari et al. (1999) bestätigt. In der Arbeit wurde die Anreicherung von Dioxinen während der Kompostierung verfolgt. Über das Abbauverhalten unter Deponiebedingungen ist nichts bekannt. Sakai et al. (2000) stellten zur Auswaschung fest, dass gelöste Huminsäuren und Tenside diese um Größenordnungen erhöhen kann.

In Tabelle 4-248 sind Literaturangaben für den PCDD und PCDF-Gehalt von Restmüll zusammengestellt



*Tabelle 4-248: PCDD/PCDF -Gehalte von Restmüll angegeben in TE*

| ng TE/kg TS |                              |
|-------------|------------------------------|
| 2,2 - 64    | Abad et al. (2002)           |
| 13,6        | Reinhardt, Jager (1996)      |
| 613         | Reinhardt, Jager (1996)      |
| 41          | Fiedler, Hutzinger (1992)    |
| 50          | Wilken, Zeschmar-Lahl (1997) |
| 200         | Wilken, Zeschmar-Lahl (1997) |
| 50          | SRU (1990)                   |
| 81,4        | Greiner/Stelzer et al (1991) |
| 62          | Krauss (1991)                |
| 58          | Krauss (1991)                |
| 130         | Krauss (1991)                |
| 35          | Krauss (1991)                |
| 20          | Krauss (1991)                |
| 40          | Krauss (1991)                |

Wegen der fehlenden Zuordenbarkeit der PCDD/PCDF zu Trägern, ist keine Aussage über die Verteilung dieser Stoffe bei der mechanischen Aufbereitung möglich.

Aufgrund der hohen Persistenz ist ein Abbau während der Rotte nicht möglich, Wurst (2004) spricht auch von der Möglichkeit zur Neubildung während des Rotteprozesses.





## 5 SCHLUSSFOLGERUNGEN

### 5.1.1 Zusammensetzung der MBA-Outputs

Die selbst gemessenen Stoffkonzentrationen der Metalle sind auffällig oft größer, zum Teil erheblich größer als die in den Vorerhebungen fixierten Rechenwerte auf Basis von Literaturdaten (vergl. 4.5). Dieser Sachverhalt bekräftigt die Skepsis gegenüber Werten, die mit praxisüblichen Methoden bei Probenahme und Probenaufbereitung bestimmt wurden. Wenigstens für Kupfer und Cadmium in heizwertreichen Fraktionen wurden systematische Minderbefunde auf Grund der nicht an die Heterogenität angepassten, zu kleinen Probenmassen und der schlechten Zerkleinerbarkeit von Metallstücken als in der gängigen Praxis sehr wahrscheinlich angenommen. Die Ergebnisse scheinen zu bestätigen, dass wesentlich höhere Anforderungen an Probengrößen und Aufbereitungstechniken zu stellen sind, um richtige durchschnittliche Metallgehalte zu messen.

#### *Heizwertreiche Fraktionen*

In Tabelle 5-1 sind die gemessenen Stoffkonzentrationen der heizwertreichen Fraktionen der Restmüllqualität und den Anforderung an Sekundärbrennstoffe nach dem RAL-Gütezeichen der deutschen Bundesgütegemeinschaft Sekundärbrennstoffe e.V. (BGS) gegenübergestellt. (Die Informationen der BGS (Grenzwerte, Probenahme und Analysenvorschriften sind in ihrer jeweils aktuellen Fassung frei verfügbar unter [www.bgs.gv.de](http://www.bgs.gv.de).)

Wie aus Tabelle 5-1 hervorgeht, ist die Qualität der heizwertreichen Fraktionen punkto Metallgehalten nur in Ausnahmefällen und auch nur bei einzelnen Parametern erheblich besser als die Restmüllqualität. Bei alleiniger Betrachtung der Metallgehalte ist es daher nicht gerechtfertigt, Unterschiede bei der Entsorgung heizwertreicher Fraktionen gegenüber Restmüll zuzulassen.

Am ehesten sind Leichtfraktionen von ballistischen Separatoren in der Lage, die Metallgehalte von Restmüll zu unterschreiten.

Die Beurteilung nach den Kriterien der BGS ist insofern problematisch, als die Methoden zur Probenahme und Aufbereitung völlig von den in dieser Arbeit praktizierten abweichen. Durch Simulationen kann gezeigt werden, dass die Laborprobenmenge von 10 Litern, die ohne Zerkleinerung aus einer Mischprobe gewonnen wird, zu Messwertverteilungen großer Schiefe führt und in den meisten Fällen Hintergrundgehalte gemessen werden (vergl. dazu die Beispiele in 3.2.5). Die in Tabelle 5-1 angegebenen Metallgehalte exklusive der Anteile aus metallischen Teilen sind wenigstens für Kupfer, Chrom und Nickel gute Schätzungen für Messwerte, die nach den Vorschriften der BGS gemessen würden (Für Blei und Zink wo die Heterogenität nicht nur durch metallische Teile sondern auch durch stabilisierte Kunststoffe oder Gummi verursacht wird, sind diese Werte als Schätzungen schlecht, weil tendenziell zu hoch.) Die BGS strebt nicht an, durchschnittliche Metallgehalte zu bestimmen, sondern nimmt bewusst die Schiefe der Messwertverteilung in Kauf. Zur Beurteilung der Sekundärbrennstoffe werden deshalb Median und 80 %-Perzentil herangezogen. Diese Kriterien sind bei heterogenen Materialien umso leichter einzuhalten, je kleiner die Proben gewählt werden. Bei den Analysen nach den Vorschriften der BGS bleibt unklar, welche durchschnittlichen Metallkonzentrationen ein Sekundärbrennstoff tatsächlich aufweist, d.h. welche Metallfracht er transportiert.

Tabelle 5-1: Vergleich der Stoffkonzentrationen in den untersuchten Gütern mit der Restmüllzusammensetzung und den Anforderungen nach dem RAL-Gütezeichen der BGS (angegeben sind die Mittelwerte der durchschnittlichen Gehalte und darunter kursiv der Gehalt, der sich unter Ausschluss der metallischen Anteile ergibt („Hintergrundgehalt“)), Werte in mg/kg TS

|    | Oberpullendorf >25 mm | Oberpullendorf >65 mm | Oberpullendorf BasL   | Oberpullendorf BasS   | Kirchdorf >50 mm L    | Kirchdorf >50 mm S    | Wien >250 mm        | Wien 50 - 250 mm    | RESTMÜLL <sup>4</sup> | RAL-GÜTEZEICHEN<br>MEDIAN | RAL-GÜTEZEICHEN<br>80 %-PERZENTIL |
|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Cd | 6,5                   | 14                    | 6,4                   | 6,2                   | 14                    | 21                    | 11                  | 6,4                 | <b>13</b>             | <b>4</b>                  | <b>9</b>                          |
| Cr | 510<br><i>210</i>     | 400<br><i>340</i>     | 300<br><i>270</i>     | 240<br><i>110</i>     | 330<br><i>130</i>     | 840<br><i>370</i>     | 85<br><i>75</i>     | 240<br><i>100</i>   | <b>420</b>            | <b>125<sup>1</sup></b>    | <b>250<sup>1</sup></b>            |
| Cu | 5300<br><i>600</i>    | 4.700<br><i>1.300</i> | 1.100<br><i>500</i>   | 8.400<br><i>400</i>   | 5.500<br><i>500</i>   | 7.400<br><i>1.100</i> | 3.600<br><i>200</i> | 3.100<br><i>900</i> | <b>3.600</b>          | <b>350<sup>1</sup></b>    | --- <sup>2</sup>                  |
| Ni | 180<br><i>40</i>      | 150<br><i>40</i>      | 70<br><i>30</i>       | 150<br><i>60</i>      | 130<br><i>40</i>      | 320<br><i>50</i>      | 60<br><i>30</i>     | 110<br><i>30</i>    | <b>150</b>            | <b>80<sup>1</sup></b>     | <b>160<sup>1</sup></b>            |
| Pb | 690<br><i>350</i>     | 300<br><i>280</i>     | 160<br><i>150</i>     | 1.200<br><i>600</i>   | 240<br><i>190</i>     | 790<br><i>240</i>     | 400<br><i>310</i>   | 400<br><i>170</i>   | <b>470</b>            | <b>190<sup>1</sup></b>    | --- <sup>2</sup>                  |
| Zn | 3.300<br><i>1.000</i> | 2.100<br><i>1.500</i> | 1.800<br><i>1.600</i> | 5.200<br><i>1.000</i> | 1.600<br><i>1.000</i> | 5.300<br><i>1.600</i> | 720<br><i>530</i>   | 1.500<br><i>800</i> | <b>2.200</b>          | --- <sup>3</sup>          | --- <sup>3</sup>                  |
| Hg | 0,78                  | 1,2                   | 0,51                  | 0,89                  |                       |                       |                     |                     | <b>2,6</b>            | <b>0,6</b>                | <b>1,2</b>                        |

<sup>1</sup> für Sekundärbrennstoff aus den heizwertreichen Fraktionen von Siedlungsabfällen

<sup>2</sup> noch nicht festgelegt

<sup>3</sup> nicht im Anforderungsprofil

<sup>4</sup> Mittelwert aus den eigenen Untersuchungen (Oberpullendorf I und II zu einem Wert vor der Mittelwertbildung zusammengefasst; Bei Hg Wert der Vorerhebung)

Im Hinblick auf eine thermische Verwertung in Anlagen, die nicht über den Rauchgasreinigungsstandard einer MVA verfügen, sind die untersuchten heizwertreichen Fraktionen als kritisch einzustufen. Die Metallgehalte sind restmüllähnlich und dazu schlecht bestimmbar. In Anlagen, die emissionsseitig wenig Spielraum aufweisen, kann deshalb die dauerhafte Einhaltung von Emissionsgrenzwerten nur eingeschränkt durch die Kontrolle der (mit-) verbrannten Abfälle über direkte chemische Analysen erfolgen.

Die brennstofftechnischen Eigenschaften der Abfälle wurden nicht untersucht. Die Sortierungen und Separatanalysen zeigten, dass alle heizwertreichen Fraktionen, die durch Sieben erzeugt wurden, große Metallstücke mit Massen bis ein kg (selten auch mehr) enthalten können, die in Wirbelschichtöfen Schäden hervorrufen. Es sind das vor allem Gegenstände aus Messing (Armaturen) und nicht ferromagnetischem Stahl. Die untersuchten Leichtfraktionen der ballistischen Separatoren enthielten solche Gegenstände nicht. Generell ist der hohe Transfer von metallischem Aluminium in die heizwertreichen Fraktionen (auch



mit Wirbelstromabscheidung) als Problemquelle für Wirbelschichtfeuerungen anzusehen, da geschmolzenes Aluminium stört.

### *Rottematerial*

Im Folgenden werden die Messwerte mit Grenzwerten für Komposte und der Deponierbarkeit auf Massenabfalldeponien verglichen. Der Vergleich mit den Kompostgrenzwerten wird zur Einordnung der Materialien bezüglich der Metallgehalte angestellt, ungeachtet dessen, dass aus Restmüll(fractionen) nur "Müllkomposte" hergestellt werden dürfen, d.h. auf Grund der Zuordnung zu dieser Kompostart eine z.B. gegenüber „Qualitätskomposten“ beschränkte Verwertungsmöglichkeit besteht.

*Tabelle 5-2: Vergleich der Stoffkonzentrationen in den untersuchten Rottematerialien mit den Grenzwerten für Komposte nach Kompost-VO und Massenabfall-Deponien nach Deponie-VO (angegeben sind die Durchschnittsgehalte; bei Kupfer, Nickel, Blei und Zink ist in der zweiten Zeile kursiv zusätzlich der Gehalt ohne Berücksichtigung der metallischen Teile angegeben („Hintergrundgehalt“)), Werte in mg/kg TS*

|    | Oberpullendorf <25 mm<br>Rotteinput | Oberpullendorf <25 mm<br>Rotteoutput | Kirchdorf <50 mm    | Wien <50 mm         | Kompost Klasse A+ | Kompost Klasse A | Kompost Klasse B | Massenabfalldeponie |
|----|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------|------------------|------------------|---------------------|
| Cd | 2,0                                 | 3,0                                  | 2,1                 | 2,1                 | <b>0,7</b>        | <b>1</b>         | <b>3</b>         | <b>30</b>           |
| Cr | 130                                 | 210                                  | 210                 | 110                 | <b>70</b>         | <b>70</b>        | <b>250</b>       | <b>5.000</b>        |
| Cu | 1.000<br><i>300</i>                 | 1.600<br><i>600</i>                  | 3.200<br><i>200</i> | 1.400<br><i>200</i> | <b>70</b>         | <b>150</b>       | <b>500</b>       | <b>5.000</b>        |
| Ni | 133<br><i>40</i>                    | 140<br><i>70</i>                     | 140<br><i>50</i>    | 63<br><i>30</i>     | <b>25</b>         | <b>60</b>        | <b>100</b>       | <b>2.000</b>        |
| Pb | 400<br><i>270</i>                   | 720<br><i>350</i>                    | 910<br><i>730</i>   | 290<br><i>160</i>   | <b>45</b>         | <b>150</b>       | <b>200</b>       | <b>3.000</b>        |
| Zn | 1.500<br><i>1.000</i>               | 2.000<br><i>1.400</i>                | 2.900<br><i>700</i> | 1.300<br><i>500</i> | <b>200</b>        | <b>500</b>       | <b>1.800</b>     | <b>5.000</b>        |
| Hg | 1,4                                 | 3,2                                  | ---                 | ---                 | <b>0,4</b>        | <b>0,7</b>       | <b>3</b>         | <b>20</b>           |

Der Vergleich der Messwerte mit den Grenzwerten zeigt, dass die Anforderungen zur Ablagerung auf Massenabfalldeponien bezüglich der Metallgehalte mit großem Abstand eingehalten werden können. Für die Materialien aus Kirchdorf und Wien kann abgeleitet werden, dass nach einer Rotte und der damit verbundenen Konzentrierung der Metalle die Grenzwerte ebenfalls bei weitem nicht überschritten würden.



Beim Vergleich mit den Grenzwerten der Kompostklassen zeigt sich, dass die Anforderungen der Qualitäten A und A+ erwartungsgemäß keinesfalls erfüllt werden können. Für Klasse B ist die Einhaltung bei Cadmium und Chrom möglich, bei Kupfer, Nickel, Blei und Zink sind die „Hintergrundgehalte“ meist unter dem Grenzwert, die durchschnittlichen Gehalte (also inkl. metallische Anteile) meist darüber. Daraus kann geschlossen werden, dass z.B. bei Kupfer mit der Beurteilung nach praxisüblichen Methoden eine Einstufung in Qualität B möglich wäre, tatsächlich aber die Kupfergehalte den Grenzwert um ein Mehrfaches überschreiten.

### 5.1.2 Konzentrierungsleistung, Schadstoffentfrachtung

Bei Cadmium, Eisen, Kupfer und Chrom ist eine eindeutige, bei allen drei untersuchten Anlagen gleichgerichtete Konzentrierungsleistung erkennbar. Diese vier Elemente werden im Rotteinput gegenüber dem Restmüllinput deutlich abgereichert. Bei Cadmium beträgt die Abreicherung zwischen - 80 und - 90 % bezogen auf die Inputkonzentration. Beim Eisen wird die Güte der Magnetabscheidung erkennbar: Praktisch keine Abreicherung ist in Kirchdorf gemessen worden, - 54 % in Oberpullendorf und - 75 % in Wien. Für Kupfer liegt die Abreicherung bei - 71 % (Oberpullendorf), - 33 % (Kirchdorf) und - 42 % (Wien), für Chrom bei - 66 % (Oberpullendorf), - 45 % (Kirchdorf) und - 43 % (Wien). Das Cadmium findet sich vor allem im Fe-Schrott wieder, in welchem es gegenüber dem Restmüll um bis zu + 3.800 % (Oberpullendorf I) angereichert ist. Die heizwertreichen Fraktionen enthalten noch 3 bis 10mal soviel Cadmium wie die Rotteinputs. Kupfer wird vor allem in die heizwertreichen Fraktionen gelenkt, wodurch sich die Gehalte darin gegenüber dem Restmüll zum Teil mehr als verdoppeln. Bei Chrom, das auch nennenswert über den Fe-Schrott ausgeschleust wird, ist die Anreicherung in den heizwertreichen Fraktionen weniger ausgeprägt. Für die anderen untersuchten Metalle ist keine oder eine nur schwache und von Versuch zu Versuch verschiedenene Lenkungswirkung festzustellen.

Eine beachtliche Trennwirkung besitzen die ballistischen Separatoren. In Tabelle 5-3 ist die Anreicherung von Metallen in der jeweiligen Schwerfraktion dargestellt. Es ist zu beachten, dass bei den Werten für Oberpullendorf II die Zusammensetzung der Schwerfraktion errechnet wurde, da diese so nicht analysiert wurde. Die Anlage trennt aus der Schwerfraktion unmittelbar den NFe-Schrott ab. Die Zusammensetzung der Schwerfraktion vor der Schrottabtrennung wurde nun mit Hilfe der Schrottzusammensetzung berechnet.

*Tabelle 5-3: Verhältnis der Gehalte ausgewählter Metalle zwischen Schwerfraktion und Leichtfraktion von ballistischen Separatoren (aufgetrennte Siebfraktionen: Oberpullendorf 25-65 mm, Kirchdorf >50 mm), Angabe des Gehalts (TS) der Schwerfraktion in % bezogen auf den Gehalt der Leichtfraktion (TS)*

| Metall                   | Al  | Cd  | Cr  | Cu  | Fe  | Ni  | Pb  | Zn  |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>Oberpullendorf II</b> | 300 | 93  | 96  | 930 | 220 | 220 | 760 | 380 |
| <b>Kirchdorf</b>         | 110 | 150 | 250 | 130 | 350 | 250 | 330 | 330 |

Die Lenkungswirkung für Metalle in die Schwerfraktionen wird durch den verfahrenstypischen Transfer von kompakten Metallteilen bewirkt. Die in Oberpullendorf beobachtete beinahe Gleichverteilung von Cadmium kommt vom Fehlen metallischer Cd-Anteile. Dagegen enthält in Kirchdorf die Schwerfraktion (im Gegensatz zur Leichtfraktion) NiCd-Akkus. Die ungleichen Ergebnisse bei Kupfer liegen in der Aufgabekörnung begründet.



Die Fraktion 25-65 mm in Oberpullendorf enthält kaum Kabel, dafür sind kompakte Kupfer- und Messingteile (z.B. Sanitärarmaturen) typische Bestandteile. Der Anreicherungseffekt ist groß. In der Fraktion >50 mm in Kirchdorf finden sich, für eine grobe Siebfraction typisch, häufig Kabel. Die Kabel werden bevorzugt in die Leichtfraktion gelenkt, weshalb bei vergleichsweise hohen Kupfergehalten in Schwer- und Leichtfraktion nur eine schwache Separationsleistung zu beobachten ist.

Generell ist die mechanische Trennung bzw. die Anreicherung von Stoffen nur möglich, wenn die verschiedenen Stoffe Gemengteilen mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften zugeordnet sind bzw. Gemengteile unterschiedlicher mechanischer Eigenschaften hinreichend unterscheidbare Zusammensetzungen aufweisen. Die Kombinationen aus mechanischen Eigenschaften und chemischer Zusammensetzung, die in den untersuchten Anlagen die wirkungsvollste Lenkung von Stoffen in einzelne Fraktion bewirkten, sind folgende:

- Magnetische Abscheidbarkeit/Eisengehalt
- Magnetische Abscheidbarkeit/Cadmiumgehalt (NiCd-Akkus)
- Große Korngröße/Cadmiumgehalt (im Kunststoff, vermutlich Cd-stabilisiertes PVC)
- Abscheidbarkeit Wirbelstromscheidung/Aluminiumgehalt

Durch die Zuordenbarkeit der Stofffrachten zu Gemengteilen bestimmter mechanischer Eigenschaften ergibt sich eine klare Inputabhängigkeit der Transferkoeffizienten von der Verteilung der Stoffe im Abfallinput.

Bei Betrachtung der zahllosen verschiedenen Erzeugnisse als Gemengteile der MBA-Outputfraktionen wird deutlich, dass die Beziehungen zwischen chemischer Zusammensetzung und mechanischen Eigenschaften zum Teil nur schwach oder sogar gegensätzlich sind. Die Abtrennung in sich einheitlicher und im stofflichen Sinn homogener Fraktionen, sei es zur Gewinnung von „sauberen“ Brennstoffen, Rückgewinnung von Stoffen oder Erfassung von Problemstoffen zur gezielten Entsorgung ist daher mit den gängigen Verfahren der mechanischen Abfallbehandlung nicht zu erzielen. Nur durch positive Selektion unter den einzelnen Gemengteilen könnten solche Fraktionen gebildet werden. Unter positiver Selektion wird verstanden, dass die gewünschten Gemengteile, die den gestellten Anforderungen entsprechen, einzeln aus dem Abfallstrom ausgelesen werden. Übrig bliebe ein Rest, der keinen Anforderungen genügen muss. Auf Grund der unüberschaubaren Vielfalt unter den Gemengteilen des Restmülls und der zahllosen Materialverbunde ist es nicht vorstellbar, durch negative Selektion, d.h., durch Befreien des Hauptmassenstroms von unerwünschten Teilen, ein vergleichbares Ergebnis zu erzielen. Die dazu notwendige Definition der auszulesenden, unerwünschten Gegenstände könnte nicht vollständig sein.

Die Metallfrachten, die in Form metallischer Teile vorliegen sind als „potentiell mechanisch abtrennbar“ zu bezeichnen. Wie die Ergebnisse der Separatbestimmungen zeigen, ist dieser Anteil häufig ein Großteil der Fracht. Theoretisch besteht die Möglichkeit, diese Mengen durch mechanische Aufbereitung von den begleitenden Stoffen zu lösen. Der außerordentlich hohe Aufwand für die Trennung von Werkstoffen zur Separatbestimmung zeigt jedoch die Schwierigkeiten auf. Zum Teil ist auch durch manuelles Bearbeiten, das als gezielteste Bearbeitungsform gelten kann, keine Trennung möglich (z.B. Kupfer aus Leiterplatten, in Epoxidharz getränkte Ankerwicklungen von Elektromotoren etc.). Die maschinelle Trennung würde eine intensive Zerkleinerung voraussetzen, um das Material aufzuschließen. Die Versuche haben allerdings gezeigt, dass selbst mit der Zerkleinerung auf Korngrößen unter



15 mm (UNTHA-Shredder) keine vollständige Trennung von Kunststoff/Metall-Verbunden z.B. Kabel, Metallstücke an Kleidungsstücken und Taschen z.B. Reißverschlüsse, Ösen oder Gürtelschnallen möglich ist.

### **5.1.3 Defizit an praxistauglichen Methoden bei der Bestimmung der durchschnittlichen Abfallzusammensetzung zur Berechnung von Stofffrachten**

In dieser Arbeit wurde ausgehend von theoretischen Ansätzen versucht, die Voraussetzungen zu bestimmen, die notwendig sind, um systematische Fehler bei der Bestimmung der durchschnittlichen Stoffkonzentrationen zu vermeiden. Die grundlegende Annahme, wonach die Metallfrachten zu relevanten Teilen in Form von hoch konzentrierten Trägerpartikeln oder -stücken vorliegen, wurde durch die Sortierungen im Zuge der Probenaufbereitungen (vergl. 4.5, den Anteil aus Metallen bei den Analysenergebnissen) und dem Zuordnungsversuch von Cadmium zur Kunststofffraktion (Kapitel 4.2.9) bestätigt. Die Annahme, dass die Probenahme vor allem auf die durch die Trägerstücke verursachte Heterogenität abzustellen ist, ist dadurch untermauert. Zusätzlich konnte die Heterogenität als Hauptursache der Streuung und damit die untergeordnete Bedeutung der Variabilität durch den Vergleich von Mischproben und Einzelproben bei der heizwertreichen Fraktion 50-250 mm der Splittinganlage Wien gezeigt werden (vergl. 4.4.5.2). Zusammenfassend ist damit die Forderung nach sehr großen Probenmassen (z.B. einige Tonnen bei heizwertreichen Fraktionen) begründet, wenn durchschnittliche Metallgehalte eines Gutes gemessen werden sollen.

In Anbetracht des Aufwands, der zur Probenahme und Aufbereitung in dieser Arbeit betrieben wurde, sind die erreichten Sicherheiten der Stoffkonzentrationen enttäuschend bzw. alarmierend, weil sie nicht auf ungünstige Voraussetzungen oder Fehler zurückzuführen sind, sondern als „normal“ bei den vorliegenden Materialqualitäten zu bezeichnen und auch theoretisch begründbar sind.

**Die Möglichkeiten MBA-Outputgüter direkt zu analysieren, um deren durchschnittliche Metallgehalte, wie sie in der Stoffflussanalyse zur Berechnung der Frachten gebraucht werden, zu bestimmen, sind daher derzeit als unbefriedigend zu bezeichnen. Es mangelt an praxistauglichen Methoden.**

Diese Aussage ist auf alle Abfälle mit vergleichbarer Heterogenität übertragbar.

Der Mangel an praxistauglichen Methoden zur Bewältigung ausreichend großer Probenmassen besteht auf jeder Ebene von der Probenahme bis zur Bestimmung. Die Aufarbeitung von Feldproben, die tatsächlich repräsentativ für eine Gütermenge sind, ist ebenso schlecht in der Praxis umsetzbar, wie die Verwendung ausreichend großer Einwaagen für eine Bestimmung (Aufschluss) im Labor oder umgekehrt die ausreichend feine Vermahlung der Analysenproben zur Bestimmung bei praxisüblichen Einwaagen. Um routinemäßige Untersuchungen, die richtige durchschnittliche Werte liefern, zu ermöglichen, ist Entwicklungsarbeit auf dem Gebiet der Probenaufbereitung notwendig. Handlungsbedarf ergibt sich, wenn Güter untersucht werden sollen, um Stofffrachten zu berechnen (d.h. für jede Stoffflussanalyse und alle daran angelehnten Untersuchungen). Für die Beurteilung von Gütern hinsichtlich der Einhaltung bestimmter Anforderungen an die Zusammensetzung sollte die Option nicht übergangen werden, andere Kriterien als die in direkter Analyse bestimmten Metallgehalte für die Beurteilung heranzuziehen. Die Machbarkeit richtiger direkter Analysen von heterogenen Abfällen sollte gesichert sein, bevor Regelwerke geschaffen werden, die



diese voraussetzen. In diesem Zusammenhang ist die Frage zu stellen, welche Methoden existieren, die es ermöglichen, die Richtigkeit (nicht nur die Wiederholbarkeit) von Analysen zu prüfen.

Die direkte Analyse von Restmüll oder Restmüllfraktionen, mit dem Zweck durchschnittliche Gehalte zu bestimmen, ist nur möglich, wenn Vorinformationen darüber vorliegen

- in welchem Konzentrationsbereich der Analyt zu erwarten ist,
- in welchen Gemengteilen er in welcher Konzentration voliegt (Identität der Träger),
- wie häufig diese Träger im Abfall anzutreffen sind
- und welche mechanischen Eigenschaften bezüglich der für die Probenaufbereitung zur Verfügung stehenden Techniken die Träger aufweisen.

Diese Informationen sind in einen statistisch-mathematisch abgesicherten Beprobungsplan einzuarbeiten (die Bestimmung der minimalen Probenmassen, ist z.B. mit den auf der Daten-CD enthaltenen Planungswerkzeugen einfach möglich; die Daten-CD liegt der Studie nicht bei, kann jedoch auf Anfrage beim Sachbearbeiter eingesehen werden). Liegen diese Informationen nicht vor, ist es unmöglich einen adäquaten Plan für die Probenahme und Probenaufbereitung zu erstellen, systematische Fehler können nicht ausgeschlossen werden.

In diesem Zusammenhang wird das Abgehen von der ÖNORM S-2123 bei der Probenahme in den praktischen Versuchen begründet. Die Probenmassen, die sich bei der Anwendung dieser Norm ergeben, sind zu klein für die Bestimmung der durchschnittlichen Zusammensetzungen von MBA-Outputgütern, wie sie zur Errechnung der Stofffrachten bei der Stoffflussanalyse (besonders der Metalle) notwendig sind. Die Norm wäre für diese Aufgabenstellung auch nicht bestimmungsgemäß angewendet. Die nach ÖNORM S-2123 bestimmten Probenmassen z.B. für heizwertreiche Fraktionen und Rottematerialien sind um Faktor 2 bis 10 zu klein, um die Kupferfracht aus Kabeln und großen Messingstücken (z.B. Sanitärarmaturen), die in der Regel mehr als die Hälfte ausmacht, im Durchschnitt zu erfassen. Das selbe gilt für die Cadmiumfracht aus Cd-stabilisiertem PVC in heizwertreichen Fraktionen (und NiCd-Akkus; NiCd-Akkus haben allerdings nur in Ausnahmefällen bei ineffizienter Magnetabscheidung Bedeutung für die Cadmiumfracht heizwertreicher Fraktionen). Mit den Probenmassen nach Norm wäre es nicht möglich, bei den genannten Metallen annähernd normalverteilte Messwerte zu erzeugen (vergl. dazu 3.2.5).

#### **5.1.4 Praxistauglichkeit der Optimierungsmethode zur Versuchsplanung**

Das Optimierungsverfahren an sich ist eine (mit EDV-Unterstützung) einfache und sichere Rechenroutine, die problemlos eingesetzt werden kann.

Der sinnvollen Anwendung in der Praxis sind jedoch Grenzen gesetzt durch:

- Mangel an Eingabedaten über die erwarteten Streuungen bei der Bestimmung der durchschnittlichen Stoffkonzentrationen
- Notwendigkeit zu großen Stichprobenumfängen oder sehr kleinen Streuungen, um die erwarteten/vorgegebenen Unsicherheiten einhalten zu können
- Normalverteilungsvoraussetzung für alle Daten
- Eigenheiten der Stoffe



### *Mangel an Eingabedaten*

Die Daten über die Streuungen bei der Bestimmung der Stoffkonzentrationen haben größten Einfluss auf das Optimierungsergebnis. Die Datenlage darüber ist schlecht. Für die genaue Bestimmung sind im Einzelfall Vorversuche notwendig. Die im praktischen Teil bestimmten Streuungen und Varianzkomponenten sind ihrerseits zufallsbehaftet (auch die Standardabweichungen streuen) und gelten für die damals gewählten/vorherrschenden Bedingungen. Für andere Probenmassen (auf allen Ebenen vom Probenziehen bis zur Analysenprobe) können die erwarteten Streuungen mit dem theoretischen Zusammenhang, wonach die Standardabweichung mit der Quadratwurzel der Probenmasse abnimmt, abgeschätzt werden. Wie die Ergebnisse des praktischen Teils zeigen, ist beim Übertragen von Stoffkonzentrationen und Streuungen auf „äquivalente“ Güter Vorsicht geboten. Durch wenig auffällige Eigenheiten einer Anlage kann z.B. die Verteilung bedeutender Stoffträger stark verändert sein. Die schlechte Magnetabscheidung der MA Kirchdorf und der daraus resultierende hohe Gehalt an NiCd-Akkus in der Schwerfraktion >50 mm ist ein Beispiel. Mit den realisierten Probenmasse konnte in dieser Fraktion unter Nichtberücksichtigung der NiCd-Akkus eine niedrige Streuung für die Cd-Messwerte erreicht werden. Ergänzt man den (stark streuenden) Beitrag der Akkus, verschlechtert sich die Sicherheit entscheidend, die Probenmasse müsste, um die niedrige Standardabweichung beizubehalten, vervielfacht werden.

