



**SCHRIFTENREIHE  
UMWELT NR. 374**

**Umweltgefährdende Stoffe  
Abfall**



**Metallische und  
nichtmetallische  
Stoffe im  
Elektroniksrott**

**Stoffflussanalyse**



**Bundesamt für  
Umwelt, Wald und  
Landschaft  
BUWAL**



**SCHRIFTENREIHE  
UMWELT NR. 374**

**Umweltgefährdende Stoffe  
Abfall**

**Metallische und  
nichtmetallische  
Stoffe im  
Elektronikschnitt  
Stoffflussanalyse**

Avec résumé en français  
Con riassunto in italiano  
With summary in English

**Herausgegeben vom Bundesamt  
für Umwelt, Wald und Landschaft  
BUWAL  
Bern, 2004**

## **Herausgeber**

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)

*Das BUWAL ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK)*

## **Autoren**

Leo Morf, Ruedi Taverna, GEO Partner AG (GEO), Zürich

## **Projektorganisation**

### **Auftraggeber, Projektträger**

BUWAL und Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft

### **Konzept**

Leo Morf                                 GEO Partner AG, Zürich

Josef Tremp                             Amt für Umweltschutz und Energie BL, Liestal

### **Auftragnehmer, Projektleitung**

GEO Partner AG, Zürich, Leo Morf

### **Planung und Durchführung des Referenzversuches auf der Entsorgungsanlage**

Leo Morf                                 GEO Partner AG, Zürich

Markus Stengele                       IMMARK AG, Regensdorf

### **Fachliche Projektbegleitung**

Andreas Weber                         BUWAL, Sektion umweltgefährdende Stoffe

Mathias Tellenbach                    BUWAL, Sektion Industrie- und Gewerbeabfälle

Yvonne Vögeli                         BUWAL, Sektion Industrie- und Gewerbeabfälle

Josef Tremp                             Amt für Umweltschutz und Energie BL, Liestal

Rolf Gloor                               Institut Bachema AG, Schlieren

Felix Schuppisser                       Institut Bachema AG, Schlieren

Johannes Gauglhofer                   EMPA, St. Gallen; im Auftrag des SWICO

Erhard Hug                              Roos und Partner AG; im Auftrag der S.EN.S

### **Probenaufarbeitung und chemisch-analytische Untersuchungen**

Institut Bachema AG, Schlieren

Hans-Joachim Günther GmbH, Dortmund

### **Externe analytische Qualitätssicherung**

AUE BL, Labor für Umweltanalytik, Liestal

EMPA, Abt. Organische Chemie, Dübendorf

Institut für terrestrische Ökologie der ETHZ, Schlieren

## **Fotos Titelblatt**

Elektrische und elektronische Kleingeräte im Betrieb der Drisa AG/IMMARK AG, Regensdorf

## **Bezug PDF**

<http://www.buwalshop.ch>

(eine gedruckte Fassung ist nicht erhältlich)

Code: SRU-374-D

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>5</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>6</b>
<b>Vorwort</b> .....	<b>7</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>8</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>15</b>
<b>Riassunto</b> .....	<b>22</b>
<b>Summary</b> .....	<b>29</b>
<b>1 Einleitung, Projektmotivation</b> .....	<b>36</b>
<b>2 Zielsetzung und Fragestellungen</b> .....	<b>40</b>
<b>3 Grundlagen</b> .....	<b>41</b>
3.1 Daten zu Elektro- und Elektronikschrott in der Schweiz- ein Überblick .....	41
3.2 Der untersuchte Verarbeitungsbetrieb .....	42
<b>4 Methodisches Vorgehen</b> .....	<b>46</b>
4.1 Einleitung, Projektablauf .....	46
4.2 Angewandte Methodik.....	46
4.3 Versuchsplanung und -durchführung .....	47
4.4 Laboruntersuchungen .....	53
4.5 Auswertung, Mathematisches Modell .....	55
<b>5 Resultate und Diskussion</b> .....	<b>56</b>
5.1 Materialflüsse/ Güterbilanz.....	56
5.2 Stoffliche Zusammensetzung der Produkte des Entsorgungsprozesses.....	59
5.3 Verteilung der Stoffe vom Input in die Outputprodukte des Entsorgungs- prozesses (Transferkoeffizienten).....	65
5.4 Stoffliche Zusammensetzung von Schweizer Elektro- und Elektronik- Kleingeräte-Schrott im Jahr 2003.....	72
5.5 Vorschlag für ein zukünftiges Monitoringkonzept.....	78

<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>81</b>
6.1	Schlussfolgerungen methodischer Art .....	81
6.2	Schlussfolgerungen inhaltlicher Art .....	82
6.3	Datenlücken, Handlungs- und Forschungsbedarf .....	86
<b>7</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>88</b>
<b>8</b>	<b>Glossar.....</b>	<b>90</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>92</b>
9.1	Anhang 1 – Versuchsdaten .....	92
9.2	Anhang 2 – Qualitätssicherung.....	93
9.3	Anhang 3 – Methodisches Vorgehen.....	110
9.4	Anhang 4 – Detailresultate .....	122
9.5	Anhang 5 - Resultate und Diskussion der Ausgleichrechnung .....	131
9.6	Anhang 6 - BFS Literaturdaten .....	134

## Abkürzungen

### Allgemein

APME	Associations of plastic manufacturers in Europe
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
S.EN.S.	Stiftung Entsorgung Schweiz
rel.	relativ
approx.	approximativ
SFA	Stoffflussanalyse
SWICO	Schweizerischer Wirtschaftsverband der Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik
VREG	Verordnung vom 14. Januar 1998 über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (SR 814.620)

### Flammschutzmittel

FS	Flammschutzmittel (Stoffe mit flammhemmender Wirkung)
BFS	bromierte Flammschutzmittel
DecaBDE <sup>1</sup>	Decabromdiphenylether
OctaBDE <sup>1</sup>	Octabromdiphenylether
PentaBDE <sup>1</sup>	Pentabromdiphenylether
PBDE	Polybromierte Diphenylether: Gruppenbezeichnung für DecaBDE, OctaBDE und PentaBDE
TBBPA	Tetrabrombisphenol A
HBCD	Hexabromcyclododecan
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PBB	Polybromierte Biphenyle

### Güter, Geräte und Geräteteile

EE-Geräte	Elektro- und Elektronikgeräte
EE-Schrott	Abfälle von Elektro- und Elektronikgeräten
EEKG	Elektro- und Elektronik-Kleingeräte
EEKG-Schrott	Abfälle von Elektro- und Elektronik-Kleingeräten
EGG	Elektronikgrossgeräte
GKG	Gewerbekühlgeräte
HHGG	Haushaltgrossgeräte
KG	Kleingeräte

---

<sup>1</sup> Als alternative Abkürzungen erscheinen in der Literatur auch DBDE, OBDE und PBDE, welche jedoch aus Gründen der Verständlichkeit hier nicht verwendet wurden. Andere Bezeichnungen: DBDO, OBDO und PBDO. Das O steht hier für Oxid statt Ether. DecaBDE wird auch als Bis(pentabromphenyl)ether bezeichnet.

## Abstract

The annual quantity of electrical and electronic equipment requiring disposal has been growing for many years, so that electrical and electronics scrap (EE scrap) now occupies an increasingly prominent position in waste management. In addition to recyclable materials, EE scrap contains substances harmful to health and the environment. Special disposal installations are employed to separate the pollutants from the reusable materials. Substance flows were investigated in one such Swiss disposal installation for metals, Cl, Br, P, PCB and brominated flame retardants using the method of material flow analysis. Based on the results, a progress assessment could be prepared for the first time on the control of substance flows in a state-of-the-art disposal installation, providing the essential basis for early recognition of the potential for resource conservation and the assessment of pollutant risks.

*Keywords: electronics scrap, substance flow analysis, heavy metals, PCB, brominated flame retardants, composition of chemical waste*

La quantité d'appareils électriques et électroniques à éliminer est en augmentation depuis plusieurs années. Les déchets électriques et électroniques (déchets EE) revêtent une importance croissante dans la gestion des déchets, car ils contiennent, en sus de matériaux recyclables, des substances dangereuses pour la santé et pour l'environnement. C'est pourquoi ils sont traités dans des installations d'élimination particulières, afin de séparer le mieux possible les matériaux recyclables et les polluants. Les flux de métaux, Cl, Br, P, PCB et produits ignifuges bromés ont été étudiés en pratiquant une analyse des flux de substances dans une installation d'élimination des déchets EE représentative au plan suisse. Ses résultats permettent d'établir pour la première fois un bilan de la gestion des flux de substances dans une installation d'élimination des déchets EE utilisant les techniques les plus récentes. Ils fournissent également des informations précieuses pour déceler précocement les possibilités de préserver les ressources et pour apprécier le risque émanant des polluants.

*Mots-clés : déchets électroniques, analyse des flux de substances, métaux lourds, PCB, produits ignifuges bromés, composition chimique des déchets*

Die Menge der zu entsorgenden Elektro- und Elektronikgeräte wächst seit Jahren. Elektronikschrott erlangt eine zunehmende Bedeutung in der Abfallwirtschaft; er enthält neben rezyklierbaren Wertstoffen auch gesundheits- und umweltgefährdende Stoffe. Um Wertstoffe und Schadstoffe bestmöglich zu trennen, wird er deshalb in speziellen Entsorgungsanlagen behandelt. Mittels einer Stoffflussanalyse wurden in einer für die Schweiz repräsentativen Entsorgungsanlage für Elektronikschrott Stoffflüsse von Metallen, Cl, Br, P sowie von PCB und bromierten Flammenschutzmitteln untersucht. Die Resultate ermöglichen erstmals eine Erfolgsbilanz über die Lenkung von Stoffflüssen in einer nach dem Stand der Technik betriebenen Entsorgungsanlage für Elektronikschrott und liefern wertvolle Grundlagen für die Früherkennung von Potenzialen für die Ressourcenschonung und die Beurteilung von Schadstoffrisiken.

*Stichwörter: Elektronikschrott, Stoffflussanalyse, Schwermetalle, PCB, bromierte Flammenschutzmittel, chemische Abfallzusammensetzung*

Da anni la quantità di apparecchi elettrici ed elettronici da smaltire è in aumento. I rottami elettrici ed elettronici assumono una crescente importanza nella gestione dei rifiuti. Oltre a materiali riciclabili, tali rifiuti contengono anche sostanze pericolose per la salute e per l'ambiente. Per separare nel migliore dei modi i materiali riciclabili dalle sostanze nocive, i rottami vengono trattati in speciali impianti di smaltimento. In Svizzera l'analisi dei flussi di sostanze ha permesso di esaminare, in un impianto di smaltimento di rottami elettrici ed elettronici rappresentativo, i flussi di metalli, Cl, Br, P nonché di PCB e di sostanze ignifughe bromate. I risultati permettono per la prima volta di fare un bilancio del governo dei flussi di sostanze in un tale impianto gestito in base allo stato attuale della tecnica. Inoltre forniscono informazioni importanti per determinare l'individuazione tempestiva delle potenzialità di impiego parsimonioso delle risorse e per stabilire una valutazione dei rischi inerenti alle sostanze nocive.

*Parole chiave: rottami elettronici, analisi dei flussi di sostanze, metalli pesanti, PCB, sostanze ignifughe bromate, composizione chimica dei rifiuti*



## Vorwort

Abfälle von elektrischen und elektronischen Geräten werden in der Schweiz seit Jahren erfolgreich separat gesammelt und verwertet. So wurden im Jahr 2003 rund 71'000 Tonnen oder 9,5 kg pro Kopf der Bevölkerung beim Handel oder an den Sammelstellen von SENS und SWICO zurückgegeben. Dieses Ergebnis ist beachtlich, auch im Vergleich zu den rund 120'000 Tonnen neuen Geräten, die in der Schweiz jährlich verkauft werden.

Dank der Separatsammlung können erhebliche Mengen an verwertbaren Metallen und Glas zurückgewonnen werden. Die Sortierung und sachgerechte Aufarbeitung in modernen Recyclinganlagen ermöglichen es auch, die in den Altgeräten enthaltenen Schadstoffe wie Blei, Cadmium, Quecksilber sowie halogenierte organische Verbindungen wie PCB oder bromhaltige Flammschutzmittel auszuschleusen und einer umweltverträglichen Entsorgung zuzuführen.

In der vorliegenden Studie wurden insgesamt 230 Tonnen vermischte Elektro- und Elektronikkleingeräte mittels einer Stoffflussanalyse auf ihre Zusammensetzung untersucht. Es wurde auch abgeklärt, wie sich ausgewählte metallische und nichtmetallische Stoffe auf die verschiedenen Output-Fractionen einer modernen Recyclinganlage verteilen. Die Ergebnisse liefern wertvolle Hinweise für die Beurteilung der Wirksamkeit der Separatsammlung und der Recyclingverfahren. Interessant ist zum Beispiel die Tatsache, dass in den separat gesammelten Geräten praktisch gleich viel Kupfer enthalten ist wie in der rund 40-mal grösseren Menge von Siedlungsabfällen. Dank der Studie liegen jetzt auch neuere Daten über den Einsatz von bromierten Flammschutzmitteln in Geräten vor.

Allen Beteiligten, die zum Gelingen dieser Studie beigetragen haben, sei an dieser Stelle herzlich gedankt. Der Dank geht insbesondere an die Immark AG, die uns Einblick in ihren Prozess gewährte und grosse Eigenleistung in die Probenvorbereitung und –aufarbeitung steckte.

Hans-Peter Fahrni  
Chef der Abteilung Abfall

Georg Karlaganis  
Chef der Abteilung Stoffe,  
Boden, Biotechnologie

# Zusammenfassung

## Motivation / Ziele

Produktion und Verwendung von Elektro- und Elektronikgeräten sind in den vergangenen Jahrzehnten sowohl weltweit als auch in der Schweiz kontinuierlich gewachsen. Elektro- und Elektronikgeräte (EE-Geräte) erlangen aus quantitativer und qualitativer Sicht sowohl als Konsumgüter, aber auch in der Abfallwirtschaft eine immer grössere Bedeutung. So stieg in den letzten 25 Jahren in der Schweiz die Menge an importierten EE-Geräten um 800%. EE-Schrott enthält einerseits bedeutende Mengen von Wertstoffen wie Metalle, die als Sekundärrohstoffe zurück gewonnen und wieder verwendet werden. Andererseits enthält EE-Schrott auch relevante Konzentrationen von gesundheits- und umweltgefährdenden Stoffen wie Antimon, Blei, Cadmium, Quecksilber, PCB und bromierte organische Verbindungen, die bei nicht sachgemässer Entsorgung frei gesetzt werden können und ein Risiko für Mensch und Umwelt darstellen.

Vor mehr als zehn Jahren wurde in der Schweiz begonnen, Separatsammelsysteme für ausgediente EE-Geräte aufzubauen. 1990 wurde die Stiftung Entsorgung Schweiz S.EN.S. zur Entsorgung von Kühlgeräten sowie von Elektro- und Elektronikschrott (EE-Schrott) gegründet. Wenig später hat der Schweizerische Wirtschaftsverband der Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik (SWICO) ein Recycling- und Entsorgungskonzept für Büroelektronik und Informatikgeräte eingeführt. Basierend auf dem Umweltschutzgesetz wurde 1998 die Verordnung über die Rückgabe, Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) in Kraft gesetzt. Die Entsorgungsaktivitäten werden durch unabhängige Kontrollbeauftragte der S.EN.S und SWICO<sup>1</sup> überwacht. Dabei werden in Audits auch betriebliche Materialflüsse überprüft, d. h. Massenflüsse von bestimmten Fraktionen bzw. Materialien (Güter wie z.B. Kabel, Kunststoffe etc.). Dies sind erste wertvolle Ansätze einer Erfolgskontrolle auf Güterflussebene.

Bis heute existiert in der Schweiz noch keine systematische Untersuchung von Stoffflüssen (chemische Elemente und Verbindungen) in der Entsorgung von EE-Geräten. Die stoffliche Zusammensetzung von EE-Schrott kann sich jedoch aufgrund gesetzlicher Vorschriften, wegen technischer, ökonomischer und gesellschaftlicher Entwicklungen stark ändern. Die chemische Analyse von Stoffen in EE-Schrott stellt daher neben der Erfolgskontrolle auf Güterflussebene ein nützliches Instrument dar, um Wirkung und Erfolg getroffener Massnahmen zu bewerten und Veränderungen der Zusammensetzung festzustellen.

Im vorliegenden Projekt wurden erstmals in der Schweiz Stoffflüsse ausgewählter Elemente (Cd, Cu, Hg, Br etc.) und organischer Verbindungen (bromierte Flammschutzmittel und PCB) in der Verarbeitung von Elektro- und Elektronikkleingeräteschrott (EEKG-Schrott) in einem modernen Entsorgungsbetrieb untersucht. Basierend auf Konzentrationsmessungen der untersuchten Stoffe in den Outputprodukten der Anlage und den erfassten Materialflüssen wurde die Verteilung der Stoffe (Transferkoeffizienten) aus dem Inputmaterial in die Outputprodukte ermittelt. Aufgrund der Ergebnisse der Stoffflussuntersuchung konnten Vorschläge für ein zukünftiges Stoffflussmonitoring in EE-Schrott Verarbeitungsbetrieben abgeleitet werden.

---

<sup>1</sup> Unabhängige Kontrollbeauftragte der S.EN.S und SWICO: Carbotech AG, Basel, Ecoservices (Yverdon) Sàrl, Yverdon-les-Bains, EMPA, St. Gallen und Roos+Partner AG, Luzern

## Vorgehen

Ein vor Versuchsbeginn ausgearbeitetes Untersuchungskonzept mit Probenahmeplan, Probenaufbereitungs- und Analysenkonzept diente als Grundlage für die erfolgreiche Durchführung und Auswertung des Grossversuchs im Entsorgungsbetrieb. Für den Versuch wurde ein Input-Mix aus Elektro- und Elektronikkleingeräte (EEKG-Schrott) vorbereitet, welcher möglichst gut der aktuellen mittleren Zusammensetzung der wichtigsten Gerätekategorien im schweizer EEKG-Schrott entsprach. Grossgeräte wurden dabei bewusst nicht berücksichtigt. Der Versuch im August 2003 dauerte drei Tage. Dabei wurden 230 t des vorbereiteten gut durchmischten EEKG-Schrotts verarbeitet. Die im Versuch umgesetzten Input- und Output-Massenflüsse wurden alle gewogen. In den relevanten Outputflüssen wurden gemäss dem Probenahmeplan Proben gezogen, aufbereitet und die ausgewählten Stoffe analysiert. Durch Multiplikation der in den Outputgütern ermittelten Stoffkonzentrationen mit den Massenflüssen wurden die Stoffflüsse berechnet. Aus der Summe aller Outputflüsse dividiert durch die gesamte EEKG-Schrott Masse wurde die stoffliche Zusammensetzung des gesamten EEKG-Schrotts bestimmt. Die Stoffverteilung vom Input in die Outputprodukte (Transferkoeffizienten) konnte dann ebenfalls berechnet werden. In der Auswertung wurde die Unsicherheit immer berücksichtigt.

## Behandlungsverfahren

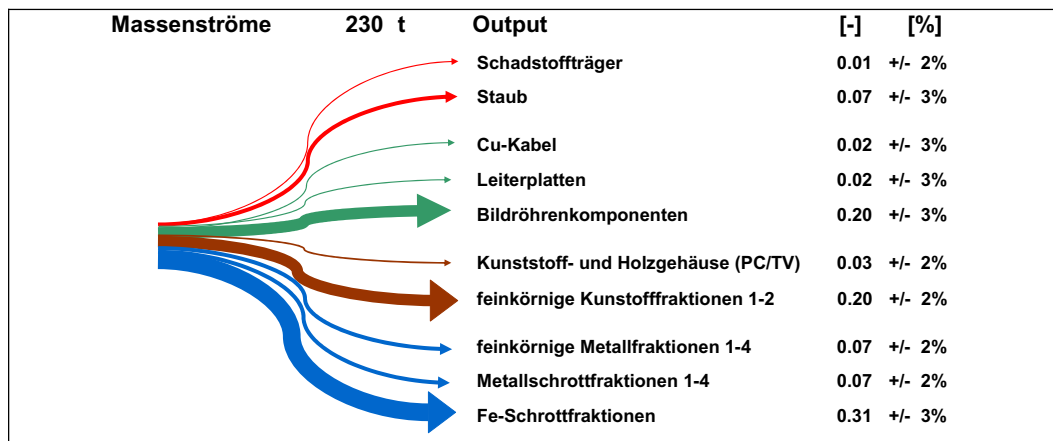
Für die vorliegende betriebliche Stoffflussanalyse wurde ein grosser Entsorgungsbetrieb ausgewählt, der ungefähr einen Viertel des in der Schweiz zur Entsorgung anfallenden EE-Schrotts auf einer modernen Anlage, die im Jahr 2002 neu in Betrieb genommen wurde, verarbeitet. Die Anlage entspricht dem heutigen Stand der Technik. In dieser Anlage wird der EE-Schrott mit einer Kombination von händischen und maschinellen Verfahrensschritten zerlegt, zerkleinert und schliesslich in diverse Massenströme unterschiedlicher Outputprodukte aufgetrennt. Als Outputprodukte verlassen das Behandlungsverfahren namentlich Eisenschrott, diverse Fraktionen von Nichteisen-Metallen, Gehäuseteile von PC- und TV-Geräten aus Kunststoffen und Holzwerkstoffen, Granulate aus gemischten Kunststoffen, Bildröhren, Leiterplatten, Kupferkabel, schadstoffhaltige Teile wie Batterien und Kondensatoren und Staubfraktionen. Die maschinellen Behandlungsschritte umfassen eine Zertrümmerung der Geräte in einem Schlagwerk und anschliessendes Auftrennen der Material- und Geräteteile aufgrund der Dichte, Korngrösse und der magnetischen Eigenschaften sowie mehrfache Zerkleinerung durch Mahlen.