Für den Anwender stellt sich somit die Frage nach der Zuverlässigkeit der optimierten Probenahmepläne, wenn die Treffsicherheit der Eingabedaten für den Anwendungsfall nicht geklärt ist. Es ist in jedem Fall durch Sensitivitätsanalysen (einfaches Probieren durch Verändern der Eingabedaten) abzuklären, ob sich der optimierte Versuchsplan gravierend ändert, wenn Eingabedaten in realistischem Rahmen verändert werden.

Unter den untersuchten Parametern ist die Planung für Metalle, die in geringen Konzentrationen auftreten, am schwierigsten. Häufig gibt es hoch konzentrierte Trägerstücke oder -partikel für diese Metalle, welche einen Großteil der Fracht ausmachen und Hauptursache der Streuung sind. Dieser Umstand bietet die Möglichkeit zur (billigen) Voruntersuchung an Hand von Sortieranalysen.

### *Erforderliche Stichprobenumfänge*

Die Unsicherheiten der Ergebnisse, die der Optimierung vorgegeben werden oder als Minima bei gegebenen Kosten errechnet werden, sind Erwartungswerte. Umso größer die Unsicherheit des Ergebnisses ist, umso größer ist auch die Unsicherheit über das Ausmaß der Unsicherheit selbst. D.h., nur bei kleinen angestrebten/vorgegebenen Unsicherheiten ist die Wahrscheinlichkeit, mit der gemessenen Versuchsstreuung in der Nähe des angestrebten/vorgegebenen Wertes zu liegen zu kommen, groß.

In vielen Fällen wird der Anwender mit dem ihm zur Verfügung stehenden Mitteln die angestrebten Bereiche kleiner Unsicherheit nicht erreichen, weil der Aufwand der Probenaufbereitung (vor allem Aufbereitung am Ort der Probenahme) zu groß ist. Einzelnen Gütern werden nach dem optimierten Plan nur einige wenige oder überhaupt nur eine Probe zugeordnet. In diesen Fällen soll die Probenzahl auf Kosten der Probenmasse erhöht werden, auch wenn das Risiko steigt, Normalverteilung der Messwerte zu verlieren. Die Probenzahlen sollten nicht unter fünf sinken, außer es handelt sich um ein bekannt homogenes Gut oder die Streuung ist beim Probenziehen und Voraufbereiten vor Ort erkennbar und erlaubt ein





spontanes Gegensteuern (z.B. wenn die bei der Voraufbereitung aussortierten Erzeugnisse für Fracht und Streuung hauptverantwortlich sind).

### *Normalverteilungsannahme*

Die Normalverteilungsannahme gilt bei der Optimierung wie auch bei der Auswertung. Bei Probenzahlen unter einigen zig ist es kaum möglich, einen aussagekräftigen Verteilungstest durchzuführen (z.B. KS-Test). In den meisten Fällen wird die Abweichung von einer Normalverteilung nicht abzusichern sein, außer es gibt einzelne sehr hohe „Ausreißer“ unter den Messwerten. Es kann davon ausgegangen werden, dass einigermaßen symmetrische Verteilungen (Mittelwert halbiert ca. Abstand zwischen Minimum und Maximum, Mittelwert und Median unterscheiden sich kaum), die Voraussetzungen für die Verteilungsannahme erfüllen, da die Methoden dagegen robust sind.

### *Eigenheiten der Stoffe*

In der Regel werden bei einem Versuch mit einem Probenahmeplan mehrere Stoffe untersucht. In den seltensten Fällen wird aber die Optimierung des Versuchsplans für alle Stoffe gleich ausfallen. Kein Problem besteht, wenn die Optimierung für einen „schwierigen“ Stoff einen realisierbaren Plan ergibt und andere Stoffe „mitlaufen“ können (und damit besser als gefordert bestimmt werden). Ist das nicht der Fall und zwei (oder mehr) konträre Optimierungsergebnisse müssen kombiniert werden, steht kein mathematisch-statistisches Werkzeug zur Verfügung um ein Optimum für die Kombination zu finden. Es liegt in der Einschätzung, Gewichtung des Versuchsplaners, einen Kompromiss zu finden.





## 6 ALLGEMEINE METHODE ZUR STOFFBILANZIERUNG VON MECHANISCHEN UND MECHANISCH-BIOLOGISCHEN ANLAGEN ZUR BEHANDLUNG VON RESTMÜLL

Im ersten Teil (Methode) wird die allgemeine Methode beschrieben, wie sie sich unabhängig von allen Randbedingungen (Anlageneigenschaften, technische Möglichkeiten bei der Probenahme und Probenaufbereitung etc.) darstellt. Dieses Kapitel behält allgemeine Gültigkeit, auch wenn sich z.B. Anlagenkonzepte ändern oder neue Techniken in der Probenaufbereitung und chemischen Analytik eingeführt werden. Im zweiten Teil („Realisierungsvorschläge“) sind konkrete Anleitungen zu den einzelnen Arbeitsschritten gegeben. Diese Anleitungen beschreiben zum größten Teil die in diesem Projekt verwendeten Techniken. Faustzahlen für Probenzahlen und Probenmassen werden angegeben, die gemeinsam mit den auf der Daten-CD enthaltenen Auswertungstabellen eine Durchführung „nach Rezept“ ermöglichen. (Die Daten-CD liegt der Studie nicht bei, kann jedoch auf Anfrage beim Sachbearbeiter eingesehen werden.) Darüber hinaus werden Abänderungsvorschläge gemacht, die sich aus den Erfahrungen herleiten, aber aus terminlichen oder budgetären Gründen in diesem Projekt nicht verwirklicht werden konnten. Vervollständigt wird das Kapitel mit der Beschreibung aller gescheiterten Bemühungen zur Probenaufbereitung. Absicht dieses letzten Abschnitts ist es, zukünftigen Autoren Informationen über bereits durchgeführte, aber gescheiterte Experimente zugänglich zu machen.

### 6.1 Methode

#### 6.1.1 Voraussetzungen

Zwei Voraussetzungen technischer Natur müssen erfüllt sein, um Stoffbilanzen erstellen zu können:

- Möglichkeit zur Erfassung der Gütermassen für die Erstellung einer Güterbilanz
- Probenahmemöglichkeiten

Die Stoffbilanz setzt auf die Güterbilanz auf, indem die stofflichen Zusammensetzungen der Güter einbezogen werden. Idealerweise werden alle Güter massenmäßig erfasst. Es ist nicht ratsam, einzelne Güter aus der Massenbestimmung auszunehmen, wenn diese auch durch Bilanzierung errechnet werden könnten. Werden alle Güter bestimmt, zeigt eine Bilanz, die nicht aufgeht, Fehler auf. Diese Kontrollmöglichkeit entfällt, wenn ein Güterfluss als Differenz berechnet wird. Einzig bei der Rotte ist der Output über die Abluft am besten aus der Differenz (Rotteinput – Rotteoutput) zu bestimmen. Eine Massenbestimmung des Rotteverlusts aus der Differenz (Abluftmasse – Zuluftmasse) ist schwer vorstellbar. Es spricht aber nichts dagegen, unabhängig von der Güterbilanz einzelne Stoffflüsse (z.B. von Hg oder flüchtigen organischen Verbindungen) aus Abluftmessungen (durchschnittliche Konzentration mal Volumenstrom) zu bestimmen.

Für die Stoffbilanzierung müssen bei jedem Prozess mindestens alle Outputs und alle bis auf einen Input beprobt und analysiert werden. (Das es bei Aufbereitungsprozessen keinen Sinn hat, alle Inputs und alle bis auf einen Output zu beproben, wird später gezeigt.) Unverfälschte, entmischungsfreie Probenahme muss möglich sein, z.B. vom Band oder Bandabwurf.



## 6.1.2 Systemdefinition

Die Vorgangsweise zur Systemdefinition bei der Stoffflussanalyse ist von Brunner und Rechner (2004) allgemein und in Beispielen beschrieben. Grundsätzlich soll das System nach den Anforderungen der Fragestellungen in so wenigen Prozessen wie möglich beschrieben werden. Bei mechanischen bzw. mechanisch-biologischen Anlagen zur Abfallbehandlung sind in der Regel maximal ein bzw. zwei Prozesse zu definieren (mechanischer Teil, biologischer Teil).

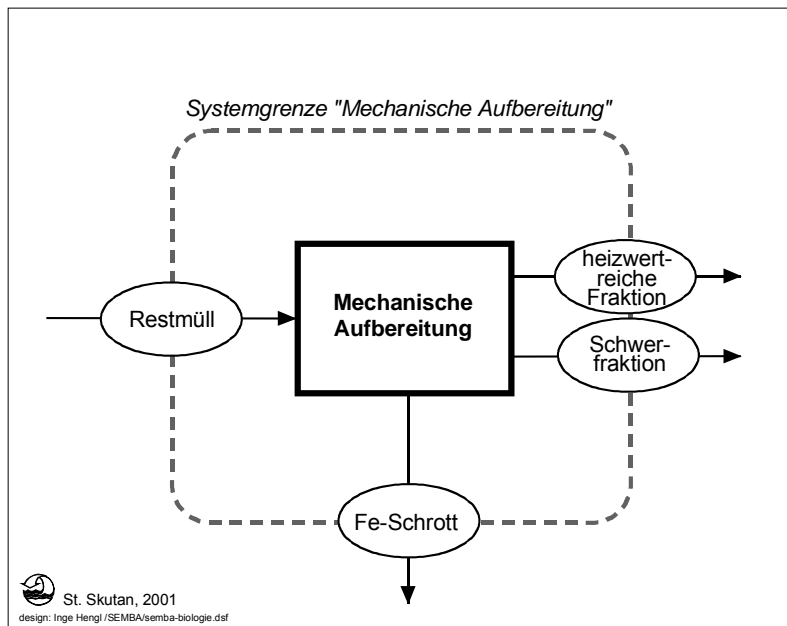


Abbildung 6-1: Einfachstes Systembild einer mechanischen Aufbereitung. Folgt eine aerobe biologische Behandlung ist statt „Schwerfraktion“ die Bezeichnung „Rotteinput“ treffender.

Sollen die Zwischenprodukte der mechanischen Behandlung mit untersucht werden, ist es notwendig, den Prozess „Mechanische Behandlung“ aufzugliedern. Die Stoffflüsse über die Zwischenprodukte müssen dann bestimmt werden, entweder durch direkte Messung (Massenerfassung, Probenahme und Analyse) oder rechnerisch, wobei die Unsicherheiten mit zu berechnen sind (z.B. mit Fehlerfortpflanzung). Ist das System überbestimmt, kann mit Methoden des Bilanzausgleichs (vergl. dazu Bauer, 1995) die Information aller Messungen zur Verbesserung der Bilanzen benutzt werden.

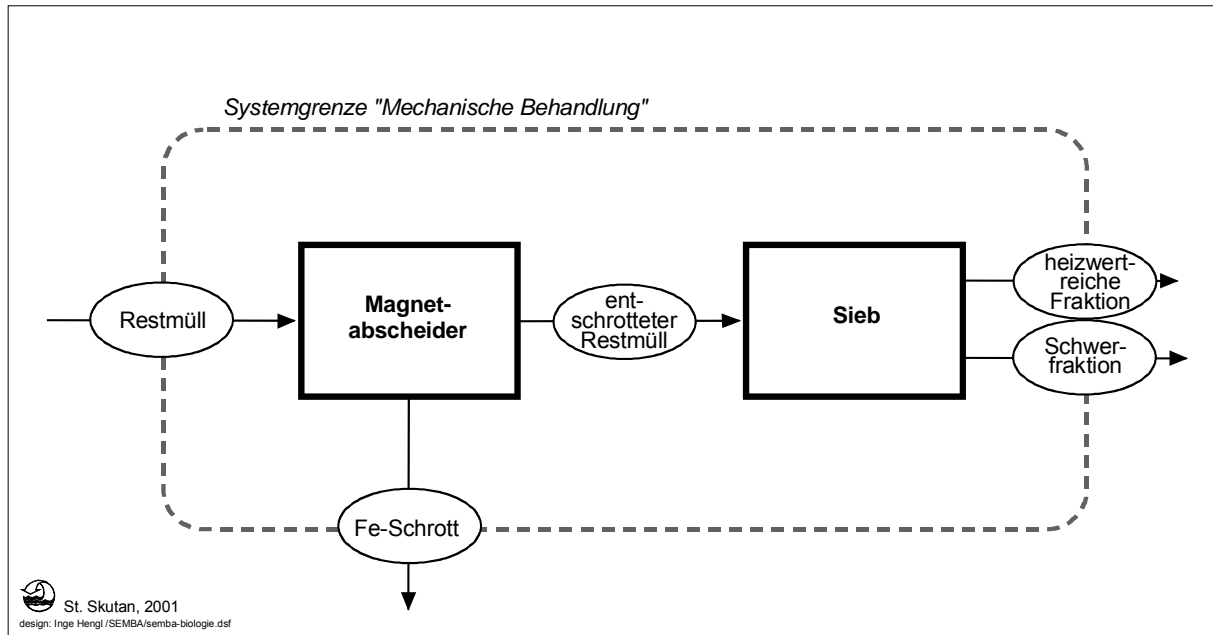


Abbildung 6-2: Systembild bei Aufgliederung der mechanischen Aufbereitung in einzelne Verfahrensschritte

In den meisten Fällen wird die Bilanz der Rotte nicht die Bruttoflüsse von Zuluft und Abluft erfassen sollen, sondern nur den rottebürtigen Austrag über die Abluft, d.h. den Nettofluss hinaus. Dementsprechend wird der „Rotteverlust“ als abstraktes Gut definiert, das als Differenz (Abluft - Zuluft) oder (Rotteinput – Rotteoutput) zu verstehen ist.

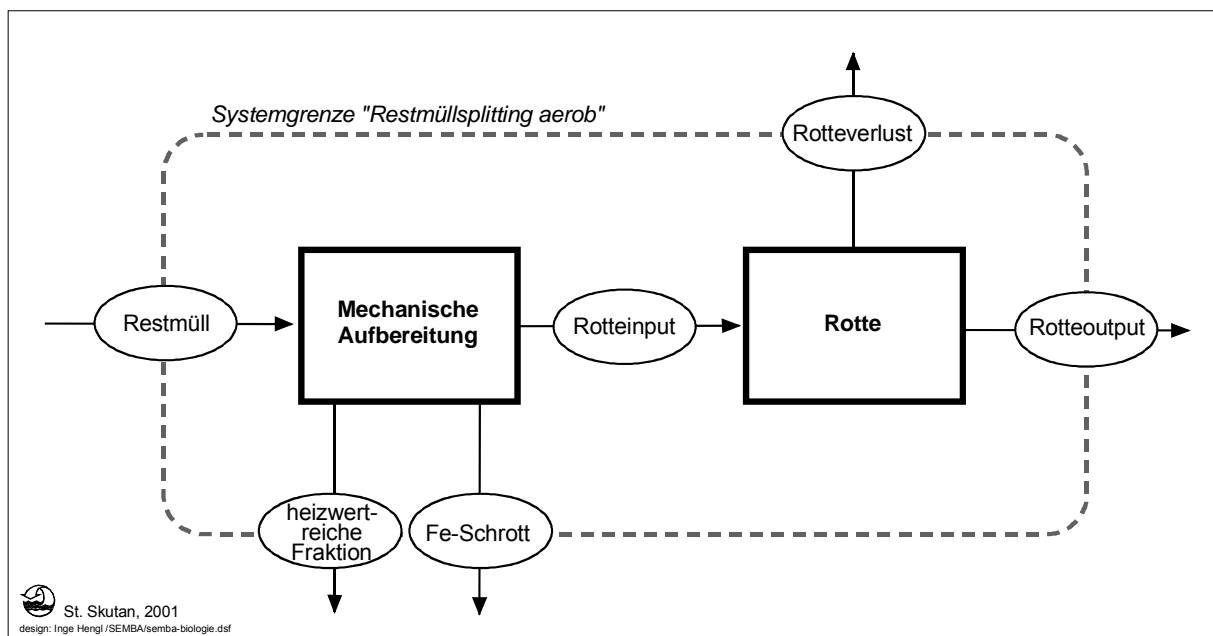


Abbildung 6-3: Beispiel eines Systembilds einer mechanisch-biologischen Aufbereitung

Finden weitere mechanische Aufbereitungsschritte nach der Rotte statt, muss der Prozess „Mechanische Nachaufbereitung“ ergänzt werden. Bei Verfahren mit Trockenstabilisierung ist die biologische Behandlung (Prozess „Biologische Trocknung“) vor der mechanischen



Aufbereitung angesiedelt. Das Outputgut der biologischen Trocknung könnte die Güterbezeichnung „trockenstabilisierter Restmüll“ tragen.

### 6.1.3 Bilanzzeiträume und Bilanzarten

Zwei Arten von Bilanzen sind möglich: „Einzelmessungen“ oder Bilanzen aus wiederholten Versuchen: Bei der Einzelmessung erhält man einen Satz von Transferkoeffizienten, bei wiederholten Versuchen pro Wiederholung einen Satz und die daraus gebildeten Mittelwerte. Die angegebenen Unsicherheiten beschränken sich beim Einzelversuch auf die Summe aller Messungenauigkeiten (der Begriff Messungenauigkeiten schließt hier alle Ungenauigkeiten ein, die bei der Bestimmung der Güterbilanz und den durchschnittlichen Stoffkonzentrationen auftreten, d.h. Wägefehler, Probenahmefehler etc.). Bei wiederholten Versuchen enthalten die angegebenen Unsicherheiten der Mittelwerte neben den Messungenauigkeiten auch die realen Schwankungen, die zwischen den Versuchsterminen auftreten. Wird ein Versuch mit wiederholter Bilanzierung so konzipiert, dass jede Einzelbilanz für sich mit ihren Unsicherheiten ausgewertet werden kann, lassen sich Messungenauigkeiten und reale Schwankungen als Streuungsursache trennen.

Bei der „Einzelmessung“ (vergl. Abbildung 6-4) sind alle Grundgesamtheiten, aus denen Messwerte bestimmt werden, durch den Bilanzzeitraum abgegrenzt. Bilanzzeitraum und Versuchszeitraum sind identisch. Als Versuchszeitraum wird hier die Zeit verstanden, in der Messungen durchgeführt und Proben gezogen werden. Für den Versuchszeitraum wird eine Güterbilanz erstellt und die durchschnittlichen Zusammensetzungen der darin enthaltenen Gütermassen bestimmt. In der Regel wird dabei für die Güterbilanzierung die gesamte Grundgesamtheit vermessen.

Bei wiederholten Versuchen (vergl. Abbildung 6-5) erstrecken sich die Grundgesamtheiten über die volle Dauer der Versuchsreihe, die Einzelmessungen liefern Stichproben von Transferkoeffizienten, die jeweils den Zeitpunkt des Einzelversuchs beschreiben.

Die Sinnhaftigkeit von wiederholten Versuchen ist abhängig vom Ausmaß der realen Schwankungen der Transferkoeffizienten und den geforderten Aussagen. Sind die Schwankungen klein, reicht eine Einzelmessung. Sind die Schwankungen groß, das Ausmaß der realen Schwankungen aber nicht Gegenstand der Untersuchung, reicht ebenfalls eine Einzelmessung, die über einen längeren Zeitraum angesetzt wird.

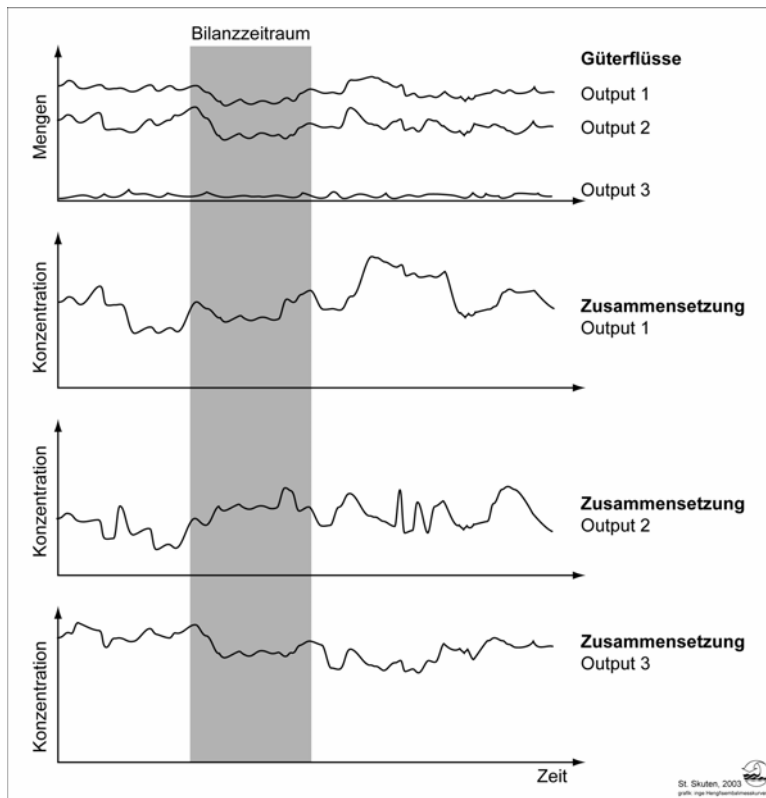


Abbildung 6-4: Einzelmessung

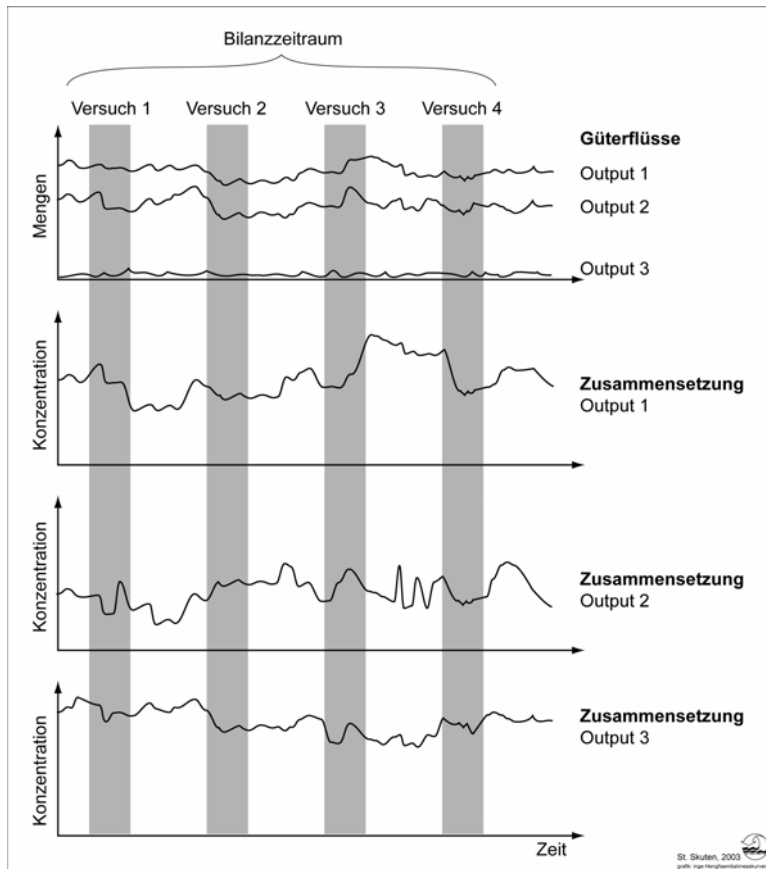


Abbildung 6-5: Bilanzierung mit wiederholten Versuchen



#### 6.1.4 Güterbilanzierung

Alle angelieferten und abtransportierten Abfallmengen müssen von den Anlagenbetreibern ohnehin erfasst werden und stehen für die Güterbilanz zur Verfügung. Nicht erfasst werden meistens Zwischenprodukte (z.B. Rotteinput), oft fehlen dafür auch die technischen Möglichkeiten der direkten Mengenbestimmung. Das Errechnen einer ungemessenen Gütermenge anhand einer Bilanz ist dann kein Problem, wenn im Prozess kein Lager besteht oder eine Lagerveränderung direkt gemessen werden kann. Besteht ein Lager, das nicht gemessen werden kann (z.B. die Abfallmenge in einer Dano-Trommel), so muss der Bilanzzeitraum so weit ausgedehnt werden, dass die maximal mögliche Lagerveränderung nur einen vernachlässigbaren Fehler verursachen kann. Die Relation zwischen Fehler der Güterbilanz und dem Verhältnis Lagerveränderung zu Gesamtdurchsatzmenge ist mit einer Sensitivitätsanalyse zu prüfen und daraus der erforderliche Gesamtdurchsatz während des Versuchs zu ermitteln.

Die Unsicherheit der Güterbilanz eines Einzelversuchs wird nur durch die Ungenauigkeit der Wägungen verursacht. Gegenüber den Unsicherheiten bei der Bestimmung der durchschnittlichen Stoffkonzentrationen sind diese meist vernachlässigbar klein. Die Varianz, die beim Wägen entsteht, wenn die Waage eine große Teilung hat (z.B. eine Brückenwaage, die Messwerte nur in Intervallen von 20 kg genau ausgibt), kann folgendermaßen berechnet werden:

*Bestimmung der Varianz von Werten, die kontinuierlich verteilt sind, aber nur in Intervallen gemessen werden können*

Die Abweichungen der gemessenen Werte von den wahren Werten sind stetig gleichverteilt. Die Varianz, die sich durch die „Rundung“ ergibt, ist berechenbar als

$$\sigma^2 = \frac{(b-a)^2}{12}$$

wobei a der größte mögliche Wert und b der kleinste mögliche Wert ist (vergl. dazu Hartung et al., 1991).

Ist die Teilung z.B. 20 kg, so sind die Messwerte Vielfache von 20. Es wird davon ausgegangen, dass die Waage richtig misst, d.h. von 0 bis 10 kg Null anzeigt, ab 10 kg bis 30 kg 20 usw.. Die ausgegebenen Werte verhalten sich dabei, als wären sie auf ganze 20 gerundet. Die größtmögliche Abweichung vom wahren Wert nach oben und unten ist jeweils 10 kg, d.h. die Differenz (b-a) ist 20. In diesem Beispiel ist die Varianz jeder Messung  $33 \text{ kg}^2$ , sie ist unabhängig von der Größe des Messwerts.

Dieser Messfehler gewinnt an Bedeutung, wenn die Massen in kleinen Einheiten gewogen werden, da für jede einzelne Messung diese Varianz anzusetzen ist (Fehlerfortpflanzung bei der Summenbildung). Wird die Gesamtmasse in 10 Portionen gemessen, ist die Varianz der Summe das 10-fache der Einzelmessung.





### 6.1.5 Bestimmung der durchschnittlichen Stoffkonzentrationen

Auf die Rahmenbedingungen bei der Probenahme und Aufbereitung von Restmüll und Restmüllfraktionen, die sich durch die abfalltypischen Materialeigenschaften ergeben, wurde in der Einleitung zur Methode der Analysen (3.2) ausführlich eingegangen.

*Es ist nicht vorstellbar, Abfälle direkt zu analysieren, ohne über die grobe Zusammensetzung des Materials im Voraus Bescheid zu wissen.*

Die prinzipielle Vorgangsweise umfasst folgende Schritte:

1. Vorerhebung der räumlichen und zeitlichen Stoffverteilung im Material
2. Feststellen der Zerkleinerungsmöglichkeiten
3. Auswahl der Analysemethoden d.h., Festlegen der Anforderungen an die Analysenproben
4. Festlegen der Anzahl an Zerkleinerungsstufen
5. Planung von Probenahme, Probenaufbereitung und Messung
6. Durchführung
7. Auswertung

#### 6.1.5.1 Probenahmestrategien

Es gibt zwei Möglichkeiten, um durchschnittliche Gehalte zu messen und die dazugehörige Unsicherheit zu berechnen (vergleiche dazu 3.2.5):

##### *Wenige große Proben - Anstreben von normalverteilten Messwerten*

Die Proben müssen so groß sein, dass durch Heterogenität bedingte Ausreißer nicht auftreten können. Ist diese Bedingung erfüllt, kann aus wenigen Messwerten erwartungstreu mit arithmetischem Mittelwert oder Median der Durchschnitt bestimmt werden. Zur weiteren Datenbeschreibung (Varianzen, Konfidenzintervalle etc.) und Versuchsauswertung (Fehlerfortpflanzung) können die gängigen Methoden der Normalverteilungsstatistik verwendet werden. Um normalverteilte Messwerte zu erhalten, müssen aus MBA-Outputgütern einige hundert kg bis zu einigen Tonnen Material je Proben gezogen werden.

##### *Viele kleine Proben - Auswertung mit empirischen Verteilungen*

Kleine Proben führen zu einer linkssteilen Verteilung der Messwerte (vergleiche dazu 3.2.5). Um den Durchschnitt davon erwartungstreu zu bestimmen, ist es erforderlich, so viele Werte zu messen, dass die Form der Verteilung beschrieben werden kann. Lassen sich die Messwerte nicht mit einer definierten Verteilung z.B. log-Normalverteilung beschreiben, müssen empirische Verteilungsfunktionen angepasst werden. Um die Daten auszuwerten, müssen die Formeln für Konfidenzintervalle, statistische Tests usw. für die jeweilige Verteilung mathematisch abgeleitet oder alle Auswertungsschritte über Monte Carlo-Simulationen geführt werden.

Die Strategie, viele kleine Proben zu nehmen und zu messen, wird hier nicht weiter verfolgt. Der Vorteil, die Verteilung der Stoffträger detaillierter zu bestimmen, steht einem unverhältnismäßig großen Aufbereitungs- und Analysenaufwand gegenüber. Darüber hinaus verlangt die Auswertung nicht normalverteilter Messwerte umfangreiche Detailkenntnisse in Mathematik und Statistik.



### 6.1.5.2 Erhebung der Stoffverteilung in den Gütern

Für die Bestimmung der Stoffgehalte ist es notwendig, die Art, Größe und Häufigkeit der „Stoffportionen“ zu bestimmen, welche die Stofffrachten verursachen. (Das gilt besonders für Metalle, aber auch für organische Spurenstoffe, die in einzelnen Erzeugnissen konzentriert enthalten sind, z.B. PCB.) Es ist zuerst zu erheben, in welchen Erzeugnissen die zu messenden Stoffe im Abfall anzutreffen sind, wie groß die Konzentrationen der Stoffe darin sind, ob sich diese Erzeugnisse zerkleinern lassen, usw.. Wenn keine Daten für die zu untersuchenden Güter vorliegen, müssen Sortieranalysen diese Daten liefern. Liegen Angaben über Restmüll vor, kann über die mechanischen Eigenschaften der Erzeugnisse die Verteilung auf die Outputgüter geschätzt werden.

Die Genauigkeit der Vorerhebungen steht nicht im Vordergrund. Es ist ratsam, iterativ vorzugehen: Im ersten Schritt müssen genügend Daten vorhanden sein, um durch eine Probenmassenbestimmung vorab die „Problemparameter“ ausfindig zu machen, d.h. jene Stoffe zu suchen, die die höchsten Anforderungen stellen. Es reicht, sich anschließend auf diese zu konzentrieren. Für die restlichen Parameter wird die schlussendlich gewählte Lösung überdimensioniert sein.

Es ist nicht möglich, die erforderlichen Probenmassen exakt zu bestimmen. Das Ziel ist, den Bereich zu finden, ab dem „repräsentative“ Probenahmen möglich sind. Je nach Umfang der Voruntersuchungen wird der ermittelte Bereich um oder über 30 % breit sein.

#### Beispiel Cadmium

Für Cadmium sind zwei Anwendungen in Bezug auf die Cadmiumfracht des Restmülls relevant: Akkumulatoren und Cd-Ba-Stabilisatoren für PVC. Weiters ist bekannt, dass Cadmium im Feinmüll (Staub) im Bereich einiger mg/kg TS enthalten ist, zum Teil als Begleiter von Zink. Der Staub und die zinkhaltigen Produkte liefern die relativ gleichmäßige Hintergrundkonzentration. In der folgenden Tabelle sind alle Informationen zusammengestellt, die für die Planung von Probenahme und ersten Probenaufbereitungsschritten aus Restmüll notwendig sind.

*Tabelle 6-1: Daten über Cadmium im Restmüll, die zur Bestimmung der minimalen Probenmassen erforderlich sind: Schätzungen*

| <b>Cadmium-Träger</b>           | <b>NiCd-Akkus</b>     | <b>PVC mit Cd-Ba-Stabilisatoren</b> | <b>„Hintergrund“</b> |
|---------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Beitrag zum Gesamtgehalt        | 5 mg/kg -TS (50%)     | 3 mg/kg TS (30%)                    | 2 mg/kg TS (20%)     |
| Cd-Konzentration in den Trägern | 150.000 mg/kg         | 2.500 mg/kg                         | ---                  |
| Masse eines Trägers             | 10 g bis einige 100 g | zig g bis einige kg                 | ---                  |
| Größe der Cd-Portionen jeTräger | 1,5 bis einige zig g  | zig mg bis einige g                 | ---                  |
| Anzahl Träger je Tonne          | 0 bis wenige          | wenige                              | ---                  |

Daraus abgeleitet lassen sich für durchschnittliche MBA-Outputs folgende Charakteristiken ableiten:



### Heizwertreiche Fraktion:

Tabelle 6-2: Daten über Cadmium in heizwertreichen Fraktionen, die zur Bestimmung der minimalen Probenmassen erforderlich sind (Schätzungen)

| Cadmium-Träger                   | NiCd-Akkus            | PVC mit Cd-Ba-Stabilisatoren | „Hintergrund“     |
|----------------------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------|
| Beitrag zum Gesamtgehalt         | max. einige %         | 5-15 mg/kg TS (~80%)         | 2 mg/kg TS (~20%) |
| Cd-Konzentration in den Trägern  | 150.000 mg/kg         | 2.500 mg/kg                  | ---               |
| Masse eines Trägers              | 10 g bis einige 100 g | zig g bis einige kg          | ---               |
| Größe der Cd-Portionen je Träger | 1,5 bis einige zig g  | zig mg bis einige g          | ---               |
| Anzahl Träger je Tonne           | selten „Ausreißer“    | wenige                       | ---               |

Von der Anlagenleistung (Zerkleinerung, Magnetabscheidung) hängt ab, wie groß die Bedeutung von NiCd-Akkus für den Cd-Gehalt einer heizwertreichen Fraktion ist. Die Häufigkeit des Auftretens ist am besten mit einer Sortieranalyse zu bestimmen.

### Rotteinput und Rotteoutput

Tabelle 6-3: Daten über Cadmium im Rotteinput oder Rotteoutput, die zur Bestimmung der minimalen Probenmassen erforderlich sind (Schätzungen)

| Cadmium-Träger                   | NiCd-Akkus            | PVC mit Cd-Ba-Stabilisatoren | „Hintergrund“    |
|----------------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------|
| Beitrag zum Gesamtgehalt         | max. einige %         | 0-1 mg/kg TS (~20%)          | 2 mg/kg TS (80%) |
| Cd-Konzentration in den Trägern  | 150.000 mg/kg         | 2.500 mg/kg                  | ---              |
| Masse eines Trägers              | 10 g bis einige 100 g | max. einige zig g            | ---              |
| Größe der Cd-Portionen je Träger | 1,5 bis einige zig g  | zig mg bis hunderte mg       | ---              |
| Anzahl Träger je Tonne           | selten „Ausreißer“    | wenige                       | ---              |

Der größte Teil des Cadmiums wird sich als relativ gleichmäßig verteilte „Hintergrundbelastung“ finden. Ausnahmen können auftreten bei ineffizienter Magnetabscheidung (NiCd-Akkus) oder Siebschnitten über 50 mm (erhöhter Kunststoffanteil).



## Magnetseparationsschrott

Tabelle 6-4: Daten über Cadmium im Magnetseparationsschrott, die zur Bestimmung der minimalen Probenmassen erforderlich sind (Schätzungen)

| Cadmium-Träger                   | NiCd-Akkus                       | PVC mit Cd-Ba-Stabilisatoren | „Hintergrund“ |
|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|---------------|
| Beitrag zum Gesamtgehalt         | einige hundert mg/kg -TS (~100%) | einige %                     | unbedeutend   |
| Cd-Konzentration in den Trägern  | 150.000 mg/kg                    | 2.500 mg/kg                  | ---           |
| Masse eines Trägers              | 10 g bis einige 100 g            | zig g bis einige kg          | ---           |
| Größe der Cd-Portionen je Träger | 1,5 bis einige zig g             | zig mg bis einige g          | ---           |
| Anzahl Träger je Tonne           | einige zig                       | wenige                       | ---           |

Die Cadmiumfracht des Magnetseparationsschrotts ist von den NiCd-Akkus dominiert.

### 6.1.5.3 Bestimmung der minimalen Probenmassen beim Anstreben normalverteilter Werte

Das Ziel dieses Abschnittes ist es, die Probenmassen zu bestimmen, die erforderlich sind, um mit einigen wenigen Proben erwartungstreu die durchschnittlichen Gehalte zu bestimmen. Die minimale Probenmasse wird für jede Probenahmestufe bestimmt, d.h. nicht nur für die Ziehung der Feldproben sondern auch für alle Teilproben, die durch Verjüngen gewonnen werden. Die Verjüngung einer Probe ist genauso wie die Ziehung der Feldproben eine Entnahme einer Stichprobe.

Beim modifizierten Ansatz nach Bunge und Bunge (1999) werden die einzelnen Schritte der Probenahme und Aufbereitung separat betrachtet. Um zur Varianz der letztlich gemessenen Werte (Labormesswerte) zu gelangen, müssen die Varianzen aller Schritte addiert werden (Gauß'sche Fehlerfortpflanzung). Die Simulation auf Basis Binomialverteilungsstatistik liefert diese Werte automatisch.

Zwei Varianten wurden adaptiert und getestet, sie liefern gleichwertige Ergebnisse:

#### *Ansatz nach Bunge und Bunge (1999), modifiziert*

Grundlagen und Vorgangsweise sind im Kapitel 3.2.3 ausführlich beschrieben. Die Excel-Datei zur Berechnung ist auf der Daten-CD („Probenmassen Bunge modifiziert“) verfügbar. Diese Datei enthält auch eine Beschreibung und Anleitung. (Die Daten-CD liegt der Studie nicht bei, kann jedoch auf Anfrage beim Sachbearbeiter eingesehen werden.)

### **Beispiel Cadmium in einer heizwertreichen Fraktion, Probenahme**

Auf Basis der Daten von Tabelle 6-2 werden folgende Eingabewerte gewählt: NiCd-Akkus, PVC und „Hintergrund“ liefern einen Beitrag von 0,5, 7,5 und 2 mg/kg TS zum Gesamtgehalt entsprechend einem Frachtanteil von 5, 75 und 20 %. Der Massenanteil der Trägerpartikel berechnet sich aus deren Cadmiumgehalt und den Konzentrationsbeiträgen (z.B. 7,5 mg/kg Beitrag aus PVC das, wenn es Cd-Ba-stabilisiert ist, im Mittel 1 g/kg Cadmium enthält, ergibt 7,5 kg CdBa-stabilisiertes PVC je Tonne Material entsprechend einem relativen Massenanteil



von 0,0075). Die maximale Masse der Trägerpartikel wird für die Akkus mit 50 g und PVC-Teile mit 500 g festgelegt. Die größte Partikelmasse unter den 10 % kleinsten Partikeln mit je 10 g. Der Tatsache des fein verteilten „Hintergrunds“ wird mit dem hohen Wert von 0,4 für den Massenanteil Rechnung getragen (Die Zeile mit dem Hintergrund könnte auch gelöscht und durch einen fixen Sockel ohne Varianz als Konzentrationsbeitrag ersetzt werden, nachdem der Beitrag zur Streuung vernachlässigbar ist.) Der Vertrauensbereich  $z$  ( $z$  gibt den Vertrauensbereich als Vielfaches der Standardabweichung an) muss bei dieser Anwendung gleich 1 gesetzt werden (notwendig, um die Standardabweichung direkt auszuwerfen). Die Zellen der relativen Probenahmefehler  $\epsilon$  werden dem Solver als veränderbare Zellen definiert. Sie werden beim Durchlauf des Solvers bestimmt, wobei als Zielzelle die Zelle des maximalen Fehlers (ganz rechts unten) eingegeben und mit dem gewünschten Zielwert versehen wird (hier wurde 2,0 gewählt, entsprechend 20 % des Gesamtgehaltes). Das Ergebnis bedeutet, dass unter den eingegeben Rahmenbedingungen (Frachtbeiträgen, Partikelmassen etc.) bei 95 % aller gezogenen Proben der Probenahmefehler unter 20 % liegt, wenn die Proben je 3.600 kg wiegen.

| 1. Probenahmeebene - unzerkleinerte Probe |                             |   |                         |             |   |  |                          |  |  |  |
|---|-----------------------------|---|-------------------------|-------------|---|--|--------------------------|--|--|--|
| Trägertyp                                 | Frachtbeitrag<br>[mg/kg TS] | Massenanteil<br>Träger-<br>partikel $\omega$<br>[relativ] | Masse<br>Trägerpartikel |             | Vertrauens-<br>bereich $z$<br>[relativ] | relativer<br>Probenahme-<br>fehler $\epsilon$<br>[relativ] | Proben-<br>masse<br>[kg] | Spanne<br>Vertrauens-<br>bereich<br>[mg/kg TS] | erwartete<br>Standard-<br>abweichung<br>[mg/kg TS] | max-Fehler bei<br>95 % aller<br>Proben<br>[mg/kg TS] |
|   |                             |   | max<br>[kg]             | 10%<br>[kg] |   |  |                          |  |  |  |
| NiCd-Akku                                 | 0,5                         | 0,000003125   | 0,05                    | 0,01        | 1                                       | 1,6182   | 3,597                    | 1,62   | 0,809  |  |
| PVC                                       | 7,5                         | 0,0075  | 0,5                     | 0,01        | 1                                       | 0,0829   | 3,597                    | 1,24   | 0,622  |  |
| Hintergrund                               | 2                           | 0,4   | 0,5                     | 0,0001      | 1                                       | 0,0086   | 3,597                    | 0,034  | 0,0172   |  |
| Summe                                     | 10                          |   |                         |             |   |  |                          |  | 1,02   | 2,00<br>Zielwert                                     |

Abbildung 6-6: Tabellenkalkulation für die Ermittlung der minimalen Probenmasse zur Bestimmung des Cadmiumgehalts einer heizwertreichen Fraktion.

Das Beispiel zeigt, dass NiCd-Akkus selbst bei kleinen Beiträgen zum Gesamtgehalt, gewichtige Mitverursacher der Probenahmestreuung sein können. Unter solchen Umständen ist mit Rücksicht auf das Ziel der Untersuchung zu hinterfragen, ob alle Frachtbeiträge (hier die 5 % aus Akkus) auch wirklich bestimmt werden sollen. Wenn ja, dann ist die „kaskadenartige“ Aufbereitung (siehe im Folgenden) das effektivste Mittel.

### Beispiel: Cadmium in einer heizwertreichen Fraktion, Teilung nach Vorzerkleinerung mit einem Shredder

Ausgangspunkt ist das Material, wie im vorigen Beispiel beschrieben, jedoch frei von NiCd-Akkus und mit einem Shredder vorzerkleinert auf <40 mm Korngröße. Als Massen für die Trägerpartikel des Typs PVC wurden 10 g als Maximum und 0,5 g für die 10 % der kleinsten Trägerpartikel gewählt.



| 2. Probenahmeebene - vorzerkleinerte Probe |                             |   |                         |             |                                       |  |                          |  |  |  |
|--|-----------------------------|---|-------------------------|-------------|---------------------------------------|--|--------------------------|--|--|--|
| Trägertyp                                  | Frachtbeitrag<br>[mg/kg TS] | Massenanteil<br>Träger-<br>partikel $\omega$<br>[relativ] | Masse<br>Trägerpartikel |             | Vertrauens-<br>bereich z<br>[relativ] | relativer<br>Probenahme-<br>fehler $\epsilon$<br>[relativ] | Proben-<br>masse<br>[kg] | Spanne<br>Vertrauens-<br>bereich<br>[mg/kg TS] | erwartete<br>Standard-<br>abweichung<br>[mg/kg TS] | max-Fehler bei<br>95 % aller<br>Proben<br>[mg/kg TS] |
|  |                             |   | max<br>[kg]             | 10%<br>[kg] |                                       |  |                          |  |  |  |
| NiCd-Akku                                  | 0                           | 0,5   | 0,05                    | 0,02        | 1                                     | 0,034  | 63                       | 0  | 0  |  |
| PVC  | 7,50                        | 0,00375   | 0,01                    | 0,0005      | 1                                     | 0,136  | 63                       | 1,02   | 1,02   |  |
| Hintergrund                                | 2,00                        | 0,4   | 0,005                   | 0,0001      | 1                                     | 0,00860  | 63                       | 0,017  | 0,017  |  |
| Summe                                      | 9,5                         |   |                         |             |                                       |  |                          |  | 1,02   | 2,00   |
|  |                             |   |                         |             |                                       |  |                          |  |  | Zielwert   |

Abbildung 6-7: Tabellenkalkulation für die Ermittlung der minimalen Teilprobenmasse nach der Vorzerkleinerung zur Bestimmung des Cadmiumgehalts einer heizwertreichen Fraktion.

Das Ergebnis bedeutet, dass unter den eingegeben Rahmenbedingungen (Frachtbeiträgen, Partikelmassen etc.) bei 95 % aller gezogenen Proben der Probenahmefehler unter 20 % liegt, wenn die Probenmassen mit 63 kg gewählt werden.

### Beispiel: Cadmium in einer heizwertreichen Fraktion, Einwaage einer analysenfertigen Probe bzw. Bestimmung der maximal zulässigen Korngröße

In Analogie zu den beiden vorangegangenen Beispielen kann mit der Tabellenkalkulation der Probenahmefehler beim Einwiegen zur Analyse bestimmt werden. Die Korngröße der analysenfertigen Probe wurde hier mit maximal 0,5 mm angenommen, die größten Durchmesser der 10 % kleinsten Körner sind mit 0,025 mm angenommen. Aus diesen Korngrößen ergeben sich die unter Annahme der Kugelgestalt und einer Dichte von 1,5 g/cm<sup>3</sup> die eingesetzten Teilchenmassen von 0,1 und ca. 0,005 mg.

| Letzte Probenahmeebene - Einwaage zur Analyse |                             |   |                         |             |                                       |  |                          |  |  |  |
|---|-----------------------------|---|-------------------------|-------------|---------------------------------------|--|--------------------------|--|--|--|
| Trägertyp                                     | Frachtbeitrag<br>[mg/kg TS] | Massenanteil<br>Träger-<br>partikel $\omega$<br>[relativ] | Masse<br>Trägerpartikel |             | Vertrauens-<br>bereich z<br>[relativ] | relativer<br>Probenahme-<br>fehler $\epsilon$<br>[relativ] | Proben-<br>masse<br>[kg] | Spanne<br>Vertrauens-<br>bereich<br>[mg/kg TS] | erwartete<br>Standard-<br>abweichung<br>[mg/kg TS] | max-Fehler bei<br>95 % aller<br>Proben<br>[mg/kg TS] |
|   |                             |   | max<br>[kg]             | 10%<br>[kg] |                                       |  |                          |  |  |  |
| PVC   | 7,50                        | 0,00375   | 1E-07                   | 4,9E-09     | 1                                     | 0,136  | 0,0006                   | 1,02   | 1,02   |  |
| Hintergrund                                   | 2,00                        | 0,4   | 1E-07                   | 4,9E-09     | 1                                     | 0,01318  | 0,0006                   | 0,026  | 0,026  |  |
| Summe   | 9,5                         |   |                         |             |                                       |  |                          |  | 1,02   | 2,00   |
|   |                             |   |                         |             |                                       |  |                          |  |  | Zielwert   |

Abbildung 6-8: Tabellenkalkulation für die Ermittlung der minimalen Einwaage zur Analyse bzw. der maximalen Korngrößen der analysenfertigen Proben zur Bestimmung des Cadmiumgehalts einer heizwertreichen Fraktion.

Das Beispiel zeigt, dass der mit gängigen Labormühlen praktisch unerreichbare Korngrößenbereich unter 0,5 mm gerade ausreicht, um mit Einwaagen um 600 mg einen Fehler von 20 % bei der Einwaage zu unterschreiten. Hebt man die maximale Korngröße auf 1 mm (unter Beibehaltung der 0,025 mm beim Wert „10 %“) steigt die erforderliche Probenmasse schon auf ca. 5 g, d.h. das fünf bis zehnfache einer Maximaleinwaage für den Mikrowellen-aufschluss.



### Beispiel: Kupfer in einer heizwertreichen Fraktion, Einwaage einer analysenfertigen Probe bzw. Bestimmung der maximal zulässigen Korngröße

Als grundsätzliche Überprüfung, ob ein Analysenverfahren (Aufschlussverfahren) geeignet ist, kann der Vergleich zwischen technisch machbarer Korngröße bei analysenfertigen Proben und berechneter maximaler Korngröße aus der Simulation herangezogen werden. In diesem Beispiel ist für einen Kupfergehalt von 2.500 mg/kg TS gezeigt, dass eine Korngröße von <1 mm - diese entspricht der eingesetzten Teilchenmasse von 5 mg - völlig unzureichend ist, um im Mikrowellenaufschluss (Einwaagen um 0,5 g) durchschnittliche Gehalte zu messen. Es wird davon ausgegangen, dass der größte Teil des Kupfers in metallischer Form vorliegt, auf die Einbeziehung eines Hintergrundgehalts wird deswegen verzichtet. Als Partikelmasse für die größten der 10 % kleinsten Partikel wurde hier ca. ein Zehntel der maximalen Trägerpartikelmasse festgesetzt. Für das Ziel einer kleineren Abweichung als 20 % bei 95 % aller Messwerte sind ca. 90 g d.h. ca. das Zweihundertfache der maximalen Mikrowellenaufschlussmenge notwendig.

| Letzte Probenahmeebene - Einwaage zur Analyse |               |                                      |                      |         |                     |                                       |             |                          |                              |                                  |
|---|---------------|--------------------------------------|----------------------|---------|---------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Trägertyp                                     | Frachtbeitrag | Massenanteil Trägerpartikel $\omega$ | Masse Trägerpartikel |         | Vertrauensbereich z | relativer Probenahmefehler $\epsilon$ | Probenmasse | Spanne Vertrauensbereich | erwartete Standardabweichung | max-Fehler bei 95 % aller Proben |
|   |               |                                      | max                  | 10%     |                     |                                       |             |                          |                              |                                  |
|   | [mg/kg TS]    | [relativ]                            | [kg]                 | [kg]    | [relativ]           | [relativ]                             | [kg]        | [mg/kg TS]               | [mg/kg TS]                   | [mg/kg TS]                       |
| Kabel   | 2500,00       | 0,00250                              | 5E-06                | 4,7E-07 | 1                   | 0,102                                 | 0,0897      | 255,10                   | 255,10                       |                                  |
| Summe   | 2500          |                                      |                      |         |                     |                                       |             |                          | 255,10                       | 500,00                           |
|   |               |                                      |                      |         |                     |                                       |             |                          |                              | Zielwert                         |

Abbildung 6-9: Tabellenkalkulation für die Ermittlung der minimalen Einwaage zur Analyse der analysenfertigen Proben zur Bestimmung des Kupfergehalts einer heizwertreichen Fraktion.

Um die maximal zulässige Korngröße bei definierter Einwaagemenge zu bestimmen, werden die Solver-Parameter geändert: Die Zelle der maximalen Trägerpartikelmasse wird als veränderbare Zelle definiert und eine Nebenbedingung eingeführt, die die gewünschte Probenmasse (hier 1 g) festsetzt. In die Zelle der „Masse Trägerpartikel 10 %“ wird eine Formel gesetzt, die ein Zehntel der maximalen Trägerpartikelmasse berechnet. Die Berechnung zeigt, dass Kornmassen unter 50  $\mu\text{g}$  notwendig sind entsprechend einem Korndurchmesser von <0,2 mm.

| Letzte Probenahmeebene - Einwaage zur Analyse |               |                                      |                      |         |                     |                                       |             |                          |                              |                                  |
|---|---------------|--------------------------------------|----------------------|---------|---------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------------|------------------------------|----------------------------------|
| Trägertyp                                     | Frachtbeitrag | Massenanteil Trägerpartikel $\omega$ | Masse Trägerpartikel |         | Vertrauensbereich z | relativer Probenahmefehler $\epsilon$ | Probenmasse | Spanne Vertrauensbereich | erwartete Standardabweichung | max-Fehler bei 95 % aller Proben |
|   |               |                                      | max                  | 10%     |                     |                                       |             |                          |                              |                                  |
|   | [mg/kg TS]    | [relativ]                            | [kg]                 | [kg]    | [relativ]           | [relativ]                             | [kg]        | [mg/kg TS]               | [mg/kg TS]                   | [mg/kg TS]                       |
| Kabel   | 2500,00       | 0,00250                              | 5,21E-08             | 5,2E-09 | 1                   | 0,102                                 | 0,001       | 255,10                   | 255,10                       |                                  |
| Summe   | 2500          |                                      |                      |         |                     |                                       | 0,001       |                          | 255,10                       | 500,00                           |
|   |               |                                      |                      |         |                     |                                       | Nebenb.     |                          |                              | Zielwert                         |

Abbildung 6-10: Tabellenkalkulation für die Ermittlung der zulässigen Korngröße zur Analyse der analysenfertigen Proben zur Bestimmung des Kupfergehalts einer heizwertreichen Fraktion.



### Simulation mittels Binomialverteilungsstatistik

Grundlagen und Vorgangsweise sind im Kapitel 3.3.6 ausführlich beschrieben. Mit der Simulation lässt sich die gesamte Prozedur von der Probenahme bis zur Einwaage in einem Stück durchrechnen. Nicht möglich ist die Kombination von mehreren Arten von Trägern in einer Simulation und die Eingabe einer Korngrößenverteilung für die Träger. Nachdem die Masse der größten Partikel den stärksten Einfluss auf die Probenmasse hat, ist diese Vereinfachung unproblematisch. Sollen dennoch verschieden große Teilchen oder Teilchen verschiedener Typen berücksichtigt werden, so ist das möglich, wenn für diese separate Simulationen durchgerechnet werden und die Ergebnisse mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung verknüpft werden (Addition der Varianzen aus den separaten Simulationen).

Als Eingangsdaten werden die erwartete durchschnittliche Konzentration, die Teilchenmasse, Teilchenzusammensetzung, Zerkleinerungsgrade und Probenmassen benötigt. Ausgegeben werden Histogramme der Messwerte sowie die Mittelwerte und Standardabweichungen auf den einzelnen Ebenen. Es ist nicht möglich, den Rechengang der Simulation umzukehren und die notwendigen Probenmassen oder Zerkleinerungsgrade als Ausgabewerte zu definieren. Die Werte, die zu akzeptablen Ergebnissen führen, müssen durch wiederholtes Probieren bestimmt werden.

### Beispiel: Cadmium in einer heizwertreichen Fraktion

Es werden die selben Eingangsdaten verwendet, wie in den Beispielen für die Berechnung nach Bunge und Bunge (1999) modifiziert (siehe oben).

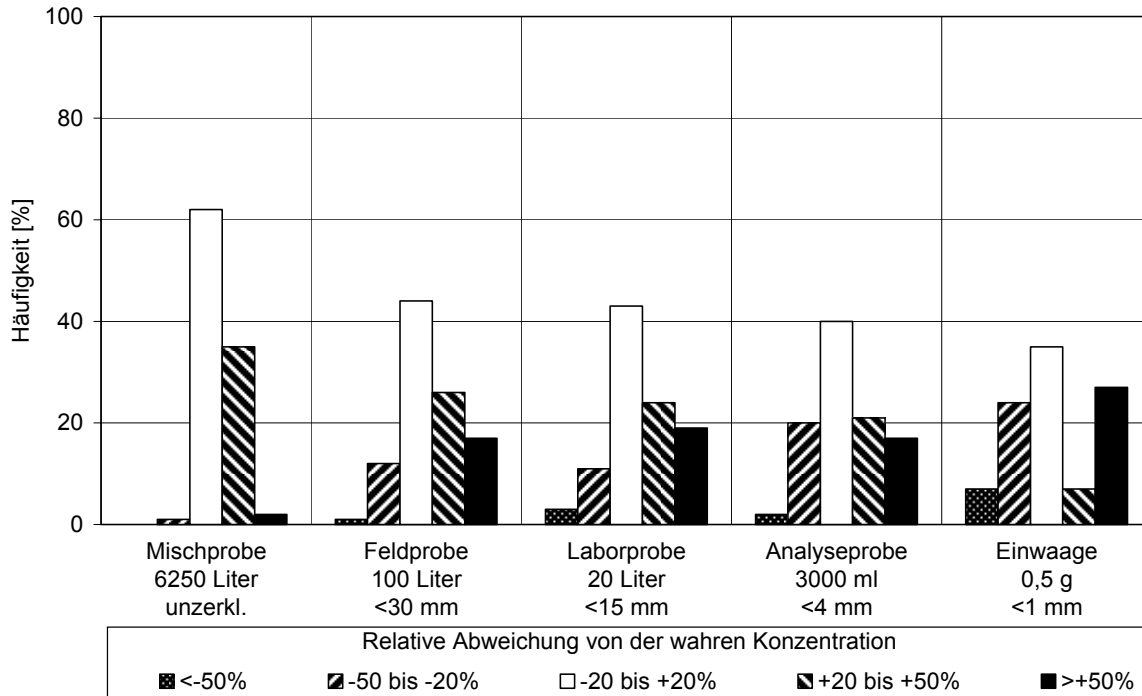


Abbildung 5.11: Simulation über die Bestimmung des Cadmiumgehalts einer heizwertreichen Fraktion bei einem hohen Anteil von Cadmium in Cd/Ba-stabilisiertem PVC: Histogramme der Cadmiumgehalte der simulierten Proben in den einzelnen Schritten der Probenahme und Aufbereitung





### *Kaskadenartige Aufbereitung der Proben*

Die Probenmasse richtet sich nach den Erzeugnissen, die die größte Streuung beim Probenziehen verursachen. Lassen sich diese Erzeugnisse aussortieren, kann die entfrachtete Probe anschließend ohne vorhergehende Zerkleinerung geteilt werden.

### **Beispiel: Cadmium**

Sind aufgrund einer ineffizienten Magnetabscheidung in einer heizwertreichen Fraktion NiCd-Akkus enthalten (z.B. Akkugeräte wie elektrische Zahnbürsten, aufladbare Taschenlampen, Spielzeuge etc.), so werden wegen diesen sehr große Proben notwendig sein. Zur Erfassung der anderen Cd-Quellen ist diese Probenmasse überdimensioniert. Gelingt es, alle NiCd-Akkus aus den Proben auszusortieren, können diese danach auf die Größe geteilt werden, die zur Bestimmung des Cadmiumgehalts auf Grund der zweitstärksten Varianzquelle notwendig ist. Die aussortierten Batterien werden separat bestimmt und bei der Auswertung auf die Probenmasse der ursprünglichen großen Probe bezogen. Der so errechnete Konzentrationsbeitrag wird zu den Laborergebnissen dazuaddiert.

#### 6.1.5.4 Bestimmung der notwendigen Aufbereitungsstufen und Separatbestimmungen

##### *Aufbereitungsstufen*

Die Anzahl der Aufbereitungsstufen von den ursprünglich gezogenen Proben bis zur Einwaage für die chemische Analyse im Labor ist allein abhängig von der Zerkleinerungsleistung der verfügbaren Maschinen. Wäre es möglich, die gesamte Probenmasse auf Analyseneinheit zu mahlen, wäre eine Abstufung nicht notwendig. Idealerweise ist die Planungsabfolge der Zerkleinerungsschritte entgegengesetzt zum Zerkleinerungsablauf: Ist festgelegt, wie der letzte Zerkleinerungsschritt erfolgen soll, um die notwendige Feinheit für das ausgewählte Analysenverfahren zu gewährleisten, ist eine Maschine zu suchen, die ausgehend von möglichst großen Mengen in möglichst grober Körnung geeignetes Material für den letzten Zerkleinerungsschritt bereitstellen kann. Wenn es nicht gelingt, mit einem einzigen Zerkleinerungsaggregat die Spanne zwischen Vorzerkleinerung der Feldproben und letzter Feinzerkleinerung zu überwinden, muss eine weitere Vorzerkleinerungsstufe eingeführt werden. Die Mengen, die jeweils zu zerkleinern sind, werden als minimale Probenmassen des betreffenden Schritts bestimmt.

##### *Separatbestimmung*

Stellt sich heraus, dass für einzelne Trägerpartikel keine adäquate Zerkleinerungsmöglichkeit besteht, müssen diese separiert werden, um sie getrennt zu analysieren. Es besteht auch die Möglichkeit, die getrennten Aufbereitungsschienen bei der chemischen Analyse wieder zusammenzuführen, indem die separat erzeugten Aufschluslösungen, im richtigen Verhältnis gemischt, gemeinsam gemessen werden. Ob die Zerkleinerungsqualität für das jeweilige Analysenverfahren ausreicht, kann abgeschätzt werden, indem für die erreichbare Korngröße die dazugehörige minimale Probenmasse berechnet wird (siehe Punkt 6.1.5.3 Beispiele). Ob schlecht zerkleinerbare Träger direkt nach der Probenahme, im Lauf der Aufbereitung oder erst direkt vor der Einwaage separiert werden, ist zu prüfen. Für die Richtigkeit der Ergebnisse ist eine möglichst frühe Abtrennung vorteilhaft, andererseits verursacht sie den größten Aufwand. Es sind mehr und größere Stücke zu bearbeiten, deren Aufschlussgrad schlechter ist. Jeder Zerkleinerungsschritt reduziert den Aufwand, Gegenstände zu zerlegen, drastisch. Die Fehler, die beim Weiterschleppen dieser Teilchen in Abhängigkeit der Proben-



masse entstehen, sind ins Verhältnis zu setzen mit dem Mehraufwand der frühzeitigen Separation.