## Resultate und Schlussfolgerungen

### Fraktionszusammensetzung des EEKG-Schrott Inputs

Die im Versuch über die Outputprodukte bestimmten Anteile des EEKG-Schrott Inputs (vgl. Abbildung 1) von 45% Metall, 23% Kunststoff, 20% Bildschirmröhrenkomponenten (Glas + Metall), 7% Staub (grösstenteils bestehend aus Metallen und Kunststoffen), je 2% Leiterplatten und Cu-Kabeln sowie 0.6% Batterien und Kondensatoren stimmen gut mit der für die Schweiz im Jahre 2002 ermittelten Zusammensetzung des EE-Schrotts überein. Die stoffliche Zusammensetzung des Input-Mix repräsentiert damit näherungsweise gut diejenige des schweizer Elektro- und Elektronik-Kleingeräte-Schrotts im Jahre 2003.

Abbildung 1: Outputprodukte des EEKG-Schrott



### Stoffliche Zusammensetzung des EEKG-Schrott Inputs

Die folgende Tabelle 1 zeigt die mittlere stoffliche Zusammensetzung der in der Schweiz zur Entsorgung anfallenden Elektro- und Elektronikkleingeräte (EEKG-Schrott), wie sie im August 2003 im Entsorgungsbetrieb der DRISA AG/IMMARK AG in Regensdorf ermittelt wurde. Dabei wird die Unsicherheit mit dem approximativen 95%-Vertrauensbereich (95%-Konfidenzintervall) charakterisiert.

Tabelle 1: Mittlere stoffliche Zusammensetzung von Elektro- und Elektronikkleingeräteschrott in der Schweiz, 2003; inkl. der Angabe der Breite eines approximativen 95%-Konfidenzintervalls

Element / Stoff	Mittelwert in [mg/kg]	Unsicherheit	Element / Stoff	Mittelwert in [mg/kg]	Unsicherheit
Al	49'000 ±	4'000	Sn	2'400 ±	100
Sb	1'700 ±	200	Cl	9'600 ±	1'400
Pb	2'900 ±	500	Br	5'500 ±	300
Cd	180 ±	50	P	360 ±	220
Cr	9'900 ±	1'700	PentaBDE	34 ±	4
Fe	360'000 ±	10'000	TBBPA	1'400 ±	100
Cu	41'000 ±	3'000	HBCD	17 ±	4
Ni	10'300 ±	1'600	OctaBDE	530 ±	30
Hg	0.68 ±	0.22	DecaBDE	510 ±	40
Zn	5'100 ±	800	PCB Summe	13 ±	4

Bis heute sind nur wenige Messungen der stofflichen Zusammensetzung von EEKG-Schrott publiziert worden. In einer Untersuchung aus Deutschland [Niedersächsisches Umweltministerium, 1998] wurden Stoffkonzentrationen in Elektrokleingeräten im Jahre 1996 ermittelt. Obwohl die Untersuchung im Vergleich zu dieser Studie zum Teil sehr ähnliche Resultate und einzelne erklärable Differenzen lieferte (z.B. tiefere Werte für Sb, Br, PBDE als Indiz einer damals noch verminderten Anwendung von BFS), ist ein direkter Vergleich der Daten nur bedingt möglich. Zu viele unterschiedliche Voraussetzungen, wie eine deutlich abweichende Zusammensetzung des untersuchten EEKG-Schrotts, eine viel kleinere Stichprobe in der deutschen Studie und z.T. methodische Unterschiede unterscheiden die beiden Arbeiten. In einer nicht publizierten Untersuchung bei Solenthaler Recycling AG in der Schweiz (Eichert et al., 2002) wurden in einem Versuch Umweltgrenzwerte des SWICO verifiziert, verfahrenstechnische Prozesse auf Ihre Eig-

nung untersucht, Optimierungspotentiale ermittelt und die Verteilung von Wertstoffen im Prozess untersucht. Dazu wurden Güterflüsse bestimmt und Stoffkonzentrationen von ausgewählten Elementen in einzelnen Outputfraktionen ermittelt. Vergleichbare Zahlen hinsichtlich der Stoffkonzentration im Input (EE-Schrott) liegen nicht vor. Auch waren bei der Untersuchung 15% Grossgeräte mit eingeschlossen. Die prozentuale Zusammensetzung der Inputfraktionen mit 13% Unterhaltungselektronik, 63% EDV-Elektronik, 8% Kleingeräte sowie 15% Grossgeräte weicht deutlich von der Zusammensetzung des hier untersuchten Abfalls ab. Dies würde nur sehr bedingt einen direkten Vergleich der EEKG-Zusammensetzung erlauben.

Ein Vergleich mit Resultaten einer nationalen Stoffflussanalyse für bromierte Flammschutzmittel in der Schweiz sowie mit Marktuntersuchungen der kantonalen Chemikalienfachstellen zeigt für TBBPA und OctaBDE recht gute Übereinstimmung (plausible Zunahme bzw. ähnliche Werte). Für PentaBDE (deutlicher Mehrbefund) und DecaBDE (gegenüber globalem Produktionsmentrend eher unerwarteter Minderbefund) weichen die Resultate jedoch deutlich ab. Das in dieser Arbeit ermittelte Br/Sb-Verhältnis von 3.2 liegt im Bereich von Literaturwerten, jedoch etwas über den Werten von 2-3 aus der interkantonalen Marktuntersuchung. Weitere direkte Vergleiche zu in der Schweiz oder anderswo gemessenen Stoffkonzentrationen im EEKG-Schrott sind nicht möglich.

Vergleicht man die Zusammensetzung von EEKG-Schrott mit aktuellen Gehalten im schweizer Kehricht, dann stellt man fest, dass die jährlichen Stofffrachten für Br, Cu, Cr und Ni in der rund 30 mal kleineren EEKG-Schrott Menge zwischen 120 und 500% grösser sind als diejenigen im gesamten Schweizer Kehricht. Selbst für die Elemente Sb, Sn, Cd, deren jährliche Fracht im EEKG-Schrott im Vergleich zur Fracht im Kehricht „nur“ rund 60-90% betragen, zeigt sich deutlich, dass selbst ein relativ kleiner Anteil von EEKG-Schrott im Kehricht dessen stoffliche Zusammensetzung deutlich verändern kann.

In wenigen Arbeiten sind Konzentrationswerte für bestimmte Stoffe bezogen auf den gesamten Kunststoffanteil im EEKG-Schrott publiziert worden. Die Literaturangaben liegen für Cl, Br, Cu und Zn in ähnlichen Wertebereichen wie die Resultate unserer Messungen. Cd, Pb, Sb, Sn, Ni, Cr, und Fe liegen am oberen Rand bzw. z.T. deutlich über den publizierten Werten. Die P-Konzentrationen liegen deutlich unterhalb der publizierten Werte. Ein Vergleich der Werte im gesamten Kunststoffgemisch des EEKG-Schrotts mit einer nach Anteilen der verschiedenen Kunststoffarten gewichteten mittleren Polymermischung aus dem Gesamtkunststoffmarkt zeigt, dass mit Ausnahme von Cl, Sb und Pb Konzentrationsdifferenzen von bis zu 10'000% existieren. Dies zeigt, dass sich Ergebnisse von Marktuntersuchungen nicht ohne Weiteres auf bestimmte Sektoren der Abfallwirtschaft oder Materialfraktionen aus Entsorgungsprozessen übertragen lassen.

### **Stoffverteilung bei der EEKG-Schrott Aufbereitung**

Es lassen sich fünf Gruppen von Stoffen unterscheiden, die in den Outputprodukten des EE-Schrott Verarbeitungsprozesses ähnliche „Stoffverteilungsmuster“ aufweisen (Tabelle 2).

Tabelle 2: „Stoffverteilungsmuster“ ausgewählter Stoffe bei der Verwertung von Elektro- und Elektronikkleingeräte-schrott im untersuchten Betrieb der Immark/Drisa AG, August 2003.

<i>Stark kunststoffgebundene Stoffe</i>	Stoffe, die zu >80% in den grösstenteils aus Kunststoffen bestehenden Outputfraktionen wieder gefunden werden.	Br, BFS und P
<i>Stark metallgebundene Stoffe</i>	Stoffe, die zu >75% in den grösstenteils aus Metallen bestehenden Outputfraktionen wieder gefunden werden.	Fe, Cr, Ni und Cu
<i>Stark aufkonzentrierbare Schadstoffe</i>	Stoffe, die durch händische Demontage/Aussortierung zu >70% in ein Outputprodukt („Schadstoffträger“) transferiert werden.	Hg, PCB
<i>Auf wenig Outputprodukte verteilte Stoffe</i>	Stoffe, die zu > 90% in weniger als drei Outputprodukte transferiert werden.	Cl, Sn und Zn
<i>Stark uniform verteilte Stoffe</i>	Stoffe, die mit Anteilen von >5% in jeweils fünf der zehn Outputprodukte verteilt werden.	Cd, Pb und Sb

### Stoffkonzentrationen in speziellen In- und Output Fraktionen

Stoffgehalte in den verschiedenen Einzelfraktionen im EEKG-Schrott Input zeigen im Vergleich zu Literaturdaten in einigen Fällen (z.B. Metallkonzentrationen in Leiterplatten) gute Übereinstimmung. Es werden aber auch grosse Unterschiede (z.B. PentaBDE in Kunststoffgehäusen, TV-Rückwänden und Cu-Kabeln sowie Sb in Leiterplatten) festgestellt. Solche Unterschiede bedürfen einer Erklärung oder müssten genauer beobachtet werden.

In den feinkörnigen Produkten aus der mechanischen Aufbereitung des untersuchten EE-Schrottverwertungsbetriebs werden neben den naturgemäss hohen Metallgehalten in Metallfraktionen bzw. hohen Gehalten an organischen Verbindungen und deren Bausteinen Cl, Br, P in Kunststofffraktionen, auch hohe Gehalte an organischen Verbindungen und Cl, Br, P in Metallfraktionen bzw. umgekehrt hohe Metallkonzentrationen in den Kunststofffraktionen vorgefunden. Im Fall des untersuchten Betriebs kann davon ausgegangen werden, dass durch die - infolge beschränkter finanzieller Ressourcen - nicht mehr bilanzierte Nachseparation für einen Teil der feinkörnigen Metallfraktionen eine weitere deutliche Abreicherung an kunststoffgebundenen Elementen / Verbindungen erreicht wird. Diese „Verunreinigungen“ spielen vor allem bei der Beurteilung von Verwertungs- und Entsorgungsfragen für diese Produkte auf stofflicher Ebene eine Rolle („Letzte-Senke-Problematik“).

Die Untersuchung zeigt auch, dass mittels der händischen Aussortierung von Batterien, Kondensatoren u.a. Schadstoffträgern eine starke Abreicherung von PCB und Hg in den Outputfraktionen erreicht werden kann. Dies kann für andere, in diversen Materialien der Hauptkomponenten von EE-Geräten gebundenen Schadstoffe (Cd, Pb, Sb etc.) mittels Handauslese/ mechanischer Aufbereitung kaum oder gar nicht erreicht werden. Staub, welcher durch die Abluftreinigungsanlage abgeschieden wird, ist z.T. stark mit Schadstoffen angereichert. Er enthält rund 10-45 mg/kg PCB und nicht vernachlässigbare Anteile an BFS.

### Datenlücken, Handlungs- und Forschungsbedarf

#### Regelmässige Kontrolle auf stofflicher Ebene („Erweitere Stoffbuchhaltung“)

Bei der hier beschriebenen Stoffflussuntersuchung handelt es sich um Resultate einer zeitlich eng begrenzten Messkampagne. Um im Unterschied zu den hier erstmals ermittelten Resultaten in Form einer „Punktmessung“ zeitliche Veränderungen der stofflichen Zusammensetzung des EEKG-Schrotts signifikant erkennen zu können, bedarf es eines regelmässigen Monitorings über längere Zeiträume. Mittels eines in diesem Bericht skizzierten Konzeptes für ein Stofffluss-

monitoring, welches in die schon bestehenden Ansätze einer Stoffbuchhaltung integriert werden könnte, kann diese Information gewonnen werden. Dies würde zudem eine seriöse Bewertung des Erfolgs von Massnahmen, z.B. hinsichtlich der Wirkung von Einschränkungen für bestimmte Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten oder der Kontrolle von freiwilligen Vereinbarungen, ermöglichen.

### **Schwache Datenbasis für Batterien**

Im Laufe dieses Projekts musste festgestellt werden, dass keine oder nur sehr unsichere Daten zu den aktuellen Stoffkonzentrationen der in der Schweiz entsorgten Batterien vorhanden sind. Die Ermittlung einer besseren und aktuellen Datenbasis, beispielsweise anhand einer Stoffflussanalyse in einer Batterieaufbereitungsanlage, wäre hilfreich und notwendig. Eine solche Datenbasis wäre auch von Nutzen für die Beurteilung der Notwendigkeit von Massnahmen, welche zum Ziel haben, die Rücklaufquote von gebrauchten Batterien zu erhöhen.

### **Ersatzstoffe für verbotene und umstrittene Flammschutzmittel**

Untersuchungen zu alternativen Flammschutzverbindungen drängen sich aus zwei Gründen auf:

Die im Rahmen des hier beschriebenen Projektes durchgeführten Untersuchungen beschränken sich auf fünf bromierte Flammschutzmittel, die global gesehen bedeutende Marktanteile haben und über deren Phase-out derzeit intensiv diskutiert wird. Ausserdem liefert diese Studie erste Daten zu aktuellen Phosphorgehalten. Zu den in EE-Geräten verwendeten Mengen an Phosphor basierten Flammschutzmitteln, anderen bromierten Verbindungen (z.B. bromierte Polymere und kovalent gebundenes TBBPA) oder Flammschutzmitteln auf der Basis anderer Elemente (z.B. Fluor in Perfluorbutansulfonsäure) sind heute praktisch keine Daten vorhanden. Die Resultate dieser Stoffflussanalyse zeigen, dass nur etwa 40% des gesamten Brom Inputs mit den Bromfrachten der analysierten Verbindungen (Penta-, Octa-, DecaBDE, additives TBBPA und HBCD) und der bekannten Anwendung von reaktiv gebundenem TBBPA in Leiterplatten (das mit den verwendeten Analysenverfahren nur als Gesamt-Brom gemessen werden konnte) erklärt werden können. Für 60% des Brom Inputs ist demnach nicht bekannt, in welcher Form das Brom in den EEKG vorliegt!

### **Emissionen in die Umwelt und Problematik halogener Dioxine/Furane**

In diesem Projekt wurde auf eine Untersuchung der Emissionen in die Umwelt (Atmosphäre) und des Vorkommens/Verbleibens bzw. des Entstehens von chlorierten/bromierten Dioxinen/Furanen verzichtet, denn diese Fragestellung war nicht Gegenstand dieser Arbeit. Berücksichtigt man jedoch die stoffliche Zusammensetzung des EE-Schrotts mit den hohen Gehalten an bromierten organischen Verbindungen und diversen Metallen, die unter Umständen (z. B. bei erhöhter Temperatur in Teilen der Anlage) die Bildung von Dibenzodioxinen/-furanen katalysieren können, erscheint eine genauere Untersuchung über die Belastung ausgewählter Outputprodukte, der Hallenluft sowie der gereinigten Abluft mit polyhalogenierten Dioxinen/-furanen durchaus wünschenswert.

## **Restflüsse an kunststoffgebundenen Elementen / Verbindungen in wiederverwerteten Metallschrotten**

In diesem Projekt wurde infolge beschränkter finanzieller Ressourcen auf die Bilanzierung der Nachseparation eines Teils der feinkörnigen Metallfraktion (weitere Abreicherung der kunststoffgebundenen Elemente/Verbindungen in den Metallfraktionen) und auf die Analyse von kleinen Restgehalten in einigen Metallschrott Fraktionen (Fe-Grobschrott, feinkörniger Fe-Schrott, Metallschrott Fraktionen 1 bis 4) verzichtet. Die Frage, wie gross Restgehalte der untersuchten Nichtmetalle bzw. organischen Verbindungen in diesen Outputfraktionen sind, wäre allenfalls in einem zukünftigen Projekt zu beantworten.

## **Beurteilung der angewandten Methodik**

Im Gegensatz zu in der Regel wenig robusten einzelnen Konzentrationsmessungen von Stoffen in bestimmten Outputprodukten aus der EE-Schrott Verarbeitung liefert die Stoffflussanalyse neben der statistisch gut gesicherten stofflichen Zusammensetzung des EEKG-Schrott Inputs auch die Stoffverteilung aus dem Input in die Outputprodukte (Transferkoeffizienten). Dies erlaubt eine ganzheitliche Darstellung des untersuchten Prozesses. Mit dieser Information können Optimierungspotenziale des Verarbeitungsprozesses und Veränderungen in der stofflichen Zusammensetzung sowohl des Inputs wie auch in den Outputfraktionen früh erkannt und für betriebliche und abfallwirtschaftliche Entscheidungen genutzt werden. Die Ergebnisse der vorliegenden Studie haben bestätigt, dass durch eine umfassende Stoffflussanalyse wichtige Qualitätskontrollen (z.B. Plausibilitätschecks von Analysedaten anhand von Input-Output-Vergleichen) durchgeführt werden können, die sonst nicht möglich sind.

Es zeigte sich, dass sich eine gezielte Versuchsvorbereitung im Hinblick auf die Qualität der Resultate lohnt (Bereitstellen einer repräsentativen Inputmischung; optimale Versuchsplanung). Die Analyseresultate bestätigen, dass sich das für den Versuch speziell entwickelte Probenahme-, Probeaufbereitungs- und Analysekonzept bewährt hat. Eine in der Regel gute Übereinstimmung von Vergleichsmessungen (interne und externe Qualitätssicherungsmaßnahmen auf Laborebene) festigt die gute Qualität der Resultate.



## Résumé

### Motivation / objectifs

La production et l'utilisation d'appareils électriques et électroniques a constamment augmenté au cours des dernières décennies, en Suisse comme dans le monde. Ces appareils, nommés « appareils EE », revêtent une importance croissante aux plans quantitatif et qualitatif, en tant que biens de consommation, mais aussi pour la gestion des déchets. C'est ainsi que la quantité d'appareils EE importés en Suisse a augmenté de 800 % au cours des 25 dernières années. Les « déchets EE » qu'ils produisent contiennent d'importantes quantités de matériaux valorisables, tels que des métaux, qui peuvent être récupérés puis réutilisés comme matières premières d'appoint. Mais ils recèlent aussi des concentrations significatives de substances dangereuses pour la santé et pour l'environnement, telles qu'antimoine, plomb, cadmium, mercure, PCB et composés organiques bromés. Si les déchets EE ne sont pas éliminés de manière appropriée, ces substances risquent d'être libérées et de présenter un danger pour les personnes et pour l'environnement.

En Suisse, des systèmes de récupération sélective des appareils EE usagés ont été mis sur pied progressivement depuis plus de dix ans. 1990 a vu naître la Fondation pour la gestion et la récupération des déchets en Suisse (S.EN.S.), créée pour assurer l'élimination des appareils frigorifiques et de congélation ainsi que des déchets électriques et électroniques (déchets EE). L'Association économique suisse de la bureautique, de l'informatique, de la télématique et de l'organisation (SWICO) a instauré peu après un concept de recyclage et d'élimination des appareils bureautiques et informatiques. L'ordonnance sur la restitution, la reprise et l'élimination des appareils électriques et électroniques (OREA), basée sur la loi sur la protection de l'environnement, est entrée en vigueur en 1998. Les déchets concernés sont éliminés sous la surveillance de contrôleurs indépendants mandatés par la S.EN.S et la SWICO<sup>1</sup>. Des audits visent notamment à examiner les flux de matériaux, c'est-à-dire les flux massiques de différents matériaux ou fractions (câbles, matières plastiques, etc.) dans les entreprises d'élimination. Ils représentent une première approche utile en vue de contrôler les résultats obtenus par la gestion des flux de matériaux.

Les flux de substances (éléments et composés chimiques) inhérents à l'élimination des appareils EE n'ont jamais été étudiés systématiquement en Suisse. Or la composition des déchets EE peut varier notablement en fonction de prescriptions légales ou suite à l'évolution de la technique, de l'économie et de la société. C'est pourquoi l'analyse chimique des substances comprises dans les déchets EE représente – en plus du contrôle des résultats obtenus par la gestion des flux de matériaux – un instrument utile en vue d'apprécier l'efficacité des mesures mises en œuvre et de déceler les modifications de la composition des déchets EE.

Le présent projet a étudié pour la première fois en Suisse les flux de certains éléments (Cd, Cu, Hg, Br, etc.) et composés organiques (produits ignifuges bromés et PCB) inhérents au traitement des déchets de petits appareils électriques et électroniques (déchets de PAEE) dans une entreprise d'élimination moderne. La répartition des substances entre l'apport et les produits de sortie (coefficients de transfert) a été calculée sur la base de mesures de la concentration des substances examinées dans les produits de sortie et en se référant aux flux de matériaux pris

---

<sup>1</sup> Contrôleurs indépendants mandatés par la S.EN.S et la SWICO: Carbotech AG, Bâle, Écoservices (Yverdon) Sàrl, Yverdon-les-Bains, EMPA, St-Gall et Roos+Partner AG, Lucerne

en compte. Les résultats de l'étude ont permis de formuler des propositions en vue d'un futur monitoring des flux de substances dans les entreprises de traitement des déchets EE.

## Procédure

La réussite de l'exécution et du dépouillement de l'essai en grandeur nature, dans l'entreprise d'élimination, a reposé sur un concept d'étude élaboré avant le début de l'essai. Il comprenait notamment un plan d'échantillonnage et un canevas de préparation et d'analyse des échantillons. Un mélange de petits appareils électriques et électroniques (déchets de PAEE), approchant au plus près la composition moyenne des principales catégories d'appareils se retrouvant actuellement dans les déchets de PAEE en Suisse, a été préparé pour servir d'apport à l'essai. Les gros appareils ont été laissés volontairement de côté. L'essai a été réalisé sur trois jours, en août 2003. Quelque 230 t du mélange préparé ont été traitées durant ce laps de temps. Tous les flux massiques entrant et sortant au cours de l'essai ont été pesés. Des échantillons ont été prélevés dans les flux de sortie importants, conformément au plan d'échantillonnage, puis ils ont été préparés et des analyses ont porté sur les substances sélectionnées. Le flux de ces substances a été calculé en multipliant leurs concentrations relevées dans les produits de sortie par les flux massiques. La composition globale des déchets de PAEE a été déterminée en divisant la somme de tous les flux de sortie par la masse totale de déchets de PAEE. Puis la répartition des substances entre l'apport et les produits de sortie (coefficients de transfert) a aussi été calculée. L'incertitude a toujours été prise en compte dans les calculs.