### **Beispiel: Cadmium und Kupfer in heizwertreichen Fraktionen**

Die gängigsten Aufschlussmethoden bei der Bestimmung von Metallen verwenden Einwaagen von einigen hundert mg bis ca. ein g. Wie in den Beispielen in Punkt 6.1.5.3 berechnet, ist es dazu notwendig, Cd/Ba-stabilisiertes PCV und metallisches Kupfer auf Korngrößen unter 0,5 bzw. 0,2 mm zu zerkleinern. Die Zerkleinerung von Kupfer auf <0,2 mm ist mit Laborgeräten derzeit unmöglich, die richtige Bestimmung anhand weniger Messungen daher unrealistisch. Metallisches Kupfer muss daher aus den Proben separiert und getrennt bestimmt werden (das gleiche gilt für kupferhaltige Legierungen wie Messing und Bronze). Es empfiehlt sich, kupferhaltige Gegenstände vor der ersten Zerkleinerung auszuklauben, weil (1) massive Teile wie Sanitärarmaturen oder Rohre aus Messing Schäden am Zerkleinerungsaggregat verursachen können, (2) sich beim Shreddern biegsamer Kabel die feinen Kupferlitzen mit Durchmessern von wenigen Zehntel mm oder darunter zum Teil in cm langen Stückchen im Material verteilen und (3) die Teile hier gut erkennbar sind. Verteilte Litzenstückchen sind kaum zerkleinerbar und praktisch nicht mehr abtrennbar, sehr leicht geraten sie beim Sieben in den Siebdurchgang und damit in „fertiges“ Probenmaterial. Für Cd/Ba-stabilisiertes PVC ist eine Erkennung und Separierung schwer vorstellbar, d.h. Probengrößen und Zerkleinerungsschritte sind nach Punkt 6.1.5.3 dem tolerierbaren Fehler anzupassen. Beim Auftreten von NiCd-Akkus sollten diese vor der ersten Zerkleinerung aussortiert werden, weil (1) die Identifizierung und Mengenerfassung der intakten Batterien einfacher ist und (2) die Möglichkeit besteht, die Probenmasse für die weitere Aufbereitung drastisch zu reduzieren, wenn die Varianzursache NiCd-Akkus wegfällt (siehe Punkt 6.1.5.3 Kaskadenartige Aufbereitung).

#### **6.1.5.5 Methoden der Separatbestimmung**

Die Notwendigkeit zur Separatbestimmung betrifft wegen ihrer schlechten Zerkleinerbarkeit vornehmlich metallische Werkstoffe.

Werkstoffe, die durch ihr Aussehen, ihre mechanischen Eigenschaften, einfache chemische Nachweisverfahren oder typische Verwendungszwecke eindeutig identifizierbar sind, werden gereinigt und gewogen. Manchmal ist es notwendig, Verbunde in der Hitze zu trennen bzw. organische Bestandteile zu verbrennen. Batterien können anhand des inneren Aufbaus den verschiedenen Typen zugeordnet werden.

Werkstoffe, die nicht identifizierbar sind, müssen aufgeschlossen und chemisch analysiert werden. Bei größeren Stücken empfiehlt es sich, Aliquote abzuschneiden und diese aufzulösen. Anhaftende organische Verunreinigungen (auch Verbunde mit Kunststoffen) werden am besten verbrannt oder wenigstens verkohlt, um Schaumbildung beim Lösen zu verhindern.

#### **6.1.6 Versuchsoptimierung - Bestimmung der Probenzahlen**

Das Optimierungsverfahren ist unter Punkt 3.3.10 aufbauend auf Punkt 3.3.8 ausführlich beschrieben. Auf der Daten-CD ist unter „Versuchsoptimierung“ ein anwendungsbereites Tabellenblatt inklusive Kurzbeschreibung und Kurzanleitung enthalten. (Die Daten-CD liegt der Studie nicht bei, kann jedoch auf Anfrage beim Sachbearbeiter eingesehen werden.)



### **6.1.7 Versuchsdurchführung**

Auf Belange der praktischen Durchführung wird hier im allgemeinen Teil nicht eingegangen, siehe dazu Punkt 6.2 unter „Realisierungsmöglichkeiten“.

### **6.1.8 Auswertung**

Die Auswertung erfolgt auf Basis Normalverteilungsverfahren und Gauß'scher Fehlerfortpflanzung wie beschrieben unter Punkt 3.3.8 oder alternativ nach Punkt 3.3.9 mit Monte Carlo-Simulation.

## **6.2 Realisierungsmöglichkeiten**

In erster Linie wird auf die Beschreibung der drei durchgeführten Versuche verwiesen.

### **6.2.1 Bilanzierung nach Rezept - Faustzahlen zur Versuchsplanung**

#### **6.2.1.1 Versuchsaufbau, Bilanzzeitraum**

In der Regel nimmt die Probenaufbereitung vor Ort so viel Zeit in Anspruch, dass Bilanzzeiträume von einer Woche oder mehr, in denen die Proben in regelmäßigen Abständen gezogen werden, das Minimum darstellen. Als Standardversuchsdauer für einen Einzelversuch kann daher eine bis zwei Wochen empfohlen werden, wenn die Anlage während dieser Zeit annähernd 100 Tonnen oder mehr durchsetzt. Wenn möglich sollten Güterbilanzen während der Versuchsdauer tageweise bestimmt werden, um die Streuung davon berechnen zu können. Die Proben werden als Mischproben über die Zeit genommen.

Bei Versuchen, die aus mehreren Bilanzwiederholungen aufgebaut sind, kann der Bilanzzeitraum für eine Teilbilanz reduziert werden. In Abhängigkeit der notwendigen Genauigkeit einer Teilbilanz ergibt sich der Zeitraum aus dem Zeitaufwand für die Probenaufbereitung vor Ort. Als Minimum kann dafür ein Tag angesetzt werden, wenn ein schlagkräftiges Team am Werk ist. Jede Teilbilanz muss für sich auswertbar sein, d.h., dass Mischproben über die Zeit maximal den Zeitraum einer Teilbilanz umfassen dürfen.

#### **6.2.1.2 Güterbilanz**

Der Versuch soll so organisiert sein, dass die Güterbilanz vom Anlagenbetreiber erstellt wird. Der Anlagenbetreiber muss garantieren, dass In- und Outputmassen innerhalb des Versuchszeitraumes lückenlos erfasst werden. Alle Behälter, Fahrzeuge und Boxen müssen zu den vorgegebenen Zeiten geleert oder gewogen sein. Wenn die technischen Möglichkeiten bestehen, sollen alle Güterflüsse direkt gemessen werden, um ungemessene Flüsse nicht berechnen zu müssen.

#### **6.2.1.3 Probenahme aus den Gütern**

Die Probenahme soll prinzipiell vom Band oder beim Bandabwurf erfolgen. Die Probenahme aus größeren Haufen ist eine unbestimmbare Fehlerquelle. Die mit Abstand beste Lösung ist, die Proben beim Bandabwurf zu nehmen. Das Material kann im laufenden Betrieb mit einem Behälter, einer Scheibtruhe oder einer Radladerschaufel aufgefangen werden. Wichtig ist, dass das gesamte herabfallende Material erfasst wird. Die zweite Möglichkeit ist, die Fläche



unter dem Abwurf frei zu machen und die Anlage kurz anzuhalten, wenn der neu entstandene Haufen die richtige Größe erreicht hat. Zu groß geratene Haufen sollen nicht geteilt sondern komplett verworfen werden.

Für beide Varianten ist es notwendig, die Probenmasse mit dem Auge abschätzen zu können. Es wird empfohlen, die Probenahmen vor dem eigentlichen Versuch zu üben, auch wenn erfahrene Personal zum Einsatz kommt. Das Üben hat den Zweck, dass die Probennehmer schon ab der ersten Probenahme im Versuchszeitraum mit den speziellen Gegebenheiten der Probenahmestelle vertraut sind und die Probenahmen über den ganzen Versuch immer identisch ausgeführt werden.

Die Probenahme vom Band ist der Probenahme vom Abwurf gleichwertig, wenn die Anlage angehalten und ein Abschnitt des Bandes komplett abgeräumt und als Probe verwendet wird. Mit Schaufeln Proben vom laufenden Band zu ziehen, ist nur dann sinnvoll, wenn die volle Breite des Bandes erfasst wird und weder beim Eintauchen noch beim Wegnehmen nennenswert Material seitlich um die Schaufel fließt. Die Probenahme vom laufenden Band ist nur dann zulässig, wenn sie gefahrlos möglich ist, d.h. beschränkt sich auf feines Material.

Wenn Proben aus großen Haufen gezogen werden müssen, weil keine andere Möglichkeit besteht, muss entweder im Mischkrenzverfahren oder nach dem in Punkt 3.4.3.2 beschriebenen Prinzip vorgegangen werden. Es ist schwer vorstellbar, z.B. mit einem Radlader einen Haufen von vielen Tonnen im Mischkrenzverfahren fehlerlos zu teilen. Die Voraussetzung, sämtliches Material von einem Punkt aus senkrecht herabfallend zu einem Kegel zu schichten, ist nicht einhaltbar. Am ehesten sollten kleinere Portionen als ganze Radladerschaufeln abwechselnd von verschiedenen Seiten zu einem Kegel geschüttet werden. Denkbar ist auch, Mieten in dünnen Schichten aufzubauen und aus diesen dann einzelne Abschnitte als Teilmengen zu entnehmen.

#### 6.2.1.4 Probenmassen, Probenanzahlen

Probenmassen und Probenzahlen sind abhängig von der Stoffen, die bilanziert werden sollen. Folgende Richtwerte (Tabelle 6-5) können für die Pallette der in dieser Arbeit untersuchten Metalle mit Ausnahme von Quecksilber angegeben werden. Die angegebenen Massen richten sich vor allem nach den Elementen Cadmium und Kupfer, die unter den in dieser Arbeit untersuchten Metallen den größten heterogenitätsbedingten Streuungen bei der Probenahme unterliegen. Die Angaben sind Erfahrungswerte, die aus den Ergebnisse der theoretischen Arbeiten (Probenahmesimulationen) und praktischen Messungen resultieren.

*Tabelle 6-5: Richtwerte für Probenmassen und Probenzahlen für die Stoffbilanzierung von mechanischen und mechanisch-biologischen Restmüllbehandlungsanlagen. Die angegebenen Probenmassen gelten für jeweils eine von z.B. mindestens 5 Proben aus einer heizwertreichen Fraktion.*

| Gut                           | Probenmasse<br>[kg] | Probenzahl |
|-------------------------------|---------------------|------------|
| Heizwertreiche Fraktion       | 1.000 - 5.000       | 5 - 20     |
| Rotteinput, Rotteoutput       | 300 - 1.000         | 5 - 20     |
| Magnetseparationsschrott      | 500 - 2.000         | 3 - 10     |
| Wirbelstromseparationsschrott | 300 - 1.500         | 3 - 10     |



Die Probenmassen für heizwertreiche Fraktionen können im unteren Bereich angesiedelt werden, wenn die Anlage über effiziente Metallabscheidung verfügt, d.h. kaum Batterien und große Metallteile (z.B. Sanitärarmaturen) darin enthalten sind. In der Regel gilt das für Leichtfraktionen aus ballistischen Separatoren und Windsichtern. Tragen NiCd-Akkus mehr als 30 % zur Cd-Gesamtfracht bei, sollten die Probenmassen auf >10 Tonnen erhöht werden, um diesen Beitrag richtig bestimmen zu können. Die Proben können nach dem Ausklauben der Akkus noch vor der ersten Zerkleinerung auf das übliche Maß geteilt werden.

Bei Rotteinput und Rotteoutput ist die Probenmasse ebenfalls vor allem auf die Effizienz der Metallabscheidung (inklusive Batterien) abzustimmen. Werden häufig Batterien und große Metallstücke (Teile aus Messing, Blei, Zink, Kupfer) gefunden, sind große Proben zu ziehen. Als ineffiziente Metallabscheidung kann grob gelten, wenn in 100 kg Probe mehr als zwei Batterien, ein Wuchtlei oder fünf Messing- oder Kupferstücke mit jeweils mehr als 10 g gefunden werden.

Bei der Festlegung der Probenmassen der Schrottfaktionen besteht die Möglichkeit, simultan Anpassungen vorzunehmen, weil die Streuung zwischen den Proben anhand der Mengen an aussortierten Stoffträgern noch während des Versuchs geschätzt werden kann. Beispielsweise können aus dem Fe-Schrott aussortierte NiCd-Akkus gezählt und gewogen werden. Nachdem der Cd-Gehalt des Fe-Schrotts fast ausschließlich von dieser Menge abhängt, liefert die einfache Rechnung

$$c_{Cd} = \frac{\text{Masse}_{NiCd-Akkus} \cdot 0,16}{\text{Probenmasse}}$$

eine relativ genaue Vorabschätzung des Cadmiumgehalts. Mit 0,16 wird der durchschnittliche Cd-Gehalt der NiCd-Akkus von 16 % eingesetzt. Streuen die Werte stärker als toleriert, werden die Massen aller Schrottpuben so lange aufgestockt, bis die gewünschte Angleichung erreicht ist. Bei der Erhöhung der Probenmassen streben die Proben immer besser dem Erwartungswert zu, weshalb sich die Werte der einzelnen Proben immer weiter annähern. Die Streuung geht theoretisch mit der Wurzel aus der Probenmasse zurück.

#### 6.2.1.5 Probenaufbereitung vor Ort

Die Probenaufbereitung vor Ort besteht aus Sortieren, Zerkleinern, Wägen, Teilen und Trocknen. Praktikable Zerkleinerungstechniken, Sortierschemata und die Trocknung im Container sind in den Punkt 3.4.2.1 beschrieben.

Die Proben können nach erfolgter Zerkleinerung folgendermaßen geteilt werden (die angegebenen Werte sind Erfahrungswerte, die auf den Ergebnissen der theoretischen wie praktischen Arbeiten beruhen).

Tabelle 6-6: Richtwerte für die Probenteilung nach Vorzerkleinerung, Werte in kg

| Gut                     | zerkleinert auf |        |                 |                 |
|-------------------------|-----------------|--------|-----------------|-----------------|
|                         | <50 mm          | <30 mm | <15 mm          | <6,3 mm         |
| Heizwertreiche Fraktion | 150             | 50     | 8               | ---             |
| Rotteinput, Rotteoutput | ---             | ---    | 5 <sup>1)</sup> | 3 <sup>2)</sup> |

1) Anteil „weicher Bestandteile“ einer Probe

2) Anteil „harter, mineralischer“ Bestandteile einer Probe



Die Proben können auch in mehreren Schritten zerkleinert und geteilt werden, z.B. Zerkleinerung von 3.000 kg auf <50 mm, Teilung auf 150 kg, Zerkleinerung der 150 kg auf <15 mm, Teilung auf 8 kg.

#### 6.2.1.6 Probenaufbereitung im Labor

Die Probenaufbereitung im Labor besteht aus Trennungs- und selektiven Zerkleinerungsschritten, weil der Material-Mix in der Regel nicht gemeinsam zerkleinert werden kann. Der letzte Schritt ist die Rückvermischung der separat zerkleinerten Teilmengen der einzelnen Proben zu den fertigen Analysenproben (separat aufbereitete Probenfraktionen können auch getrennt analysiert und rechnerisch vereinigt werden). Brauchbare Techniken sind in den Punkt 3.4.3 beschrieben, weitere Möglichkeiten und Ideen, die lohnen getestet zu werden in Punkt 6.3.

Meistens müssen die Laborproben mehrstufig zerkleinert werden. Abhängig von der erreichten Körnung ist eine Reduktion der Probenmassen möglich (die angegebenen Werte sind Erfahrungswerte, die auf den Ergebnissen der theoretischen wie praktischen Arbeiten beruhen).

*Tabelle 6-7: Richtwerte für die Probenteilung nach Zerkleinerungsschritten im Labor, Werte in kg*

| Gut  | zerkleinert auf |       |       |       |
|--|-----------------|-------|-------|-------|
|  | <8 mm           | <4 mm | <2 mm | <1 mm |
| Heizwertreiche Fraktionen, Rotteinput, Rotteoutput | 5               | 1,5   | 0,5   | 0,2   |

#### 6.2.1.7 Chemische Analysen

Zum Erstellen von Stoffbilanzen ist es notwendig, Gesamtgehalte zu messen, d.h. Totalaufschlüsse aus den Analysenproben herzustellen. Die heute üblichen Aufschlussmethoden arbeiten mit Mengen um oder unter 1 g. Diese Mengen sind gemessen an der erreichbaren Feinheit der Analysenproben in der Regel zu klein, um im einzelnen Aufschluss eine repräsentative Menge zu messen (auch wenn das konsequente Aussortieren von metallenen Teilen und die gezielte Zerkleinerung der Kunststoffe das zum Ziel hat). Es empfiehlt sich, so viele Aufschlüsse einer Analysenprobe zusammenzumischen, dass die Lösung, die gemessen wird, einige g Probe repräsentiert. Wie viele solcher Aufschlussmischungen erzeugt und gemessen werden müssen, hängt von der Aufbereitungsqualität der Probe ab und der Streuung der Proben untereinander. Ist die Streuung der Proben untereinander hoch, ist die genaue Bestimmung jeder Probe von geringerer Bedeutung.

### 6.2.2 Arbeitszeitbedarf der Probenaufbereitung

Die Personalkosten für die manuellen Arbeiten der Probenaufbereitung bestimmen maßgeblich den finanzielle Aufwand, der zur Bestimmung der Stoffkonzentrationen in den Gütern notwendig ist. Im Folgenden werden für die gewählten Arbeitsschritte Angaben für den durchschnittlichen Arbeitszeitbedarf gemacht. Je nach Anlagenart und Inputqualität können Abweichungen von den angegebenen Werten auftreten. Der im Vergleich mit routinemäßigen Abfallanalysen immense Aufwand ist notwendig, um die Metallgehalte der Outputfraktionen unter Berücksichtigung aller „Störstoffe“ bestimmen zu können. Die bei Routineverfahren als „Störstoffe“ von der Analyse ausgeklammerten Gemengteile (z.B.



Bügeleisen oder Kochtopf in heizwertreicher Fraktion) tragen oftmals den Großteil der Metallfracht, weshalb sich die Analyse gerade auf diese Teile konzentrieren muss, wenn das Ziel verfolgt wird, die „wahren durchschnittlichen Stoffkonzentrationen“ zu erfassen. Es hätte keinen Sinn, eine Stoffbilanz nur für den Anteil eines Stoffes zu erstellen, der mit Routineverfahren erfasst werden kann. Eine Stoffbilanz muss immer die gesamte durchgesetzte Menge eines Stoffes erfassen. Aus diesem Grund sind durchwegs aufwendige Methoden anzuwenden, um die Beiträge der „Störstoffe“ zu den Gesamtgehalten zu ermitteln.

#### 6.2.2.1 Probenaufbereitung am Ort der Probenahme

Bei heizwertreichen Fraktionen ist der Zeitbedarf der Sortierschritte naturgemäß von der Korngröße des Materials abhängig. Der Gehalt an mineralischen Gemengteilen (Glas, Beton, Steine, Ziegel) entscheidet, ob eine quetschende Vorzerkleinerung (Walzen) notwendig ist, um die Abtrennung der mineralischen Anteile zu erleichtern. Die quetschende Vorzerkleinerung hilft auch, Kunststoff/Metall-Verbunde zu trennen.

*Tabelle 6-8: Arbeitszeitbedarf bei der Voraufbereitung von Feldproben vor Ort*

| <b>Arbeitsschritt</b>                                      | <b>Arbeitszeitbedarf<br/>Akh/1.000 kg</b> |
|--|---|
| <b>heizwertreiche Fraktionen</b>                           |   |
| Sortieren <sup>1</sup> >25 mm                              | 20  |
| Sortieren <sup>1</sup> >50 mm inkl.<br>Walzen <sup>2</sup> | 12  |
| Sortieren <sup>1</sup> >50 mm                              | 15  |
| Sortieren <sup>1</sup> >250 mm                             | 10  |
|  |   |
| Shreddern und Teilen                                       | 20  |
|  |   |
| <b>Rottematerial</b>                                       |   |
| Walzen + Sieben + Sortieren <sup>3</sup>                   | 150                                       |
|  |   |
| <b>Fe-Schrott</b>  |   |
| Sortieren <sup>4</sup>                                     | 20  |
|  |   |
| <b>NFe-Schrott</b>   |   |
| Sortieren <sup>5</sup>                                     | 40  |

<sup>1</sup> unter „Sortieren“ wird generell das Aussortieren von metallischen und mineralischen Gemengteilen verstanden

<sup>2</sup> beim Walzen werden gleichzeitig die mineralischen Bestandteile („Steine“) auf Korngrößen von ca. 0-5 mm zerkleinert.

<sup>3</sup> Endprodukt ist eine mineralstoffreiche Feinfraktion, eine kunststoffreiche Grobfraktion und eine Metallfraktion

<sup>4</sup> Sortierung in Fe+Verunreinigungen, „Konzentrat“, „Kunststoffe+Weich“ und Feinfraktion

<sup>5</sup> Sortierung in Al+Verunreinigungen, „Konzentrat“, „Kunststoffe+Weich“ und Feinfraktion



### 6.2.2.2 Laboraufbereitung

In Tabelle 6-9 ist für verschiedene Schritte der Laboraufbereitung in Abhängigkeit des Probenmaterials der Arbeitszeitbedarf angegeben.

*Tabelle 6-9: Arbeitszeitbedarf bei der Laboraufbereitung; die Korngrößenangaben und Massen beziehen sich auf die zu bearbeitenden Laborproben*

| <b>Arbeitsschritt</b>                           | <b>Arbeitszeitbedarf<br/>Akh/Probe</b> |
|---|--|
| <b>heizwertreiche Fraktionen</b>                |  |
| Grobaufbereitung <sup>1</sup> <40 mm, 15 kg     | 25                                     |
| Grobaufbereitung <sup>1</sup> <15 mm, 8 kg      | 18                                     |
| Feinaufbereitung 1,5 kg <sup>2</sup>            | 10                                     |
| Behandeln der Metalle, 20 kg <sup>3</sup>       | 32                                     |
| <b>Rottmaterial</b>                             |  |
| Aufbereitung exkl. Metalle, 2 kg <sup>4</sup>   | 20                                     |
| Behandeln der Metalle, 2 kg <sup>3</sup>        | 12                                     |
| <b>Fe-Schrott</b>                               |  |
| Behandeln des „Konzentrats“, 50 kg <sup>5</sup> | 55                                     |
| Behandlung Verunreinigungen <sup>6</sup>        | 25                                     |
| <b>NFe-Schrott</b>                              |  |
| Behandeln des „Konzentrats“, 30 kg <sup>5</sup> | 55                                     |
| Behandlung Verunreinigungen <sup>6</sup>        | 25                                     |

<sup>1</sup> beinhaltet Aussortieren von Metallen und Steinen, Separation und Vermahlung körniger, mineralischer Bestandteile, Vermahlung mit Schneidmühlauf <4 mm

<sup>2</sup> beinhaltet Teilung, 2. Vermahlung mit der Schneidmühle, wiederholtes Sieben, Pressen, Sägen, Rückvermischen

<sup>3</sup> beinhaltet Sortierung, Zerlegen, Reinigen und Wägen identifizierbarer Teile, Vorbereitung zum Abspülen und Lösen, Bereitung der flüssigen Analysenproben

<sup>4</sup> beinhaltet Probenteilung, Vermahlung der Laborproben „Grob“ und „Fein“ mit Schneidmühle bzw. Scheibenschwingmühle, Schmelzen und Sägen der Kunststoffanteile, Rückvermischen; die Mengenangabe bezieht sich auf die Laborprobe „Fein“

<sup>5</sup> beinhaltet Sortierung, Zerlegen, Reinigen und Wägen identifizierbarer Teile, Vorbereitung zum Abspülen und Lösen, Bereitung der flüssigen Analysenproben

<sup>6</sup> Aufbereitung wie heizwertreiche Fraktion bzw. Rottmaterial; jedoch geringer Massen





## 6.2.3 Alternativen bei der Bestimmung der durchschnittlichen Stoffkonzentrationen

### 6.2.3.1 Möglichkeiten bei direkten Analysen

#### *Größere Einwaagen*

Die geringen Einwaagen sind bei den gegebenen Aufbereitungsmöglichkeiten ungeeignet, mit einem oder wenigen Aufschlüssen richtige Werte von einer Analysenprobe zu erhalten. Konsequenterweise sollten diese Techniken nicht angewendet und von solchen für größere Einwaagemengen abgelöst werden. Dafür kommen am ehesten Verbrennungsaufschlüsse in Frage. Anzudenken wären Apparaturen, die es erlauben, Mengen bis zu einigen 100 g im Sauerstoffstrom zu verbrennen, wobei flüchtige Metallverbindungen in gekühlten Teilen der Apparatur abgefangen werden müssten, wie es etwa beim Trace-O-mat Aufschluss durch Kühlung mit flüssigen Stickstoff (vergl. Heng-bin Han et al., 1981) der Fall ist. Gelingt es, die Einwaagen auf ein Niveau von einigen 100 g anzuheben, werden die aufwendigen Feinzerkleinerungsschritte für Kunststoffe und das Aussortieren der meisten Metalle überflüssig.

#### *Bessere Zerkleinerung*

Um Einwaagen um oder unter 1 g einhalten zu können, sind grob Korngrößen unter 0,2 mm erforderlich. Diese Körnung ist mit Kunststoffen nur mit höchstem Aufwand erreichbar, bei zähen Metallen unerreichbar. Ein Ausweg könnte sein, nach einer intensiven „herkömmlichen“ Laborzerkleinerung mit z.B. einer Schneidmühle bei 0,2 mm zu Sieben und den Siebüberlauf mit einem Extruder zu einem Profil zu formen. Der Extruder müsste mit einem Sieb ausgestattet sein, das Teilchen mit  $>0,2$  mm Durchmesser aus der geschmolzenen Masse zurückhält, eine Technik, die im Kunststoffrecycling Stand der Technik ist. Das Kunststoffprofil müsste anschließend zerkleinert werden, wobei die Anforderungen an die Körnung deutlich niedriger sind, weil die Kunststofffraktion in sich homogenisiert ist, d.h. alle Trägerpartikel aufgelöst und deren Fracht in der gesamten Kunststofffraktion verteilt, d.h. verdünnt ist. Die abgetrennten Metallteilchen müssten separat gelöst und analysiert werden.

Die direkte Extrusion könnte eine Möglichkeit sein, um größere Mengen hochkalorischer Fraktionen, wie sie beispielsweise in Zementwerken mitverbrannt werden, zur chemischen Analyse einer Voraufbereitung zu unterziehen. Für eine Extrusion kommen alle Fraktionen in Frage, die hauptsächlich aus thermoplastischen Kunststoffen bestehen.

#### *Vollständige Separation von Metallen*

In der Frage der Kunststoffzerkleinerung ist der Stand der Technik von der Vorgabe nicht weit entfernt, die Vermahlung von reinen Kunststoffen auf  $<0,2$  mm ist mit schnelllaufenden Schneidmühlen und Ultrazentrifugalmühlen zum Teil möglich. Kunststoffmischungen und insbesondere der gegenständliche Material-Mix inklusive Metallteilchen und abrasiven mineralischen Teilchen werden aber von jeder Art von Mühle selektiv zerkleinert. Es kommt zur Entmischung, zähe und hochfeste Materialien werden verzögert zerkleinert oder bleiben überhaupt in der Mühle. Die vollständige Abtrennung wenigstens der Metallteilchen wäre die Lösung. Die Möglichkeit einer maschinellen Abtrennung aus Laborproben mit einigen mm Korngröße durch Magnetabscheidung, Wirbelstromabscheidung oder Elektrosortieren wäre zu prüfen.



Weiters wäre zu klären, ob es gelingt, durch lang Laufzeiten bei quetschender und schlagender Beanspruchung des Materials z.B. in einer Kugelmühle die nötige Feinzerkleinerung zu erreichen. Auch schlagfeste Kunststoffe werden nach langer Beanspruchung mürbe und brechen, zähe Metallteilchen können durch die Schläge zu Plättchen geschmiedet und schließlich zerteilt werden. Eventuell kommt es aber zu Aggregation und Anpackung im Mühlenbehälter.

### 6.2.3.2 Indirekte Analysen

#### *Verbrennungsversuche*

Die Stoffbilanzierung von großtechnischen Verbrennungsanlagen ist eine Möglichkeit um von großen Mengen brennbaren Materials die mittlere Zusammensetzung zu bestimmen. Besonders für Elemente die in der Hitze flüchtig sind und daher in hohem Ausmaß in Rauchgasreinigungsrückständen zu finden sind, ist die indirekte Analyse über die Verbrennungsprodukte eine wesentliche Erleichterung gegenüber der direkten Analyse. Rückstände aus der Rauchgasreinigung wie Filterstäube oder Neutralisationsschlämme sind „einfach“ zu beproben und unproblematisch in der Probenaufbereitung. Bei der Analyse von Verbrennungsschlacken stellt sich dagegen ebenfalls das Problem der durch Metallteile verursachten Heterogenität. Der Vorteil besteht jedoch darin, dass (1) die lithophilen Elemente beim Verbrennen in der Schlacke konzentriert werden, weshalb kleinere Probenmassen zulässig sind und (2) keine zäh-elastischen Bestandteile (Kunststoffe) enthalten sind.

#### *Großtechnisches Aufbereiten oder Einschmelzen von Schrotten*

Die Aufbereitung der Schrottfractionen, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wurde, ist extrem zeitaufwendig und erfordert umfangreiche materialkundliche Kenntnisse. Im Prinzip können mit dieser Methode nur Stofffrachten gemessen werden, wenn ihre Träger im Gemenge erkannt, aussortiert und aufgearbeitet werden. Es ist zu überlegen, für die Analyse großer Mengen, großtechnische Prozesse oder wenigstens Maschinen im halbtechnischen Maßstab als Aufbereitungshilfe heranzuziehen. Allerdings sind solchen Bestrebungen Grenzen gesetzt: Beim Einschmelzen von Magnetseparationsschrott gehen alle Elemente, die verbrennen bzw. selbst oder ihre Verbindungen niedrige Siedepunkte haben, verloren. Hier müssten erst geeignete Techniken entwickelt werden, um diese vollständig zu erfassen. Betroffen sind Cadmium, Quecksilber und Zink. Im halbtechnischen Maßstab ist besonders die Dioxinbildung beim Verbrennen der Verunreinigungen ein Problem. Das Institut für Eisenhüttenkunde der Montanuniversität Leoben lehnte aus diesem Grund ab, vorsortierte Schrottsproben zum Einschmelzen in einem Versuchs-Induktionsofen zu übernehmen.

Für die Aufbereitung von Nichteisenschrotten könnten Prozesse zur Auftrennung von Leicht- und Buntmetallen bzw. Zink benutzt werden (Schwimm/Sink-Verfahren, Schwertrübesortierung, erneute Wirbelstromscheidung nach Zerkleinerung und Klassierung).



## 6.3 Fehlgeschlagene Versuche im Rahmen der Probenaufbereitung

### 6.3.1 Feinzerkleinerung der Kunststoffe

#### *Langsamlaufende Schneidmühle Retsch SM 2000*

Kunststoffe bereiten wegen ihrer zäh-elastischen Eigenschaften bei der Feinzerkleinerung Probleme. Schneidendes oder schleifendes Bearbeiten eignet sich prinzipiell zur Zerkleinerung. Die langsamlaufende Schneidmühle Retsch SM 2000 ist wegen ihrer niedrigen Drehzahl und des großen Schneidspalts (mind. 0,3 mm) nicht in der Lage, Kunststoffe vollständig auf Korngrößen unter 1 mm zu zerkleinern. Beim Mahlen mit 4 mm Siebeinsatz wird das Material bis auf unerhebliche Rückstände aus Kunststoffplättchen (meist PET), die einige Zehntel mm dick sind und Durchmesser von 4 bis ca. 8 mm haben, ausgetragen. Beim Mahlen mit 1 mm Siebeinsatz werden dagegen Kunststoffe kaum weiter zerkleinert, sie bleiben zum größten Teil im Mahlraum bei Korngrößen zwischen 1 und 4 mm. Nur dünne Folien (Frischhaltefolien, PE-Sackerl), Fäden und synthetische Fasern finden sich nennenswert im Austrag. Mindestens 20 % der Probenmasse einer heizwertreichen Fraktion bleiben nach zwei Mahlgängen mit der Schneidmühle (4 mm, 0,5 mm Siebeinsatz) mit >0,5 mm Korngröße zurück. Die Kornmassen von Kunststoff- und Al-Teilchen bewegen sich in dieser Fraktion zwischen 0,1 und 5 mg.