## Procédé de traitement

La présente analyse des flux de substances dans un contexte pratique a été réalisée dans une grande entreprise d'élimination. Celle-ci traite près d'un quart des déchets EE produits en Suisse, dans une installation entrée en service en 2002, qui fait appel aux techniques les plus récentes. Les déchets EE passent par une succession d'étapes de traitement à la main et à la machine, au cours desquelles ils sont démontés, broyés, puis séparés pour se retrouver dans différents flux massiques, correspondant à autant de produits de sortie. Les produits issus du procédé de traitement sont la ferraille de fer, diverses fractions de métaux non ferreux, les boîtiers d'ordinateurs et de télévisions en plastique et en bois, les granulés de plastiques mélangés, les tubes cathodiques, les plaquettes de circuits imprimés, les câbles de cuivre, les pièces riches en polluants, telles que piles et condensateurs, ainsi que les fractions de poussières. Les étapes de traitement à la machine comprennent la fragmentation des appareils dans une machine à percussion puis la séparation des matériaux et des pièces en fonction de leur densité, de leur granulométrie et de leurs propriétés magnétiques, ainsi qu'un broyage réitéré par mouture.

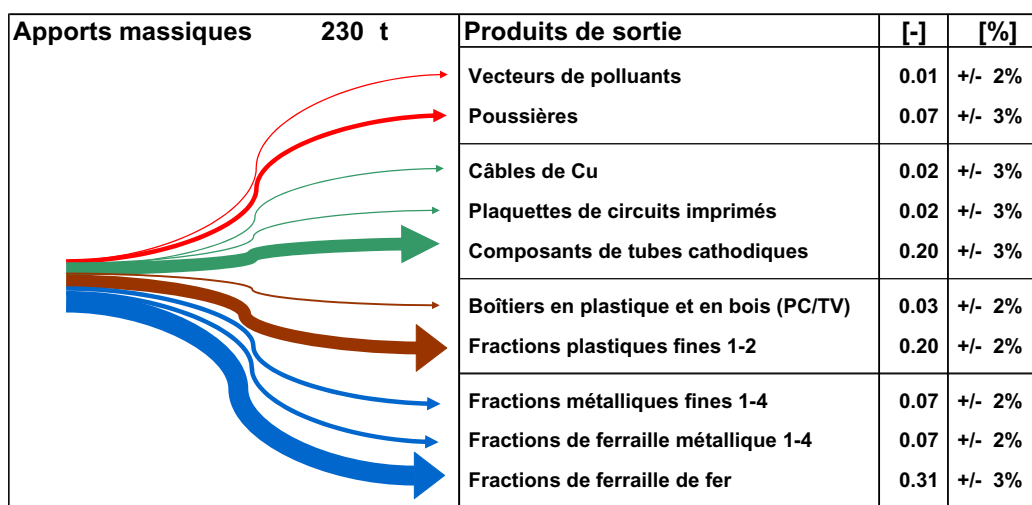
## Résultats et conclusions

### Composition des apports de déchets de PAEE (fractions)

La composition des déchets de PAEE utilisés pour l'essai, déterminée par l'entremise des produits de sortie (fig. 1), comprend 45 % de métaux, 23 % de plastiques, 20 % de composants de tubes cathodiques (verre et métaux), 7 % de poussières (formées majoritairement de substances métalliques et plastiques), 2 % de plaquettes de circuits imprimés, 2 % de câbles de cuivre ainsi que 0,6 % de piles et condensateurs. Elle correspond bien à la composition des déchets EE établie pour la Suisse en 2002, si bien que la composition du mélange d'apport est sensi-

blement représentative de celle des déchets de petits appareils électriques et électroniques produits en Suisse en 2003.

Figure 1: Produits de sortie résultant du traitement des déchets de PAEE



### Composition des apports de déchets de PAEE (substances)

Le tableau 1 présente la composition moyenne, en termes de substances, des petits appareils électriques et électroniques destinés à être éliminés en Suisse (déchets de PAEE), telle qu'elle a été déterminée en août 2003 dans l'entreprise d'élimination DRISA AG / IMMARK AG à Regensdorf. L'incertitude est restituée par l'intervalle de confiance pour la probabilité d'environ 95 %.

Tableau 1: Composition moyenne des déchets de petits appareils électriques et électroniques produits en Suisse en 2003; y compris l'intervalle de confiance pour la probabilité d'environ 95 %.

Élément / substance	Moyenne	Incertitude	Élément / substance	Moyenne	Incertitude
	en [mg/kg]			en [mg/kg]	
Al	49'000	± 4'000	Sn	2'400	± 100
Sb	1'700	± 200	Cl	9'600	± 1'400
Pb	2'900	± 500	Br	5'500	± 300
Cd	180	± 50	P	360	± 220
Cr	9'900	± 1'700	PentaBDE	34	± 4
Fe	360'000	± 10'000	TBBPA	1'400	± 100
Cu	41'000	± 3'000	HBCD	17	± 4
Ni	10'300	± 1'600	OctaBDE	530	± 30
Hg	0.68	± 0.22	DécaBDE	510	± 40
Zn	5'100	± 800	Somme PCB	13	± 4

Seules quelques mesures de la composition des déchets de PAEE ont été publiées jusqu'à présent. Une étude allemande [Ministère de l'intérieur de Basse-Saxe, 1998] a porté en 1996 sur la concentration de substances dans les petits appareils électriques. Bien qu'elle ait fourni des résultats parfois très voisins de ceux de la présente étude et présenté certaines différences explicables (p. ex. des valeurs inférieures pour le Sb, le Br et les PBDE, témoignant d'un usage moins intensif des produits ignifuges bromés à l'époque), la comparaison directe n'est possible que sous certaines conditions. Les deux travaux ont été réalisés dans des conditions trop différentes: composition très divergente des déchets de PAEE étudiés, taille nettement moindre des échantillons prélevés dans l'étude allemande et application d'une méthodologie parfois différente. Une étude suisse non publiée (Eichert et al., 2002) a consisté à réaliser un essai auprès

de l'entreprise Solenthaler Recycling AG pour vérifier les valeurs limites de la SWICO concernant l'environnement, étudier la pertinence de procédés techniques, déterminer les possibilités d'optimisation et étudier la répartition des substances recyclables au cours du processus. Des flux de matériaux ont été déterminés et les concentrations d'éléments sélectionnés ont été mesurées dans certaines fractions de sortie. Mais les apports de déchets EE n'étaient pas comparables et 15 % de gros appareils étaient également compris dans cette étude. La composition des fractions formant l'apport de déchets, soit 13 % d'appareils relevant de l'électronique de loisirs, 63 % d'appareils informatiques, 8 % de petits appareils et 15 % de gros appareils, diverge notablement de la composition des déchets faisant l'objet de la présente étude. C'est pourquoi les possibilités de comparaison directe avec le mélange de PAEE étudié ici sont très restreintes.

Une comparaison avec les résultats d'une analyse des flux de produits ignifuges bromés en Suisse et ceux d'une étude réalisée sur le marché par les services cantonaux en charge des produits chimiques révèle une bonne coïncidence pour le TBBPA et l'octaBDE (croissance plausible ou valeurs similaires). En revanche, les résultats divergent notablement pour le pentaBDE (trouvé en quantités nettement supérieures) et le décaBDE (étonnamment trouvé en quantités inférieures, en contradiction avec la tendance à la croissance de la production au plan mondial). Le rapport Br/Sb déterminé dans le cadre de ce travail – de 3,2 – correspond sensiblement aux valeurs figurant dans la littérature spécialisée, mais il est quelque peu supérieur aux valeurs de 2 à 3 trouvées lors de l'étude intercantonale portant sur le marché. Il n'est pas possible de procéder à d'autres comparaisons directes avec des concentrations mesurées en Suisse ou ailleurs dans des déchets de PAEE.

Si l'on compare la composition des déchets de PAEE avec la teneur actuelle des ordures ménagères suisses, on constate que les charges annuelles de Br, Cu, Cr et Ni sont de 120 à 500 % supérieures dans les déchets de PAEE, bien qu'ils soient produits en quantités 30 fois moindres que les ordures ménagères. Il ressort même clairement, si l'on considère les éléments Sb, Sn et Cd, dont la charge annuelle dans les déchets de PAEE équivaut « seulement » à 60 à 90 % de la charge dans les ordures, que l'ajout d'une proportion modeste de déchets de PAEE dans les ordures suffit pour modifier considérablement leur composition.

Quelques travaux publiés présentent les valeurs de concentration de certaines substances rapportées à la proportion totale de plastique dans les déchets de PAEE. Les données de la littérature concernant les éléments Cl, Br, Cu et Zn sont similaires aux résultats de nos mesures. Les concentrations de Cd, Pb, Sb, Sn, Ni, Cr et Fe se trouvent dans le haut de la fourchette, voire nettement au-delà des valeurs publiées. En revanche, les concentrations de P sont sensiblement inférieures à celles-ci. Une comparaison entre les concentrations dans l'ensemble des plastiques mélangés parmi les déchets de PAEE et dans un mélange moyen de polymères, pondéré selon les proportions des différents types de plastiques écoulés sur le marché, révèle des différences pouvant aller jusqu'à 10 000 %, sauf pour les éléments Cl, Sb et Pb. Il en résulte qu'on ne peut pas transposer sans autre les résultats des études portant sur le marché à certains secteurs de la gestion des déchets, ni à certaines fractions de matériaux issues de processus d'élimination.

## Répartition des substances lors du traitement des déchets de PAEE

On distingue cinq groupes de substances, qui présentent des « canevas de répartition » similaires dans les produits issus du traitement des déchets EE (tableau 2).

Tableau 2: « Canevas de répartition » des substances sélectionnées, lors de l'élimination des déchets de petits appareils électriques et électroniques dans l'entreprise Immark/Drisa AG, étudiée en août 2003.

<i>Substances étroitement liées aux plastiques</i>	Substances retrouvées à raison de > 80 % dans les fractions de sortie essentiellement composées de plastiques.	Br, PIB* et P
<i>Substances étroitement liées aux métaux</i>	Substances retrouvées à raison de > 75 % dans les fractions de sortie essentiellement composées de métaux.	Fe, Cr, Ni et Cu
<i>Polluants pouvant être fortement concentrés</i>	Substances transférées à raison de > 70 % dans un produit de sortie (« vecteur de polluants ») par démontage et tri manuels.	Hg, PCB
<i>Substances présentes dans quelques produits de sortie</i>	Substances transférées à raison de > 90 % dans moins de trois produits de sortie.	Cl, Sn et Zn
<i>Substances réparties uniformément</i>	Substances réparties dans cinq des dix produits de sortie, à raison de > 5 % chacun	Cd, Pb et Sb

\* PIB: produits ignifuges bromés

## Concentrations dans certaines fractions d'apport et de sortie

La teneur de certaines substances contenues dans les fractions composant l'apport de déchets de PAEE concorde bien avec les données figurant dans la littérature (p. ex. concentration de métaux dans les plaquettes de circuits imprimés). Mais d'importants écarts ont aussi été constatés (p. ex. pentaBDE dans les boîtiers en plastique, parois arrières de télévisions et câbles de cuivre; Sb dans les plaquettes de circuits imprimés). Il faut expliquer ces différences ou les étudier de plus près.

Dans les produits de granulométrie fine issus du traitement mécanique dans l'entreprise de valorisation des déchets EE étudiée, on a logiquement trouvé des teneurs élevées en métaux dans les fractions métalliques et des teneurs élevées en composés organiques et leurs composants Cl, Br et P dans les fractions plastiques. Mais on a aussi trouvé des concentrations élevées en composés organiques, Cl, Br, et P dans des fractions métalliques et des concentrations élevées en métaux dans des fractions plastiques. Dans le cas de l'entreprise étudiée, on peut admettre l'hypothèse que la suite de la séparation – qui n'a pas fait l'objet d'un bilan pour des raisons financières – s'accompagne d'un appauvrissement notable en éléments ou composés liés aux matières plastiques dans une partie des fractions métalliques fines. Ces « impuretés » sont surtout importantes lorsqu'il s'agit d'évaluer la valorisation et l'élimination de ces produits en regard des substances qu'ils contiennent (problématique de la « régression terminale »).

L'étude montre également que le tri manuel des piles, condensateurs et autres vecteurs de polluants permet d'obtenir un appauvrissement notable en PCB et Hg dans les fractions de sortie. Ce résultat est difficile voire impossible à atteindre par tri à la main ou traitement mécanique pour d'autres polluants (Cd, Pb, Sb, etc.) liés dans divers matériaux utilisés pour fabriquer les principaux éléments des appareils EE. Les poussières déposées dans l'installation de traitement des effluents gazeux sont parfois considérablement enrichies en polluants. Elles contiennent des PCB à raison de 10 à 45 mg/kg et des concentrations non négligeables de produits ignifuges bromés.

## **Données manquantes, actions et recherches à entreprendre**

### **Contrôle régulier des flux de substances**

#### **(« extension de la comptabilité des substances »)**

L'étude des flux de substances présentée ici se base sur les résultats d'une campagne de mesures étroitement limitée dans le temps. Un monitoring régulier, sur une période plus longue, serait nécessaire pour être à même d'identifier rigoureusement les variations temporelles de la composition des déchets de PAEE. Les résultats obtenus pour la première fois dans le cadre de cette étude revêtent plutôt un caractère de « mesure ponctuelle ». Les informations souhaitées peuvent être acquises en appliquant un concept de monitoring des flux de substances esquissé dans le présent rapport, qui pourrait être intégré dans l'ébauche de comptabilité des substances déjà existante. Il permettrait en outre d'évaluer avec pertinence la portée des mesures mises en œuvre, en ce qui concerne notamment l'efficacité des restrictions à l'encontre de certaines substances utilisées dans la fabrication des appareils électriques et électroniques et le contrôle des conventions volontaires.

### **Une base de données insatisfaisante pour les piles**

Il s'est avéré au cours de cette étude que les données concernant la composition actuelle des piles éliminées en Suisse font défaut ou sont très peu fiables. Il serait utile, voire nécessaire d'élaborer une base de données à jour de meilleure qualité, par exemple en effectuant une analyse des flux de substances dans une installation de traitement des piles. Une telle base de données servirait aussi à évaluer la nécessité de mesures visant à améliorer le taux de récupération des piles usagées.

### **Substituts aux produits ignifuges interdits et controversés**

Des recherches visant à trouver d'autres composés ignifuges s'imposent pour deux raisons: Les recherches effectuées dans le cadre de ce projet se sont limitées à cinq produits ignifuges bromés, qui occupent dans l'ensemble d'importantes parts de marché et dont la suppression fait l'objet d'intenses discussions. Cette étude fournit par ailleurs la première série de données relatives aux teneurs actuelles en phosphate. Mais on ne dispose pratiquement d'aucun chiffre concernant les quantités de produits ignifuges phosphorés, d'autres composés bromés (p. ex. polymères bromés et TBBPA covalent lié) ou de produits ignifuges à base d'autres éléments (p. ex. fluor dans l'acide perfluorobutanesulfonique), qui interviennent dans la fabrication des appareils EE. Au vu des résultats de cette analyse des flux de substances, seuls 40 % de l'apport global en brome peuvent être expliqués par la teneur en brome des composés analysés (pentaBDE, octaBDE, décaBDE, additifs à base de TBBPA et HBCD) et par l'utilisation connue de TBBPA lié réactif dans les plaquettes de circuits imprimés (qui n'a pu être mesuré que sous la forme de brome total selon la méthode d'analyse appliquée). On ignore donc la forme revêtue par 60 % du brome contenu dans les déchets de PAEE étudiés.

### **Émissions dans l'environnement et problématique des dioxines et furanes halogénés**

Ce projet n'a pas étudié les émissions dans l'environnement (atmosphère), ni l'occurrence, la persistance ou la formation de dioxines et furanes chlorés et bromés, car ces investigations sortaient du cadre de ce travail. Mais si l'on se réfère à la composition des déchets EE et à leurs teneurs élevées en composés organiques bromés et divers métaux susceptibles, sous certaines conditions (p. ex. température élevée dans une partie de l'installation) de catalyser la formation de dibenzodioxines et dibenzofuranes, il serait souhaitable d'étudier de plus près la

pollution de certains produits de sortie, de l'air des locaux et de l'air épuré par des dioxines et furanes polyhalogénés.

### **Flux résiduels d'éléments et composés liés aux plastiques dans les déchets métalliques recyclés**

Faute de moyens, ce projet n'a pas pu établir de bilan au terme de la séparation ultérieure d'une partie de la fraction métallique fine (appauvrissement en éléments ou composés liés aux plastiques dans les fractions métalliques), ni analyser les faibles teneurs résiduelles dans certaines fractions de ferraille (ferraille de fer grossière, ferraille de fer fine, fractions de ferraille métallique 1 à 4). Il est souhaitable qu'un projet futur vise à déterminer l'importance, dans ces fractions de sortie, des teneurs résiduelles en substances non métalliques et composés organiques abordés dans le cadre de ce projet.

### **Évaluation de la méthode appliquée**

Contrairement aux mesures ponctuelles des concentrations de substances dans certains produits issus du traitement des déchets EE, généralement moins robustes, l'analyse des flux de substances fournit la répartition de ces substances entre l'apport et les produits de sortie (coefficients de transfert) en sus de la composition, fiable au plan statistique, des apports de déchets de PAEE. Elle permet donc de se faire une représentation globale des processus étudiés. Les informations retirées peuvent être utilisées pour déceler précocement les possibilités d'optimiser les processus de traitement et les modifications de la composition des apports et des fractions de sortie. Elles servent aussi de base pour prendre des décisions concernant l'exploitation des installations et la gestion des déchets. Les résultats de la présente étude ont confirmé le fait qu'une analyse exhaustive des flux de substances permet d'effectuer des contrôles de qualité importants (p. ex. tests de plausibilité des résultats des analyses en comparant les apports et les produits de sortie), qui ne seraient pas possibles sans cela.

Il s'est avéré qu'une préparation ciblée de l'essai se justifie au vu de la qualité des résultats (préparation d'un mélange d'apport représentatif; planification optimale de l'essai). Les résultats de l'étude témoignent de l'efficacité du concept d'échantillonnage, de préparation et d'analyse des échantillons spécialement mis au point pour cet essai. La correspondance, généralement bonne, entre les mesures comparatives (mesures d'assurance qualité internes et externes concernant les procédés de laboratoire) confirme la bonne qualité des résultats.

## Riassunto

### Motivazione / obiettivi

Negli ultimi decenni la produzione e l'utilizzazione di apparecchi elettrici ed elettronici sono costantemente aumentate sia in Svizzera che a livello mondiale. E tali apparecchi (apparecchi EE) assumono un'importanza sempre maggiore in termini quantitativi e qualitativi, sia come beni di consumo sia nell'ambito della gestione dei rifiuti. La quantità degli apparecchi EE importati negli ultimi 25 anni in Svizzera è infatti cresciuta dell'800%. I rifiuti elettrici ed elettronici contengono quantità significative di materiali riciclabili, come ad esempio metalli, che possono essere recuperati e riutilizzati come materie prime secondarie. Sono però anche ricchi di sostanze nocive per la salute e per l'ambiente, tra cui l'antimonio, il piombo, il cadmio, il mercurio, i PCB ed i composti organici bromati, i quali, in caso di smaltimento inadeguato, possono giungere nell'ambiente e costituire un rischio sia per quest'ultimo che per l'uomo.

Da oltre dieci anni la Svizzera dispone di sistemi per la raccolta differenziata di apparecchi EE fuori uso. Nel 1990 è stata creata la Fondazione per la gestione e il recupero dei rifiuti in Svizzera (S.EN.S.), che si occupa dello smaltimento di apparecchi refrigeranti e di rifiuti elettrici ed elettronici (rifiuti EE). Poco tempo dopo, l'Associazione economica svizzera della tecnica d'informazione, comunicazione e organizzazione (SWICO) ha adottato un piano di riciclaggio e di smaltimento per apparecchi della burocratica e dell'informatica. Nel 1998 è infine entrata in vigore l'ordinanza concernente la restituzione, la ripresa e lo smaltimento degli apparecchi elettrici ed elettronici (ORSAE), basata sulla legge federale sulla protezione dell'ambiente. Le attività di smaltimento sono supervisionate da società indipendenti incaricate dalla S.EN.S e dalla SWICO<sup>1</sup>, le quali, nell'ambito delle verifiche, esaminano anche i flussi di sostanze provenienti dalle aziende, ovvero i flussi di massa di determinate frazioni o materiali (cavi, materiale plastico, ecc.). Ciò costituisce un primo valido approccio per il controllo dei risultati a livello di gestione del flusso dei materiali.

In Svizzera non viene ancora effettuato un controllo sistematico dei flussi di sostanze (elementi e composti chimici) nell'ambito dello smaltimento degli apparecchi EE. La composizione chimica dei rifiuti EE può tuttavia variare notevolmente in funzione delle prescrizioni legali in vigore e degli sviluppi tecnici, economici e sociali. Per tale ragione, l'analisi chimica delle sostanze contenute nei rifiuti EE rappresenta, insieme al controllo dei risultati ottenuti a livello del flusso dei materiali, uno strumento utile per valutare l'impatto ed il successo delle misure adottate e per accertare eventuali variazioni della composizione dei rifiuti stessi.

Nell'ambito del presente progetto sono stati esaminati per la prima volta in Svizzera i flussi di determinati elementi chimici (Cd, Cu, Hg, Br ecc.) e composti organici (prodotti ignifughi bromati [PIB] e PCB) nei rifiuti provenienti dal trattamento di piccoli apparecchi elettrici ed elettronici (rifiuti PAEE) in un moderno impianto di smaltimento dei rifiuti. Sulla base delle concentrazioni di sostanze rilevate nei residui generati dall'impianto e dei flussi di materiali registrati, si è proceduto a stabilire la ripartizione delle sostanze (coefficiente di trasferimento) tra il materiale in uscita e quello in entrata (rifiuti PAEE consegnati all'impianto di smaltimento).