#### *Schnelllaufende Ultrazentrifugalmühle Retsch ZM 200*

Wie bei der Schneidmühle ist es nicht möglich, eine Probe vollständig auf <0,5 mm oder darunter zu zerkleinern. Metallteilchen und Teilchen aus besonders festen Kunststoffen bleiben in der Mühle. Es kommt in jedem Fall zu einer Veränderung der Zusammensetzung der Probe, wenn der unzerkleinerte Rest nicht in einer anderen Form aufgearbeitet und rückgeführt wird. Das Mahlen ausreichender Mengen ist darüberhinaus problematisch, weil sich die Mühle rasch erwärmt (nach wenigen 100 g). Verstopfungen durch aufgeschmolzenes Material können die Folge sein.

#### *Scheibenschwingmühle*

Bei einer üblichen Mahldauer von 3 min ist keinerlei Zerkleinerungseffekt an Kunststoffteilchen erkennbar. Verlängert man die Laufzeit auf 15 min werden viele Teilchen platt gedrückt, einige wenige zerfallen infolge der Zermürbung. Folienteilchen mit einigen Zehntel mm Dicke zeigen keinerlei Veränderung. Der Zusatz von Quarzsand (0,7-1,2 mm, oder <0,5 mm) als Mahlhilfsmittel bewirkt eine unbedeutende Beschleunigung der beschriebenen Zerkleinerungs- und Zermürbungseffekte. Quarzsand wurde gewählt, weil Quarz scharfkantig bricht. Es wurde vermutet, dass die scharfkantigen Körnchen in der Lage wären, Kunststoffteilchen durch viele kleine Schnitte anzugreifen. Der Sand wird allerdings rasch zerkleinert und verliert dadurch seine Aggressivität gegenüber weichen Materialien. Bereits nach 3 min erhält man ein mehliges Quarzpulver, das leicht von den Kunststoffteilchen abgesiebt werden kann. Vermutlich führt Entmischung von Kunststoff und Quarz zu dieser selektiven Zerkleinerung. In einem weiteren Versuch wurden Mahlsteine sowie Innenseite des Mühlenbehälters mit Korund-Schleifpapier (Körnung 80) beklebt. Diese Anordnung bewirkt eine beginnende Zerkleinerung bevor das Papier zu verkleben beginnt. Es bilden sich nach wenigen Minuten „Inseln“ am Papier, die verhindern, dass sich die Korundkörnchen in die Kunststoffteilchen drücken



### *Versuche mit flüssigem Stickstoff*

Es wurde versucht, in einer Reibschale, die mit flüssigem Stickstoff ( $-196^{\circ}\text{C}$ ) gekühlten Teilchen zu zerquetschen bzw. zu zerschlagen. Versprödung tritt allerdings nur bei Gummi (nicht Silikongummi) und einigen bei Raumtemperatur harten Kunststoffen auf. PET, PP und PE bleiben elastisch genug, um gegen Druck und Schlag unempfindlich zu sein. Beim Versuch, das tiefkalte Material in einer schnelllaufenden Kaffeemühle zu zerkleinern, blieben ebenfalls PE- und PET-Teilchen vorwiegend unzerkleinert. Aufgrund dieser Erfahrungen wurden an der Schneidmühle keine Versuche mit flüssigem Stickstoff gemacht. Es ist außerdem nicht möglich, ausreichende Mengen flüssigen Stickstoffs in die Mühle einzubringen, weil die Ausgasung des heftig kochenden Kühlmittels feinere Bestandteile der Proben mitreißt. Weiters bildet sich auf allen Oberflächen Reif, der zum Verkleben und Verstopfen führen kann. Die Proben sind nach der Behandlung abhängig von der Behandlungsdauer und Kontaktzeit mit der Umgebungsluft feucht.

### *Versuche mit Schmelzen und Schleifen bzw. Schneiden*

Der Anteil an Thermoplasten ist in der Regel hoch genug, um die abgeseibte mit der Schneidmühle unzerkleinerbare Restfraktion zu einer plastischen Masse zu schmelzen. Metallteilchen, Duroplaste und Reste von Fasern und mineralischen Teilchen werden in der thermoplastischen Matrix eingeschlossen. Beim Abkühlen entstehen überaus feste Blöcke, die durch Zerspanen oder Schleifen fein zerkleinert werden können.

Zunächst wurde versucht, auf einem Aluminium-Blech, das auf einer Ceran-Heizplatte erhitzt wurde, das Material zu schmelzen und zu verkneten, damit alle nicht schmelzenden Bestandteile guten Kontakt zur Matrix bekommen. Bei diesem Verfahren entsteht sehr viel Rauch, es kommt zu lokalen Überhitzungen. Enthalten die Proben zu viele Fasern oder anhaftenden feinen Staub, lässt sich das Material nicht durchkneten sondern es bröseln (Konsistenz erinnert an mageren Speisetopfen). Das Institut für Kunststofftechnik am TGM Wien riet ab, das Material mit Hilfe eines Versuchsextruders zu Profilen zu formen. Die enthaltenen Verunreinigungen könnten die Maschine zerstören. Eventuell könnte die Funktion eines Extruders mit einer robusten Faschiermaschine (Küchengerät), die erhitzt wird, nachempfunden werden. Aufsätze, mit denen es möglich ist, Profile zu formen, sind erhältlich (metallene Ausführungen erforderlich). Vorteil des Extrudierens wäre die Homogenisierung des Materials. Alle Körnchen aus thermoplastischen Werkstoffen würden zu einer einheitlichen Mischung verschmelzen. Diese Durchmischung ist beim alleinigen Pressen nicht zu erzielen.

Das maschinelle Schleifen der gepressten Blöcke scheiterte, nachdem die Vorversuche mit jeweils neuwertigen Schleifscheiben und Schleifpapieren erfolgreich waren. Eine Tischbohrmaschine, ausgerüstet mit eigens entworfener Führung und Anpressmechanismus, sollte zum selbsttätigen Schleifen verwendet werden. Binnen Minuten (entspricht einigen g gewonnenen Materials) verloren alle getesteten Schleifmittel derart an Schärfe, dass kaum feines Material gewonnen werden konnte und durch die Reibung nur noch Hitze entstand. Große Stückchen ( $>0,5\text{ mm}$ ) von Duroplasten und Metallen wurden aus dem in der Hitze weichen Verband gerissen und blieben unzerkleinert. Getestet wurden vielerlei Schleif- und Trennscheiben sowie verschiedene Schleifpapiere oder -gewebe in unterschiedlichen Körnungen. Drehzahl und Anpressdruck wurden ohne zufriedenstellendes Ergebnis variiert.



Während der Schleifversuche mussten oft Blöcke zersägt werden (Eisensäge). Die anfallenden Späne entsprachen der geforderten Feinheit besser als das Schleifgut. Mit einer rasch gebastelten Handsäge für 10 parallel eingespannte Sägeblätter wurde das Sägen zum Zweck der Spangewinnung (zu kurz) getestet. Dafür wurde einige cm in eine Block gesägt und die Späne gesammelt. Das Material entsprach den Anforderungen. Um diese Technik zeitsparend einzusetzen zu können, wurde eine Mechanik (Kurbeltrieb) entworfen und gebaut, die getrieben von einer Tischbohrmaschine selbsttätig sägt. Das maschinelle Sägen scheiterte allerdings: Die Standzeiten der Sägeblätter sind zu kurz, der benötigte Anpressdruck sehr hoch, die Sägeblätter verziehen und schneiden nicht mehr parallel sondern laufen zusammen oder auseinander.





## 7 BEGRIFFSBESTIMMUNGEN

### *Analysenprobe*

Aus der *Analysenprobe* werden *Einwaagen* für die Analyse entnommen (bei flüssigen Analysenproben Teilvolumina statt *Einwaagen*). In der Regel ist die *Analysenprobe* die Probenmenge, die alle Probenaufbereitungsschritte durchlaufen hat.

### *Einzelprobe*

Eine Probe, die mit einer einzelnen Entnahme gewonnen wird ist eine *Einzelprobe*. Einzelne Entnahme bedeutet Entnahme an einem Ort zu einer Zeit.

### *Einwaage*

Die Menge einer Analysenprobe, die für eine Einfachbestimmung verwendet wird, ist die *Einwaage* (bei flüssigen Proben sinngemäß ein abgemessenes Volumen).

### *Erwartungswert*

Der unbekannte, zu bestimmende Wert einer Eigenschaft der *Grundgesamtheit* ist der *Erwartungswert*.

### *Erwartungstreue*

Methoden, die bei der Bestimmung des *Erwartungswerts* frei von systematischen Fehlern sind, werden als *erwartungstreu* bezeichnet.

### *Feldprobe*

In Anlehnung an die Bodenkunde und Agrarwissenschaften wird eine Probe, die „im Feld“, d.h. im übertragenen Sinn auf Behandlungsanlagen, Deponien etc. gezogen wird als *Feldprobe* bezeichnet. *Feldproben* können sowohl *Einzelproben* als auch *Mischproben* sein. Die Identität als *Feldprobe* endet, sobald die gezogene Probenmenge geteilt oder in irgendeiner Form aufbereitet (z.B. zerkleinert, sortiert) wird.

### *Grundgesamtheit*

Die Abfallmenge, für welche die Charakterisierung gelten soll, ist die *Grundgesamtheit*.

### *Laborprobe*

Die Proben, die zur Weiterbehandlung ins Labor gebracht werden sind *Laborproben*. Werden die *Feldproben* am Ort der Probenahme nicht behandelt (geteilt, sortiert, zerkleinert) so sind diese *Feldproben* physisch identisch mit den *Laborproben*.

### *Heterogenität*

In Zusammenhang mit der Probenahme aus Abfällen bezeichnet *Heterogenität* den Umstand, dass die einzelnen Stücke im Gemenge (stark) unterschiedliche Zusammensetzungen aufweisen. Bei Abfällen mit hoher Heterogenität lassen sich in der Regel die Stücke im Gemenge in *Träger* und *Verdüner* einteilen, wobei die *Träger* gegenüber dem Durchschnitt



des Gemenges sehr viel höhere Konzentrationen, die *Verdüner* gegenüber dem Durchschnitt des Gemenges niedrigere Konzentrationen aufweisen. Das Ausmaß an *Heterogenität* ist nicht durch Mischen reduzierbar. Dazu ist es notwendig, zu zerkleinern und zu mischen. Anmerkung: In der Normenserie ÖNORM S 2123 wird der Begriff *Heterogenität* (neben dem Begriff *Variabilität*) sowohl als Bezeichnung des Phänomens der *Heterogenität* als auch der *Variabilität* verwendet.

### *Mischprobe*

Eine Probe, die aus den Mengen mehrerer Einheiten (*Einzelproben* oder *seinerseits Mischproben*) zusammengemischt wird, ist eine *Mischprobe* (z.B. *Mischprobe* über die Zeit beim Vereinen von Mengen, die aus einem Güterstrom am selben Ort zu verschiedenen Zeiten gezogen werden; *Mischproben* aus Mengen, die zur gleichen Zeit aus einem Haufen von verschiedenen Stellen genommen werden). Die mengenproportionale kontinuierliche Entnahme aus einem Güterstrom ist ein Spezialfall einer *Mischprobe* über die Zeit. Auch *Laborproben* oder *Analysenproben* können zu *Mischproben* vereint werden.

### *repräsentativ*

Eine Probe ist dann *repräsentativ*, wenn es möglich ist, aus ihr einen Schluss auf die *Grundgesamtheit* zu ziehen. Eine repräsentative Probe ist daher ein „verkleinertes Abbild“ der *Grundgesamtheit* (Hartung et al., 1991). In der Praxis der Abfallanalyse ist eine Probe oder eine *Stichprobe* dann repräsentativ, wenn sie in den untersuchten Merkmalen nicht mehr als akzeptiert von der Merkmalsausprägung der *Grundgesamtheit* abweicht.

### *Stichprobe*

Eine *Stichprobe* ist ein Teil der *Grundgesamtheit*, der zur Charakterisierung der *Grundgesamtheit* verwendet wird. Die *Stichprobe* ist die Menge der *Stichprobenelemente*. Nur im Spezialfall, wenn eine einzige Probe gezogen wurde, ist diese Probe eine *Stichprobe*, eine *Stichprobe* mit nur einem *Stichprobenelement*.

### *Stichprobenelement*

Ein *Stichprobenelement* ist ein Element der *Grundgesamtheit*, das in die *Stichprobe* aufgenommen wird. Bei der Beprobung von Abfällen ist die Unterteilung der *Grundgesamtheit* in Elemente meist abstrakt. Die *Feldproben* sind die *Stichprobenelemente*.

### *Stichprobenumfang*

Die Anzahl der *Stichprobenelemente* in einer *Stichprobe* ist der *Stichprobenumfang*.

### *Träger (-partikel, -stück)*

Gemengeteile eines Abfalls, die den gesuchten Stoff in sehr viel höherer Konzentration enthalten, als dem Durchschnitt dieses Abfalls entspricht, werden als *Träger* bezeichnet. In Restmüll, restmüllähnlichen Abfällen und daraus erzeugten Abfallfraktionen gibt es meistens Produkte, die als charakteristische *Träger* bestimmter Stoffe auftreten z.B. Kabel für Kupfer oder NiCd-Akkus für Nickel und Cadmium. *Träger* verursachen die *Heterogenität* eines Abfalls.





### *Variabilität*

In Zusammenhang mit der Probenahme aus Güterströmen bzw. großen lagernden Mengen (z.B. Haufen) bezeichnet *Variabilität* die tatsächliche Verschiedenartigkeit des Materials zu verschiedenen Zeitpunkten bzw. an verschiedenen Orten (z.B. eines Haufens). Das Ausmaß der *Variabilität* ist (im Gegensatz zur *Heterogenität*) durch Mischen reduzierbar.

### *Verdünner (-partikel, -stück)*

Gemeineteile eines Abfalls, die den gesuchten Stoff in niedrigerer Konzentration enthalten, als dem Durchschnitt dieses Abfalls entspricht, werden als *Verdünner* bezeichnet. Die Einstufung als *Verdünner* ist an das gleichzeitige Vorhandensein von *Trägern* gebunden.





## 8 VERWENDETE SYMBOLE

|               |  |
|---------------|--|
| Akh           | Arbeitskraftstunde                                   |
| cov           | Kovarianz  |
| n             | Anzahl   |
| $d_{\max}$    | maximale Korngröße der Trägerpartikel                |
| $d_{10\%}$    | maximale Korngröße der 10 % kleinsten Trägerpartikel |
| M             | minimale Probenmasse                                 |
| $\dot{m}$     | Massenfluss pro Zeiteinheit                          |
| $m_{\max}$    | maximale Masse der Trägerpartikel                    |
| $m_{10\%}$    | maximale Masse der 10 % kleinsten Trägerpartikel     |
| MS            | „mean square“, mittlere quadratische Abweichung      |
| MW            | Mittelwert   |
| rsd           | Variationskoeffizient                                |
| s             | Standardabweichung berechnet                         |
| $s^2$         | Varianz berechnet                                    |
| SS            | „sum of squares“, Summe der Abweichungsquadrate      |
| stabw         | Standardabweichung berechnet                         |
| t             | Tonnen   |
| TK            | Transferkoeffizient                                  |
| TS            | Trockensubstanz                                      |
| z             | geforderte Sicherheit, Vertrauensbereich             |
| $\varepsilon$ | relativer tolerierter Probennahmefehler              |
| $\rho_T$      | Dichte der Trägerpartikel                            |
| $\sigma$      | Standardabweichung Erwartungswert                    |
| $\sigma^2$    | Varianz Erwartungswert                               |
| $\bar{x}$     | Mittelwert   |
| $\omega$      | Massenanteil an Trägerpartikeln                      |





## **9 VERWENDETE UND ZITIERTE NORMEN**

ÖNORM EN 12880:2000 12 01 Charakterisierung von Schlämmen - Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehaltes

ÖNORM EN 13137:2001 12 01 Charakterisierung von Abfall - Bestimmung des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) in Abfall, Schlämmen und Sedimenten

ÖNORM EN 1483:1997 08 01 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von Quecksilber

ÖNORM EN ISO 11885:1998 03 01 Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von 33 Elementen durch induktiv gekoppelte Plasma-Atom-Emissionsspektrometrie (ISO 11885:1996)

ÖNORM L 1082:1999 04 01 Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von Stickstoff nach Kjeldahl

ÖNORM S 2023:1993 11 01 Untersuchungsmethoden und Güteüberwachung von Komposten

ÖNORM S 2123 Probenahmepläne für Abfälle, 5-teilige Normenserie, ÖNORM S 2123-1:2003 11 01 bis ÖNORM S 2123-5:2003 12 01





## 10 LITERATURVERZEICHNIS

- Abad, E., M. A. Adrados, J. Caixach und Josep Rivera (2002): Dioxin Abatement Strategies and Mass Balance at a Municipal Waste Management Plant. *Environmental Science and Technology* 36(1): 92 - 99
- Aichberger, K. (2000): Bodenschutz und Sekundärrohstoffe. Veröffentlichung, Bundesamt für Agrarbiologie Linz/Donau 22: 65-75
- Angerer, T. (1999): Abluftreinigung bei der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung (MBA) Bericht BE-156, Umweltbundesamt Wien
- Angerer, T. und A. Reisenhofer (1999): Abluftemissionen der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung – Pilotanlage Kufstein. Bericht BE-126, Umweltbundesamt Wien
- Baccini, P. und P.H. Brunner (1991): *Metabolism of the Antroposphere*. Springer Verlag, Berlin
- Bauer, G. (1995): Die Stoffflussanalyse von Prozessen der Abfallwirtschaft unter Berücksichtigung der Unsicherheit. Dissertation, TU-Wien
- Bidlingmayer, W. (1990): *Schwermetalle im Hausmüll – Herkunft, Schadwirkung, Analyse*. Erich Schmidt-Verlag, Bielefeld
- Bilitewski, B., G. Kümmler und K. E. Lorber (1985): Bilanz eines Aufbereitungsprozesses. *Müll und Abfall* 11: 369-376
- Bilitewski, B., und A. Heilmann (1999): Stoffströme aus der mechanisch-biologischen Abfallaufbereitung - Aufkommen, Charakteristik, Verwertungsmarkt in Bio- und Restabfallbehandlung III Hrsg. Wiemer K und M Kern, Baeza-Verlag, Witzenhausen
- Blume, J (1996): Die optimale Restmüllentsorgungstechnologie: biologisch und/oder thermisch? *Müll&Abfall* 96-3: 157-168
- Brunner, P.H. und D. Gajcy (1989): Veränderung und Bedeutung der Metallfrachten im Klärschlamm. *Mitteilungen der EAWAG* 28: 5-12 (Nov. 1989)
- Brunner P.H. und H. Rechberger (2004): *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. CRC-Press, New York, USA
- Bunge, R. und K. Bunge (1999): Probenahme auf Altlasten: Minimal notwendige Probenmasse. *Altlasten Spektrum* 3/99: 174-179
- CalRecovery, Inc. (1993): *Handbook of solid waste properties*. Governmental Advisory Associates, New York
- Cuhls, C. (2000): Abluftemissionen aus der MBA und deren Minderung nach dem Stand der Technik. In: *Abluft und Abluftreinigung bei der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung*, Fachtagung UBA Wien, 2000



- Daxbeck, H., A. Merl, E. Ritter und P.H. Brunner (2000): Analyse der Flüsse des lizenzierten Aluminiums in Österreich – Endbericht. TU Wien, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft
- Dolle, L., C. Hoppe und H. Wefing (2000): Behandlung und thermische Verwertung von Restabfall aus Haushalten und Gewerbe. Müll und Abfall 7/00: 411-418
- EAWAG, (1982): Metallgehalte in der Kehrichtschlacke und Elektrofilterasche der Kehrichtverbrennungsanlage Biel. Projekt Nr. 30-4658
- Fehrenbach, H. (2000): Abfallwirtschaftliche und ökobilanzielle Aspekte für ein Klärschlamm Entsorgungskonzept. 7. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Schriftenreihe zur Abfallwirtschaft, Fachhochschule Münster
- Fehringer, R., H. Rechberger, H.-L. Pesonen und P.H. Brunner (1997): Auswirkungen unterschiedlicher Szenarien der thermischen Verwertung von Abfällen in Österreich (Projekt ASTRA) Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft – Abteilung Abfallwirtschaft, TU Wien
- Fiedler H, und O. Hutzinger(1992): Sources and Sinks of Dioxins: Germany. Chemosphere 25: 1487-1491
- Fischer P., K. Krone und J. Krüger (1982): Vakuumraffination von Stahl aus Müllschrott. In Recycling International – Gewinnung von Energie und Material aus Rückständen und Abfällen. Hrsg.: K. J. Thomé-Kozmiensky, E. Freitag – Verlag für Umwelttechnik
- Fricke, J. (2001): Stand und Perspektiven der Altbatterie-Entsorgung in Deutschland. In Bio- und Restabfallbehandlung V. Hrsg.: Wiemer K. und Kern M., Witzenhausen-Institut für Abfall Umwelt und Energie
- Friedrich, H. (2000): Vollzugsinstrumente zur Abgrenzung der schadlosen Verwertung von der Beseitigung in Nordrhein-Westfalen. In Bio- und Restabfallbehandlung IV. Hrsg.: Wiemer K. und Kern M., Witzenhausen-Institut für Abfall Umwelt und Energie
- Gotthelf, H. (1983): Anforderungen an die Qualität von Müllschrott und dessen Verwertung im Stahlwerk. In Materialrecycling durch Abfallaufbereitung – Aggregate und Systeme zur Abfallsortierung – Produktverwertung – Verfahrensauswahl, Hrsg.: K. J. Thomé-Kozmiensky, E. Freitag – Verlag für Umwelttechnik
- Greiner, J. und Stelzer S. (1991): Koordination, Erfassung und Auswertung von Dioxinmessungen an Abfallverbrennungsanlagen. Umweltbundesamtes, Berlin BRD
- Harant, M., M. Nelles, M. Hofer, K.E. Lorber und B. Raninger (1999): Stoffflussanalyse bei der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung. Schriftenreihe Abfall-Umwelt, Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik, Montanuniversität Leoben
- Hartung, J., B. Elpelt, und K.-H. Klösener (1991): Statistik, Lehrbuch und Handbuch der angewandten Statistik., Oldenbourg-Verlag. München, Deutschland





- Hauer, W., H. Goldschmid und T. Herzfeld (2002): Restmüllanalysen in niederösterreich. Hrsg.: Amt der niederösterreichischen Landesregierung, St. Pölten
- Häusler, G. und T. Angerer (1998): Abluftemissionen der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung –Anlage Siggerwiesen. Bericht BE-138, Umweltbundesamt Wien
- Heng-Bin, H., G.Kaiser und G. Tölg (1981): Decomposition of Biological Materials, Rocks and Soils in Pure Oxygen under Dynamic Conditions for the Determination of Selenium at Trace Levels. *Analytica Chimica Acta* 128: 9-21
- Hennecke, D. (1999): Deponieverhalten von mechanisch-biologisch vorbehandelten Restabfällen. Dissertation Universität Duisburg
- Holleman, A.F. und E. Wiberg (1985): Lehrbuch der anorganischen Chemie. Walter de Gruyter Verlag, Berlin – New York
- Ibrahim, H. A. (1998): Untersuchungen zu In- und Outputströmen bei der Restabfallvergärung und Vergleich mit der Kompostierung. Diplomarbeit, Universität - Gesamthochschule Paderborn, Höxter
- Kost, T. (2001): Brennstofftechnische Charakterisierung von Haushaltsabfällen. Beiträge zur Abfallwirtschaft der TU Dresden Band 16, TU Dresden, Deutschland
- Kraus, P.(1991): Ursachen und Quellen der Schadstoffbelastung- Organische Schadstoffe im Kompost. In: Kompost und Abfallwirtschaft. Loccum Protokolle, Loccum BRD
- Krauß, P. (1985): Gibt es die Strategie zur Erzeugung schadstoffarmen Komposts aus Siedlungsabfällen? *Müll und Abfall* 17: 227-233
- Krauß, P. und P.H. Brunner (1989): Möglichkeiten und Grenzen der Schadstoffentfrachtung von Hausmüll durch mechanische Sortieranlagen. *Proceedings EAWAG*, Dübendorf, Schweiz
- Kührer, D. E. Vogel und M. Steiner (1998): Restmüllanalysen 1998. Hrsg.: Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Graz
- Lahl (2001): Unveröffentlichte Daten, mit freundlicher Genehmigung zur Verfügung.
- Lahl, U. und B. Zeschmar-Lahl (2001): Lösungsansätze zur Umsetzung der Emissionsanforderungen der 30. BImSchV. In Bio- und Restabfallbehandlung V. Hrsg.: Wiemer K. und Kern M., Witzhausen-Institut für Abfall Umwelt und Energie Baeza-Verlag, Witzhausen, Deutschland
- Lange, J. (1997): zit. in Zeschmar-Lahl et al. (2000)



- Lazzari, L., L. Sperti, M. Salizzato und B. Pavoni (1999): Gas chromatographic determination of organic micropollutants in samples of sewage sludge and compost: Behaviour of PCB and PAH during composting. *Chemosphere*, Volume 38, Issue 8: 1925-1935
- Lechner, P. (2004): Persönliche Mitteilung. Univ. f. Boku, Wien
- Maleschitz, F. (2001): Persönliche Mitteilung, MBA Oberpullendorf, Mai 2001
- MA 48 (1999): Altstoff- und Systemmüllanalyse Wien 1997/98. Hrsg.: Magistratsabteilung 48 der Gemeinde Wien
- Mayr, B. (2001): Mechanisch-biologische Behandlung der Restmüllfeinfraktion am Beispiel der Abfallbehandlungsanlage des AWV Hartberg - Endbericht. Technische Büro für Verfahrenstechnik EnviCare DI Dr. Mayr
- Nelles, M., M. Harant, M. Hofer, K.E. Lorber und B. Raninger (1997): Mechanisch-biologische Restabfallbehandlung vor der Deponierung (MBRVD) im Mürzverband. Endbericht, Institut für Entsorgungs- und Deponietechnik, Montanuniversität Leoben
- Neumayer, S. (1999): Einfluß der mechanisch-biologischen Behandlung auf die Nachsorgephase einer Deponie. Diplomarbeit, TU Wien
- Pichler, M. und I. Kögel-Knabner (1998): Humifizierungsprozesse und Huminstoffhaushalt während der Rotte und Deponierung von Restmüll. In: BMBF-Statusseminar: Verbundvorhaben mechanisch-biologische Behandlung von zu deponierenden Abfällen Hrsg.: Umweltbundesamt. Potsdam: Umweltbundesamt, 1998, S. 99-108
- Pöpel, F. (1964): Das Wesen der Vergärung organischer Stoffe bei der Kompostierung. Müll-Handbuch 3/64, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- Puchelt A. (2000): Das Verfahrenskonzept der MBS-Rennerod. In Bio- und Restabfallbehandlung IV. Hrsg.: Wiemer K. und Kern M., Witzenhausen-Institut für Abfall Umwelt und Energie Baeza-Verlag, Witzenhausen, Deutschland
- Raach, C., H. Higgering, und S. Bringezu (1999): Stoffflussanalyse Abwasser – eine Abschätzung der Substanzflüsse deutscher Kläranlagen. *Vom Wasser*, 92: 11-35 (1999)
- Ramke, H.-G. (1991): Hydraulische Beurteilung und Dimensionierung der Basisentwässerung von Deponien fester Siedlungsabfälle – Wasserhaushalt, hydraulische Kennwerte, Berechnungsverfahren. Dissertation, Technische Universität, Braunschweig
- Rasmussen P.E., K.S Subramanian und B.J. Jessiman (2001): A multi element profile of housedust in relation to exterior dust and soils in the city of Ottawa, Canada. *The Science of the Total Environment* 267: 125-140
- Rechberger (1999): Entwicklung einer Methode zur Bewertung von Stoffbilanzen in der Abfallwirtschaft. Dissertation, TU Wien



- Reinhardt, T. und J. Jäger (1996): Schadstoffbelastung der Abluft bei der mechanisch-biologischen Restabfallbehandlung und anschließenden Deponierung. In Biologische Abfallbehandlung III, 1. Auflage; Hrsg.: Wiemer K. und Kern M., Witzenhausen-Institut für Abfall Umwelt und Energie M.I.C. Baeza-Verlag, Witzenhausen, Deutschland
- Rotter, S. (2002): Schwermetalle in Haushaltsabfällen. Beiträge zur Abfallwirtschaft der TU Dresden Band 27, TU Dresden, Deutschland
- Rotter, S., T. Kost und B. Bilitewski (2001): Verteilung und Steuerung von Stoffflüssen durch mechanische Aufbereitung von Haushaltsabfällen am Beispiel von Chlor und Schwermetallen. Müll und Abfall 33/9: 512-518
- Sager, M. (1990): unveröffentlichte Ergebnisse, Bundesamt und Forschungszentrum für Landwirtschaft Wien
- Sakai, S., S. Urano und H. Takatsuki (2000): Leaching behavior of PCBs and PCDDs/DFs from some waste materials. Waste Management, Volume 20, Issues 2-3: 241-247
- Schachermayer, E., G. Bauer, E. Ritter und P.H. Brunner (1995): Messung der Güter- und Stoffbilanz einer Müllverbrennungsanlage. Monographie Bd. 56 Umweltbundesamt, Wien
- Schneider, C., E. Möhle, G. Stenz, J.W. Metzger und P. Krauß (2001): Arzneimittel in Siedlungsabfällen und Deponiesickerwässern. Müll und Abfall 33/6: 362-369
- Sievers, U. und N. Nitz (1997): MBA-Pilotprojekt des Landkreises Ravensburg – Technische Erprobung der Vergärung von Haushaltsabfällen. Müll und Abfall 11/97, Jg. 29 692-700
- Six, W. (1999): Auftrennung und Vergärung von Restabfall mit dem Dranco Verfahren. in Bio- und Restabfallbehandlung III Hrsg. Wiemer K und M Kern, Baeza-Verlag, Witzenhausen
- Soyez, K. (2001): Mechanisch-biologische Abfallbehandlung: Technologien, Ablagerungsverhalten und Bewertung. Abfallwirtschaft in Forschung und Praxis Band 120, Erich Schmidt Verlag, Berlin
- Spiegel, M.R. (1976): Statistik. McGraw-Hill Verlag, Maidenhead Berkshire, UK
- Spuziak-Salzenberg, D., S. Riemer, B. Bayley-Blackwedel, und G. Bär (1998): Probenaufbereitungssystem zur Qualitätssicherung für Abfälle zur energetischen (stofflichen) Verwertung. Entsorgungspraxis 1998/10: 36-40
- SRU (1990): Umweltgutachten. Rat von Sachverständigen für Umweltfragen. Berlin, BRD
- Tabasharan, O. (1984): Separierung schwermetallhaltiger Hausmüllkomponenten durch Absieben. Müll und Abfall 1/84:15-22