---

<sup>1</sup> Società indipendenti incaricate dalla S.EN.S e dalla SWICO: Carbotech AG, Basilea, Ecoservices (Yverdon) Sàrl, Yverdon-les-Bains, EMPA, San Gallo e Roos+Partner AG, Lucerna



In seguito ai risultati emersi dall'analisi dei flussi di sostanze è stato possibile formulare delle proposte per garantire, in futuro, un adeguato monitoraggio dei flussi di sostanze negli impianti di trattamento dei rifiuti EE.

## **Procedura**

Per garantire l'efficacia dell'attuazione e della valutazione dell'esperimento su larga scala eseguito nell'impianto di smaltimento, ci si è basati su una strategia di analisi elaborata precedentemente, la quale prevedeva un piano di campionamento, di preparazione e di analisi dei campioni. Per effettuare la prova è stato preparato un mix di diversi piccoli apparecchi elettrici ed elettronici fuori uso (rifiuti PAEE), il più possibile rappresentativo della composizione media attuale dei rifiuti PAEE in Svizzera. Sono invece stati volutamente esclusi gli apparecchi di grandi dimensioni. Nel corso dell'esperimento, durato tre giorni ed effettuato nell'agosto 2003, sono state trattate 230 t di rifiuti di piccoli apparecchi elettrici ed elettronici ben mescolati. Tutti i flussi di massa in entrata ed in uscita generati dall'esperimento sono stati pesati. Come previsto dal piano di campionamento, dai flussi in uscita sono stati prelevati e preparati dei campioni e sono state analizzate le sostanze selezionate. I flussi di sostanze sono stati calcolati moltiplicando le concentrazioni di sostanze rilevate nei prodotti in uscita con i flussi di massa. La composizione complessiva delle sostanze contenute nei rifiuti PAEE è stata determinata dividendo la somma dei flussi in uscita con la massa totale dei rifiuti PAEE. Ciò ha permesso di calcolare la ripartizione delle sostanze tra il materiale in entrata e quello di uscita (coefficiente di trasferimento). Nell'ambito dei calcoli effettuati si è sempre tenuto conto dell'incertezza.

## **Procedura di trattamento**

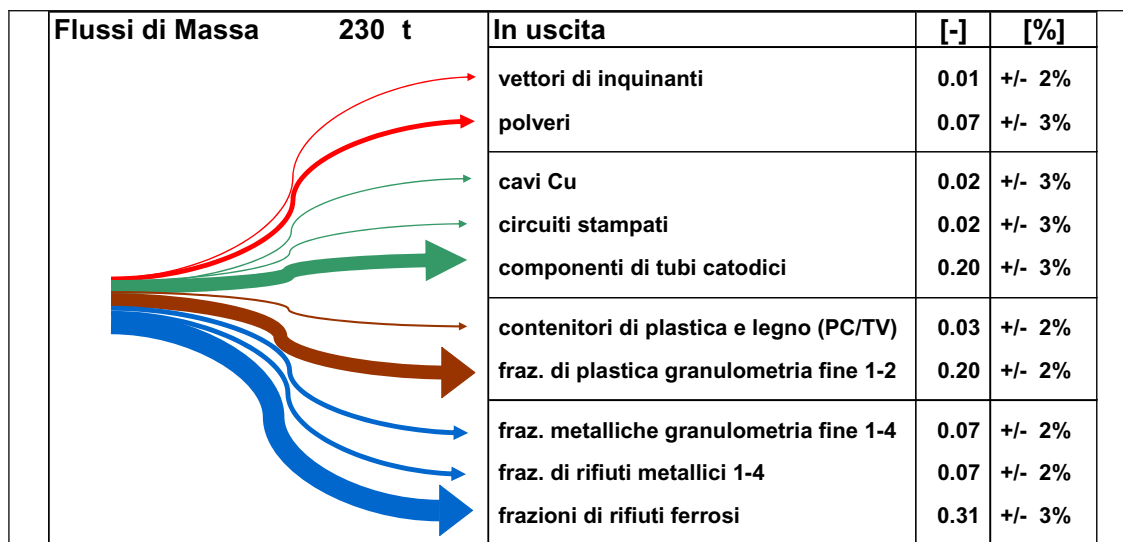
La presente analisi dei flussi di sostanze è stata effettuata presso una grossa azienda di smaltimento dei rifiuti che, in un impianto moderno entrato in funzione nel 2002 e realizzato secondo lo stato attuale della tecnica, tratta circa un quarto di tutti i rifiuti di apparecchi elettrici ed elettronici prodotti in Svizzera. Nel corso del trattamento, i rifiuti EE vengono smontati e frantumati con procedimenti manuali e meccanici e, infine, ripartiti in diversi flussi di massa che corrispondono ad altrettanti prodotti in uscita. I materiali in uscita sono costituiti da rottami di ferro, diverse frazioni di metalli non ferrosi, parti di carcasse di computer e di televisori in plastica e legno, granulato di materiale plastico misto, tubi catodici, circuiti stampati, cavi di rame, parti contenenti sostanze nocive quali pile e condensatori, e frazioni di polveri. Le fasi di trattamento meccaniche comprendono la frantumazione degli apparecchi in una macchina a percussione, la successiva separazione delle parti di materiale e di apparecchi a seconda della densità, della granulometria e delle caratteristiche magnetiche nonché diverse fasi di triturazione.

## **Risultati e conclusioni**

### **Composizione delle frazioni in entrata dei rifiuti PAEE**

La composizione dei rifiuti PAEE utilizzati per l'esperimento, determinata attraverso i prodotti in uscita (cfr. fig. 1), comprende il 45% di metalli, il 23% di materia plastiche, il 20% di componenti di tubi catodici (vetro e metallo), il 7% di polveri (formate prevalentemente da materiale metallico e plastico), il 2% di circuiti stampati e di cavi di rame nonché lo 0.6% di pile e condensatori, e coincide in larga misura con quella dei rifiuti EE prodotti in Svizzera nel 2002. La composizione delle sostanze del mix di apparecchi in entrata è quindi abbastanza rappresentativa della quantità di rifiuti PAEE prodotti in Svizzera nel 2003.

Fig. 1: prodotti in uscita dal trattamento di rifiuti PAEE



### Composizione dei rifiuti PAEE in uscita (sostanze)

La tabella 1 illustra la composizione media in termini di sostanze dei piccoli apparecchi elettrici ed elettronici (rifiuti PAEE) destinati allo smaltimento in Svizzera. Detta composizione è stata determinata nell'agosto 2003 nell'impianto di smaltimento della ditta DRISA AG/IMMARK AG di Regensdorf. L'incertezza è caratterizzata con un intervallo di confidenza approssimativo del 95%.

Tabella 1: composizione media delle sostanze contenute nei rifiuti di piccoli apparecchi elettrici ed elettronici in Svizzera nel 2003, inclusi i dati relativi ad un intervallo di confidenza approssimativo del 95%.

Elemento / sostanza	Valore medio	Incertezza	Elemento / sostanza	Valore medio	Incertezza
	in [mg/kg]			in [mg/kg]	
Al	49'000	± 4'000	Sn	2'400	± 100
Sb	1'700	± 200	Cl	9'600	± 1'400
Pb	2'900	± 500	Br	5'500	± 300
Cd	180	± 50	P	360	± 220
Cr	9'900	± 1'700	pentaBDE	34	± 4
Fe	360'000	± 10'000	TBBPA	1'400	± 100
Cu	41'000	± 3'000	HBCD	17	± 4
Ni	10'300	± 1'600	octaBDE	530	± 30
Hg	0.68	± 0.22	decaBDE	510	± 40
Zn	5'100	± 800	somma PCB	13	± 4

Sono poche le misurazioni della composizione dei rifiuti PAEE pubblicate sinora. In un'indagine effettuata in Germania [Ministero dell'ambiente della Bassa Sassonia, 1998] sono state determinate le concentrazioni di sostanze nei piccoli apparecchi elettrici nel 1996. Nonostante le ricerche avessero fornito in parte risultati molto simili a quelli del presente studio ed anche singole divergenze spiegabili (ad es. valori inferiori di Sb, Br e PBDE, indice di un'utilizzazione di PIB meno intensiva rispetto ad oggi), il confronto diretto è possibile soltanto a determinate condizioni. Troppe premesse differenti, una significativa divergenza nella composizione dei rifiuti PAEE, un campionamento nettamente inferiore nella ricerca tedesca e, in parte, l'applicazione di metodologie diverse distinguono i due studi. Nell'ambito di una ricerca non pubblicata (Eichert et

al., 2002), e condotta presso l'azienda svizzera Solenthaler Recycling AG, è stato effettuato un esperimento volto a verificare i valori limite ambientali fissati dalla SWICO, controllare l'idoneità delle procedure tecniche e valutare la possibilità di ottimizzazione nonché la ripartizione delle sostanze riciclabili nel corso del processo. Sono stati determinati dei flussi di materiali e si è proceduto alla misurazione, in singole frazioni di materiali in uscita, delle concentrazioni di elementi selezionati. Non erano disponibili dati comparabili sulla concentrazione delle sostanze nel materiale in entrata (rifiuti EE). L'indagine comprendeva inoltre un 15% di apparecchi di grandi dimensioni. La composizione delle frazioni di materiale in entrata, con il 13% di apparecchi dell'elettronica d'intrattenimento, il 63% di apparecchi informatici, l'8% di piccoli apparecchi nonché il 15% di apparecchi di grosse dimensioni, diverge chiaramente dalla composizione dei rifiuti esaminati dalla presente ricerca. Per questo motivo la possibilità di un confronto diretto della composizione dei PAEE è molto limitata.

Un confronto con i risultati di un'analisi dei flussi di prodotti ignifughi bromati in Svizzera e di alcune indagini di mercato realizzate dai servizi cantonali competenti in materia di prodotti chimici rivela una buona corrispondenza per il TBBPA e l'octaBDE (aumento plausibile o valori simili). Per quanto riguarda il pentaBDE (riscontrato in quantità nettamente superiori) e il decaBDE (quantità sorprendentemente inferiori rispetto alle attese, legate al tendenziale incremento della produzione a livello mondiale) i risultati divergono notevolmente. Il rapporto Br/Sb di 3.2, stabilito in questo studio, rientra nei valori fissati dai testi specializzati, ma è leggermente superiore al valore 2-3 riscontrato nel quadro dell'indagine di mercato intercantonale. Non è possibile effettuare ulteriori confronti diretti con le concentrazioni di sostanze misurate in Svizzera o altrove nei rifiuti PAEE.

Confrontando la composizione dei rifiuti PAEE con le quantità di sostanze contenute nei rifiuti domestici in Svizzera, si constata che i carichi annuali di Br, Cu, Cr e Ni rilevati nei primi superano dal 120 al 500% quelli registrati nei secondi, nonostante la quantità di rifiuti PAEE sia 30 volte inferiore a quella dei rifiuti domestici. Persino nel caso degli elementi Sb, Sn, Cd, i cui carichi annuali nei rifiuti PAEE costituiscono "soltanto" il 60-90% di quelli rilevati nei rifiuti domestici, si può chiaramente constatare come la composizione di questi ultimi possa essere notevolmente modificata da una percentuale anche minima di PAEE.

Pochi studi hanno pubblicato valori sulla concentrazione di determinate sostanze in rapporto alla percentuale complessiva di materiale plastico nei rifiuti PAEE. Nella letteratura relativa alle sostanze Cl, Br, Cu e Zn sono presenti valori simili ai risultati delle nostre misurazioni. Le concentrazioni di Cd, Pb, Sb, Sn, Ni, Cr, e Fe si situano al livello più alto e sono quindi, in parte, nettamente superiori ai valori pubblicati, mentre le concentrazioni di P risultano chiaramente inferiori. Un confronto tra le concentrazioni registrate in tutta la plastica mescolata ai rifiuti PAEE e quelle rilevate una miscela media di polimeri, ponderata secondo le componenti dei diversi tipi di plastica presenti sul mercato, mostra che, a parte il caso eccezionale degli elementi Cl, Sb e Pb, esistono differenze che possono arrivare fino al 10'000%. Ciò mostra che i risultati delle indagini di mercato non possono essere semplicemente applicati a determinati settori della gestione dei rifiuti o a frazioni di materiali generate nel corso di processi di smaltimento.

### **Ripartizione delle sostanze durante il trattamento dei rifiuti PAEE**

Si possono distinguere cinque gruppi di sostanze, i quali presentano modelli di ripartizione simili nel materiale in uscita, ovvero nei prodotti derivanti dal trattamento dei rifiuti EE (tabella 2).

Tabella 2: "modelli di ripartizione" di sostanze selezionate al momento del riciclaggio di piccoli apparecchi elettrici ed elettronici nell'azienda Immark/Drise AG, agosto 2003.

<i>Sostanze strettamente legate alla plastica</i>	Sostanze presenti in misura superiore all'80% nelle frazioni in uscita composte prevalentemente da plastica	Br, PIB e P
<i>Sostanze strettamente legate ai metalli</i>	Sostanze presenti in misura superiore al 75% nelle frazioni in uscita prevalentemente composte da metalli.	Fe, Cr , Ni e Cu
<i>Inquinanti che possono presentare forti concentrazioni</i>	Sostanze trasferite in misura superiore al 70% in un prodotto in uscita ("vettori di inquinanti") mediante procedimenti di smontaggio e selezione manuali.	Hg, PCB
<i>Sostanze presenti in pochi prodotti in uscita</i>	Sostanze trasferite in misura superiore al 90% in meno di tre prodotti in uscita.	Cl, Sn e Zn
<i>Sostanze ripartite in modo molto uniforme</i>	Sostanze ripartite in misura superiore al 5% in cinque dei dieci prodotti in uscita.	Cd, Pb e Sb

### Concentrazioni di sostanze in determinate frazioni in entrata e in uscita

Se da un lato vi sono casi in cui il tenore di determinate sostanze nelle singole frazioni di rifiuti PAEE combacia con i dati che figurano in altri studi (ad es. concentrazioni di metalli in circuiti stampati), dall'altro sussistono però anche notevoli divergenze (ad es. in merito al pentaBDE negli involucri di plastica, nei pannelli posteriori dei televisori e nei cavi di rame, come pure alle concentrazioni di Sb presenti nei circuiti stampati). Simili differenze vanno spiegate o dovrebbero comunque essere analizzate con maggiore attenzione. Nei prodotti a granulometria fine scaturiti dal trattamento meccanico applicato dall'azienda di riciclaggio di rifiuti EE esaminata, oltre al tenore di metalli ovviamente alto nelle frazioni metalliche ed ai notevoli carichi di composti organici e dei loro componenti Cl, Br, P nelle frazioni di materiale plastico, sono stati rilevati consistenti carichi di composti organici e di Cl, Br, P nelle frazioni metalliche, come pure alte concentrazioni di metallo nelle frazioni di plastica. Nel caso dell'azienda esaminata si può partire dal presupposto che una successiva separazione di una parte delle frazioni metalliche a granulometria fine, di cui non è stato effettuato un bilancio per ragioni finanziarie, permetta di ottenere un'ulteriore notevole riduzione degli elementi o composti legati alla plastica. Tali "impurità" svolgono un ruolo soprattutto nell'ambito della valutazione delle questioni attinenti al riciclaggio ed allo smaltimento delle sostanze contenute in questi prodotti (problematica del deposito finale delle sostanze).

L'indagine prova anche che la separazione manuale di pile, condensatori ed altri vettori di inquinanti può generare un forte calo di PCB e Hg nelle frazioni in uscita. La selezione manuale o meccanica non è invece in grado di ottenere tale risultato (o può raggiungerlo solo in parte) per quanto riguarda altri inquinanti legati in diversi materiali presenti nei principali componenti degli apparecchi EE (Cd, Pb, Sb ecc.). Una parte delle polveri generate dall'impianto di depurazione dell'aria di scarico è notevolmente carica di inquinanti e contiene circa 10-45 mg/kg di PCB nonché percentuali non trascurabili di PIB.

## **Carenza di dati, necessità d'intervento e di ricerca**

### **Controlli periodici a livello di flusso di sostanze ("estensione del bilancio delle sostanze")**

L'analisi dei flussi di sostanze qui illustrata si basa sui risultati emersi da una campagna di misurazione strettamente limitata nel tempo. I dati pubblicati per la prima volta dalla presente ricerca scaturiscono pertanto da una "misurazione puntuale". Per poter individuare in maniera significativa le variazioni nel tempo della composizione delle sostanze contenute nei rifiuti PAEE è invece necessario un monitoraggio periodico a lungo termine. Tali informazioni possono essere ottenute attuando il piano di monitoraggio del flusso di sostanze definito nel presente rapporto, il quale potrebbe essere a sua volta integrato nei progetti già esistenti in materia di bilancio delle sostanze. L'approccio descritto permetterebbe inoltre una valutazione seria dei risultati di determinate misure, ad esempio per quanto riguarda la limitazione di certe sostanze negli apparecchi elettrici ed elettronici oppure il controllo degli accordi volontari conclusi nel settore.

### **Banche dati insufficienti per le pile**

Nel corso del presente progetto si è constatato che i dati relativi alle concentrazioni attuali di inquinanti nelle pile smaltite in Svizzera sono estremamente inaffidabili, se non addirittura assenti. L'elaborazione di una banca dati migliore o più aggiornata, basata ad esempio sull'analisi del flusso di sostanze in un impianto per il trattamento delle pile, sarebbe non solo utile ma anche necessaria e servirebbe tra l'altro per valutare la necessità di misure volte ad incrementare il tasso di recupero delle pile usate.

### **Surrogati di prodotti ignifughi vietati o controversi**

La necessità di compiere ricerche su prodotti ignifughi alternativi è dettata in particolare dalle seguenti ragioni:

Le indagini eseguite nell'ambito del presente progetto si sono concentrate su cinque prodotti ignifughi bromati che occupano fette di mercato significative e dei quali si sta attualmente discutendo l'abbandono. Lo studio fornisce inoltre primi dati concernenti il tenore attuale di fosforo. Sulle quantità di prodotti ignifughi a base di fosforo utilizzate negli apparecchi EE, come pure su quelle di altri composti bromati (ad esempio polimeri bromati e TBBPA con legame covalente) o di prodotti ignifughi a base di altri elementi (ad es. fluoro nell'acido sulfonico del perfluorobutano) non ci sono praticamente dati disponibili. I risultati della presente analisi dei flussi di sostanze mostrano che soltanto il 40% circa dell'apporto globale di bromo può essere spiegato con la quantità di questo elemento contenuta nei composti esaminati (pentaBDE, octaBDE, decaBDE, additivi TBBPA e HBCD) e con i carichi di bromo generati dalle applicazioni conosciute di TBBPA con legami reattivi nei circuiti stampati (che secondo la procedura di analisi utilizzata ha potuto essere misurato soltanto sotto forma di bromo totale). Si ignora pertanto la forma del 60% del bromo contenuto nei PAEE analizzati.

### **Emissioni nell'ambiente e problematica delle diossine e dei furani alogenati**

Nell'ambito del presente progetto si è rinunciato ad esaminare le emissioni nell'ambiente (atmosfera) e la presenza, la persistenza o la formazione di diossine/furani clorati/bromati, in quanto non erano previste indagini a tale riguardo. Se si tiene però conto della composizione dei rifiuti EE, con il loro alto tenore di composti organici bromati e di diversi metalli, i quali, in determinate circostanze (ad esempio in presenza di un aumento della temperatura in parti dell'impianto), possono catalizzare la formazione di dibenzodiossine e dibenzofurani, ci sembra alquanto indicato effettuare un'indagine più approfondita sul grado di inquinamento di determinati prodotti in

uscita selezionati, dell'aria dei locali e dell'aria da scarico depurata dalle diossine e dai furani polialogenati.

### **Flussi residui di elementi e composti legati alla plastica nei rifiuti metallici riciclati**

Le scarse risorse finanziarie hanno indotto a rinunciare, nell'ambito del presente progetto, all'effettuazione di un bilancio relativo all'ulteriore separazione di una parte della frazione metallica a granulometria fine (riduzione degli elementi/composti legati alla plastica nelle frazioni metalliche), come pure all'analisi di piccole quantità residue contenute in alcune frazioni di rifiuti metallici (frazioni di materiale ferroso grossolano, materiale ferroso fine, rifiuti frazioni di rifiuti metallici da 1 a 4). È auspicabile che un futuro progetto possa determinare le quantità residue delle frazioni non metalliche e dei composti organici esaminati.

### **Valutazione della metodologia applicata**

Contrariamente alle misurazioni puntuali (in genere meno approfondite) delle concentrazioni di sostanze di determinati prodotti generati dal trattamento di rifiuti, la presente analisi dei flussi di sostanze fornisce anche i dati sulla ripartizione di tali sostanze fra i prodotti in entrata e quelli in uscita (coefficiente di trasferimento). Tale approccio permette una rappresentazione complessiva del processo esaminato. Grazie a queste informazioni si possono riconoscere tempestivamente ed utilizzare, nel quadro di decisioni aziendali e della gestione dei rifiuti, sia le potenzialità di ottimizzazione del processo di trattamento sia le variazioni della composizione delle frazioni in entrata ed in uscita. I risultati del presente studio hanno confermato che l'analisi complessiva del flusso di sostanze permette di eseguire importanti controlli di qualità (ad esempio controlli di plausibilità dei dati emersi dalle analisi sulla base di confronti tra i materiali in entrata e quelli in uscita) che, altrimenti, sarebbero impossibili.

Lo studio ha mostrato quanto sia giustificata la preparazione mirata dell'esperimento ai fini della qualità dei risultati (preparazione di un mix rappresentativo di materiali in entrata, pianificazione ottimale dell'esperimento). Ed i risultati ottenuti provano l'efficacia del piano di prelievo, preparazione ed analisi dei campioni. La corrispondenza, generalmente buona, tra le misure comparative (misure di assicurazione di qualità interne ed esterne a livello di laboratorio) conferma infine l'ottima qualità dei risultati stessi.