- Timmermann, F. (2000): Einsatz konkurrierender Stoffströme (Klärschlamm, Kompost, Wirtschaftsdünger) in der Landwirtschaft. 7. Münsteraner Abfallwirtschaftstage, Schriftenreihe zur Abfallwirtschaft, Fachhochschule Münster
- Tubergen, J. (1996): Mechanisch-biologische Behandlung in Kombination mit thermischer Verwertung – Modell Wijster, das Versarbeitungsmodell der Firma VAM. In Biologische Abfallbehandlung III. Hrsg.: Wiemer K. und Kern M., Witzenhausen-Institut für Abfall Umwelt und Energie
- UBA Berlin (1999): Batterien und Akkus. hier nach: <http://www.umweltbundesamt.de/uba-infodaten/batterien> (Stand 23. 3. 2001)
- Umweltdienst Burgenland (2002a): Mündliche Mitteilung über Klärschlammuntersuchung., Oberpullendorf, Burgenland
- Umweltdienst Burgenland (2002b): Unveröffentlichte Daten. Oberpullendorf, Burgenland
- Umweltforum Batterien (2001): Auskunft über Sammelmengen 1999 und 2000, Schätzung der Sammelquote, Umweltforum Batterien, Interessengemeinschaft der österreichischen Batteriehersteller und -importeure, Wiedner Hauptstraße 63, A-1045 Wien
- Wengenroth, K. (2000): Emissionsminderung mit dem Herhof –Abluftreinigungssystem. In: Abluft und Abluftreinigung bei der mechanisch-biologischen Abfallbehandlung, Fachtagung UBA Wien, 2000
- Wengenroth, K. (2001): Betriebserfahrungen in der Aufbereitung von Sekundärbrennstoffen beim Herhof-Trockenstabilat<sup>®</sup>-Verfahren. In Bio- und Restabfallbehandlung V. Hrsg.: Wiemer K. und Kern M., Witzenhausen-Institut für Abfall Umwelt und Energie
- Weißbach, W. (1988): Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung 9. Auflage. Friedrich Vieweg und Sohn Verlag, Braunschweig
- Wilken, W und B. Zeschmar-Lahl (1997): In Hösel, G; Bilitewski, B; Schenkel, W; Schnurer, H; Müllhandbuch, Band 3, Erich Schmidt Verlag: Berlin, Deutschland
- Winkler, S. (2001): persönliche Mitteilung, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft – Abteilung Wassergüte, TU Wien
- Woelders, H., T. Oorthuys und L. Luning (1999): Design and operation of the mechanical-biological treatment plant VAGRON, Groningen, the Netherlands. in Münsteraner Schriften zur Abfallwirtschaft Band 2, Hrsg. Gallenkemper, Bidlingmaier, Doedens, Stegmann, Fachhochschule Münster, Münster
- Wurst, F. (2004): Mündliche Mitteilung aus unveröffentlichten Daten. TU Wien
- Zeschmar-Lahl, B., J. Jager, K. Ketelsen, U. Lahl, K. Scheidel, M. Steiner und A. Heckmann (2000): Mechanisch-Biologische Abfallbehandlung in Europa. Parey Buchverlag, Berlin



## 11 ANHANG

### 11.1 Daten für die provisorische Bilanzierung

*Tabelle 11-1: Daten zur provisorischen Massenbilanzierung*

| Anlage                | Heizw. Fr. | Rotterest | Fe-Schrott | Quelle                      |
|-----------------------|------------|-----------|------------|-----------------------------|
| MBA Großefehn, D      | 90         | 400       | 10         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| MBA Lüneburg, D       | 330        | 410       | 20         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| MBA Niederlausnitz, D | 420        | 403       | 27         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| MBA Zell am See, A    | 310        | 390       | 20         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| MBA Schaffhausen, CH  | 440        | 280       | 8          | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| MBA Oldenburg, D      | 220        | 620       | 20         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| MBA Herzogsdorf, A    | 275        | 575       |            | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| MBA Fischamend, A     | 250        | 542       | 42         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| Allerheiligen, A      | 360        | 260       | 20         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| Aich-Assach, A        | 309        | 235       | 10         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| MBA Kufstein, A       | 500        | 200       | 10         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| MBA Quarzbichl, D     | 480        | 290       | 30         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| MBA Biberbach, D      | 334        | 371       | 14         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |

*Tabelle 11-2: Daten zur provisorischen Wasserbilanz*

| Gehalt                         | Anlage, Beschaffenheit der Güter               | Quelle                           |
|--------------------------------|--|----------------------------------|
| Restmüll [% FS]                |  |                                  |
| 30                             | MVA Spittelau                                  | Schachermayer et al. (1995)      |
| 40                             | Restmüll Bad Tölz                              | Fricke (1997) in Soyez (2001)    |
| Heizwertreiche Fraktion [% FS] |  |                                  |
| 26,4                           | MBA Kufstein >18mm                             | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 28,6                           | MBA Zell am See >100mm                         | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 33                             | Siebreste MBA >100mm                           | Spuziak-Salzenberg et al. (1998) |
| 26                             | diverse MBA-Siebüberläufe (70 Werte gemittelt) | Lahl (2001)                      |
| Rotterest [% FS]               |  |                                  |
| 19,3                           | MBA Herzogsdorf, <80mm, 2-4 Wochen             | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 16,9                           | MBA Herzogsdorf, <80mm, 16 Wochen              | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 41,9                           | MBA Ort im Innkreis, <10 mm                    | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 47                             | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 8 Monate           | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 28                             | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 10 Monate          | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 38                             | MBA Frojach-Katsch, <25mm + KS, 6 Monate       | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 31,1                           | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen           | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 33,05                          | MBA Zell am See, <100 mm, 13 Wo                | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| Gärwässer [% FS]               |  |                                  |
| 91,3                           | Presswasser Ravensburg                         | Sievers und Nitz (1997)          |
| 85                             | Abwasser Ravensburg                            | Sievers und Nitz (1997)          |



Tabelle 11-3: Daten zur provisorischen Glühverlust-Bilanz

| Gehalt                         | Anlage, Beschaffenheit des Gutes          | Quelle                           |
|--------------------------------|---|----------------------------------|
| Restmüll [% FS, TS]            |   |                                  |
| 60,1 (TS)                      | Kufstein                                  | Harant et al. (1999)             |
| 68 (TS)                        | Bad Tölz                                  | Soyez (2001)                     |
| 60 (TS)                        | Spittelau                                 | Schachermayer et al. (1995)      |
| 55,7 (TS)                      | Allerheiligen                             | Harant et al. (1999)             |
| 62,6 (TS)                      | Zell am See                               | Harant et al. (1999)             |
| 40 (FS)                        | MVA Spittelau                             | Schachermayer et al. (1995)      |
| Heizwertreiche Fraktion [% TS] |   |                                  |
| 81,1                           | MBA Allerheiligen, >80mm                  | Harant et al. (1999)             |
| 76,9                           | MBA Osnabrück, >100mm, vor Rotte          | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 61                             | MBA Osnabrück, >100 mm, nach 9 Monaten    | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 79                             | MBA Siebreste, >80/100mm                  | Spuziak-Salzenberg et al. (1998) |
| 57                             | MBA Siebreste, >100mm                     | Spuziak-Salzenberg et al. (1998) |
| 88,3                           | MBA Zell am See, >100mm                   | Harant et al. (1999)             |
| 72,2                           | MBA Kufstein, >50mm                       | Harant et al. (1999)             |
| Rotterest [% TS]               |   |                                  |
| 26,3                           | MBA Osnabrück, <40 mm, nach 9 Monaten     | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 35                             | MBA Lüneburg, <100 mm, nach 16 Wo         | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 40                             | MBA Quarzbichl, <40 mm, nach 5-6 Wo       | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 30,7                           | MBA Kirchdorf/Krems, <50mm +Baseb         | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 30                             | MBA Kufstein, <18mm                       | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 28                             | MBA Ort im Innkreis, <10mm                | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 45,7                           | MBA Kufstein, <50mm, 13 Wo                | Harant et al. (1999)             |
| 36,3                           | MBA Allerheiligen, <80mm, 22 Wo           | Harant et al. (1999)             |
| 32,5                           | MBA Zell am See, 13 Wo                    | Harant et al. (1999)             |
| 25,4                           | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 8 Monate      | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 27,5                           | MBA Aich-Assach, <60 mm +KS, 10 Monate    | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 19,5                           | MBA Frojach-Katsch, <25 mm + KS, 6 Monate | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 32,8                           | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen      | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| Klärschlamm [% TS ]            |   |                                  |
| 71,7                           | MBA Allerheiligen                         | Harant et al. (1999)             |
| 58,9                           | MBA Oberpullendorf                        | Harant et al. (1999)             |
| 57,2                           | MBA Oberpullendorf                        | Harant et al. (1999)             |
| 63,8                           | MBA Zell am See                           | Harant et al. (1999)             |
| Fe-Schrott [% FS ]             |   |                                  |
| 35                             | MBA Osnabrück                             | Lange (1997)                     |
| 20                             | MBA Oberpullendorf                        | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 22,6                           | MBA Zell am See                           | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 12                             | MBA Schaffhausen (CH)                     | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |



Forsetzung Tabelle 11-3:

| Gärwässer [% TS] |                        |                         |
|------------------|------------------------|-------------------------|
| 59               | Presswasser Ravensburg | Sievers und Nitz (1997) |
| 42               | Abwasser Ravensburg    | Sievers und Nitz (1997) |

Tabelle 11-4: Daten zur provisorischen Asche-Bilanz

| Gehalt                         | Anlage, Beschaffenheit des Gutes     | Quelle                      |
|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| Heizwertreiche Fraktion [% TS] |                                      |                             |
| 21,1                           | MBA Zell am See, >100 mm             | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| Rotterest [% TS]               |                                      |                             |
| 58,4                           | MBA Zell am See, <100 mm, nach 13 Wo | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |

Tabelle 11-5: Daten zur provisorischen TOC-Bilanz

| Gehalt                         | Anlage, Beschaffenheit des Gutes        | Quelle                        |
|--------------------------------|---|-------------------------------|
| Restmüll [% TS]                |   |                               |
| 27                             | Hausmüll, Bad Tölz                      | Fricke (1997) in Soyez (2001) |
| Heizwertreiche Fraktion [% TS] |   |                               |
| 48,3                           | MBA Allerheiligen, >80mm                | Harant et al. (1999)          |
| 34,2                           | MBA Zell am See                         | Harant et al. (1999)          |
| 34,8                           | verschiedene (5 Werte gemittelt)        | Lahl (2001)                   |
| Rotterest [% TS]               |   |                               |
| 20,4                           | MBA Herzogsdorf, <80 mm, 2-4 Wochen     | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 22,1                           | MBA Herzogsdorf, <80 mm, 16 Wochen      | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 14,8                           | MBA Kirchdorf/Krems, <50 mm, +Baseb     | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 12,9                           | MBA Aich-Assach, <60 mm +KS, 8 Monate   | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 16,8                           | MBA Aich-Assach, <60 mm, +KS, 10 Monate | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 22,2                           | Siggerwiesen                            | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 22,3                           | MBA Zell am See, < 100 mm, 13 Wo        | Harant et al. (1999)          |
| 22,2                           | MBA Allerheiligen, <80mm, 22 Wo         | Harant et al. (1999)          |
| Abluft MBA                     |   |                               |
| <1 bis<br>1,5kg/t Input        |   | Lahl (2001)                   |
| 0,4-1,5kg/t<br>Abfall          |   | Angerer (1999)                |
| Klärschlamm [% TS]             |   |                               |
| 38,7                           | MBA Allerheiligen                       | Harant et al. (1999)          |
| 31,0                           | MBA Zell am See                         | Harant et al. (1999)          |



*Tabelle 11-6: Daten zur provisorischen TIC-Bilanz*

| Gehalt                              | Anlage, Beschaffenheit des Gutes             | Quelle                      |
|-------------------------------------|--|-----------------------------|
| Restmüll [% FS]                     |  |                             |
| 0,39                                | aus C-Transfer in die Schlacke, MVA Hausmüll | Schachermayer et al. (1995) |
| 0,36                                | aus C-Transfer in die Sch., MVA Systemmüll   | Schachermayer et al. (1995) |
| Rotterest [% CaCO <sub>3</sub> TS ] |  |                             |
| 44                                  | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 8 Monate         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 31                                  | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 10 Monate        | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 11                                  | MBA Frojach-Katsch, <25mm + KS, 6 Monate     | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 8,10                                | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |

*Tabelle 11-7: Daten zur provisorischen TC-Bilanz*

| Gehalt                         | Anlage, Beschaffenheit des Gutes   | Quelle                      |
|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|
| Restmüll [% TS]                |                                    |                             |
| 26                             | Spittelau, Hausmüll                | Schachermayer et al. (1995) |
| 24                             | Spittelau, Systemmüll              | Schachermayer et al. (1995) |
| Heizwertreiche Fraktion [% TS] |                                    |                             |
| 47,1                           | MBA Zell am See, >100 mm           | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| Rotterest [% TS]               |                                    |                             |
| 21,3                           | MBA Herzogsdorf, <80mm, 16 Wochen  | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 21,6                           | MBA Zell am See, <100mm, 13 Wochen | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |

*Tabelle 11-8: Daten zur provisorischen Brennwert-Bilanz*

| Gehalt                             | Anlage, Beschaffenheit des Gutes      | Quelle                      |
|------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| Restmüll [MJ/kg TS]                |                                       |                             |
| 14,1                               | MBA Kufstein                          | Harant et al. (1999)        |
| 13,9                               | MBA Allerheiligen                     | Harant et al. (1999)        |
| 14,8                               | MBA Zell am See                       | Harant et al. (1999)        |
| Heizwertreiche Fraktion [MJ/kg TS] |                                       |                             |
| 28,8                               | MBA Allerheiligen >80mm               | Harant et al. (1999)        |
| 21,1                               | MBA >100 nach 13 Wo Hammermühle ZEMKA | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 21,7                               | MBA Zemka                             | Harant et al. (1999)        |
| 18,4                               | MBA >50 Kufstein                      | Harant et al. (1999)        |





Fortsetzung Tabelle 11-8:

| Rotterest [MJ/kg TS]   |                                      |                             |
|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| 10,2                   | MBA Herzogsdorf, <80mm, 16 Wochen    | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 4,8                    | MBA Ort/Krems, <50mm, +Baseb         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 6,5                    | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 9,1                    | MBA Kufstein <50mm, 8 Wochen         | Harant et al. (1999)        |
| 11,3                   | MBA Kufstein, <50mm, 13 Wochen       | Harant et al. (1999)        |
| 9,3                    | MBA Allerheiligen, <80mm, 22 Wochen  | Harant et al. (1999)        |
| 7,9                    | MBA Zell am See, <100 mm, 8 Wochen   | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 7,8                    | MBA Zell am See, <100 mm, 13 Wochen  | Harant et al. (1999)        |
| Klärschlamm [MJ/kg TS] |                                      |                             |
| 17                     | MBA Allerheiligen                    | Harant et al. (1999)        |
| 14,4                   | MBA Zell am See                      | Harant et al. (1999)        |

Tabelle 11-9: Daten zur provisorischen Cl-Bilanz

| Gehalt                             | Anlage, Beschaffenheit des Gutes            | Quelle                           |
|------------------------------------|---|----------------------------------|
| Restmüll [% TS, FS]                |   |                                  |
| 0,41 (TS)                          | MBA Osnabrück                               | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 0,87 (FS)                          | Restabfall Mittelwert                       | Friedirch (2000)                 |
| 0,53 (FS)                          | MVA Spittelau                               | Schachermayer et al. (1995)      |
| Heizwertreiche Fraktion [% FS, TS] |   |                                  |
| 1,58 (TS)                          | MBA Osnabrück, >100mm, vor Rotte            | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 0,54 (TS)                          | MBA Osnabrück, >100mm, nach 9 Monaten Rotte | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 1,75 (TS)                          | MBA Kufstein, >50mm                         | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 0,7 (TS)                           | MBA Siebreste >80/100mm                     | Spuziak-Salzenberg et al. (1998) |
| 0,5 (TS)                           | MBA Siebreste >100mm                        | Spuziak-Salzenberg et al. (1998) |
| 0,55 (FS)                          | verschiedene (95 Werte gemittelt)           | Lahl (2001)                      |
| Rotterest [% TS]                   |   |                                  |
| 0,49                               | MBA Osnabrück, vor Rotte                    | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 0,08                               | MBA Osnabrück, nach 9 Monaten Rotte         | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 0,15                               | MBA Osnabrück, < 40mm, nach 9 Monaten Rotte | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 0,45                               | Cl- Emissionspotential                      | Soyez (2001)                     |
| Klärschlamm [g/kg TS]              |   |                                  |
| 0,63                               | Faulschlamm, deutsche Anlage                | Raach et al. (1999)              |



Tabelle 11-10: Daten zur provisorischen Phosphor-Bilanz

| Gehalt                                    | Anlage, Beschaffenheit des Gutes       | Quelle                          |
|---|--|---------------------------------|
| Restmüll [g/kg FS]                        |  |                                 |
| 0,91                                      | Hausmüll Spittelau                     | Schachermayer et al. (1995)     |
| 1,05                                      | Systemmüll Spittelau                   | Schachermayer et al. (1995)     |
| Rotterest [% TS]                          |  |                                 |
| 0,22                                      | MBA Frojach-Katsch, <25mm, 6 Monate    | Zeschmar-Lahl et al. (2000)     |
| Rotterest - Klärschlamm + Restmüll [% TS] |  |                                 |
| 0,58                                      | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 8 Monate   | Zeschmar-Lahl et al. (2000)     |
| 0,44                                      | MBA Aich-Assach, <60mm, +KS, 10 Monate | Zeschmar-Lahl et al. (2000)     |
| 0,69                                      | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen   | Zeschmar-Lahl et al. (2000)     |
| Klärschlamm [g/kg TS]                     |  |                                 |
| 34  | Zürich, Werdhölzli                     | Brunner und Gajcy (1989)        |
| 21  | Mittel deutsche Anlagen, Faulschlamm   | Raach et al. (1999)             |
| 16  | MBA Oberpullendorf                     | Umweltdienst Burgenland (2002a) |
| 36  | MBA Oberpullendorf                     | Umweltdienst Burgenland (2002a) |
| Fe-Schrott [mg/kg TS]                     |  |                                 |
| 30  | Magnetseparationsschrott               | Fischer et al. (1982)           |

Tabelle 11-11: Daten zur provisorischen Schwefel-Bilanz

| Gehalt                            | Anlage, Beschaffenheit des Gutes       | Quelle                        |
|-----------------------------------|--|-------------------------------|
| Restmüll [% FS]                   |  |                               |
| 0,33                              | Mittelwert Restabfall                  | Friedrich (2000)              |
| 0,24                              | Spittelau Hausmüll                     | Schachermayer et al. (1995)   |
| 0,29                              | Spittelau Systemmüll                   | Schachermayer et al. (1995)   |
| Heizwertreiche Fraktion [% TS,FS] |  |                               |
| 0,75 (TS)                         | MBA Kufstein                           | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 0,146 (FS)                        | verschiedene (gemittelt aus 39 Werten) | Lahl (2001)                   |
| Rotterest [% TS]                  |  |                               |
| 1,1                               | MBA Herzogsdorf, <80mm, 2-4 Wochen     | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 0,7                               | Herzogsdorf, <80mm, 16 Wochen          | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| Klärschlamm [g/kg TS]             |  |                               |
| 8                                 | Zürich Werdhölzli                      | Brunner und Gajcy (1989)      |
| 21                                | Faulschl. deutsche Anlagen, mittel     | Raach et al. (1999)           |
| Abluft MBA                        |  |                               |
| 0,075kg/t Inp.                    |  | Lahl und Zeschmar-Lahl (2001) |
| 0,07 kg/t Inp.                    |  | Soyez (2001)                  |



Fortsetzung Tabelle 11-11:

|                   |                          |                 |
|-------------------|--------------------------|-----------------|
| Fe-Schrott [% TS] |                          |                 |
| 0,075             | Magnetseparationsschrott | Gotthelf (1983) |

Tabelle 11-12: Daten zur provisorischen Stickstoff-Bilanz

| Gehalt                             | Anlage, Beschaffenheit des Gutes         | Quelle                        |
|------------------------------------|--|-------------------------------|
| Restmüll[g/kg TS, FS]              |  |                               |
| 4,5 (TS)                           | Restmüll, Bad Tölz                       | Soyez (2001)                  |
| 6 (FS)                             | Restmüll                                 | Ramke (1991)                  |
| 7 (TS)                             | durchschnittlicher Restmüll              | Fehringer et al. (1997)       |
| Klärschlamm [% TS]                 |  |                               |
| 7,3                                | Zürich, Werdhölzli                       | Brunner und Gajcy (1989)      |
| 4,6                                | Faulschl. deutsche Anlagen, mittel       | Raach et al. (1999)           |
| Heizwertreiche Fraktion [% TS, FS] |  |                               |
| 0,2 (TS)                           | MBA Osnabrück, >100mm, 9 Monate Rotte    | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 1,6 (TS)                           | MBA Zell am See, >100mm                  | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 1,0 (FS)                           | verschiedene (4 Werte gemittelt)         | Lahl (2001)                   |
| Rotterest [% TS, FS]               |  |                               |
| 1,5 (TS)                           | MBA Herzogsdorf, <80mm, 2-4 Wochen       | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 0,7 (TS)                           | MBA Herzogsdorf, <80mm, 16 Wochen        | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 1,36 (TS)                          | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 8 Monate     | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 1,19 (TS)                          | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 10 Monate    | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 0,64 (TS)                          | MBA Frojach-Katsch, <25mm + KS, 6 Monate | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 1,12 (TS)                          | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen     | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 1,5                                | MBA Rügen, Mecklenb.- Vorpommern         | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 1,0 (TS)                           | MBA Zell am See, <100mm, 13 Wochen       | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| Abluft [g/t Input]                 |  |                               |
| 300-1.700                          | bei KS Mitbehandlung                     | Lahl und Zeschmar-Lahl (2001) |
| 100                                | MBA Cuhls                                | Cuhls (2000)                  |
| 10-550                             | MBA Siggerwiesen                         | Angerer (1999)                |



*Tabelle 11-13: Daten zur provisorischen Aluminium-Bilanz*

| Gehalt                         | Anlage, Beschaffenheit des Gutes   | Quelle                          |
|--------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Restmüll [% FS]                |                                    |                                 |
| 1,34                           | Al gesamt, MVA Wels, Spittelau     | Daxbeck et al. (2000)           |
| 0,27                           | Al aus Haushaltsfolien             | Daxbeck et al. (2000)           |
| 0,62                           | Al aus Al-Verpackungen             | Daxbeck et al. (2000)           |
| 0,53                           | Al aus mineralischen Bestandteilen | Daxbeck et al. (2000)           |
| Heizwertreiche Fraktion [% FS] |                                    |                                 |
| 0,59                           | MBA Oberpullendorf, >70mm          | Umweltdienst Burgenland (2002b) |
| 0,87                           | MBA Oberpullendorf                 | Umweltdienst Burgenland (2002b) |
| 1,2                            | MBA Oberpullendorf                 | Umweltdienst Burgenland (2002b) |
| 0,723                          | MBA Oberpullendorf                 | Umweltdienst Burgenland (2002b) |
| 0,881                          | MBA Oberpullendorf                 | Umweltdienst Burgenland (2002b) |
| 0,197                          | verschiedene (2 Werte gemittelt)   | Lahl (2001)                     |
| Klärschlamm [g/kg TS]          |                                    |                                 |
| 25                             | Zürich Werdhölzli                  | Brunner und Gajcy (1989)        |
| 15                             | Faulschl. deutsche Anlage mittel   | Raach et al. (1999)             |



Tabelle 11-14: Aluminium-Konzentrationen in heizwertreichen Fraktionen: Berechnung aus Sortieranalysen in einer Abfallmatrix, Berechnung für je 1.000 kg, Al-Gehalte der Teilfraktionen übernommen von Daxbeck et al. (2000)

| Teilfraktion                          | Al-Konz.<br>[g/100g FS] | Fraktion >70 mm            |                | Fraktion 25-70mm           |                |
|---------------------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|
|                                       |                         | Massenanteil<br>[Massen-%] | Fracht<br>[kg] | Massenanteil<br>[Massen-%] | Fracht<br>[kg] |
| Papier und Pappe, Verpackungen        | 1                       | 0,15                       | 0,015          | 1,38                       | 0,138          |
| Papier und Pappe, Nicht- Verpackungen | 1                       | 3,19                       | 0,319          | 3,17                       | 0,317          |
| Verbundstoffe, Getränkeverpackungen   | 2,97                    | 0,98                       | 0,29106        | 2,17                       | 0,64449        |
| Verbundstoffe, sonstige Verpackungen  | 2,97                    | 0,85                       | 0,25245        | 2,29                       | 0,68013        |
| Verbundstoffe, Nicht- Verpackungen    | 2,97                    | 0,52                       | 0,15444        | 1,86                       | 0,55242        |
| Hygieneartikel                        | 1                       | 25,53                      | 2,553          | 11,35                      | 1,135          |
| Textilien, Verpackungen               | 0                       | 0                          | 0              | 0                          | 0              |
| Textilien Nicht- Verpackungen         | 0                       | 22,06                      | 0              | 7,7                        | 0              |
| Holz, Leder, Gummi                    | 0                       | 4,17                       | 0              | 3,06                       | 0              |
| Folien und Säcke, Verpackungen > A3   | 0                       | 7,87                       | 0              | 0                          | 0              |
| Folien und Säcke, Verpackungen < A3   | 0                       | 10,12                      | 0              | 12,74                      | 0              |
| Flaschen; PET- Getränkeverpackungen   | 0                       | 1,09                       | 0              | 0,69                       | 0              |
| Flaschen; PE, HDPE und sonstige       | 0                       | 1,36                       | 0              | 1,36                       | 0              |
| Kanister und Eimer                    | 0                       | 0,76                       | 0              | 0                          | 0              |
| Becher; Verpackungen PS, PP           | 0                       | 1,01                       | 0              | 2,31                       | 0              |
| EPS; Verpackungen ("Styropor")        | 0                       | 0,05                       | 0              | 0,15                       | 0              |
| Sonstige Kunststoffe, Verpackungen    | 0                       | 0,29                       | 0              | 1,96                       | 0              |
| Kunststoffe, Nicht- Verpackungen      | 0                       | 6,59                       | 0              | 5,02                       | 0              |
| Vegetabilien                          | 0,0005                  | 2,75                       | 0,0001375      | 8,27                       | 0,0004135      |
| Metalle, Verpackungen Al              | 95                      | 0,86                       | 8,17           | 0,78                       | 7,41           |
| Metalle, Verpackungen Fe              | 4                       | 0,26                       | 0,104          | 0,34                       | 0,136          |
| Metalle, Nicht- Verpackungen          | 20                      | 0,57                       | 1,14           | 1,03                       | 2,06           |
| Glas, Verpackungen                    | 0,05                    | 0,12                       | 0,0006         | 4,7                        | 0,0235         |
| Glas, Nicht- Verpackungen             | 0,05                    | 0                          | 0              | 0,97                       | 0,00485        |
| Mineralische Bestandteile             | 1,15                    | 0,83                       | 0,09545        | 7,2                        | 0,828          |
| Problemstoffe                         | 1,5                     | 0                          | 0              | 0,27                       | 0,0405         |
| Restfraktion > 20mm                   | 1,5                     | 2,25                       | 0,3375         | 10,22                      | 1,533          |
| Feinfraktion < 20mm                   | 1,5                     | 5,77                       | 0,8655         | 9,01                       | 1,3515         |
| <b>Summe</b>                          |                         | <b>100</b>                 | <b>14,3</b>    | <b>100</b>                 | <b>16,7</b>    |

Tabelle 11-15: Daten zur provisorischen Blei-Bilanz

| Gehalt                                 | Anlage, Beschaffenheit des Gutes         | Quelle                           |
|--|--|----------------------------------|
| Restmüll [mg/kg TS, FS]                |  |                                  |
| 774 (TS)                               | MBA Osnabrück                            | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 584,3 (FS)                             | Mittelwert Restabfall                    | Friedrich (2000)                 |
| (980 (TS)                              | Metalle ausgeklaut 8Wo Rotte             | Hennecke (1999)                  |
| 700 (TS)                               | Spittelau, Hausmüll                      | Schachermayer et al. (1995)      |
| Heizwertreiche Fraktion [mg/kg TS, FS] |  |                                  |
| 138 (TS)                               | MBA Allerheiligen, >80mm                 | Harant et al. (1999)             |
| 1138 (TS)                              | MBA Osnabrück, >100mm, vor Rotte         | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 462 (TS)                               | MBA Osnabrück, >100 nach 9 Monaten Rotte | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 59 (TS)                                | MBA Kufstein, >18mm                      | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 71,2 (TS)                              | MBA Siebreste >80/100mm                  | Spuziak-Salzenberg et al.(1998)  |
| 106,4 (TS)                             | MBA Siebreste >100mm                     | Spuziak-Salzenberg et al. (1998) |
| 1.700 (TS)                             | Heizwertreiche Fraktion >40mm            | Tubergen (1996)                  |
| 136 (FS)                               | verschiedene (96 Werte gemittelt)        | Lahl (2001)                      |



Fortsetzung Tabelle 11-15:

| Rotterrest [mg/kg TS]  |  |                             |
|------------------------|--|-----------------------------|
| 213                    | MBA Allerheiligen, <80mm                 | Harant et al. (1999)        |
| 292                    | MBA Osnabrück, <100mm, vor Rotte         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 1261                   | MBA Osnabrück, <40mm, 9 Monate           | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 703                    | MBA Osnabrück, 40-100mm, 9 Monate        | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 145                    | MBA Herzogsdorf, <80mm, 2-4 Wochen       | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 89                     | MBA Herzogsdorf, <80mm, 16 Wochen        | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 179                    | MBA Kirchdorf/Krems, <50mm, +Baseb       | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 680                    | MBA Ort im Innkreis, <10mm               | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 734                    | <40, 20 Wochen                           | Hennecke (1999)             |
| 1175                   | <40, 50 Wochen                           | Hennecke (1999)             |
| 665                    | <40, 2,5 Wo Gärung, 12 Wo Rotte          | Hennecke (1999)             |
| 197                    | MBA Allerheiligen, <80mm, frisch         | Harant et al. (1999)        |
| 227                    | MBA "" 2 Wochen                          | Harant et al. (1999)        |
| 245                    | MBA "" 6 Wochen                          | Harant et al. (1999)        |
| 237                    | MBA "" 14 Wochen                         | Harant et al. (1999)        |
| 311                    | MBA "" 22 Wochen                         | Harant et al. (1999)        |
| 334                    | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 8 Monate     | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 416                    | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 10 Monate    | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 177                    | MBA Allerheiligen, <80mm + KS, 22 Wochen | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 590                    | MBA Frojach-Katsch, <25mm + KS, 6 Monate | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 121                    | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen     | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 224                    | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen     | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 194                    | MBA Zell am See, <100mm, 13 Wochen       | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 268                    | MBA Fischamend                           | Nelles et al. (1997)        |
| 289                    | MBA Pöchlarn                             | Nelles et al. (1997)        |
| 357                    | MBA Gerling                              | Nelles et al. (1997)        |
| 273                    | MBA Kirchdorf                            | Nelles et al. (1997)        |
| 197                    | MBA Ort im Innkreis                      | Nelles et al. (1997)        |
| 98                     | MBA Roppen                               | Nelles et al. (1997)        |
| 177                    | MBA Allerheiligen                        | Nelles et al. (1997)        |
| 963                    | MBA Frojach-Katsch                       | Nelles et al. (1997)        |
| Klärschlamm [mg/kg TS] |  |                             |
| 85                     | MBA Allerheiligen                        | Harant et al. (1999)        |
| 63                     | Schwermetallbelastung n. ATV, 1999       | Timmerman (2000)            |
| 99                     | Langenwang Mürz I                        | Nelles et al. (1997)        |
| 95                     | Wartberg Mürz II                         | Nelles et al. (1997)        |
| 81                     | St. Marein Mürz III                      | Nelles et al. (1997)        |
| 65                     | Kapfenberg Mürz IV                       | Nelles et al. (1997)        |
| 102                    | Bruck                                    | Nelles et al. (1997)        |
| 57                     | oberösterreichische Anlagen              | Aichberger (2000)           |



Fortsetzung Tabelle 11-15:

| MBA Abluft             |                               |                        |
|------------------------|-------------------------------|------------------------|
| <0,2mg/t Abf.          | MBAAs Allerheiligen, Kufstein | Angerer (1999)         |
| <0,03µg/m <sup>3</sup> | MBAAs Allerheiligen, Kufstein | Angerer (1999)         |
| Gärwässer [mg/l]       |                               |                        |
| 0,13                   | Presswasser Ravensburg        | Sievers und Nitz(1997) |
| 0,40                   | Abwasser Ravensburg           | Sievers und Nitz(1997) |

Tabelle 11-16: Daten zur provisorischen Chrom-Bilanz

| Gehalt                                 | Anlage, Beschaffenheit des Gutes          | Quelle                        |
|--|---|-------------------------------|
| Restmüll [mg/kg TS, FS]                |   |                               |
| 119 (TS)                               | Metalle ausgeklaut 8Wo Rotte              | Hennecke (1999)               |
| 175 (TS)                               | Gehalt nach Magnetabscheider              | Krauß (1985)                  |
| 113 (FS)                               | Hausmüll                                  | EAWAG (1982)                  |
| 47 (FS)                                | Mittelwert Restabfall                     | Friedrich (2000)              |
| Heizwertreiche Fraktion [mg/kg TS, FS] |   |                               |
| 684 (TS)                               | MBA Osnabrück, >100mm, vor Rotte          | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 552 (TS)                               | MBA Osnabrück, >100mm, 9 Monate           | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 38,5 (TS)                              | MBA Kufstein, >18mm                       | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 100 (TS)                               | MBA Meckelenb.-Vorpommern, >50 mm         | Lahl und Zeschmar-Lahl (2001) |
| 120 (TS)                               | Heizwertreiche Fraktion >40mm             | Tubergen (1996)               |
| 164 (FS)                               | verschiedene (96 Werte gemittelt)         | Lahl (2001)                   |
| Rotterest [mg/kg TS]                   |   |                               |
| 1198                                   | MBA Osnabrück, <100mm, vor Rotte          | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 358                                    | MBA Osnabrück, <40mm, nach 9 Monate       | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 788                                    | MBA Osnabrück, 40-100mm, 9 Monate         | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 52                                     | MBA Herzogsdorf, <80mm, 2-4 Wochen        | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 52                                     | MBA Herzogsdorf, <80mm, 16 Wochen         | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 97,1                                   | MBA Ort/Krems, <50mm +Baseb               | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 125                                    | MBA Ort im Innkreis, <10mm                | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 110                                    | <40mm, 20 Wo Rotte                        | Hennecke (1999)               |
| 287                                    | <40mm, 50 Wo Rotte                        | Hennecke (1999)               |
| 148                                    | <40mm, 2,5 Wo Gärung, 12 Wo Rotte         | Hennecke (1999)               |
| 196                                    | MBA Aich-Assach, <60mm, +KS, 8 Monate     | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 200                                    | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 10 Monate     | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 292                                    | MBA Allerheiligen, <80mm, + KS, 22 Wochen | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 74                                     | MBA Frojach-Katsch, <25mm, + KS, 6 Monate | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 66                                     | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen      | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 285                                    | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen      | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 138                                    | MBA Zell am See, <100, 13 Wochen          | Zeschmar-Lahl et al. (2000)   |
| 112                                    | MBA Fischamend                            | Nelles et al. (1997)          |



Fortsetzung Tabelle 11-16:

| Rotterest [mg/kg TS]   |                                    |                         |
|------------------------|------------------------------------|-------------------------|
| 278                    | MBA Pöchlarn                       | Nelles et al. (1997)    |
| 215                    | MBA Gerling                        | Nelles et al. (1997)    |
| 344                    | MBA Kirchdorf                      | Nelles et al. (1997)    |
| 206                    | MBA Ort im Innkreis                | Nelles et al. (1997)    |
| 103                    | MBA Roppen                         | Nelles et al. (1997)    |
| 292                    | MBA Allerheiligen                  | Nelles et al. (1997)    |
| 209                    | MBA Frojach-Katsch                 | Nelles et al. (1997)    |
| Klärschlamm [mg/kg TS] |                                    |                         |
| 50                     | Klärschlamm Nordrhein-Westfalen    | Fehrenbach (2000)       |
| 46                     | Schwermetallbelastung n. ATV, 1999 | Timmerman (2000)        |
| 86                     | Langenwang Mürz I                  | Nelles et al. (1997)    |
| 69                     | Wartberg Mürz II                   | Nelles et al. (1997)    |
| 61                     | St. Marein Mürz III                | Nelles et al. (1997)    |
| 106                    | Kapfenberg Mürz IV                 | Nelles et al. (1997)    |
| 47                     | Bruck                              | Nelles et al. (1997)    |
| 43                     | oberösterreichische Anlagen        | Aichberger (2000)       |
| Gärwässer [mg/l]       |                                    |                         |
| 0,2                    | Presswasser Ravensburg             | Sievers und Nitz (1997) |
| 19                     | Abwasser Ravensburg                | Sievers und Nitz (1997) |

Tabelle 11-17: Daten zur provisorischen Cadmium-Bilanz

| Gehalt                                 | Anlage, Beschaffenheit des Gutes      | Quelle                           |
|--|---------------------------------------|----------------------------------|
| Restmüll [mg/kg TS, FS]                |                                       |                                  |
| 3,8 (TS)                               | MBA Osnabrück                         | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 12,1 (TS)                              | Restabfall Mittelwert                 | Friedrich (2000)                 |
| 7,7 (TS)                               | Gehalt nach Magnetabscheider          | Krauß (1985)                     |
| 2,5 (TS)                               | nach Metallabsonderung                | Hennecke (1999)                  |
| 6,3 (FS)                               | MVA Spittelau                         | Schachermayer et al. (1995)      |
| Heizwertreiche Fraktion [mg/kg TS, FS] |                                       |                                  |
| 5,1 (TS)                               | Allerheiligen, >80mm                  | Harant et al. (1999)             |
| 2,1 (TS)                               | MBA Osnabrück, >100mm, vor Rotte      | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 3 (TS)                                 | MBA Osnabrück, >100mm, 9 Monate Rotte | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 0,98 (TS)                              | MBA Mecklenb.- Vorpommern >50mm       | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 0,95 (TS)                              | MBA Kufstein >18mm                    | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 1,88 (TS)                              | MBA Siebreste >80/100mm               | Spuziak-Salzenberg et al. (1998) |
| 1,18 (TS)                              | MBA Siebreste >100mm                  | Spuziak-Salzenberg et al. (1998) |
| 0,7 (TS)                               | Heizwertreiche Fraktion >40mm         | Tubergen (1996)                  |
| 2,53 (FS)                              | diverse (97 Werte gemittelt)          | Lahl (2001)                      |





Fortsetzung Tabelle 11-17:

| Rotterest [mg/kg TS]   |  |                             |
|------------------------|--|-----------------------------|
| 3,7                    | MBA Allerheiligen, <80mm                   | Harant et al. (1999)        |
| 3,2                    | MBA Osnabrück, <100mm, vor Rotte           | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 4,1                    | MBA Osnabrück, <40mm, nach 9 Monaten Rotte | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 6                      | MBA Osnabrück, 40-100mm, 9 Monate          | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 1,5                    | MBA Herzogsdorf, <80mm, 2-4 Wochen         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 0,9                    | MBA Herzogsdorf, <80mm, 16 Wochen          | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 1,465                  | MBA Kirchdorf/Krems, <50mm +Baseb          | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 4                      | MBA Ort im Innkreis, <10mm                 | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 3,4                    | MBA Allerheiligen, <80mm frisch            | Harant et al. (1999)        |
| 3,7                    | MBA Allerheiligen, 2 Wochen                | Harant et al. (1999)        |
| 4,1                    | MBA Allerheiligen, 6 Wochen                | Harant et al. (1999)        |
| 3,9                    | MBA Allerheiligen, 14 Wochen               | Harant et al. (1999)        |
| 3,6                    | MBA Allerheiligen, 22 Wochen               | Harant et al. (1999)        |
| 2,8                    | MBA Aich-Assach, <60mm, +KS 8 Monate       | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 3,2                    | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 10 Monate      | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 2,6                    | MBA Allerheiligen, <80mm + KS, 22 Wochen   | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 11,87                  | MBA Frojach-Katsch, <25mm + KS, 6 Monate   | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 0,70                   | MBA Oberpullendorf, <35mm, nach 22 Wochen  | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 3,60                   | MBA Oberpullendorf, <35mm, nach 22 Wochen  | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 1,6                    | MBA Zell am See, <100mm, 13 Wochen         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 0,6                    | MBA Fischamend                             | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 2,1                    | MBA Pöchlarn                               | Nelles et al. (1997)        |
| 2,7                    | MBA Gerling                                | Nelles et al. (1997)        |
| 3,8                    | MBA Kirchdorf                              | Nelles et al. (1997)        |
| 1,4                    | MBA Roppen                                 | Nelles et al. (1997)        |
| 2,6                    | MBA Allerheiligen                          | Nelles et al. (1997)        |
| 6,1                    | MBA Frojach-Katsch                         | Nelles et al. (1997)        |
| 3,8                    | MBA Ort im Innkreis                        | Nelles et al. (1997)        |
| Klärschlamm [mg/kg TS] |  |                             |
| 1,3                    | Allerheiligen                              | Harant et al. (1999)        |
| 2                      | Klärschlamm Nordrhein-Westfalen            | Fehrenbach (2000)           |
| 1,4                    | Schwermetallbelastung n. ATV, 1999         | Timmerman (2000)            |
| 1,4                    | Langenwang Mürz I                          | Nelles et al. (1997)        |
| 1,6                    | Wartberg Mürz II                           | Nelles et al. (1997)        |
| 2,6                    | St. Marein Mürz III                        | Nelles et al. (1997)        |
| 1,8                    | Kapfenberg Mürz IV                         | Nelles et al. (1997)        |
| 1                      | Bruck                                      | Nelles et al. (1997)        |
| 1,3                    | oberösterreichische Anlagen                | Aichberger (2000)           |
| Abluft MBA             |  |                             |
| <0,001mg/t             | MBA's Allerheiligen, Kufstein              | Angerer (1999)              |



Fortsetzung Tabelle 11-17:

| Gärwasser [mg/l] |                        |                         |
|------------------|------------------------|-------------------------|
| <0,0005          | Presswasser Ravensburg | Sievers und Nitz (1997) |
| 0,3              | Abwasser Ravensburg    | Sievers und Nitz (1997) |

Tabelle 11-18: Daten zur provisorischen Eisen-Bilanz

| Gehalt                | Anlage, Beschaffenheit des Gutes         | Quelle                      |
|-----------------------|--|-----------------------------|
| Restmüll [% FS]       |  |                             |
| 3,5                   | Spittelau, Hausmüll                      | Schachermayer et al. (1995) |
| 4,2                   | Spittelau, Systemmüll                    | Schachermayer et al. (1995) |
| Rotterest [% TS]      |  |                             |
| 1,6                   | Aich-Assach, <60mm + KS, nach 8 Monaten  | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 1,8                   | Aich-Assach, <60mm + KS, nach 10 Monaten | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 2,60                  | Oberpullendorf, <35mm, nach 22 Wochen    | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| Klärschlamm [g/kg TS] |  |                             |
| 15                    | Zürich, Werdhölzli                       | Brunner und Gajcy (1989)    |
| 39                    | Faulschlamm, deutsche Anlage             | Raach et al. (1999)         |

Tabelle 11-19: Daten zur provisorischen Kupfer-Bilanz

| Gehalt                             | Anlage, Beschaffenheit des Gutes          | Quelle                      |
|------------------------------------|---|-----------------------------|
| Restmüll [mg/kg TS, FS]            |   |                             |
| 640 (FS)                           | Mittelwert Restabfall                     | Friedrich (2000)            |
| 2000 (TS)                          | Gehalt nach Magnetabscheider              | Krauß (1985)                |
| 193 (TS)                           | Metalle ausgeklaut 8Wo Rotte              | Hennecke (1999)             |
| 310 (FS)                           | MVA Spittelau                             | Schachermayer et al. (1995) |
| Heizwertreiche Fraktion [mg/kg FS] |   |                             |
| 697                                | verschiedene (97 Werte gemittelt)         | Lahl (2001)                 |
| Rotterest [mg/kg TS]               |   |                             |
| 106                                | MBA Herzogsdorf, <80mm, 2-4 Wochen        | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 297                                | MBA Herzogsdorf, <80mm, 16 Wochen         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 344,5                              | MBA Kirchdorf/Krems, <50mm +Baseb         | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 280                                | MBA Ort im Innkreis, <10mm                | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 533                                | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 8 Monate      | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 517                                | MBA Aich-Assach, <60mm, +KS, 10 Monate    | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 447                                | MBA Allerheiligen, <80mm, + KS, 22 Wochen | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 553                                | MBA Frojach-Katsch, <25mm, + KS, 6 Monate | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 487                                | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen      | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 306                                | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen      | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 456                                | MBA Zell am See, <100mm, 13 Wochen        | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |



Fortsetzung Tabelle 11-19:

|                        |                                       |                         |
|------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| 161                    | MBA Fischamend                        | Nelles et al. (1997)    |
| 278                    | MBA Pöchlarn                          | Nelles et al. (1997)    |
| 247                    | MBA Gerling                           | Nelles et al. (1997)    |
| 500                    | MBA Kirchdorf                         | Nelles et al. (1997)    |
| 277                    | MBA Ort im Innkreis                   | Nelles et al. (1997)    |
| 208                    | MBA Siggerwiesen                      | Nelles et al. (1997)    |
| 218                    | MBA Roppen                            | Nelles et al. (1997)    |
| 447                    | MBA Allerheiligen                     | Nelles et al. (1997)    |
| 227                    | MBA Frojach-Katsch                    | Nelles et al. (1997)    |
| Klärschlamm [mg/kg TS] |                                       |                         |
| 300                    | Klärschlamm Nordrhein-Westfalen       | Fehrenbach (2000)       |
| 61,5                   | Schwermetallbelastung n. ATV, 1999    | Timmerman (2000)        |
| 188                    | Langenwang Mürz I                     | Nelles et al. (1997)    |
| 319                    | Wartberg Mürz II                      | Nelles et al. (1997)    |
| 191                    | St. Marein Mürz III                   | Nelles et al. (1997)    |
| 142                    | Kapfenberg Mürz IV                    | Nelles et al. (1997)    |
| 178                    | Bruck                                 | Nelles et al. (1997)    |
| 190                    | oberösterreichische Anlagen           | Aichberger (2000)       |
| Abluft MBA             |                                       |                         |
| 7,55mg/t Abfall        | Allerheiligen, Siggerwiesen, Kufstein | Angerer (1999)          |
| 5,79µg/m <sup>3</sup>  | Allerheiligen, Siggerwiesen, Kufstein | Angerer (1999)          |
| Gärwasser [mg/l]       |                                       |                         |
| 0,1                    | Presswasser Ravensburg                | Sievers und Nitz (1997) |
| 62                     | Abwasser Ravensburg                   | Sievers und Nitz (1997) |

Tabelle 11-20: Daten zur provisorischen Nickel-Bilanz

| Gehalt                                 | Anlage, Beschaffenheit des Gutes | Quelle                      |
|--|----------------------------------|-----------------------------|
| Restmüll [mg/kg TS, FS]                |                                  |                             |
| 31 (FS)                                | Restmüll Mittelwert              | Friedrich (2000)            |
| 51,7 (FS)                              | Restmüll                         | EAWAG (1982)                |
| 51 (TS)                                | Restmüll, Metalle ausgeklaut     | Hennecke (1999)             |
| Heizwertreiche Fraktion [mg/kg TS, FS] |                                  |                             |
| 56,75 (TS)                             | MBA Kufstein, >18mm              | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 80 (TS)                                | Heizwertreiche Fraktion >40      | Tubergen (1995)             |
| 50,5 (FS)                              | (96 Werte gemittelt)             | Lahl (2001)                 |



Fortsetzung Tabelle 11-20:

| Rotterest [mg/kg TS]                    |  |                             |
|---|--|-----------------------------|
| 127                                     | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 8 Monate     | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 156                                     | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 10 Monate    | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 188                                     | MBA Allerheiligen, <80mm + KS, 22 Wochen | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 84                                      | MBA Frojach-Katsch, <25mm + KS, 6 Monate | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 59                                      | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen     | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 253                                     | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen     | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 87                                      | MBA Zell am See, <100mm, nach 13 Wochen  | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 84                                      | MBA Fischamend                           | Nelles et al. (1997)        |
| 133                                     | MBA Pöchlarn                             | Nelles et al. (1997)        |
| 200                                     | MBA Gerling                              | Nelles et al. (1997)        |
| 243                                     | MBA Kirchdorf                            | Nelles et al. (1997)        |
| 141                                     | MBA Ort im Innkreis                      | Nelles et al. (1997)        |
| 90                                      | MBA Roppen                               | Nelles et al. (1997)        |
| 188                                     | MBA Allerheiligen                        | Nelles et al. (1997)        |
| 149                                     | MBA Frojach-Katsch                       | Nelles et al. (1997)        |
| 40                                      | MBA Heidenheim, <40 mm                   | Krauß (1985)                |
| 71                                      | <40 mm, 20 Wochen                        | Hennecke (1999)             |
| 181                                     | <40 mm 50 Wochen                         | Hennecke (1999)             |
| Klärschlamm [mg/kg TS]                  |  |                             |
| 50                                      | Klärschlamm Nordrhein-Westfalen          | Fehrenbach (2000)           |
| 23                                      | Schwermetallbelastung n. ATV, 1999       | Timmerman (2000)            |
| 64                                      | Langenwang Mürz I                        | Nelles et al. (1997)        |
| 38                                      | Wartberg Mürz II                         | Nelles et al. (1997)        |
| 44                                      | St. Marein Mürz III                      | Nelles et al. (1997)        |
| 62                                      | Kapfenberg Mürz IV                       | Nelles et al. (1997)        |
| 15                                      | Bruck                                    | Nelles et al. (1997)        |
| 24                                      | oberösterreichische Anlagen              | Aichberger (2000)           |
| Abluft MBA [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] |  |                             |
| 14,1                                    | MBAs Allerheiligen, Kufstein             | Angerer (1999)              |
| 10,64                                   | MBAs Allerheiligen, Kufstein             | Angerer (1999)              |
| Gärwässer [mg/l]                        |  |                             |
| 0,15                                    | Presswasser Ravensburg                   | Sievers und Nitz (1997)     |
| 8,6                                     | Abwasser Ravensburg                      | Sievers und Nitz (1997)     |

Tabelle 11-21: Daten zur provisorischen Quecksilber-Bilanz

| Gehalt                  | Anlage, Beschaffenheit des Gutes | Quelle                      |
|-------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Restmüll [mg/kg TS, FS] |                                  |                             |
| 2,6 (TS)                | Mittelwert Restabfall            | Friedrich (2000)            |
| 1,8 (FS)                | MVA Spittelau                    | Schachermayer et al. (1995) |



Fortsetzung Tabelle 11-21:

|  |  |                                  |
|--|--|----------------------------------|
| Heizwertreiche Fraktion [mg/kg TS, FS] |  |                                  |
| 1,4 (TS)                               | MBA Mecklenb.- Vorpom., >50mm            | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 0,21 (TS)                              | MBA Siebreste >80/100mm                  | Spuziak-Salzenberg et al. (1998) |
| 0,39 (TS)                              | MBA Siebreste >100mm                     | Spuziak-Salzenberg et al. (1998) |
| 0,1 (TS)                               | Heizwertreiche Fraktion >40              | Tubergen (1995)                  |
| 0,422 (FS)                             | verschiedene (95 Werte gemittelt)        | Lahl (2001)                      |
| 0,2                                    | MBA Kufstein                             | Lahl und Zeschmar-Lahl (2001)    |
| Rotterest [mg/kg TS]                   |  |                                  |
| 0,3                                    | MBA Herzogsdorf, <80mm, 2-4 Wochen       | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 1,65                                   | MBA Kirchdorf/Krems, <50mm +Baseb        | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 2,2                                    | MBA Ort im Innkreis, <10mm               | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 12,7                                   | MBA Aich-Assach, <60mm, +KS, 8 Monate    | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 3                                      | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 10 Monate    | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 1,1                                    | MBA Allerheiligen, <80mm + KS, 22 Wochen | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 1                                      | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen     | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 2,1                                    | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen     | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 1,8                                    | MBA Zell am See, <100mm, nach 13 Wochen  | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 0,05                                   | MBA Fischamend                           | Nelles et al. (1997)             |
| 1,2                                    | MBA Pöchlarn                             | Nelles et al. (1997)             |
| 1                                      | MBA Gerling                              | Nelles et al. (1997)             |
| 2,6                                    | MBA Kirchdorf                            | Nelles et al. (1997)             |
| 1,5                                    | MBA Ort im Innkreis                      | Nelles et al. (1997)             |
| 0,99                                   | MBA Roppen                               | Nelles et al. (1997)             |
| 1,1                                    | MBA Allerheiligen                        | Nelles et al. (1997)             |
| 1,1                                    | MBA Frojach-Katsch                       | Nelles et al. (1997)             |
| Abluft MBA                             |  |                                  |
| <10 mg/t Inp.                          | Friesland, Bassum, Lüneburg, Horm        | Cuhls (2000)                     |
| 14 mg/t Inp.                           | MBA Kufstein                             | Angerer in Cuhls (2000)          |
| 4 mg/t Inp.                            | MBA Allerheiligen                        | Angerer in Cuhls (2000)          |
| 8 µg/m <sup>3</sup>                    | Herhof Aßlar Prozessumluft               | Wengenroth (2000)                |
| 3,7 µg/m <sup>3</sup>                  | Herhof Rennerod Reingas nach Lara        | Wengenroth (2000)                |
| Klärschlamm [mg/kg TS]                 |  |                                  |
| 1,5                                    | Nordrhein-Westfalen, Klärschlamm         | Fehrenbach (2000)                |
| 1                                      | Schwermetallbelastung n. ATV, 1999       | Timmerman (2000)                 |
| 1                                      | OÖ                                       | Aichberger (2000)                |
| 2,7                                    | Langenwang Mürz I                        | Nelles et al. (1997)             |
| 2                                      | Wartberg Mürz II                         | Nelles et al. (1997)             |
| 2,7                                    | St. Marein Mürz III                      | Nelles et al. (1997)             |
| 3,1                                    | Kapfenberg Mürz IV                       | Nelles et al. (1997)             |
| 2                                      | Bruck                                    | Nelles et al. (1997)             |



Fortsetzung Tabelle 11-21:

| Gärwässer [mg/l] |                        |                         |
|------------------|------------------------|-------------------------|
| <0,0005          | Ravensburg Presswasser | Sievers und Nitz (1997) |
| 0,1              | Ravensburg Abwasser    | Sievers und Nitz (1997) |

Tabelle 11-22: Daten zur provisorischen Zink-Bilanz

| Gehalt                                 | Anlage, Beschaffenheit des Gutes             | Quelle                           |
|--|--|----------------------------------|
| Restmüll [mg/kg TS, FS]                |  |                                  |
| 728 (TS)                               | MBA Osnabrück                                | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 1149 (TS)                              | Gehalt nach Magnetabscheider                 | Krauß (1985)                     |
| 601 (TS)                               | Metalle ausgeklaut, 8Wo Rotte                | Hennecke (1999)                  |
| 940 (FS)                               | MVA Spittelau                                | Schachermayer et al.(1995)       |
| Heizwertreiche Fraktion [mg/kg TS, FS] |  |                                  |
| 624 (TS)                               | MBA Allerheiligen                            | Harant et al. (1999)             |
| 3230 (TS)                              | MBA Osnabrück, vor Rotte                     | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 1330 (TS)                              | MBA Osnabrück, 9 Monate Rotte                | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 205 (TS)                               | MBA Kufstein >18mm                           | Zeschmar-Lahl (2000)             |
| 670 (TS)                               | Siebrete MBA >80/100mm                       | Spuziak-Salzenberg et al. (1998) |
| 532 (TS)                               | Siebrete MBA >100mm                          | Spuziak-Salzenberg et al. (1998) |
| 2300 (TS)                              | Heizwertreiche Fraktion >40mm                | Tubergen (1995)                  |
| 584 (FS)                               | verschiedene (93 Werte gemittelt)            | Lahl (2001)                      |
| Rotterest [mg/kg TS]                   |  |                                  |
| 792                                    | MBA Allerheiligen                            | Harant et al. (1999)             |
| 864                                    | MBA Osnabrück, vor Rotte                     | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 1340                                   | MBA Osnabrück, 9 Monate Rotte                | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 2116                                   | MBA Osnabrück, 9 Monaten Rotte               | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 485                                    | MBA Herzogsdorf, <80mm, 2-4 Wochen           | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 469                                    | MBA Herzogsdorf, <80mm, 16 Wochen            | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 848                                    | MBA Kirchdorf/Krems, <50mm +Baseb            | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 1130                                   | MBA Ort im Innkreis, <10mm                   | Zeschmar-Lahl et al. (2000)      |
| 2171                                   | nach Zerkl. <40mm, 20 Wo Rotte               | Hennecke (1999)                  |
| 1531                                   | nach Zerkl. <40mm, 50 Wo Rotte               | Hennecke (1999)                  |
| 1335                                   | nach Zerkl. <40mm, 2,5Wo Gärung, 12 Wo Rotte | Hennecke (1999)                  |
| 786                                    | MBA Allerheiligen, <80mm, frisch             | Harant et al. (1999)             |
| 842                                    | „ 2 Wochen                                   | Harant et al. (1999)             |
| 1087                                   | „ 6 Wochen                                   | Harant et al. (1999)             |
| 1186                                   | „ 14 Wochen                                  | Harant et al. (1999)             |
| 1089                                   | „ 22 Wochen                                  | Harant et al. (1999)             |
| 1149                                   | „ 22 Wo 0-12mm                               | Harant et al. (1999)             |
| 992                                    | „ 22 Wo 12-24mm                              | Harant et al. (1999)             |
| 1166                                   | „ 22 Wo 24-80mm                              | Harant et al. (1999)             |
| 1833                                   | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 8 Monate         | Zeschmar-Lahl (2000)             |



Fortsetzung Tabelle 11-22:

|                        |  |                             |
|------------------------|--|-----------------------------|
| 1733                   | MBA Aich-Assach, <60mm +KS, 10 Monate    | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 769                    | MBA Allerheiligen, <80mm + KS, 22 Wochen | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 1262                   | MBA Frojach-Katsch, <25mm + KS, 6 Monate | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 1180                   | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen     | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 990                    | MBA Oberpullendorf, <35mm, 22 Wochen     | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 685                    | MBA Zell am See, <100mm, 13 Wo           | Zeschmar-Lahl et al. (2000) |
| 339                    | MBA Fischamend                           | Nelles et al. (1997)        |
| 762                    | MBA Pöchlarn                             | Nelles et al. (1997)        |
| 904                    | MBA Gerling                              | Nelles et al. (1997)        |
| 973                    | MBA Kirchdorf                            | Nelles et al. (1997)        |
| 878                    | MBA Ort im Innkreis                      | Nelles et al. (1997)        |
| 398                    | MBA Siggerwiesen                         | Nelles et al. (1997)        |
| 489                    | MBA Roppen                               | Nelles et al. (1997)        |
| 769                    | MBA Allerheiligen                        | Nelles et al. (1997)        |
| 235                    | MBA Frojach-Katsch                       | Nelles et al. (1997)        |
| Klärschlamm [mg/kg TS] |  |                             |
| 748                    | Allerheiligen                            | Harant et al. (1999)        |
| 1000                   | Klärschlamm Nordrhein-Westfalen          | Fehrenbach (2000)           |
| 809                    | Schwermetallbelastung n. ATV, 1999       | Timmerman (2000)            |
| 440                    | Langenwang Mürz I                        | Nelles et al. (1997)        |
| 525                    | Wartberg Mürz II                         | Nelles et al. (1997)        |
| 930                    | OÖ                                       | Aichberger (2000)           |
| Gärwässer [mg/l]       |  |                             |
| 0,76                   | Presswasser Ravensburg                   | Sievers und Nitz (1997)     |
| 120                    | Abwasser Ravensburg                      | Sievers und Nitz (1997)     |



## 11.2 Probenahmedokumentation

In diesem Abschnitt sind Zeitpunkte der Feldprobenahmen und Feldprobenmassen dokumentiert.