## Summary

### Motivation/goals

The production of electrical and electronic equipment (EE equipment) has increased continuously over the past decades, both in Switzerland and worldwide. In quantitative and qualitative terms, EE equipment now occupies an increasingly prominent position, not only in the field of consumer goods, but also in the waste management. Thus the quantity of EE equipment imported into Switzerland has increased over the past 25 years by 800%. Electrical and electronics scrap (EE scrap) contains substantial quantities of reusable materials including metals, which can be recovered in the form of secondary raw materials. On the other hand it also contains significant quantities of substances such as antimony, lead, cadmium, mercury, PCB and brominated organic compounds deleterious to health and the environment. Where these are not properly disposed of, their release may represent a hazard to humans and the environment.

More than a decade ago, efforts began in Switzerland to establish separate collection of disused EE equipment. In 1990, the Swiss Waste Disposal Foundation (S.EN.S) was established with the single purpose of managing the disposal of refrigeration equipment and EE scrap. After a short interval, the Swiss Association for Information, Communications and Organisation Technology (SWICO) introduced a recycling and disposal scheme for office electronics and IT equipment. Based on the Environmental Protection Law, the Ordinance on the Return, the Taking back and the Disposal of Electrical and Electronic Appliances (ORDEA) entered into force in 1998. The necessary disposal procedures are monitored by independent inspectors appointed by the S.EN.S and the SWICO<sup>1</sup>. Audits are taken of material flows in disposal plant, involving measurement of mass flows of selected fractions and materials such as cables and plastics. This is an important first step in monitoring performance at the material flow level.

To-date, no systematic analysis of the substance flows (i.e. of chemical elements and compounds) associated with the disposal of EE equipment exists in Switzerland. Moreover, the composition of EE scrap can change significantly both due to legislative provisions and in the wake of technical, economic and social developments. Chemical analysis of the substances contained in EE scrap therefore represents a useful procedure, not only in monitoring performance at the material flow level, but also in determining changes in composition and in assessing the efficacy of control measures.

The project represents the first Swiss investigation of substance flows for chosen elements (Cd, Cu, Hg, Br etc.) and organic compounds (brominated flame retardants and PCB) in the processing of scrap from small electrical and electronics equipment (EEKG scrap) in a modern disposal installation. Concentration measurements of given substances in the material flow and output streams of the installation were performed. From these, transfer coefficients were calculated enabling the output quantities to be determined from an inventory of the input materials. Furthermore, the results of the substance flow analysis enabled recommendations for efficient substance flow monitoring in EE scrap disposal installations to be prepared.

---

<sup>1</sup> Independent inspectors of the S.EN.S and SWICO: Carbotech AG, Basel, Ecoservices (Yverdon) Sàrl, Yverdon-les-Bains, EMPA, St. Gall and Roos+Partner AG, Lucerne

## Procedure

To ensure the efficient performance and evaluation of the large-scale tests in the disposal plant, a scheme for sampling, sample preparation and sample analysis was prepared in advance of the tests. First, an input mix was prepared of the appliances most frequently occurring in EEKG scrap, i.e. of small electrical and electronic equipment, to best approximate the current Swiss mix. Large pieces of equipment were intentionally excluded. In the tests, which were carried out in August 2003 over a period of three days, a total of 230 t of well-mixed EEKG scrap was processed. The input and output quantities were weighed. Samples were taken from the output streams as specified in the sampling plan, these prepared and the substances of interest analysed. The substance flows were determined by multiplying the substance concentrations measured in the output streams with the mass flows. Finally, the composition of the EEKG scrap (input) was calculated from the aggregated substance flows divided by the total mass of EEKG scrap. The transfer coefficients enabling the output products to be determined from the inventory of input materials were also calculated. The uncertainties in the results were assessed at each stage of the evaluation.

## Treatment process

For the purposes of the present substance flow analysis, a large and modern disposal installation was chosen, in which one-quarter of the EE scrap disposed of in Switzerland is processed. The plant, which is based on current technology, was taken into service in 2002. A combination of manual and machine procedures is used, whereby the EE scrap is cut up, crushed and finally sorted into discreet product streams. The output comprises scrap iron, non-ferrous metal fractions, PC and TV casing components (consisting of wood and plastics), granulates of mixed plastics, cathode ray tubes, printed circuit boards, copper cables, components containing organic pollutants such as batteries and condensers, and fine particulates (dust). The machine processes cover breaking of / crushing the equipment in a hammer mill, separating the materials and components according to density, granulate size and magnetic properties, and multiple pulverisation by milling.

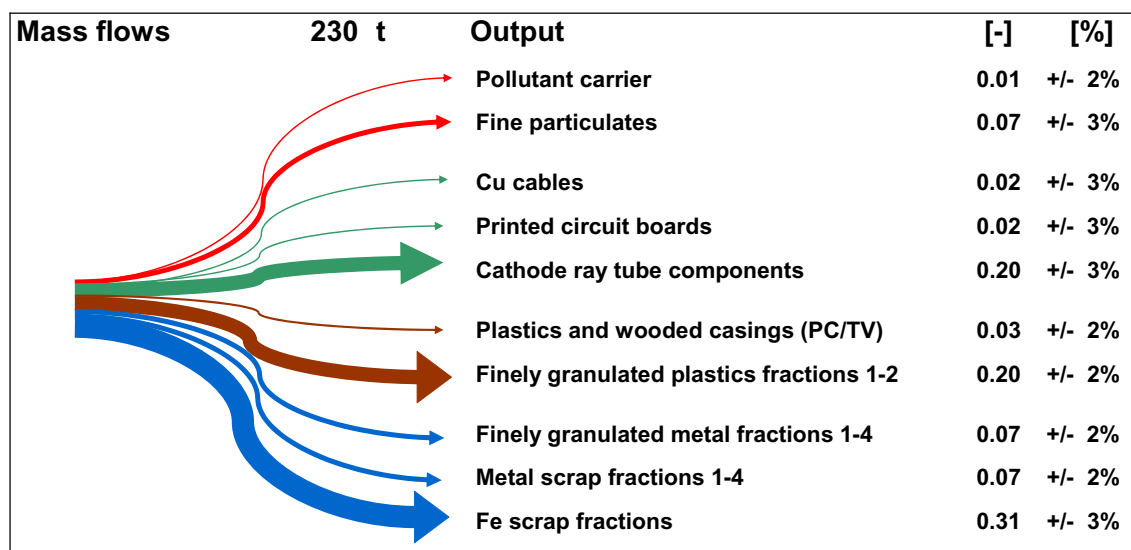
## Results and conclusions

### Composition of EEKG scrap

The fractional composition of the EEKG scrap input was determined in the test via the output products (Fig. 1). The values determined were 45% metal, 23% plastics, 20% cathode ray tube components (glass and metal), 7% fine particulates (mainly consisting of metals and plastics), 2% each of printed circuit boards and Cu cables, and 0.6% batteries and condensers. These are in good agreement with the values determined in Switzerland in 2002. The composition of the input mix may roughly be regarded as representative of the composition of scrap from small electrical and electronics equipment in Switzerland in 2003.



Fig. 1: Mass transfer-coefficient [-] from EEKG scrap into the output products including the relative width of uncertainty [%]. The range of uncertainty quoted corresponds approximately to the 95% confidence interval.



### Substances in EEKG scrap

The following table shows the average content of substances in EEKG scrap requiring disposal in Switzerland as determined at the DRISA AG/IMMARK AG disposal installation in Regensdorf in August 2003. The range of uncertainty was assessed using the 95% confidence interval.

Tab. 1: Average substance content [mg/kg] of scrap from small electrical and electronic equipment in Switzerland in 2003. The range of uncertainty quoted corresponds approximately to the 95% confidence interval.

Element / Substance	Average value	Range of uncertainty	Element / Substance	Average value	Range of uncertainty
	[mg/kg]			[mg/kg]	
Al	49'000	± 4'000	Sn	2'400	± 100
Sb	1'700	± 200	Cl	9'600	± 1'400
Pb	2'900	± 500	Br	5'500	± 300
Cd	180	± 50	P	360	± 220
Cr	9'900	± 1'700	PentaBDE	34	± 4
Fe	360'000	± 10'000	TBBPA	1'400	± 100
Cu	41'000	± 3'000	HBCD	17	± 4
Ni	10'300	± 1'600	OctaBDE	530	± 30
Hg	0.68	± 0.22	DecaBDE	510	± 40
Zn	5'100	± 800	PCB Sum	13	± 4

To-date, very few measurements of the substance content of EEKG scrap have been published. In 1996, substance concentrations in small electrical equipment were determined in a German study (Lower Saxony Environmental Protection Agency, 1998). The study produced very similar results as in the present study for some substances. For others, although the results differed substantially, the differences were plausible (e.g. lower values for Sb, Br and PBDE, reflecting the less frequent use of BFS at the time). Nevertheless, since the studies were carried out under quite different conditions, direct comparison is not always possible. In addition to methodical differences, a much smaller sample was used in the German study, and there were also significant deviations in the composition of the EEKG scrap used. In an unpublished Swiss study

based on tests at the Sohlenthaler Recycling AG (Eichert et al., 2002), the suitability of different processes was analysed, the potential for optimisation determined, and the mass distribution of reusable materials in the process determined. The SWICO environmental limit values were verified. Material flows and substance concentrations of selected elements in some output fractions were determined. No data were given for the input substance concentrations in EE scrap. Furthermore, the study included 15% large equipment. The percentage input fractions, i.e. 13% household electronics, 63% EDP electronics, 8% small equipment and 15% large equipment, deviate significantly from the composition used in the present study. A direct comparison of the two studies would therefore only be possible under closely defined conditions.

A comparison with the results of a national substance flow analysis for brominated flame retardants, and with market studies carried out by the chemical advisory services in the cantons mostly gave very good agreement (i.e. similar values or plausible increase) for TBBPA and octaBDE. However, for pentaBDE (significantly higher value) and decaBDE (significantly lower value despite the increasing global trend in production), the results diverge substantially. The ratio Br:Sb of 3.2 determined in the present work lies within the range quoted in the literature, but somewhat above the values of 2.0-3.0 found in the intercantonal market study. Further direct comparisons with the substance concentrations measured in EEKG scrap in Switzerland and elsewhere are not possible.

A further comparison was made between the composition of domestic waste and EEKG scrap in Switzerland. Although the quantity of EEKG scrap only amounts to about 1/30 of that of domestic waste, the yearly substance flows of Br, Cu, Cr and Ni in the former are between 120% and 500% greater than in the latter. Also, considering that although the annual flows of the elements Sb, Sn and Cd in EEKG scrap "only" amount to some 60-90% of those in domestic waste, it is clear that even a relatively small percentage of EEKG scrap in domestic waste can significantly alter its composition.

Several publications quote the concentrations of given substances in the total plastics fraction of EEKG scrap. The present results for Cl, Br, Cu, Cr and Zn are in the same range as those given in the literature, whereas those for Cd, Pb, Sb, Sn, Ni, Cr and Fe generally lie at the upper limits, and indeed in some cases significantly above, the published values. The P concentrations lie substantially below the published values. A comparison of the total plastics mix in EEKG scrap with an average polymer mix weighted according to the percentages of plastics on the market shows that with the exception of Cl, Sb and Pb, the concentrations may diverge by up to 10 000%. In general, it may be concluded that the results of market analyses can be applied neither to isolated sectors of waste management, nor to individual fractions in disposal processes.

### **Distribution pattern of substances in EEKG scrap**

The distribution patterns of substances in the output stream of the EE scrap treatment process may be divided into five groups (Tab.2).

Tab. 2: Distribution patterns of substances in the output stream from scrap from small electrical and electronic equipment in the Immark/Driza AG works in August 2003.

<i>Substances mainly attached to plastics</i>	Substances of which >80% find their way into the output fractions consisting mainly of plastics.	Br, BFS and P
<i>Substances mainly attached to metals</i>	Substances of which >75% find their way into the output fractions consisting mainly of metals.	Fe, Cr, Ni and Cu
<i>Highly concentrated pollutants</i>	Substances of which >70% are diverted to an output product (pollutant carrier) by manual separation/sorting.	Hg, PCB
<i>Substances confined to certain output products</i>	Substances of which >90% are transferred to fewer than three output products.	Cl, Sn and Zn
<i>Very uniformly distributed substances</i>	Substances that occur in quantities >5% in at least five of the ten output products.	Cd, Pb and Sb

### Substance concentrations in chosen input and output fractions

The substance content of certain input fractions of EEGG scrap shows good agreement with data taken from the literature (e.g. metal concentration of printed circuit boards), although in some cases large differences were found (e.g. pentaBDE in plastics casings, TV back covers and Cu cables; Sb in printed circuit boards). Differences of this order need to be explained and/or must be carefully examined.

The finely granulated products resulting from mechanical pre-processing in the EE scrap disposal installation investigated were analysed. The metal fractions unsurprisingly showed a high metal content, and the plastics fractions a high percentage of organic compounds, together with their constituents Cl, Br and P. The metal fractions, however, were also found to contain large quantities of organic compounds, especially those containing Cl, Br and P, while the plastics fractions had high metal concentrations. In the present case, the preparation of substance balances by post-sorting certain of the finely granulated metal fractions (which was not performed for financial reasons) would unquestionably have led to significant lower concentrations of the organic elements/compounds occurring in these fractions. This so-called 'contamination' phenomenon is of relevance in the assessment of the recycling and disposal modalities for the products concerned at the substance level ('final sink' problem).

It was also found that a strong decrease of the PCB- and Hg- concentration in the output fractions could be achieved through manual sorting of batteries, condensers and other pollutant carriers. Dilution of other pollutants (Cd, Pb, Sb, etc.), for example by hand sorting or mechanical pre-treatment, is hardly possible for certain other materials in the principal components of EE equipment. Particulate residues from the air filters often have high pollutant concentrations, with a PCB content of between 10 and 45 mg/kg and non-negligible quantities of BFS.

### Data gaps, required action and research

#### Regular checks at substance level ("extended substance bookkeeping")

In the present substance flow analysis, which is the first of its kind to be carried out in Switzerland, the results are given in the form of spot measurements over a very restricted period of time. However, to obtain a clear picture of the time variation of the substance content of EEGG scrap, regular monitoring over a longer period is required. To enable the necessary information to be obtained, the substance flow monitoring scheme suggested here could be included as a

supplement to the somewhat tentative substance bookkeeping procedures already in place. It would also permit a consistent assessment to be made of the efficacy of control measures such as restrictions on certain substances in electrical and electronic equipment, and monitoring of voluntary agreements.

### **Poor data basis for batteries**

During the project it was discovered that the data on substance concentrations in batteries disposed of in Switzerland are either very unreliable or non-existent. To close this gap, it would be useful to perform a substance flow analysis in a battery processing plant. This could also be used to assess the need for measures to raise the return quota of used batteries.

### **Substitutes for prohibited and disputed flame retardants**

The search for alternative flame retardants must be undertaken for two reasons:

The present study was restricted to the investigation of the five brominated flame retardants with a substantial share of the world market, whose phase-out is presently the subject of intensive discussion. It also provides the first available data on phosphorus content. At present, hardly any data is available on the following substances in EE equipment: flame retardants based on phosphorus and other brominated compounds (e.g. brominated polymers and covalently bound TBBPA), and those based on other elements (e.g. fluorine in perfluorobutane acid). The present analysis showed that only about 40% of the total bromine input can be accounted for by the bromine flows in the compounds analysed (pentaBDE, octaBDE, decaBDE and additive TBBPA and HBCD) and by the reactively bound TBBPA commonly used in printed circuit boards (which in the present analysis could only be detected in combination with total bromine). Thus for 60% of the bromine input, it is not known in what form the bromine was present in the EEKG!

### **Emissions to the environment and problems associated with halogenated dioxins and furans**

Neither the emission of chlorinated/brominated dioxins/furans to the environment (atmosphere), nor their origin, formation, or occurrence, were included in the present work. However, in view of the elevated content in EEKG scrap of brominated organic compounds and metals (which under certain circumstances can engender the formation of dibenzodioxins/dibenzofurans by catalytic action in parts of the plant, e.g. where elevated temperatures prevail), a more detailed investigation of the presence of polyhalogenated dioxins/furans in selected output products, room air and (filtered) spent air would be very desirable.

### **Residual flows in recycled metal scrap**

It was decided for financial reasons not to perform a substance balance by post-sorting certain of the finely granulated metal fractions (which would allow further lowering concentrations of the elements/compounds bound to plastics in these). Likewise, the smaller residues in certain of the metal scrap fractions (Fe coarse scrap, finely granulated Fe scrap and metal scrap fractions numbers 1 to 4) were not analysed. The question as to how large the residues of non-metals and/or organic compounds in these output fractions are, would need to be addressed in a future study.

---

## Methodology assessment

Point concentration measurements of substances in output products arising in the EE scrap treatment process are usually insufficiently conclusive. By contrast, substance flow analysis not only provides statistically well-founded data on the substance content of the EEKG scrap input, but also permits to determine the distribution of the input substance flow into the different output fractions by using so called transfer coefficients. This in turn enables a comprehensive understanding of the process to be investigated, and the potential for optimisation of the treatment procedure to be identified. Furthermore, changes in the composition of substances in the input and the output fractions can be detected at an early stage, and the information obtained employed in decision making both at the works and management levels. The present study confirmed that a comprehensive substance flow analysis would permit essential quality checks to be performed (e.g. plausibility checks on analysis data based on input/output comparisons), which would otherwise not be possible.

The present study showed that the quality of the results can be enhanced by appropriate preparation, e.g. by optimum planning of the tests and provision of a representative input mix. The excellent quality of the results was shown by the good general agreement with control measurements (i.e. those performed during internal and external quality assurance procedures at laboratory level), and served to demonstrate the efficacy of the specially designed sampling, sample pre-treatment and analysis scheme adopted.

# 1 Einleitung, Projektmotivation

## Wachsende Bedeutung von Elektro- und Elektronikgeräten in der Entsorgung

Elektro- und Elektronikgeräte erlangen aus quantitativer und qualitativer Sicht als Konsumgüter und später in der Abfallwirtschaft eine immer grössere Bedeutung. So stieg beispielsweise gemäss Angaben des Schweizerischen Wirtschaftsverbands der Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik (SWICO) die Menge an in die Schweiz importierten Elektronikgeräten (Unterhaltungselektronik, Computer und Büroelektronik) zwischen Anfang der 80er Jahre und Ende der 90er Jahre um beinahe 800%. Die Material- und Stoffzusammensetzung der Elektro- und Elektronikgeräte verändert sich infolge kurzer Innovationszyklen innerhalb weniger Jahre deutlich (z.B. Umstellung von Bildröhren auf andere Bildschirmtechnologien, wie z.B. LCD-Bildschirme). Neben der Mengenentwicklung der verschiedenen Produktgruppen bzw. Abfallfraktionen sind auch Trends der stofflichen Zusammensetzung (anorganischen sowie organischen Schadstoffen und Ressourcen) von besonderem Interesse.

## Wichtige anorganische sowie organische Schadstoffe und Ressourcen

EE-Schrott enthält abgesehen von rezyklierbaren Wertstoffen auch relevante Konzentrationen von gesundheits- und umweltgefährlichen Stoffen wie Antimon, Blei, Cadmium, Quecksilber, PCB und bromierte organische Verbindungen, die bei nicht sachgemässer Entsorgung frei gesetzt werden können und ein Risiko für Mensch und Umwelt darstellen. Bromierte Flamm- schutzmittel (BFS) werden seit einigen Jahren kontrovers diskutiert. Polybromierte Biphenyle (PBB) sind gemäss Stoffverordnung, Anhang 3.1, in der Schweiz verboten. Ein Gefährdungspotenzial der untersuchten Flamm- schutzmittel besteht in mehrerer Hinsicht. Sie gelten als persistent und können sich in der Nahrungskette anreichern (z.B. PBB, PentaBDE, TBBPA). Bei unkontrollierter Verbrennung (z.B. von DecaBDE) kann es zur Bildung von bromierten Dioxinen und Furanen kommen, und es gibt Hinweise auf ein kanzerogenes Potenzial (z.B. DecaBDE) und eine östrogene Wirkung (z.B. PentaBDE, TBBPA). Erste Messungen in Elektro- und Elektronikgeräterecyclingbetrieben zeigen erhöhte PBDE- Gehalte in der Innenluft, in Staubproben [Sjördin et al., 2001] sowie im Blut von Arbeitern [Hovander et al., 2001]. Eine in Bearbeitung befindliche Studie über vier der meistverwendeten BFS [Morf et al., 2002] zeigt, dass aus dem Konsum grosse Flüsse in die Prozesse der Abfallwirtschaft gelangen. Welche Mengen an Emissionen aus den abfallwirtschaftlichen Prozessen resultieren, ist bis heute wenig (Verbrennung) bis gar nicht (Verwertung, Deponie, unkontrollierte Entsorgung) bekannt. Es ist deshalb notwendig, dass Stofffluss-Untersuchungen über die bekannten Problemstoffe in den wichtigsten abfallwirtschaftlichen Prozessen (z.B. Grossshredderanlagen, Sortieranlagen, thermische Behandlung) durchgeführt werden, damit qualifizierte Entscheidungen möglich sind, welche Massnahmen zum Schutz des Menschen (Arbeitshygiene) und der Umwelt (Emissionsminimierung) sowie für die Gewährleistung der Qualität von zurück gewonnenen Rohstoffen in der Entsorgungs- und Wiederverwertungsphase getroffen werden müssen.

## Aufbau von Separatsammelsystemen, Wahrnehmung der Produktverantwortung

Vor mehr als zehn Jahren wurde in der Schweiz damit begonnen, Separatsammelsysteme für ausgediente Elektro- und Elektronikgeräte aufzubauen. Am 20. August 1990 wurde die Stiftung Entsorgung Schweiz S.EN.S. gegründet. Sie hat während zehn Jahren gesamtschweizerische Entsorgungslösungen für FCKW-haltige Kühlgeräte sowie Elektro- und Elektronikschrott entwickelt und erfolgreich etabliert. Im Jahre 2004 bestanden 27 durch die S.EN.S lizenzierte Entsorgungsbetriebe. 1994 hat der SWICO (Schweizerischer Wirtschaftsverband der Informations-,

Kommunikations- und Organisationstechnik) ein umfassendes Recycling- und Entsorgungskonzept für Computer und elektronische Bürogeräte eingeführt. Die Entsorgungsaktivitäten werden für S.EN.S und SWICO durch unabhängige Kontrollbeauftragte<sup>1</sup> überprüft. Dabei werden in Audits auch betriebliche Materialflüsse ermittelt, d. h. Massenflüsse und deren Entsorgungswege von bestimmten Fraktionen bzw. Materialien (Güter, wie z.B. Kabel, Kunststoffe etc.).