*Tabelle 11-23: Probenahmen Versuch Oberpullendorf I, Fraktion >25 mm. Feldproben sind Einzelproben*

|    | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch<br/>[kg]</b> |
|----|--------------|----------------|------------------------------------|
| 1  | 18. 10. 2002 | 10:20          | 140                                |
| 2  | 18. 10. 2002 | 11:30          | 180                                |
| 3  | 18. 10. 2002 | 14:00          | 140                                |
| 4  | 18. 10. 2002 | 15:45          | 160                                |
| 5  | 23. 10. 2002 | 7:45           | 160                                |
| 6  | 23. 10. 2002 | 10:15          | 260                                |
| 7  | 23. 10. 2002 | 14:23          | 160                                |
| 8  | 23. 10. 2002 | 15:45          | 120                                |
| 9  | 24. 10. 2002 | 8:02           | 200                                |
| 10 | 24. 10. 2002 | 11: 34         | 180                                |
| 11 | 24. 10. 2002 | 12:58          | 200                                |
| 12 | 24. 10. 2002 | 14:30          | 160                                |
| 13 | 25. 10. 2002 | 8:13           | 120                                |
| 14 | 25. 10. 2002 | 10:45          | 160                                |
| 15 | 25. 10. 2002 | 13:30          | 180                                |
| 16 | 25. 10. 2002 | 15:10          | 140                                |
| 17 | 30. 10. 2002 | 7:55           | 240                                |
| 18 | 30. 10. 2002 | 11:12          | 280                                |
| 19 | 30. 10. 2002 | 13:33          | 180                                |
| 20 | 30. 10. 2002 | 15:01          | 120                                |
| 21 | 31. 10. 2002 | 8:00           | 200                                |
| 22 | 31. 10. 2002 | 11:02          | 80                                 |
| 23 | 31. 10. 2002 | 12:44          | 240                                |
| 24 | 31. 10. 2002 | 14:17          | 260                                |





*Tabelle 11-24: Probenahmen Versuch Oberpullendorf II, Fraktion >65 mm; Feldproben sind Einzelproben*

|    | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch<br/>[kg]</b> |
|----|--------------|----------------|------------------------------------|
| 1  | 16. 10. 2002 | 07:30          | 260                                |
| 2  | 16. 10. 2002 | 11:55          | 280                                |
| 3  | 16. 10. 2002 | 13:00          | 200                                |
| 4  | 16. 10. 2002 | 15:00          | 220                                |
| 5  | 17. 10. 2002 | 08:17          | 140                                |
| 6  | 17. 10. 2002 | 09:30          | 340                                |
| 7  | 17. 10. 2002 | 11:30          | 220                                |
| 8  | 19. 10. 2002 | 7:54           | 100                                |
| 9  | 19. 10. 2002 | 12:00          | 180                                |
| 10 | 19. 10. 2002 | 13:30          | 120                                |

*Tabelle 11-25: Probenahmen Versuch Oberpullendorf I und II, Fraktion <25 mm (Rotteinput). Feldproben sind Einzelproben*

|    | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch<br/>[kg]</b> |
|----|--------------|----------------|------------------------------------|
| 1  | 16. 10.2002  | 7:45           | 33,2                               |
| 2  | 16. 10.2002  | 8:15           | 33,9                               |
| 3  | 16. 10.2002  | 9:44           | 37,5                               |
| 4  | 16. 10.2002  | 11:21          | 35,8                               |
| 5  | 16. 10.2002  | 12:05          | 35,8                               |
| 6  | 16. 10.2002  | 14:05          | 41,2                               |
| 7  | 17. 10.2002  | 7:43           | 37,8                               |
| 8  | 17. 10.2002  | 11:13          | 39,2                               |
| 9  | 17. 10.2002  | 12:36          | 34,2                               |
| 10 | 17. 10.2002  | 13:46          | 36,2                               |
| 11 | 17. 10.2002  | 14:57          | 35,1                               |
| 12 | 18. 10. 2002 | 09:30          | 45,8                               |
| 13 | 18. 10. 2002 | 10:00          | 37,8                               |
| 14 | 18. 10. 2002 | 11:30          | 43,9                               |
| 15 | 18. 10. 2002 | 13:00          | 38,9                               |
| 16 | 18. 10. 2002 | 14:10          | 49,6                               |
| 17 | 19. 10. 2002 | 09:30          | 43,9                               |
| 18 | 19. 10. 2002 | 12:00          | 47,6                               |
| 19 | 19. 10. 2002 | 13:23          | 33,6                               |
| 20 | 23. 10. 2002 | 7:43           | 34,8                               |
| 21 | 23. 10. 2002 | 10:44          | 32,3                               |
| 22 | 23. 10. 2002 | 12:10          | 30,9                               |
| 23 | 23. 10. 2002 | 15:01          | 35,0                               |
| 24 | 24. 10. 2002 | 7:39           | 36,9                               |
| 25 | 24. 10. 2002 | 10:01          | 45,8                               |



Forsetzung Tabelle 11-27:

|    | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch<br/>[kg]</b> |
|----|--------------|----------------|------------------------------------|
| 26 | 24. 10. 2002 | 12:17          | 39,9                               |
| 27 | 24. 10. 2002 | 14:36          | 23,6                               |
| 28 | 25. 10. 2002 | 7:55           | 32,3                               |
| 29 | 25. 10. 2002 | 9:51           | 36,7                               |
| 30 | 25. 10. 2002 | 12:10          | 27,9                               |
| 31 | 25. 10. 2002 | 14:55          | 26,6                               |
| 32 | 30. 10. 2002 | 7:45           | 50,0                               |
| 33 | 30. 10. 2002 | 10:04          | 26,7                               |
| 34 | 30. 10. 2002 | 12:14          | 32,9                               |
| 35 | 30. 10. 2002 | 15:08          | 35,1                               |
| 36 | 31. 10. 2002 | 8:30           | 44,6                               |
| 37 | 31. 10. 2002 | 10:00          | 45,7                               |
| 38 | 31. 10. 2002 | 12:44          | 41,4                               |
| 39 | 31. 10. 2002 | 15:02          | 32,8                               |

Tabelle 11-26: Probenahmen Versuch Oberpullendorf I, Rotteoutput. Feldproben sind Einzelproben

|    | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch<br/>[kg]</b> |
|----|--------------|----------------|------------------------------------|
| 1  | 21. 12. 2002 | 09:00          | 38,4                               |
| 2  | 21. 12. 2002 | 10:00          | 42,2                               |
| 3  | 21. 12. 2002 | 10:30          | 37,8                               |
| 4  | 21. 12. 2002 | 11:03          | 35,9                               |
| 5  | 21. 12. 2002 | 11:29          | 40,1                               |
| 6  | 21. 12. 2002 | 12:05          | 41,8                               |
| 7  | 21. 12. 2002 | 12:23          | 38,7                               |
| 8  | 21. 12. 2002 | 12:55          | 40,8                               |
| 9  | 22. 12. 2002 | 7:23           | 38,3                               |
| 10 | 22. 12. 2002 | 8:21           | 30,4                               |
| 11 | 22. 12. 2002 | 8:55           | 39,3                               |
| 12 | 22. 12. 2002 | 9:32           | 33,3                               |
| 13 | 2. 1. 2003   | 08:15          | 41,3                               |
| 14 | 2. 1. 2003   | 08:45          | 41,0                               |
| 15 | 2. 1. 2003   | 09:15          | 45,4                               |
| 16 | 2. 1. 2003   | 09:40          | 39,0                               |
| 17 | 2. 1. 2003   | 09:55          | 44,6                               |
| 18 | 2. 1. 2003   | 10:15          | 38,2                               |
| 19 | 2. 1. 2003   | 10:35          | 44,3                               |
| 20 | 2. 1. 2003   | 11:00          | 41,2                               |
| 21 | 2. 1. 2003   | 11:23          | 40,0                               |
| 22 | 2. 1. 2003   | 11:40          | 38,8                               |
| 23 | 2. 1. 2003   | 12:00          | 38,5                               |
| 24 | 2. 1. 2003   | 12:25          | 38,6                               |



*Tabelle 11-27: Probenahmen Versuch Oberpullendorf II, Fraktion 25-65 mm Leicht (BasL). Feldproben sind Einzelproben*

|   | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch<br/>[kg]</b> |
|---|--------------|----------------|------------------------------------|
| 1 | 16. 10. 2002 | 8:10           | 16,9                               |
| 2 | 16. 10. 2002 | 14:20          | 22,1                               |
| 3 | 17. 10. 2002 | 8:15           | 23,3                               |
| 4 | 17. 10. 2002 | 11:30          | 24,8                               |
| 5 | 19. 10. 2002 | 9:15           | 22,9                               |
| 6 | 19. 10. 2002 | 10:45          | 25,1                               |

*Tabelle 11-28: Probenahmen Versuch Oberpullendorf II, Fraktion 25-65 mm Schwer (BasS); Feldproben sind Einzelproben*

|    | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch<br/>[kg]</b> |
|----|--------------|----------------|------------------------------------|
| 1  | 16. 10. 2002 | 9:45           | 34,9                               |
| 2  | 16. 10. 2002 | 10:00          | 35,1                               |
| 3  | 16. 10. 2002 | 11:02          | 36,1                               |
| 4  | 16. 10. 2002 | 11:51          | 36,1                               |
| 5  | 16. 10. 2002 | 12:05          | 21,5                               |
| 6  | 16. 10. 2002 | 13:43          | 33,7                               |
| 7  | 16. 10. 2002 | 14:24          | 26,0                               |
| 8  | 17. 10. 2002 | 7:45           | 36,8                               |
| 9  | 17. 10. 2002 | 8:51           | 36,0                               |
| 10 | 17. 10. 2002 | 10:21          | 34,7                               |
| 11 | 17. 10. 2002 | 11:55          | 25,9                               |
| 12 | 19. 10. 2002 | 7:56           | 38,0                               |
| 13 | 19. 10. 2002 | 10:30          | 40,3                               |
| 14 | 19. 10. 2002 | 12:00          | 36,6                               |



*Tabelle 11-29: Probenahmen Versuch Oberpullendorf I und II, Fe-Schrott I; Feldproben sind Einzelproben*

|    | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch<br/>[kg]</b> |
|----|--------------|----------------|------------------------------------|
| 1  | 16. 10. 2002 | 8:31           | 39,1                               |
| 2  | 16. 10. 2002 | 15:12          | 41,1                               |
| 3  | 17. 10. 2002 | 8:54           | 31,2                               |
| 4  | 17. 10. 2002 | 15: 24         | 24,8                               |
| 5  | 18. 10. 2002 | 8: 15          | 31,2                               |
| 6  | 18. 10. 2002 | 15:41          | 24,8                               |
| 7  | 19. 10. 2002 | 11:01          | 28,0                               |
| 8  | 23. 10. 2002 | 8:32           | 35,1                               |
| 9  | 23. 10. 2002 | 15:09          | 19,3                               |
| 10 | 24. 10. 2002 | 8:28           | 24,6                               |
| 11 | 24. 10. 2002 | 15:28          | 22,1                               |
| 12 | 25. 10. 2002 | 8:11           | 37,0                               |
| 13 | 25. 10. 2002 | 15:55          | 25,5                               |
| 14 | 30. 10. 2002 | 8:51           | 52,2                               |
| 15 | 30. 10. 2002 | 15:47          | 31,2                               |
| 16 | 31. 10. 2002 | 8:21           | 26,8                               |
| 17 | 31. 10. 2002 | 15: 11         | 35,8                               |

*Tabelle 11-30: Probenahmen Versuch Oberpullendorf I und II, Fe-Schrott II; Feldproben sind Einzelproben*

|    | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch<br/>[kg]</b> |
|----|--------------|----------------|------------------------------------|
| 1  | 16. 10. 2002 | 7:31           | 44,7                               |
| 2  | 16. 10. 2002 | 14:54          | 40,6                               |
| 3  | 17. 10. 2002 | 8:10           | 47,7                               |
| 4  | 17. 10. 2002 | 14:28          | 29,4                               |
| 5  | 18. 10. 2002 | 7:59           | 36,4                               |
| 6  | 18. 10. 2002 | 14:01          | 42,8                               |
| 7  | 19. 10. 2002 | 10:00          | 41,1                               |
| 8  | 23. 10. 2002 | 7:45           | 37,7                               |
| 9  | 23. 10. 2002 | 13:55          | 39,7                               |
| 10 | 24. 10. 2002 | 8:14           | 38,1                               |
| 11 | 24. 10. 2002 | 14:01          | 41,8                               |
| 12 | 25. 10. 2002 | 8:34           | 40,7                               |
| 13 | 25. 10. 2002 | 14:23          | 31,3                               |
| 14 | 30. 10. 2002 | 8:02           | 35,8                               |
| 15 | 30. 10. 2002 | 13:49          | 56,6                               |
| 16 | 31. 10. 2002 | 8:10           | 53,5                               |
| 17 | 31. 10. 2002 | 14:02          | 38,3                               |



*Tabelle 11-31: Probenahmen Versuch Oberpullendorf II, NFe-Schrott; Feldproben sind Einzelproben*

|   | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch [kg]</b> |
|---|--------------|----------------|--------------------------------|
| 1 | 16. 10. 2002 | 08:15          | 40,6                           |
| 2 | 16. 10. 2002 | 13:50          | 33,6                           |
| 3 | 16. 10. 2002 | 15:10          | 31,6                           |
| 4 | 17. 10. 2002 | 08:30          | 36,0                           |
| 5 | 17. 10. 2002 | 11:30          | 26,6                           |
| 6 | 19. 10. 2002 | 09:00          | 27,8                           |
| 7 | 19. 10. 2002 | 10:45          | 22,7                           |

*Tabelle 11-32: Probenahmen der Einzelproben. Versuch Kirchdorf, Fraktion >50 mm Leicht. Einzelproben zur Mischprobenbildung über die Zeit. Die ausgeklaubten Metalle und Steine wurden nicht pro Einzelprobe getrennt, sondern nur als Summe der Mischprobe gewogen.*

| <b>Mischprobe</b> | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch [kg]</b> |
|-------------------|--------------|----------------|--------------------------------|
| 1                 | 14. 4. 2003  | 9:30           | 44,5                           |
| 1                 | 15. 4. 2003  | 8:31           | 49,3                           |
| 1                 | 16. 4. 2003  | 7:45           | 49,7                           |
| 1                 | 17. 4. 2003  | 8:10           | 25,1                           |
| 1                 | 18. 4. 2003  | 7:16           | 25                             |
| 1                 | 18. 4. 2003  | 14:23          | 21,5                           |
| Metalle 1         |              |                | 4,6                            |
| Mineralisch 1     |              |                | 6,4                            |
|                   |              |                |                                |
| 2                 | 14. 4. 2003  | 10:43          | 16,8                           |
| 2                 | 15. 4. 2003  | 9:31           | 37,8                           |
| 2                 | 16. 4. 2003  | 8:34           | 39,5                           |
| 2                 | 17. 4. 2003  | 8:57           | 49,3                           |
| 2                 | 18. 4. 2003  | 8:35           | 22,0                           |
| Metalle 2         |              |                | 2,6                            |
| Mineralisch 2     |              |                | 4,8                            |
|                   |              |                |                                |
| 3                 | 14. 4. 2003  | 11:17          | 15,9                           |
| 3                 | 15. 4. 2003  | 11:34          | 51,2                           |
| 3                 | 16. 4. 2003  | 11:45          | 46,5                           |
| 3                 | 17. 4. 2003  | 10:57          | 61,0                           |
| 3                 | 18. 4. 2003  | 10:34          | 20,5                           |
| Metalle 3         |              |                | 5,6                            |
| Mineralisch 3     |              |                | 5,8                            |



Fortsetzung Tabelle 11-32:

| Mischprobe    | Datum       | Uhrzeit | Probenmasse<br>frisch<br>[kg] |
|---------------|-------------|---------|-------------------------------|
| 4             | 14. 4. 2003 | 13:43   | 17,8                          |
| 4             | 15. 4. 2003 | 13:27   | 41,0                          |
| 4             | 16. 4. 2003 | 13:23   | 40,4                          |
| 4             | 17. 4. 2003 | 13:17   | 50,6                          |
| 4             | 18. 4. 2003 | 13:01   | 24,9                          |
| Metalle 4     |             |         | 4,7                           |
| Mineralisch 4 |             |         | 4,5                           |
|               |             |         |                               |
| 5             | 14. 4. 2003 | 14:54   | 16,3                          |
| 5             | 15. 4. 2003 | 14:34   | 53,4                          |
| 5             | 16. 4. 2003 | 15:01   | 34,5                          |
| 5             | 17. 4. 2003 | 14:32   | 51,7                          |
| 5             | 18. 4. 2003 | 13:34   | 26,5                          |
| Metalle 5     |             |         | 5,8                           |
| Mineralisch 5 |             |         | 5,8                           |

Tabelle 11-33: Probenahmen Versuch Kirchdorf, Fraktion >50 mm Schwer. Einzelproben zur Mischprobenbildung über die Zeit. Die ausgeklaubten Metalle und Steine wurden nicht pro Einzelprobe getrennt, sondern nur als Summe der Mischprobe gewogen.

| Mischprobe    | Datum       | Uhrzeit | Probenmasse<br>frisch<br>[kg] |
|---------------|-------------|---------|-------------------------------|
| 1             | 14. 4. 2003 | 10:02   | 36,0                          |
| 1             | 15. 4. 2003 | 7:23    | 40,1                          |
| 1             | 16. 4. 2003 | 7:25    | 58,0                          |
| 1             | 16. 4. 2003 | 11:55   | 35,0                          |
| 1             | 17. 4. 2003 | 7:28    | 55,0                          |
| 1             | 17. 4. 2003 | 11:34   | 62,0                          |
| 1             | 18. 4. 2003 | 7:34    | 48,1                          |
| 1             | 18. 4. 2003 | 11:24   | 66,8                          |
| Metalle 1     |             |         | 49,7                          |
| Mineralisch 1 |             |         | 96,4                          |
|               |             |         |                               |
| 2             | 14. 4. 2003 | 11:05   | 42,1                          |
| 2             | 15. 4. 2003 | 8:43    | 35,3                          |
| 2             | 16. 4. 2003 | 8:55    | 46,9                          |
| 2             | 16. 4. 2003 | 13:11   | 53,5                          |
| 2             | 17. 4. 2003 | 8:51    | 51,6                          |
| 2             | 17. 4. 2003 | 13:26   | 75,7                          |
| 2             | 18. 4. 2003 | 9:01    | 40,2                          |
| 2             | 18. 4. 2003 | 11:55   | 38,2                          |
| Metalle 2     |             |         | 50,1                          |
| Mineralisch 2 |             |         | 84,8                          |



Fortsetzung Tabelle 11-33:

| Mischprobe    | Datum       | Uhrzeit | Probenmasse frisch [kg] |
|---------------|-------------|---------|-------------------------|
| 3             | 14. 4. 2003 | 11:45   | 37,2                    |
| 3             | 15. 4. 2003 | 9:45    | 55,4                    |
| 3             | 16. 4. 2003 | 9:56    | 43,2                    |
| 3             | 16. 4. 2003 | 14:20   | 44,5                    |
| 3             | 17. 4. 2003 | 9:42    | 67                      |
| 3             | 17. 4. 2003 | 14:14   | 107,3                   |
| 3             | 18. 4. 2003 | 9:32    | 103,5                   |
| 3             | 18. 4. 2003 | 13:17   | 51,5                    |
| Metalle 3     |             |         | 53,1                    |
| Mineralisch 3 |             |         | 94,5                    |
|               |             |         |                         |
| 4             | 14. 4. 2003 | 13:45   | 30,9                    |
| 4             | 15. 4. 2003 | 10:53   | 45,2                    |
| 4             | 16. 4. 2003 | 10:23   | 51,1                    |
| 4             | 16. 4. 2003 | 15:08   | 56,7                    |
| 4             | 17. 4. 2003 | 10:32   | 54,8                    |
| 4             | 17. 4. 2003 | 14:59   | 99,5                    |
| 4             | 18. 4. 2003 | 10:01   | 45,1                    |
| 4             | 18. 4. 2003 | 14:07   | 52,4                    |
| Metalle 4     |             |         | 50,5                    |
| Mineralisch 4 |             |         | 75,6                    |
|               |             |         |                         |
| 5             | 14. 4. 2003 | 15:01   | 51,8                    |
| 5             | 15. 4. 2003 | 13:25   | 42,3                    |
| 5             | 16. 4. 2003 | 11:14   | 41,4                    |
| 5             | 16. 4. 2003 | 15:52   | 49,6                    |
| 5             | 17. 4. 2003 | 11:01   | 83,0                    |
| 5             | 17. 4. 2003 | 15:41   | 85,9                    |
| 5             | 18. 4. 2003 | 10:46   | 47,3                    |
| 5             | 18. 4. 2003 | 15:02   | 62,6                    |
| Metalle 5     |             |         | 52,9                    |
| Mineralisch 5 |             |         | 76,9                    |



*Tabelle 11-34: Probenahmen Versuch Kirchdorf, Fraktion <50 mm; Einzelproben zur Mischprobenbildung über die Zeit*

| <b>Mischprobe</b> | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch [kg]</b> |
|-------------------|--------------|----------------|--------------------------------|
| 1                 | 14. 4. 2003  | 9:12           | 21,0                           |
| 1                 | 15. 4. 2003  | 7:13           | 36,2                           |
| 1                 | 16. 4. 2003  | 7:23           | 35,9                           |
| 1                 | 17. 4. 2003  | 7:31           | 35,0                           |
| 1                 | 18. 4. 2003  | 7:18           | 17,4                           |
|                   |              |                |                                |
| 2                 | 14. 4. 2003  | 10:45          | 18,6                           |
| 2                 | 15. 4. 2003  | 9:15           | 45,6                           |
| 2                 | 16. 4. 2003  | 9:09           | 33,2                           |
| 2                 | 17. 4. 2003  | 9:01           | 33,1                           |
| 2                 | 18. 4. 2003  | 8:56           | 14,5                           |
|                   |              |                |                                |
| 3                 | 14. 4. 2003  | 11:57          | 18,1                           |
| 3                 | 15. 4. 2003  | 11:43          | 35,6                           |
| 3                 | 16. 4. 2003  | 11:42          | 33,5                           |
| 3                 | 17. 4. 2003  | 11:34          | 35,8                           |
| 3                 | 18. 4. 2003  | 11:28          | 16,7                           |
|                   |              |                |                                |
| 4                 | 14. 4. 2003  | 13:54          | 19,7                           |
| 4                 | 15. 4. 2003  | 13:41          | 34,5                           |
| 4                 | 16. 4. 2003  | 14:02          | 32,4                           |
| 4                 | 17. 4. 2003  | 13:39          | 34,3                           |
| 4                 | 18. 4. 2003  | 13:45          | 16,2                           |
|                   |              |                |                                |
| 5                 | 14. 4. 2003  | 15:05          | 17,9                           |
| 5                 | 15. 4. 2003  | 14:59          | 37,3                           |
| 5                 | 16. 4. 2003  | 14:51          | 33,2                           |
| 5                 | 17. 4. 2003  | 14:45          | 32,3                           |
| 5                 | 18. 4. 2003  | 15:07          | 16,2                           |





*Tabelle 11-35: Probenahmen Versuch Kirchdorf, Fe-Schrott. Einzelproben zur Mischprobenbildung über die Zeit*

| <b>Mischprobe</b> | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch [kg]</b> |
|-------------------|--------------|----------------|--------------------------------|
| 1                 | 14. 4. 2003  | 11:45          | 98,4                           |
| 1                 | 15. 4. 2003  | 10:51          | 65,1                           |
| 1                 | 16. 4. 2003  | 12:57          | 78,1                           |
| 1                 | 17. 4. 2003  | 13:17          | 88,7                           |
| 1                 | 18. 4. 2003  | 11:23          | 75,4                           |
|                   |              |                |                                |
| 2                 | 14. 4. 2003  | 15:18          | 75,9                           |
| 2                 | 15. 4. 2003  | 15:34          | 101,7                          |
| 2                 | 16. 4. 2003  | 15:54          | 77,9                           |
| 2                 | 17. 4. 2003  | 15:27          | 105,7                          |
| 2                 | 18. 4. 2003  | 15:39          | 72,9                           |

*Tabelle 11-36: Probenahmen Versuch Wien, Fraktion >250 mm. Einzelproben zur Mischprobenbildung über die Zeit. Die ausgeklauten Metalle und Steine wurden nicht pro Einzelprobe getrennt, sondern nur als Summe der Mischprobe gewogen.*

| <b>Mischprobe</b>       | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch [kg]</b> |
|-------------------------|--------------|----------------|--------------------------------|
| 1                       | 23. 6. 2003  | 7:27           | 71,2                           |
| 1                       | 24. 6. 2003  | 8:00           | 112,3                          |
| 1                       | 25. 6. 2003  | 7:47           | 99,3                           |
| 1                       | 26. 6. 2003  | 7:38           | 107,1                          |
| Metalle + Mineralisch 1 |              |                | 23,9                           |
|                         |              |                |                                |
| 2                       | 23. 6. 2003  | 11:17          | 122,5                          |
| 2                       | 24. 6. 2003  | 12:57          | 152,9                          |
| 2                       | 25. 6. 2003  | 10:09          | 201,4                          |
| 2                       | 26. 6. 2003  | 10:45          | 103,0                          |
| Metalle + Mineralisch 2 |              |                | 17,9                           |
|                         |              |                |                                |
| 3                       | 23. 6. 2003  | 14:57          | 157,2                          |
| 3                       | 24. 6. 2003  | 14:25          | 155,5                          |
| 3                       | 25. 6. 2003  | 13:31          | 134,3                          |
| 3                       | 26. 6. 2003  | 11:17          | 129,4                          |
| Metalle + Mineralisch 3 |              |                | 20,1                           |



*Tabelle 11-37: Probenahmen Versuch Wien, Fraktion 50-250 mm. Einzelproben zur Mischprobenbildung über die Zeit. Die ausgeklaubten Metalle und Steine wurden nicht pro Einzelprobe getrennt, sondern nur als Summe der Mischprobe gewogen.*

| <b>Mischprobe</b>       | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse<br/>frisch<br/>[kg]</b> |
|-------------------------|--------------|----------------|--|
| 1                       | 23. 6. 2003  | 7:12           | 187,3                                  |
| 1                       | 24. 6. 2003  | 8:20           | 213,4                                  |
| 1                       | 25. 6. 2003  | 7:02           | 265,9                                  |
| 1                       | 26. 6. 2003  | 7:34           | 299,2                                  |
| Metalle + Mineralisch 1 |              |                | 16,8                                   |
|                         |              |                |  |
| 2                       | 23. 6. 2003  | 8:17           | 202,1                                  |
| 2                       | 24. 6. 2003  | 8:57           | 154,9                                  |
| 2                       | 25. 6. 2003  | 8:07           | 199,7                                  |
| 2                       | 26. 6. 2003  | 7:54           | 205,1                                  |
| Metalle + Mineralisch 2 |              |                | 15,2                                   |
|                         |              |                |  |
| 3                       | 23. 6. 2003  | 10:27          | 145,5                                  |
| 3                       | 24. 6. 2003  | 9:25           | 123,1                                  |
| 3                       | 25. 6. 2003  | 11:34          | 112,5                                  |
| 3                       | 26. 6. 2003  | 10:25          | 75,5                                   |
| Metalle + Mineralisch 3 |              |                | 8,5                                    |
|                         |              |                |  |
| 4                       | 23. 6. 2003  | 13:46          | 182,7                                  |
| 4                       | 24. 6. 2003  | 13:36          | 182,4                                  |
| 4                       | 25. 6. 2003  | 13:17          | 217,5                                  |
| 4                       | 26. 6. 2003  | 13:01          | 169,7                                  |
| Metalle + Mineralisch 4 |              |                | 16,1                                   |
|                         |              |                |  |
| 5                       | 23. 6. 2003  | 14:14          | 145,2                                  |
| 5                       | 24. 6. 2003  | 14:45          | 222,8                                  |
| 5                       | 25. 6. 2003  | 15:24          | 178,2                                  |
| 5                       | 26. 6. 2003  | 13:21          | 78,7                                   |
| Metalle + Mineralisch 5 |              |                | 14,3                                   |
|                         |              |                |  |
| 6 (Ballen)              | 27. 6. 2004  | 7:30           | 931,0                                  |
| Metalle + Mineralisch 6 |              |                | 14,2                                   |
|                         |              |                |  |
| 7 (Ballen)              | 27. 6. 2004  | 9:34           | 858,1                                  |
| Metalle + Mineralisch 7 |              |                | 12,2                                   |
|                         |              |                |  |
| 8 (Ballen)              | 27. 6. 2004  | 10: 45         | 825,8                                  |
| Metalle + Mineralisch 8 |              |                | 11,6                                   |
|                         |              |                |  |
| 9 (Ballen)              | 27. 6. 2004  | 12:35          | 879,1                                  |
| Metalle + Mineralisch 9 |              |                | 17,2                                   |



Fortsetzung Tabelle 11-37:

| Mischprobe              | Datum       | Uhrzeit | Probenmasse frisch [kg] |
|-------------------------|-------------|---------|-------------------------|
| 10 (Ballen)             | 27. 6. 2004 | 14:56   | 949,7                   |
| Metalle+ Mineralisch 10 |             |         | 17,6                    |

Tabelle 11-38: Probenahmen Versuch Wien, Fraktion <50 mm. Einzelproben zur Mischprobenbildung über die Zeit

| Mischprobe | Datum       | Uhrzeit | Probenmasse frisch [kg] |
|------------|-------------|---------|-------------------------|
| 1          | 23. 6. 2003 | 7:44    | 33,8                    |
| 1          | 24. 6. 2003 | 7:12    | 34,9                    |
| 1          | 24. 6. 2003 | 11:53   | 9,0                     |
| 1          | 25. 6. 2003 | 7:14    | 65,0                    |
| 1          | 26. 6. 2003 | 7:23    | 40,4                    |
| 1          | 27. 6. 2003 | 7:08    | 49,0                    |
|            |             |         |                         |
| 2          | 23. 6. 2003 | 9:15    | 32,6                    |
| 2          | 24. 6. 2003 | 8:10    | 20,6                    |
| 2          | 24. 6. 2003 | 13:45   | 30,4                    |
| 2          | 25. 6. 2003 | 8:33    | 49,8                    |
| 2          | 26. 6. 2003 | 9:06    | 43,9                    |
| 2          | 27. 6. 2003 | 8:41    | 43,5                    |
|            |             |         |                         |
| 3          | 23. 6. 2003 | 10:37   | 35,9                    |
| 3          | 24. 6. 2003 | 9:02    | 23,3                    |
| 3          | 24. 6. 2003 | 14:25   | 26,6                    |
| 3          | 25. 6. 2003 | 10:55   | 39,9                    |
| 3          | 26. 6. 2003 | 11:34   | 40,7                    |
| 3          | 27. 6. 2003 | 10:53   | 53,9                    |
|            |             |         |                         |
| 4          | 23. 6. 2003 | 13:03   | 23,6                    |
| 4          | 24. 6. 2003 | 10:02   | 34,5                    |
| 4          | 24. 6. 2003 | 14:57   | 36,4                    |
| 4          | 25. 6. 2003 | 13:47   | 39,6                    |
| 4          | 26. 6. 2003 | 14:17   | 55,7                    |
| 4          | 27. 6. 2003 | 11:45   | 65,8                    |
|            |             |         |                         |
| 5          | 23. 6. 2003 | 14:47   | 27,6                    |
| 5          | 24. 6. 2003 | 11:21   | 21,4                    |
| 5          | 24. 6. 2003 | 15:11   | 33,2                    |
| 5          | 25. 6. 2003 | 15:17   | 58,3                    |
| 5          | 26. 6. 2003 | 15:00   | 73,9                    |
| 5          | 27. 6. 2003 | 11:58   | 54,5                    |



*Tabelle 11-39: Probenahmen Versuch Wien, Fe-Schrott. Einzelproben zur Mischprobenbildung über die Zeit*

| <b>Mischprobe</b> | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch [kg]</b> |
|-------------------|--------------|----------------|--------------------------------|
| 1                 | 23. 6. 2003  | 10:23          | 98,9                           |
| 1                 | 24. 6. 2003  | 10:02          | 76,3                           |
| 1                 | 25. 6. 2003  | 11:45          | 63,1                           |
| 1                 | 26. 6. 2003  | 10:43          | 102,1                          |
| 1                 | 27. 6. 2003  | 8:28           | 70,0                           |
|                   |              |                |                                |
| 2                 | 23. 6. 2003  | 14:02          | 117,7                          |
| 2                 | 24. 6. 2003  | 14:32          | 85,1                           |
| 2                 | 25. 6. 2003  | 14:57          | 98,4                           |
| 2                 | 26. 6. 2003  | 14:17          | 111,2                          |
| 2                 | 27. 6. 2003  | 11:45          | 130,9                          |

*Tabelle 11-40: Probenahmen Versuch Wien, NFe-Schrott. Einzelproben zur Mischprobenbildung über die Zeit*

| <b>Mischprobe</b> | <b>Datum</b> | <b>Uhrzeit</b> | <b>Probenmasse frisch [kg]</b> |
|-------------------|--------------|----------------|--------------------------------|
| 1                 | 23. 6. 2003  | 10:33          | 50,8                           |
| 1                 | 24. 6. 2003  | 10:10          | 71,2                           |
| 1                 | 25. 6. 2003  | 11:50          | 42,1                           |
| 1                 | 26. 6. 2003  | 10:48          | 64,9                           |
| 1                 | 27. 6. 2003  | 8:35           | 47,4                           |
|                   |              |                |                                |
| 2                 | 23. 6. 2003  | 14:10          | 73,1                           |
| 2                 | 24. 6. 2003  | 14:27          | 69,4                           |
| 2                 | 25. 6. 2003  | 14:43          | 39,9                           |
| 2                 | 26. 6. 2003  | 14:56          | 40,1                           |
| 2                 | 27. 6. 2003  | 11:02          | 44,3                           |