### **Gesetzliche Regelung über die Rückgabe, Rücknahme und Entsorgung von EE-Geräten**

Auf Gesetzesebene wurde am 1.7.1998 basierend auf dem Umweltschutzgesetz die Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) in Kraft gesetzt. Unter die VREG fallen elektrisch betriebene Geräte der Unterhaltungselektronik, Geräte der Büro-, Informations- und Kommunikationstechnik und Haushaltgeräte. In der Verordnung werden die Rückgabepflicht für Endbesitzer und die Rücknahmepflicht des Handels verlangt. Demnach müssen Konsumentinnen und Konsumenten ausgediente Elektro- und Elektronikgeräte einem Händler, Hersteller, Importeur oder einem qualifizierten Entsorgungsunternehmen zurückgeben. Zulässig ist auch die Rückgabe an eine öffentliche Sammlung oder Sammelstelle für Geräte. Auf der Gegenseite müssen Fach- und Detailhändler elektrische und elektronische Geräte der Art, die sie im Sortiment führen, zurücknehmen. Hersteller und Importeure müssen elektrische und elektronische Geräte der von ihnen hergestellten oder importierten Marken zurücknehmen. Sie können Dritte mit der Rücknahme beauftragen. Diese Verordnung soll sicherstellen, dass diese Geräte mit ihrem Schadstoff- und Ressourcenpotenzial nicht in den Siedlungsabfall gelangen und umweltverträglich entsorgt werden. Sie bildet zusammen mit weiteren Verordnungen (wie z.B. der Stoffverordnung, StoV, und der Verordnung über den Verkehr mit Sonderabfällen, VVS), freiwilligen Branchenvereinbarungen und den kontrollierten Entsorgungsbetrieben eine gute Voraussetzung für eine optimierte, nachhaltigere Abfallwirtschaft.

Als Basis für eine optimale Umsetzung der VREG hat das BUWAL im Jahre 2000 mit Unterstützung verschiedener Arbeitsgruppen aus Behörden und Wirtschaft als Vollzugshilfe eine Wegleitung zur VREG herausgegeben. Als wichtige Teile dieser Wegleitung sind auch Faktenblätter zum Stand der Entsorgungstechnik und die Musterpapiere zur Erteilung von VREG-Bewilligungen enthalten. In der Entsorgungsbewilligung legt jeweils der entsprechende Kanton unter anderem auch die Art und den Umfang der Meldung über die entsorgten Geräte fest. Im Anhang der Wegleitung befindet sich dazu ein Stoffflussdatenblatt, mit dem die nötigen Angaben gemacht werden können. Im so genannten „Stoffflussdatenblatt“ werden pro Kalenderjahr die Inputmengen sowie die weitergegebenen und zwischengelagerten Mengen an einzelnen Gerätekategorien (z.B. Haushaltskleingeräte) und Neutral- und Wertstoffen (z.B. Kunststoffe, Leiterplatten) angegeben. Die Faktenblätter sollen allen interessierten Kreisen zur Information des heute geltenden Standes der Technik auf dem Gebiet der Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten dienen. Mit diesen Faktenblätter werden vor allem Entsorgungsziele vorgegeben – nicht aber Verfahren. Die Blätter werden bei Bedarf angepasst.

Bald sechs Jahre seit der Inkraftsetzung der VREG in der Schweiz, sind deren Ziele hinsichtlich der Rückgabe/Rücknahme bis auf einige kleine Gerätegruppen einheitlich erfüllt.

---

<sup>1</sup> Unabhängige Kontrollbeauftragte der S.EN.S und SWICO: Carbotech AG, Basel, Ecoservices (Yverdon) Sàrl, Yverdon-les-Bains, EMPA, St. Gallen und Roos+Partner AG, Luzern

S.EN.S und SWICO ermöglichen für ihren Gerätebereich die Gratisrücknahme dank der Finanzierung durch vorgezogene Entsorgungsbeiträge, die der Kunde beim Kauf eines neuen Gerätes bezahlt.

Mit der Revision der VREG werden neue Gerätekategorien in die Verordnung aufgenommen. Ab 1. Januar 2005 gelten die Bestimmungen der VREG auch für elektrisch betriebene Werkzeuge (ohne ortsfeste industrielle Grosswerkzeuge) und für Sport- und Freizeitgeräte sowie Spielzeug. Ab 1. August 2005 kommen die Kategorien Leuchten und Leuchtmittel (ohne Glühlampen) ebenfalls dazu. Zudem wird die kostenlose Rücknahmepflicht in der Verordnung festgeschrieben. Konsumentinnen und Konsumenten können ihre ausgedienten Geräte ab dem 1. Januar 2005 an jeder Verkaufsstelle gratis zurückgeben.

### **Verbote, Einschränkungen und freiwillige Vereinbarungen bezüglich der Produktion, des Inverkehrbringens und der Verwendung von gefährlichen Stoffen**

Über Einschränkungen bei bromierten Flammschutzmitteln wurde innerhalb der OECD und in diversen Nationen diskutiert. Die OECD entwickelte im Jahre 1990 ein Risikoreduktionsprogramm, für welches ausgewählte BFS nominiert wurden. Auf Grund dieses OECD- Risikoreduktionsprogrammes wurde 1995 weltweit mit den Produzenten von PBB und PBDE auf freiwilliger Basis eine Vereinbarung (Voluntary Industry Commitment, VIC) getroffen. Diese Vereinbarung beinhaltet einerseits den Verzicht auf die Produktion sowie den Export und Import (Ausnahme DecaBB in Europa) von PBB und andererseits für die kommerziell verwendeten PBDE ein striktes Risikomanagement. DecaBDE sollte demnach mindestens zu 97% rein sein und OctaBDE möglichst geringe Anteile an nieder bromierten Diphenylethern aufweisen.

Für verschiedene Stoffe, welche in Elektro- und Elektronikgeräten vorkommen, bestehen in der Schweiz, der EU oder auch weltweit Verbote, Einschränkungen und freiwillige Vereinbarungen bezüglich deren Produktion und Verwendung oder sind in Vorbereitung. Dies trifft z.B. für bromierte Flammschutzmittel zu, welche zu einem grossen Anteil in Elektro- und Elektronikgeräten verwendet werden. Seit 1987 besteht gemäss Anhang 3.1 der eidgenössischen Stoffverordnung ein Verbot für die Herstellung, Abgabe und Import von PBB sowie PBB-enthaltende Produkte und seit 1988 ein diesbezügliches Verwendungsverbot. Der Entwurf der neuen Chemikalien-Reduktionsverordnung (ChemRRV) in der Schweiz sieht vor, das Inverkehrbringen von Elektro- und Elektronikgeräten, deren Bauteile PBB und PBDE enthalten, zu verbieten. Weiterhin ist vorgesehen, das Inverkehrbringen und Verwenden von PentaBDE und OctaBDE sowie das Inverkehrbringen von Gegenständen, welche diese Stoffe enthalten, zu verbieten. Auch auf Europäischer Ebene sind in der EU PentaBDE und OctaBDE gemäss Richtlinie 2003/11/EG vom 6. Februar 2003 zur 24. Änderung der Richtlinie 76/769/EWG ab dem 15. August 2004 verboten. Die Richtlinie 2002/95/EG verlangt, dass nach dem 30. Juni 2006 neu in den Verkehr gebrachte Elektro- und Elektronikgeräte keine PBB und PBDE enthalten. Dieses Verbot gilt auch für Ersatzteile, sofern sie nicht für Geräte bestimmt sind, die vor dem genannten Datum auf den Markt gekommen sind.

Ähnliche Verbote, Einschränkungen bzw. freiwillige Vereinbarungen existieren für weitere Stoffe, wie z.B. verschiedene Schwermetalle (Hg, Cd und Pb).

### **Bewertung von Wirkung und Erfolg der Massnahmen (Erfolgskontrolle)**

Um die Wirkung und den Erfolg von gesetzgeberischen, ökonomischen oder anderen Massnahmen zu prüfen, brauchen Abfallwirtschaft und Behörden aktuelle Informationen über Grösse, Quellen und Senken und Unsicherheit von Material- und Stoffflüssen. Die Datenerhebung



darf sich deshalb nicht nur auf **Material- bzw. Güterflüsse**<sup>1</sup> (Mengen- bzw. Massenflüsse von Fraktionen, Materialien wie z.B. Kabel, Kunststoffe, Eisenschrott etc.) konzentrieren, sondern muss auch **Stoffflüsse**<sup>2</sup>, wie beispielsweise bestimmte Metalle (z.B. Cd, Sb) und Nichtmetall-Elemente (z.B. Cl, Br) oder gesundheits- und umweltrelevante Flammschutzmittel untersuchen. Des Weiteren sollte auch die Unsicherheit der Daten (Fehler) berücksichtigt und diskutiert werden.

Erste Ansätze eines übergreifenden Controllingsystems bestehen heute schon. So werden seit einiger Zeit mittels der Stoffflussdatenblätter Inputmengen der EE-Schrott Fraktionen sowie die weitergegebenen und zwischengelagerten Mengen an einzelnen Gerätekategorien und Neutral- und Wertstoffen gesammelt (Kontrolle der Güterflüsse). Auch werden durch speziell beauftragte Experten<sup>3</sup> die lizenzierten Entsorgungsbetriebe regelmässig überprüft.

Bis heute existiert noch kein Monitoring von wirklichen Stoffflüssen (chemische Elemente und Verbindungen) in der Entsorgung von elektrischen und elektronischen Geräten. Es sind daher auch nur wenige Daten vorhanden, die Risikoabschätzungen oder eine Erfolgskontrolle auf der Ebene von bestimmten chemischen Elementen oder Verbindungen erlauben würden.

In der Abfallwirtschaft werden erste Anwendungen des Stoffflussmonitorings seit wenigen Jahren auf verschiedenen thermischen Abfallbehandlungsanlagen angewandt (z.B. Morf & Brunner, 1999; Morf, 2000). Thermische Abfallbehandlungsanlagen, wie z.B. Kehrichtverbrennungsanlagen (KVA), eignen sich für die Kontrolle der Stoffflüsse einiger wichtiger Schad- (z.B. Hg, Cd) bzw. Rohstoffe (z.B. Zn, Al) in der Siedlungsabfallwirtschaft. Durch Erfassung und Analyse einzelner Produkte (Verbrennungsrückstände) der KVA lässt sich bei bekannter Stoffverteilung mittels speziell entwickelter Methoden (Morf & Brunner, 1998) kostengünstig die elementare Zusammensetzung des Inputs (Kehricht) bestimmen. Ebenfalls im Aufbau ist in einem anderen Bereich der Entsorgung ein optimiertes Stoffflussmonitoring für die Abwasserentsorgung Wiens (Zessner et al., 2003).

Im vorliegenden Projekt sollen anhand der Bilanzierung eines Elektro- und Elektronikschrott-Entsorgungsbetriebes in der Schweiz erstmals Stoffflüsse ausgewählter anorganischer (Cd, Cu, Hg, Pb, Sb etc.) und organischer Schadstoffe (polychlorierte Biphenyle (PCB), polybromierte Diphenylether (PBDE), Tetrabrombisphenol A (TBBPA) und Hexabromcyclododecan (HBCD) etc.) im Verwertungs- und Entsorgungsprozess von Elektro- und Elektronikschrott bestimmt werden. Projektziel wird auch sein, anhand der gesammelten Erfahrungen und Erkenntnissen Vorschläge für ein zukünftiges Monitoringkonzept auf Stoffebene für den Bereich der Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte abzuleiten.

---

<sup>1</sup> Ein Gut besteht aus einem oder mehreren Stoffen. Es ist eine handelbare Substanz, die einen Handelswert besitzt. Dieser kann positiv (z.B. Trinkwasser) oder negativ (z.B. Hausmüll) sein.

<sup>2</sup> Ein Stoff ist definiert als ein Element des Periodensystems (z.B. Kohlenstoff, Chlor) oder eine chemische Verbindung (z.B. Kohlendioxid oder Sulfat). Stoffe bestehen ausschließlich aus einer Art Atome oder Moleküle.

<sup>3</sup> Unabhängige Kontrollbeauftragte der S.EN.S und SWICO: Carbotech AG, Basel, Ecoservices (Yverdon) Sàrl, Yverdon-les-Bains, EMPA, St. Gallen und Roos+Partner AG, Luzern

## 2 Zielsetzung und Fragestellungen

Übergeordnetes Ziel ist die Schaffung von Entscheidungsgrundlagen für die Lenkung von Stoffflüssen für einige ausgewählte anorganische und organische Schadstoffe bzw. Wertstoffe.

Im vorliegenden Projekt sollen für einen bestimmten Zeitbereich Konzentrationen ausgewählter Stoffe in repräsentativen Outputgütern einer modernen Schweizer Behandlungsanlage für Elektro- und Elektronikschrott (EE-Schrott) quantitativ bestimmt und die entsprechenden Stoffflüsse ermittelt werden. Für diese Untersuchungen werden die nachfolgend aufgeführten relevanten Stoffe ausgewählt: **Metalle**: 1. Priorität: Cd, Cu, Hg, Pb, Sb, Sn, 2. Priorität: Al, Fe, Cr, Ni und Zn und **Nichtmetalle** Br und Cl sowie die **organischen Verbindungen** PBDE (PentaBDE, OctaBDE und DecaBDE), TBBPA und HBCD, welche als Flammschutzmittel Anwendung finden und PCB. Phosphor, als alternative Flammschutzmittelsubstanz, wird zu Vergleichszwecken auch stichprobenweise analysiert. Die Untersuchung wird auf die Behandlung von Elektro- und Elektronik-Kleingeräten (EEKG) beschränkt. Elektrogrossgeräte werden nicht in die Bilanzierung der Stoffflüsse einbezogen, weil sie für die Verteilung der Schadstoffe auf die relevanten Outputgüter weniger wichtig sind (mit Ausnahme z.B. PCB-haltiger Kondensatoren in Haushalt-grossgeräten) und weil bei deren Einbezug in die Stoffbilanzierung methodische Probleme zu lösen wären, die den Rahmen dieses Projektes sprengen würden. Die angewandte Methode zur Ermittlung der betrieblichen Stoffflüsse ausgewählter Stoffe soll in diesem Projekt im Hinblick auf eine generelle Verwendung erprobt und kritisch geprüft werden.

### *Fragestellungen:*

1. Wie gross sind die Materialflüsse in den untersuchten Entsorgungsbetrieb (Input) und aus welchen Fraktionen bestehen diese?
2. Welches sind die Produkte und wie gross sind die einzelnen Materialflüsse der Produkte aus dem untersuchten Entsorgungsbetrieb (Outputgüter)?
3. Welche Konzentrationen der jeweiligen Stoffe enthalten die einzelnen Produkte aus dem untersuchten Entsorgungsbetrieb (Schadstoffbelastung der Outputgüter)?
4. Wie gross sind die Transferkoeffizienten der untersuchten Stoffe und deren Unsicherheiten in die verschiedenen Produkte im untersuchten Entsorgungsbetrieb?
5. Aus welchen Gerätetypen und Materialien setzt sich der gewählte Abfallinput zusammen bzw. wie gross sind die Gehalte der untersuchten Elemente und Verbindungen des Abfallinputs sowie die umgesetzten Material- und Stoffflüsse im untersuchten Entsorgungsbetrieb während des Referenzversuchs?
6. Wie soll der untersuchte oder andere ähnliche Entsorgungsbetriebe in Zukunft untersucht werden, um Veränderungen in der stofflichen Zusammensetzung der Abfälle und der damit zusammen hängenden Änderungen der Stoffflüsse möglichst effizient und repräsentativ feststellen zu können?

## 3 Grundlagen

### 3.1 Daten zu Elektro- und Elektronikschrott (EEKG-Schrott) in der Schweiz – ein Überblick

#### 3.1.1 Mengendaten

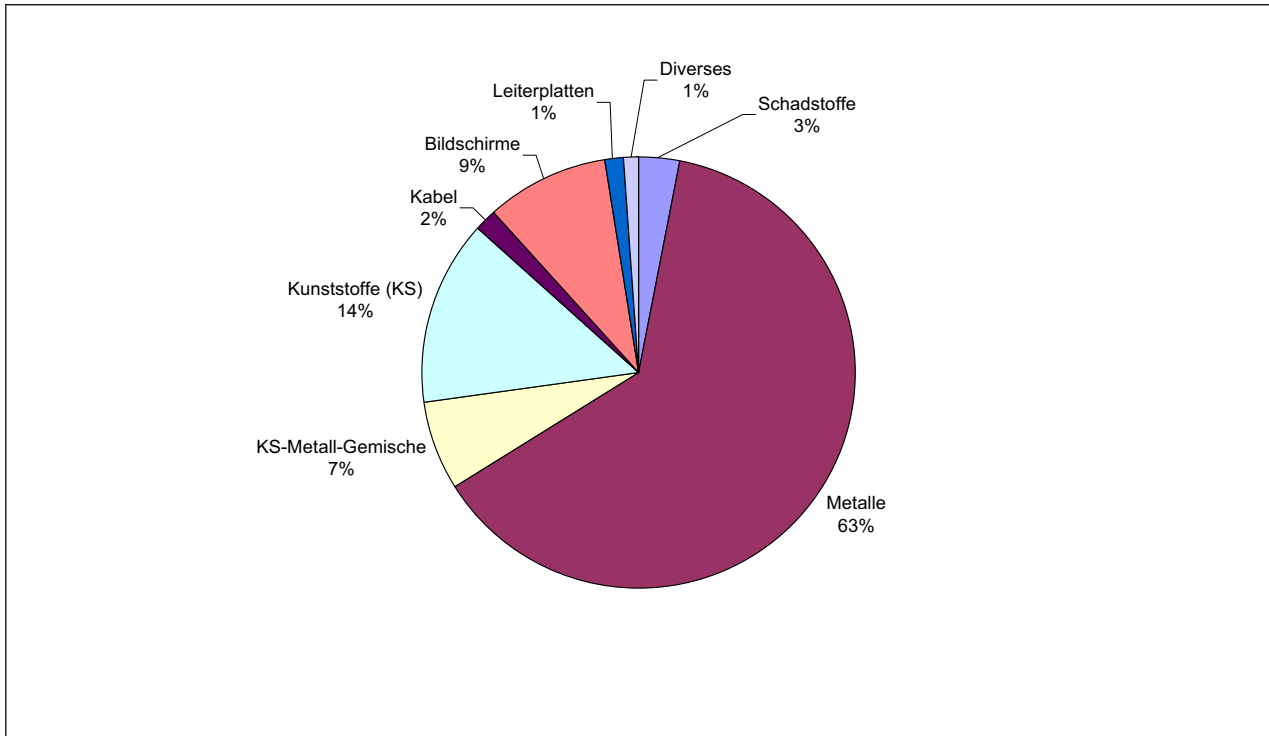
In der Schweiz wurden im Jahr 2003 gemäss [S.EN.S, 2004] durch die S.EN.S. und SWICO rund 71'600 t Elektro- und Elektronikschrott separat gesammelt, entsorgt bzw. einer Aufbereitung zugeführt. Das entspricht einer Menge von knapp 10 kg pro Einwohner und Jahr. Gesamthaft entspricht dies nun beinahe 90 % der jährlich zu erwartenden Abfallmenge im Elektro- und Elektronikbereich von 80'000 t. Neben der Entsorgung über weitere Betriebe mit einer VREG-Bewilligung sind nicht registrierte Exporte, unkontrollierte und nicht konforme Entsorgungen im Inland mögliche Erklärungen für die noch vorhandene Differenz. Tabelle 3-1 zeigt zusammenfassend die verschiedenen EE-Schrott Anteile, welche für das Jahr 2003 gemessen bzw. geschätzt worden sind.

Tabelle 3-1: EE-Schrottmengen in der Schweiz im Jahr 2003 in Tonnen [S.EN.S, 2004]

MATERIAL	MENGEN im JAHRE 2003 in [t]
<b>S.EN.S. und SWICO- Sammlung</b>	
Büro- und Telekommunikation	17'600
Unterhaltungselektronik	10'700
Haushaltsgeräte klein	5'400
Haushaltsgeräte gross	14'700
Kühlgeräte	11'600
Übrige Geräte	2'100
Rundungsfehler <sup>1)</sup>	1'100
<b>Total</b>	<b>63'900</b>
<b>Export</b>	<b>7'700</b>
<b>Geschätzte Menge an EEKG-Schrott im Kehricht</b>	<b>8'400</b>
<b>Gesamthaft angefallene EE-Schrott Menge</b>	<b>80'000</b>

In den Verarbeitungsbetrieben fallen als Outputfraktionen knapp zwei Drittel als Metallfraktionen (63%), 14% als reine Kunststofffraktionen, 9% Bildschirme, 7% Kunststoff-Metall-Gemische, 3% Schadstoffe und mengenmässig unbedeutende Mengen an Kabeln (2%) sowie je 1% Leiterplatten und Diversem an [S.EN.S, 2004] (vgl. Abbildung 3-1).

Abbildung 3-1: Fraktionen aus der Zerlegung und dem Recycling von Elektro- und Elektronikgeräten in der Schweiz [S.EN.S, 2004], Angaben in Gewichtsprozent.



### 3.1.2 Daten zu Stoffflüssen und -konzentrationen

Aktuelle Daten zu Stoffflüssen und Konzentrationen, wobei als Stoffe wirklich chemische Elemente oder Verbindungen, in Schweizer EEKG-Schrott sowie in den Outputfraktionen der Verarbeitungsbetriebe verstanden werden, existieren keine. Es existieren einzelne Analysenwerte zu verschiedenen Outputfraktionen in Betrieben. Diese erlauben aber keine statistisch gesicherten Aussagen bezüglich deren Zusammensetzung und natürlich auch nicht hinsichtlich der EEKG-Schrott Zusammensetzung oder Stoffverteilung in die Outputfraktionen eines Betriebs. Literaturdaten existieren zu Stoffgehalten in verschiedenen Elektro- und Elektronikgerätekomponten (z.B. Leiterplatten) oder zu diversen EEKG-Schrott Fraktionen (siehe Resultatteil).

## 3.2 Der untersuchte Verarbeitungsbetrieb

### 3.2.1 Ideale Voraussetzungen im ausgewählten Betrieb

Die beiden zusammenarbeitenden Firmen Immark AG / Drisa Entsorgung AG sind zusammen in der Schweiz führend im Bereich der Aufbereitung und Entsorgung von ausgedienten Elektro- und Elektronikgeräten. Der Hauptstandort der IMMARK AG ist Regensdorf/ZH, der DRISA Entsorgung AG ist Lausen BL. Daneben betreiben die beiden Unternehmen eine Vielzahl an Annahmestellen im ganzen Land sowie vorwiegend sozial ausgerichtete Zerlegezentren in allen Regionen.

Der EE-Schrott Verarbeitungsbetrieb der IMMARK AG und DRISA Entsorgung AG in Regensdorf wurde aus mehreren Gründen für die Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes ausgewählt.

- a) die Anlage, mit einer Kapazität von jährlich maximal 30'000 Tonnen EE-Schrott (inkl. Kühl- und Grossgeräte) ist der mengenmässig bedeutendste Betrieb in der Schweiz [verarbeitete Menge an Elektro- und Elektronik-Kleingeräten im Jahr 2003: ca. 13'000 t]
- b) die in der modernsten Anlage (Inbetriebnahme 2002) eingesetzten verfahrenstechnischen Prozesse erlauben in Bezug auf Wirtschaftlichkeit, Recyclingquote und Umwelt bisher unerreichte Werte (State of the Art Verfahren).
- c) das im Betrieb verarbeitete EE-Schrottspektrum ist sehr breit und es bestanden ideale Möglichkeiten einen möglichst repräsentativen Versuchs-Mix bezüglich der mittleren Fraktionszusammensetzung von Schweizer Elektro- und Elektronik-Kleingeräten für den Stoffflussanalysen-Versuch bereitzustellen.
- d) Die produzierten Outputprodukte konnten mehrheitlich optimal beprobt werden, eigneten sich in Folge ihrer Konsistenz/reduzierten Heterogenität in der Regel gut zur Beprobung
- e) Die genaue Mengenerfassung aller Input- und Outputfraktionen war mittels Wiegung möglich.
- f) Der Betrieb war selber interessiert eine Stoffflussanalysenuntersuchung durchzuführen und ermöglichte die optimale Durchführung des Versuchs durch seine Unterstützung.

### 3.2.2 Verarbeiteter EE-Schrott und produzierte Outputprodukte

Im Verarbeitungsbetrieb Regensdorf werden folgende Inputfraktionen angenommen: Elektronikgrossgeräte aus Industrie und Gewerbe, Elektro- und Elektronikkleingeräte sowie schon aufbereitete Fraktionen aus vorgeschalteten Sortierbetrieben.

Aus diesem grossen Inputspektrum produziert der Betrieb folgende Outputarten: Eisenschrotte und (Nicht-Eisen-) Metallschrotte, Kunststofffraktionen, Fraktionen mit Schadstoffträgern (Batterien / Kondensatoren), spezielle Komponentenfraktionen (wie Cu-Kabel, Leiterplatten und Bildröhrenkomponenten. Ebenfalls als Output fällt ein Restgemisch an brennbaren Abfällen und Staub aus der Abluftreinigung an.

Bei der Verarbeitung des EE-Schrottes in die Outputfraktionen wird eine möglichst hohe Wiederverwertungsquote angestrebt. Dazu werden die Verarbeitungsprozesse laufend der sich ändernden Inputzusammensetzung sowie den Verhältnissen auf dem Roh- und Altstoffmarkt angepasst.

### 3.2.3 Prozessschema des Betriebs

Die Verarbeitung der verschiedensten EE-Schrott Fraktionen im Betrieb in Regensdorf kann gemäss Angaben des Anlage-Betreibers in drei Stufen unterteilt werden.

- *Triage*

Bei der Triage wird aussortiert, welche Geräte manuell schadstoffentfrachtet werden müssen und welche direkt in die maschinelle Verarbeitung gehen.

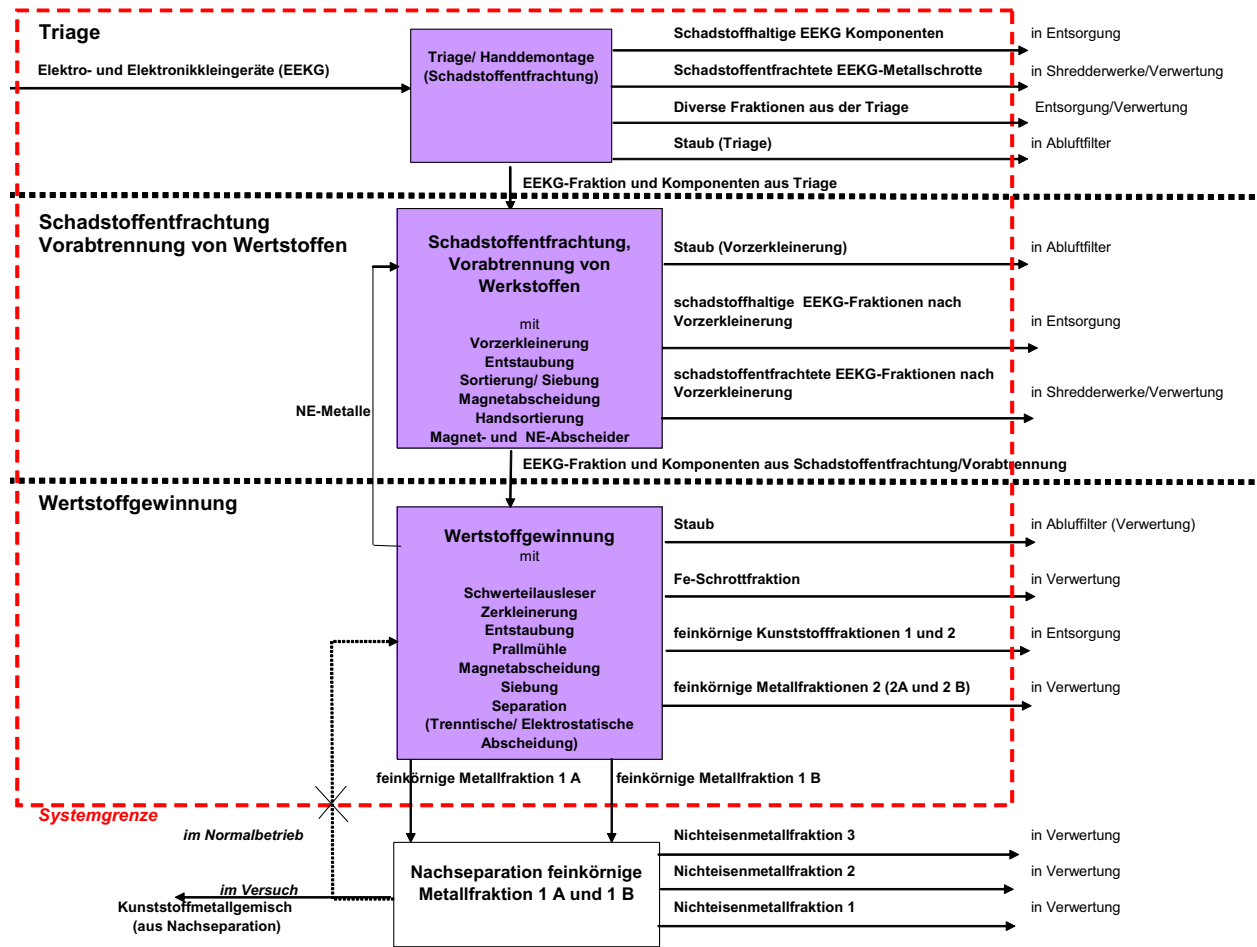
### *- Maschinelle Verarbeitung*

In der ersten Stufe der mechanischen Verarbeitung werden die Geräte mittels Kettenwerk grob zerschlagen. Kleinteile, unter anderem Batterien und Kondensatoren, bleiben dabei unbeschädigt und werden anschliessend dem Massenstrom entnommen. Des weiteren erlaubt dieser Zerkleinerungsprozess die Produktion eines Outputmaterials mit guten Trenneigenschaften unter minimaler Wärmefreisetzung, so dass eine Schadstofffreisetzung minimal begrenzt bleibt. Zusätzlich zu den Schadstoffen werden Metalle, Eisen und Leiterplatten entfernt. Diese Art der mechanischen Schadstoffentfrachtung beruht auf eigenem über 10-jährigem Know-how in der maschinellen Elektronikschrottverarbeitung.

In den nachfolgenden Arbeitsschritten (zweite Stufe: Schadstoffentfrachtung und Vorabtrennung von Wertstoffen, dritte Stufe: Wertstoffgewinnung und vierte Stufe Nachseparation) werden die noch vorhandenen Materialverbunde aufgelöst. Dank trockenmechanischer Verarbeitung können selbst kleinste Leicht- und Schwermetallteilchen vom Massenstrom separiert werden. Die dabei anfallenden Metalle werden dem Werkstoffkreislauf zugeführt. Die Kunststoffabfälle werden nach erfolgter Schadstoff-Analyse in geeigneten Verfahren thermisch verwertet. Stäube werden wiederverwertet bzw. bei Bedarf entsorgt.

Abbildung 3-2 zeigt ein Prozessschema des Betriebs mit seinen Haupt- und Unterprozessen sowie seinen zusammengefassten Input- und Outputfraktionen. Wie später ausgeführt ist, zeigt die eingezeichnete Systemgrenze, dass der Prozess der Nachseparation für den Versuch ausserhalb der Systemgrenzen lag. Im Versuch wurde der Rückfluss des Kunststoffgemisches aus der Nachseparation unterbunden.

Abbildung 3-2: Schematische Darstellung der verschiedenen Aufbereitungsprozesse sowie aggregierter Materialflüsse im untersuchten Betrieb der IMMARRK AG in Regensdorf im August 2003, mit eingezeichneter gestrichelter Systemgrenze für den Versuch.



LEGENDE:

- Schadstoffhaltige EEKG Komponenten ( Kondensatoren, Tonermodule, Pb-Batterien, Neonröhren aus Notebooks etc.)
- Schadstoffentfrachtete EEKG-Metallschrotte ( Eisenschrott, Ni-Cr-Teile)
- Diverse Fraktionen aus der Triage ( brennbare Abfälle, Bildröhren , Kabel etc.)
- schadstoffhaltige EEKG-Fraktionen nach Vorzerkleinerung ( Batterien/Akkus, Kondensatoren)
- schadstoffentfrachtete EEKG-Fraktionen nach Vorzerkleinerung ( Diverse Eisen- und Nichteisenschrottfaktionen und Leiterplatten, Cu-Kabel)

## 4 Methodisches Vorgehen

### 4.1 Einleitung, Projektablauf

Gemeinsam mit den Verantwortlichen des Entsorgungsbetriebes in Regensdorf wurden in einem **ersten Schritt** des Gesamtprojekts schon vorhandene Daten (Mengen und Stoffkonzentrationen) gesichtet und ausgewertet. Ziel dieses ersten Schrittes war die Sammlung von Grundlagen, um das Messkonzept für den geplanten Versuch festzulegen.

In einem **zweiten Schritt** wurde der Grossversuch zusammen mit dem Anlagenbetreiber geplant. In der Versuchsplanung wurden die örtlichen und zeitlichen Systemgrenzen festgelegt, die Orte und Art der Massenflussbestimmung definiert, der Probenahmeplan (Häufigkeit, zeitliche Abfolge, Probengewicht etc.) erstellt und das Probenaufbereitungs- und Analysenkonzept ausgearbeitet. Die Versuchsplanung wurde zusammen mit dem Anlagebetreiber sowie mit dem involvierten Labor Institut BACHEMA abgesprochen. Ebenfalls im Vorfeld des Versuchs wurden Vorbereitungen getroffen, dass für die ganze Versuchsdauer genügend Inputmaterial zur Verfügung stand. Wichtig war dabei auch sicherzustellen, dass der Input-Mix für den Versuch möglichst gut der aktuellen mittleren Zusammensetzung des schweizer EEKG-Schrotts entsprach.

Der **dritte Schritt** bestand in der Durchführung des Versuchs sowie den Arbeiten im Labor. Im Grossversuch wurde nach einer gründlichen Reinigung der Anlage das vorbereitete EEKG-Schrott Inputgemisch über die gesamte Versuchsdauer von drei Tagen verarbeitet. Es wurden alle während der Messkampagne umgesetzten Input- und Outputmassenflüsse gewogen. In den relevanten Outputflüssen wurden nach dem definierten Probenahmeplan Proben gezogen. Diese zum Teil vor Ort und im Labor aufbereitet und auf die ausgewählten Elemente und Verbindungen analysiert. Interne und externe Qualitätskontrollen gewährleisteten die Verlässlichkeit der Analysenresultate.

Im **vierten Schritt** wurden die Versuchsdaten und Analysenresultate ausgewertet und interpretiert. Ausgehend von den analytisch bestimmten Stoffkonzentrationen in den Outputgütern und den gewogenen Güterflüssen wurden die Stoffflüsse berechnet. Aus der Summe aller Outputflüsse konnten die Input-Stoffflüsse in den Entsorgungsbetrieb (EEKG-Schrott) bestimmt werden. Die Stoffverteilung der verschiedenen Stoffe vom Input in die verschiedenen Outputgüter (Transferkoeffizienten) wurde ebenfalls mittels der Stoffflüsse ermittelt. Die mittleren Stoffkonzentrationen des EEKG-Schrotts errechnet sich aus dem Verhältnis der Summe aller Outputflüsse für einen Stoff und der durchgesetzten EEKG-Schrott Menge. Unsicherheiten wurden mittels der Gauss'schen Fehlerfortpflanzung berechnet. Die Berechnungen wurden mittels der Stoffflussanalysen-Software SIMBOX<sup>®</sup> durchgeführt.

### 4.2 Angewandte Methodik

Die Stoffflussanalyse nach [Baccini & Brunner, 1991] bzw. [Baccini & Bader, 1996] diente als Methode zur Bestimmung der Stoffflüsse und –Konzentrationen im EEKG-Schrott sowie der Stoffverteilung vom EEKG-Schrott Input in die Outputprodukte. Die Auswertung erfolgte mit mathematisch-statistischen Methoden, welche im Anhang 9.3.3 beschrieben sind.



## 4.3 Versuchsplanung und -durchführung

### 4.3.1 Systemdefinition

Die Systemdefinition beinhaltet die Wahl der zeitlichen und örtlichen Systemgrenzen, die Wahl der Stoffe, die Wahl der Prozesse sowie der Güter.

Die untersuchte EE-Schrott Verarbeitungsanlage der IMMARK AG / DRISA Entsorgungs AG in Regensdorf besteht aus vielen komplexen Teilprozessen (Triage, Sortierungen, Trennungen, Siebungen etc.). Im Versuch wurde das System so detailliert untersucht, wie es für die Beantwortung der Fragestellungen erforderlich war. Die Resultate im Bericht und im Anhang werden jedoch nicht mehr in diesem Detailliertheitsgrad wiedergegeben. Dies ist damit begründet, dass die Fragestellungen auf dieser Detailliertheitsstufe vollständig mit ausreichender Genauigkeit beantwortet und übersichtlich dargestellt werden können. Dazu besteht so auch Gewähr, dass kein verfahrenstechnisches Detail-Know-how über den Betrieb preisgegeben werden wird.

#### **Zeitliche Systemgrenze**

Um genügend repräsentative Resultate zu erhalten, wurde die Versuchsdauer so gewählt, dass ca. 200-250 t Inputmaterial behandelt werden konnte. Dabei sollte der Routinebetrieb des Betriebs nur unbedeutend tangiert werden. Daraus folgte dass die Versuchsdauer mit drei Arbeitstagen begrenzt wurde. Die vorbereitete EEKG-Schrott Menge wurde während der normalen Arbeitszeit während dieser drei Tage (= ca. 25 Stunden) verarbeitet. Zur korrekten Berücksichtigung der zeitlichen Systemgrenze ist die exakte Einhaltung der Versuchsdauer weniger wichtig. Wichtiger ist, dass nach dem Versuche alle Outputströme mit Zugehörigkeit zum im Versuch verarbeiteten Inputmaterial noch vollständig erfasst werden (Berücksichtigung der Systemverweilzeit). Dieses Vorgehen konnte optimal innerhalb des normalen hektischen Betriebsalltags mit eingeplant werden.

#### **Örtliche Systemgrenze**

Die Wahl der örtlichen Systemgrenze wird durch die Ziele und Fragestellungen im Projekt, durch die Verhältnisse vor Ort (Zugang für Probenahme, Messgelegenheiten) sowie durch vorhandene Möglichkeiten für Modell-Vereinfachungen bestimmt. Abklärungen vor Ort, Auswertungen schon vorhandener Messdaten waren dazu notwendig. Die örtliche Systemgrenze ist in Abbildung 3-2 und Abbildung 4-1 dargestellt. Wichtig ist dabei zu erwähnen, dass nur EEKG-Geräte als Input berücksichtigt worden sind. Zusätzlich wichtig ist zu erwähnen, dass der Prozess „Nachseparation der feinkörnigen Metallfraktion 1 A und 1 B“ nicht untersucht worden ist (liegt ausserhalb der Systemgrenzen). Die Gründe dafür sind: Beschränkte finanzielle Mittel und Wunsch zum Schutz des verfahrenstechnischen Detail-Know-hows. Weil keine unbedingte Erforderlichkeit bzgl. Fragestellungen in diesem Projekt bestand, wurde davon abgesehen.

#### **Wahl der Prozesse**

Für die übersichtliche Darstellung der Resultate ist es zielführend, den untersuchten EE-Schrott Verarbeitungsbetrieb in Regensdorf mit allen seinen wichtigen Teilprozessen [Triage/ Handdemontage, Vorzerkleinerung, Entstaubung, Sortierung/ Siebung, Magnetabscheidung, Handsortierung, Magnet- und NE- Abscheider, Schwerteilausleser, Zerkleinerung, Entstaubung, Prallmühle, Magnetabscheidung, Siebung, Feinseparation (Trenntische/Nachtrennung)] als eine „Black-Box“ zusammenzufassen. Nicht berücksichtigt wurde, wie oben erwähnt, der Prozess „Nachseparation der feinkörnigen Metallfraktion 1 A und 1B“. So kann auch gewährleistet wer-

den, dass kein betriebsinternes Prozess-Know-how preisgegeben wird. Der Prozess wird mit „EEKG-Schrott Verarbeitung“ bezeichnet (siehe Abbildung 4-1).

### Wahl der Güter

Um die Resultate im Sinne der oben angefügten Bemerkungen darzustellen, wurden Outputprodukte in Outputgüter (-kategorien) zusammengefasst. Mittels dieser Zusammenfassung kann auch gewährleistet werden, dass kein betriebsinternes Prozess-Know-how preisgegeben wird. Tabelle 4-1 definiert die im Resultatteil und Anhang verwendeten Outputgüter.

Tabelle 4-1: Definition und Beschreibung der gewählten Gütergruppen für den Resultatteil bzw. Anhang

Outputgüter (-kategorien)	Beschreibung/ Bestehend aus Güter/Gütergruppen (siehe Anhang)
<b>INPUT</b>	
<b>EEKG-Schrott</b>	<i>Elektro- und Elektronikkleingeräte aus dem Schweizer VREG Sammelsystem der S.EN.S. und SWICO, möglichst einem mittleren Jahres- Mix entsprechend, bestehend aus entsprechenden Anteilen von Haushaltskleingeräten, Unterhaltungselektronik, Kommunikationstechnik, EDV- und Büroelektronik.</i>
<b>OUTPUT</b>	
<b>Schadstoffträger</b>	<i>Sind Komponenten im verarbeiteten EEKG-Schrott, welche wegen ihrer potentieller Schadstoffgehalte händisch abgetrennt/ ausgeschieden und einer externen Entsorgung zugeführt werden.</i> <b>Kondensatoren; Batterien/ Akkumulatoren; Bariumgeter</b>
<b>Staub</b>	<i>Staub, der in der Vorzerkleinerung und der Prallmühle anfällt und in Abluffiltern abgeschieden und einer externen Verwertung/Entsorgung zugeführt wird.</i>
<b>Cu-Kabel</b>	<i>Cu-Kabel mit oder ohne Ummantelung, welche an verschiedenen Stellen des EE-Schrott Verarbeitungsprozesses händisch aussortiert und einer separaten externen Verwertung zugeführt werden.</i>
<b>Leiterplatten</b>	<i>Im EEKG-Schrott enthaltene Leiterplatten/Platinen, welche an verschiedenen Stellen des EE-Schrott Verarbeitungsprozesses händisch aussortiert werden und separat (unterteilt in hoch- und niederwertige) in externe Verwertungsprozesse gegeben werden. Im Versuch wird nicht unterschieden zwischen hoch- und niederwertiger Fraktion (Gemisch wird untersucht).</i>
<b>Bildröhrenkomponenten</b>	<i>Summe von Komponenten, welche in der Triage/händischen Demontage abgetrennt und einer separaten externen Verwertung zu geführt werden (wie z.B. Bildröhren, Triplexröhren, Kathodenstrahler und Ablenkspulen).</i> <b>- Bildschirmröhrenkomponenten 1 bis 5</b>
<b>Kunststoff- und Holzgehäuse</b>	<i>Summe von allen in der Triage händisch abgetrennten Gehäuse von Bildschirmgeräten (TV und PC-Monitore) sowie TV-Rückwände, welche einer externen Verwertung/Entsorgung zugeführt werden. Im Versuch wurden als Teile dieser Summe folgende Fraktionen separat analysiert:</i> <b>- TV-Gehäuse Holz</b> (nur Holz) <b>- TV/PC-Gehäuse</b> (gemischt Kunststoff mit vernachlässigend kleinem Anteil Holz) <b>- TV- Rückwände</b> (Kunststoff)
<b>Feinkörnige Kunststofffraktion 1 und 2</b>	<i>Summe aller feinkörnigen/pulverförmigen Kunststofffraktionen, welche in der mechanischen Aufbereitung anfallen und einer externen Verwertung/Entsorgung zugeführt werden.</i> <b>- feinkörnige Kunststofffraktion 1</b> <b>- feinkörnige Kunststofffraktion 2</b>
<b>Feinkörnige Metallfraktion 1- 4</b>	<i>Summe aller4 feinkörnigen/pulverförmigen Nicht-Eisenmetallfraktionen, welche direkt einer externen Verwertung ( 2 A/2 B) oder der Nachseparationsstufe ( 1 A und 1 B) zugeführt werden.</i> <b>- feinkörnige Metall- Fraktion 1 (bestehend aus zwei Unterfraktionen 1A und 1B)</b> <b>- feinkörnige Metall- Fraktion 2 (bestehend aus zwei Unterfraktionen 2A und 2B)</b>
<b>Metallschrottfraktion</b>	<i>Summe aller grobkörnigen/ stückigen Nicht-Eisenmetallfraktionen, welche in der mechanischen Aufbereitung anfallen und einer externen Verwertung zugeführt werden.</i> <b>- Metallschrott- Fraktion 1 bis 4</b>
<b>Fe-Schrottfraktion</b>	<i>Summe aller grobkörnigen und feinkörnigen Eisenschrottfaktionen, welche in der mechanischen Aufbereitung anfallen und einer externen Verwertung zugeführt werden.</i> <b>- Fe-Grobschrottfraktion</b> <b>- feinkörniger Fe- Schrott</b>

Einzelne Güter, wie z.B. brennbare Abfälle, welche auf der Ebene der Stoffe für keinen der untersuchten Stoffe einen relevanten Einfluss haben, werden hier nicht betrachtet. Gereinigte Abluft wird in der Stoffflussanalyse auch nicht berücksichtigt. Die in der gereinigten Abluft vorhandenen Restgehalte sind so klein, dass Sie im Bezug auf die Bestimmung der EEKG- Zusammensetzung keinen Einfluss haben. Der Betrieb der IMMARK AG unterliegt der Luftreinhalteverordnung (LRV) und kann die Grenzwerte sehr gut einhalten. So liegt z.B. der Staubgehalt bei ca. 0.5- 0.7 mg/m<sup>3</sup> Abluft.

### Wahl der Stoffe

Die für die Untersuchung ausgewählten Stoffe sind im Vorfeld des Projektes gemeinsam mit den Projektpartnern definiert worden. Obwohl sich noch viele andere interessante Wert- bzw. Schadstoffe zur Untersuchung angeboten hätten (z.B. Ag, Au, Pd, bromierte Dioxine/ Furane, fluorierte Verbindungen), wurde für diesen Versuch die folgende Auswahl an Stoffen gewählt:

#### Metalle:

1. Priorität: Cd, Cu, Hg, Pb, Sb, Sn
2. Priorität: Al, Fe, Cr, Ni und Zn

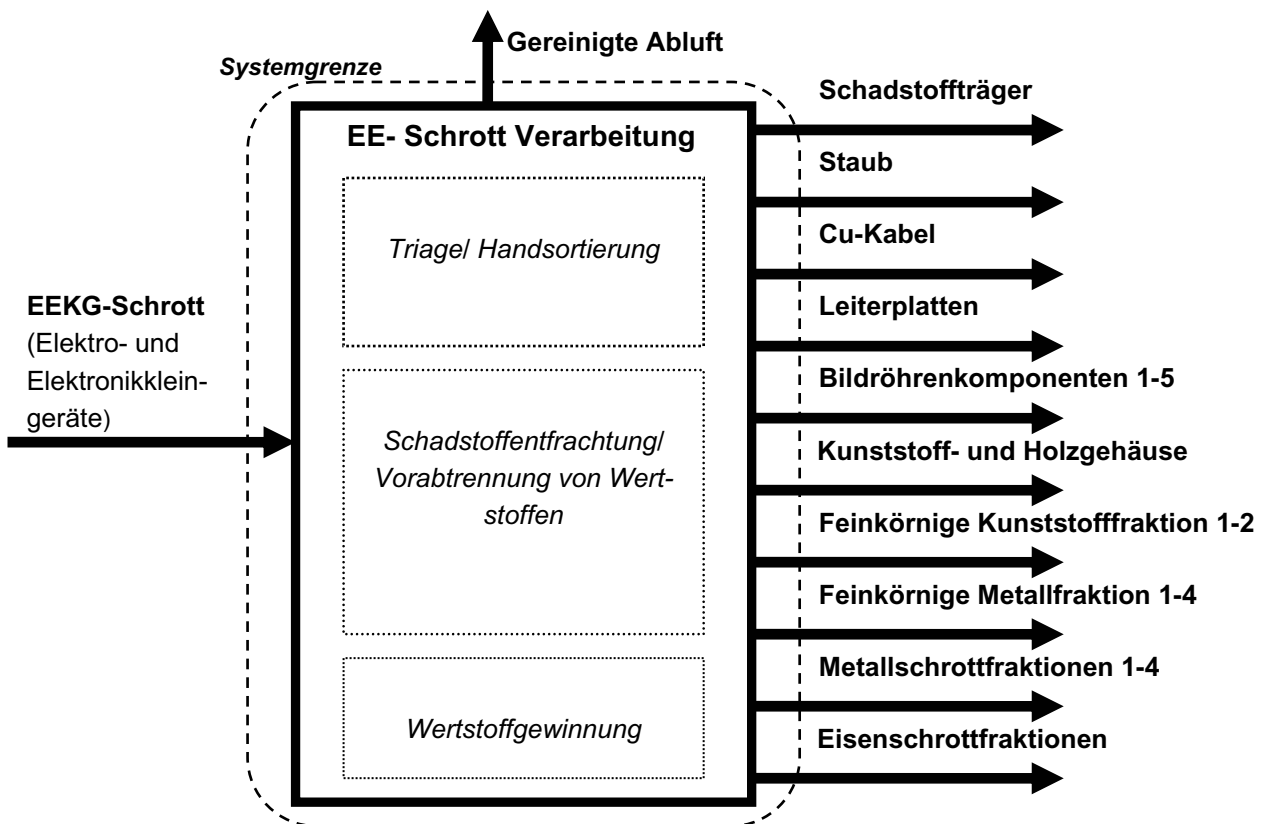
#### Nichtmetalle:

Br, Cl und P

**Organischen Verbindungen :** PBDE (Penta-, Octa- und DecaBDE), TBBPA, HBCD und PCB.

Abbildung 4-1 zeigt das untersuchte System inklusive der Darstellung der Teilprozesse, welche im Bericht nicht im Detail diskutiert werden mit seinen Input und Outputflüssen.

Abbildung 4-1: Systembeschreibung der untersuchten EE-Schrott Verarbeitung<sup>1</sup>



<sup>1</sup> Die Untersuchung beschränkt sich auf die EEKG- Schrott (siehe Kap. 2 und im Glossar) und beinhaltet auch keine Untersuchung des nachgeschalteten Prozesses „Nachseparation feinkörnige Metallfraktionen 1 A und 1 B) (siehe oben)

### 4.3.2 Definition der Orte und Art der Bestimmung der Güterflüsse

Im Vorfeld des Versuchs wurden Vorbereitungen getroffen, dass - mit Ausnahme der gereinigten Abluft<sup>1</sup> - alle während der gesamten Versuchsdauer anfallenden Teilgüterflüsse der EE-Schrott Verarbeitung bei den Abwurfstellen im Mechanischen Prozess oder in den händischen Sortierstationen in Gebinden (Containern, Big-Bags und andern Behältern) gesammelt werden konnten. Die in den Gebinden angesammelten Teilmengen konnten dann zu Versuche einzeln gewogen werden. Aus diesen gewogenen Teilmengen konnten die Mengen aller in Tabelle 4-1 definierten Güterflüsse bzw. Güterflussgruppen exakt ermittelt werden.

### 4.3.3 Definition der Orte der Bestimmung der Stoffkonzentrationen

Die Probenahme erfolgte grundsätzlich manuell an den Stellen, an denen die einzelnen Outputgüter an der Systemgrenze angefallen sind ( z.B. bei Abwurfstellen von Förderbändern etc.). Einige Proben wurden jedoch an Stellen innerhalb der Systemgrenzen gezogen, oder zum Versuche während der Vorzerkleinerung der Gesamtmenge von Outputgütern beim Abwurf des Zerkleinerungsaggregats (z.B. TV-Gehäuse, Leiterplatten) entnommen. Wieder andere Proben konnten erst am Versuche aus den Lagerbehälter (z.B. Container) entnommen werden.

Zusätzlich zu den in Tabelle 4-1 definierten Outputgütern, wurde ein interessanter Güterfluss innerhalb der Systemgrenzen, „Summe Feinkorn“, beprobt. Die Beprobung dieses Güterflusses am Austritt der Vorzerkleinerung bzw. vor der Aufgabe Prallmühle im Teilprozess „Wertstoffgewinnung“ erlaubte einen Input- Outputvergleich über die Endstufe des Teilprozesses „Wertstoffgewinnung“ mit nur noch feinen Korngrößen (< 20mm). Dieses Vorgehen erlaubte wertvolle Erkenntnisse hinsichtlich der Qualitätssicherung auf Probeaufbereitungs- und Analyseebene (vgl. Anhang 9.5) sowie lieferte Zusatzinformationen hinsichtlich eines zukünftigem Monitoring (siehe Kapitel 5.5).

---

<sup>1</sup> Zu Projektbeginn wurde mit den Auftraggebern entschieden, dass im Rahmen dieses Projekts keine Abluftmessungen durchgeführt werden, weil damit verbundene Stoffflüsse hinsichtlich der hier diskutierten Fragestellungen nicht von Bedeutung sind.

Tabelle 4-2: Definition der Orte der Bestimmung der Stoffkonzentrationen

Güter/Gütergruppen	Orte	Untersuchte/analyisierte Stoffe
<b>INPUT</b>		
<b>EEKG-Schrott</b>	Keine Probenahme / Analysen im Input	
<b>OUTPUT</b>		
<b>Schadstoffträger</b>		
- Kondensatoren	Beim Bandabwurf unterhalb des Zerkleinerers (Vorzerkleinerung während Probeaufbereitung vor Ort)	BFS, PCB
- Batterien/ Akkumulatoren	Keine eigenen Analysen/ Verwendung von Literaturdaten	
<b>Staub</b>	Jeweils aus den Staubsäcken unterhalb der Abluftfilter	Metalle, Cl, Br, P, BFS, PCB
<b>Cu-Kabel</b>	Aus dem Gutstrom nach der Zerkleinerung in der externen Kabelaufbereitung	
<b>Leiterplatten</b>	Beim Bandabwurf unterhalb des Zerkleinerers (Vorzerkleinerung während Probeaufbereitung vor Ort)	Metalle, Cl, Br, P, BFS, PCB
<b>Bildröhrenkomponenten 1 bis 5</b>	Keine eigenen Analysen/ Verwendung von Angaben des Anlagenbetreibers und Literaturdaten	
<b>Kunststoff- und Holzgehäuse</b> - TV-Gehäuse Holz - TV/PC-Gehäuse - TV- Rückwände	Jede Einzelfraktion jeweils beim Bandabwurf unterhalb des Zerkleinerers (Vorzerkleinerung während Probeaufbereitung vor Ort)	Metalle, Cl, Br, P, BFS, PCB Metalle, Cl, Br, P, BFS, PCB Cl, Br, BFS, PCB
<b>Feinkörnige Kunststofffraktionen 1 und 2</b>	Bei den einzelnen Materialabwurfstellen der Trenntische der Feinseparation bzw. bei elektrostatischen Abscheider in die Container	Metalle, Cl, Br, P, BFS, PCB
<b>Feinkörnige Metallfraktion 1 - 4</b>	Bei den einzelnen Materialabwurfstellen der Trenntische der Feinseparation bzw. bei elektrostatischen Abscheider in die Container (Nachseparation wurde nicht berücksichtigt)	➤ Kunststoffanteilen sowohl auf Metalle als auch auf Cl, Br, P, BFS, PCB ➤ Metallanteile: Nur auf Metallgehalte
<b>Metallschrottfraktion 1-4</b>	Keine eigenen Analysen/ Verwendung von Angaben des Anlagenbetreibers und Literaturdaten	
<b>Fe-Schrottfraktion (Fe-Grobschrottfraktion und feinkörniger Fe- Schrott)</b>	Keine eigenen Analysen/ Verwendung von Angaben des Anlagenbetreibers und Literaturdaten	
<b>Gereinigte Abluft</b>	Keine Analysen durchgeführt	
<b>INNERER FLUSS</b>		
<b>Summe Feinkorn</b>	Beim Bandabwurf in einen Zwischenbehälter zwischen Vorzerkleinerung und Prallmühle	Metalle, Cl, Br, BFS, PCB

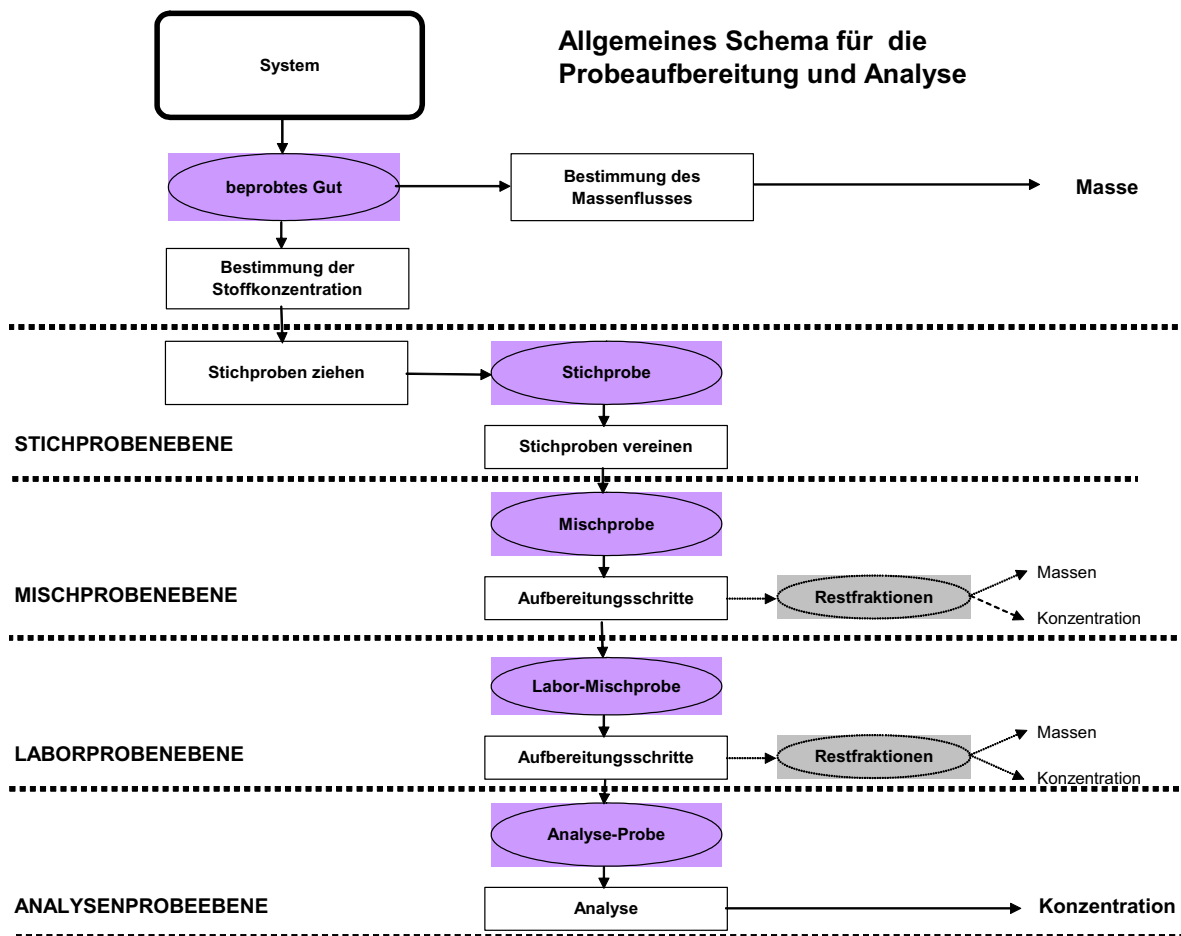
### 4.3.4 Definition des Probenahmekonzeptes

Die Definition der Struktur und Art, Anzahl und Häufigkeit der Probenahmen und des zeitlichen Ablaufs der Probenahme erfolgte anhand von Literaturangaben, Erfahrung und Abklärungen vor Ort. Das Probenahmekonzept für den durchgeführten Versuch ist im Anhang 9.3.1 im Detail beschrieben

### 4.3.5 Probeaufbereitungskonzept

Abbildung 4-2 zeigt in allgemeiner Form den Ablauf der Probeaufbereitung von der Probenahme vor Ort bis zur Analyse im Labor. Im Versuch wurden die Stichproben sowie die Vereinigung der Stichproben zu den Mischproben sowie die Aufbereitungsschritte (Vorzerkleinerung, Teilung) vor Ort im Betrieb durchgeführt. Arbeiten auf Laborproben- und Analysenprobenebene wurden im Labor des Instituts BACHEMA durchgeführt. In verschiedenen Aufbereitungsschritten anfallende Restfraktionen, welche nicht in den Analysenproben Berücksichtigung finden, müssen – falls von Relevanz auf das Endresultat – mitberücksichtigt werden. Dazu müssen deren Masse und Konzentrationen bestimmt oder geschätzt werden.

Abbildung 4-2: Allgemeines Schema für die Probeaufbereitung und Analyse im Projekt



## 4.4 Laboruntersuchungen

Von den auf der EE-Schrottverarbeitungsanlage während des Referenzversuches entnommenen Mischproben von allen für die Stoffflussanalyse relevanten Outputfraktionen wurden vor Ort durch repräsentative Teilung mittels einem Riffelteiler Mischproben für die anschliessenden Laboruntersuchungen gewonnen. Diese Labor-Mischproben von je 2 bis 3 kg Probenmaterial sind in den Labors weiter zu Analysenproben aufbereitet worden. Detaillierte Angaben zur Probenaufarbeitung auf Laborstufe sowie zur Analytik und analytischen Qualitätssicherung sind im Anhang 9.3 beschrieben. Im Folgenden wird eine summarische Beschreibung der Probenaufarbeitung, Analysenverfahren und analytischen Qualitätssicherung gegeben.

### 4.4.1 Probenaufbereitung

Aus den Labor-Mischproben sind mittels Handsortierung, mechanischer Zerkleinerung und repräsentativer Probenteilung sowie Schmelzverfahren (nur für Metalle) Analysenproben gewonnen worden.

Für jede Outputfraktion musste eine angepasste Aufbereitungstechnik entwickelt werden, die mit entsprechenden Vorversuchen getestet wurde. Im Prinzip sind die beiden Hauptkomponenten Metalle und Kunststoffe soweit erforderlich vorgängig durch Handsortierung getrennt worden. Die so getrennten Fraktionen mit überwiegendem Anteil an Kunststoffen und anderen organischen Materialien wie Holz und Gummi sind jeweils separat bis zu den für die Extraktion/den Aufschluss erforderlichen Korngrössen (Analysenproben, <0.5 mm bzw. <0.1 mm) zerkleinert worden. Die abgetrennten Fraktionen mit überwiegendem Metallanteil sind durch Schmelzverfahren homogenisiert worden. Die homogenen Analysenproben sind anschliessend mit geeigneten Lösungsmitteln extrahiert (für die Bestimmung organischer Zielverbindungen) beziehungsweise mittels Aufschlussverfahren in Messlösungen überführt (für Elementbestimmungen mittels ICP-MS und ICP-OES) oder pulverförmig zu Pillen gepresst (für Elementbestimmungen mittels Röntgenfluoreszenz) worden.

Wo diese Aufbereitung nicht möglich war, wurde das gesamte Materialgemisch in einem grösseren Ansatz (im kg-Massstab) direkt extrahiert resp. über eine Schmelze homogenisiert und anschliessend analysiert. Die reinen Metallfraktionen wurden ebenfalls über Schmelzen homogenisiert und analysiert.

### 4.4.2 Analysenmethoden

#### 4.4.2.1 Elementbestimmungen

Die Elementbestimmungen in den aufbereiteten Fraktionen erfolgten entweder direkt in den analysenfeinen gepressten Feststoffproben mittels energiedispersiver Röntgenfluoreszenz (ED-RFA) oder mittels induktiv gekoppelter Plasma-Atom Emissionsspektrometrie (ICP-OES) resp. induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) nach Aufschluss mit Königswasser. Die Bestimmungen mittels ED-RFA ergaben für Chlor und Brom generell und für andere Elemente in Proben, die keine Metallpartikel enthielten, jeweils die verlässlicheren und höheren Messwerte. Für Proben, in denen nach Feinmahlung immer noch Metallpartikel vorhanden wa-

ren, sind in den Königswasserextrakten höhere Elementkonzentrationen bestimmt worden. In diesen Fällen sind jeweils die Resultate des Königswasser-Aufschlusses verwendet worden.

Proben, welche nicht durch Feimahlung homogenisiert werden konnten, sind in einem metallurgisch-analytischen Speziallabor in Dortmund, Deutschland, über Schmelzprozesse homogenisiert und anschliessend mit elektro- und nasschemischen Methoden analysiert worden.

#### 4.4.2.2 Bestimmung organischer Verbindungen

Für die Bestimmung der polychlorierten Biphenyle (PCB) und der polybromierten organischen Verbindungen (bromierte Flammschutzmittel, BFS) wurden die Proben jeweils 3-fach mit Toluol extrahiert. Die Bestimmung der organischen Zielverbindungen im Toluolextrakt erfolgte anschliessend mit Kapillargaschromatographie und Nachweis mittels Elektroneneinfangdetektor (GC-ECD) bzw. Massenspektrometrie (GC-MS). Die bromierten Flammschutzmittel sind ohne Reinigung der Extrakte und ohne Aufkonzentrierung direkt aus dem Toluolextrakt mit GC-ECD resp. GC-MS bestimmt worden. Für die Bestimmung der PCB mit GC-ECD sind die Toluolextrakte nach einer Behandlung mit Oleum mittels Fest-flüssig-Chromatografie über Ionentauscher-Kartuschen (SCX/SAX) gereinigt (Clean-up) und anschliessend durch Evaporation des Lösungsmittel (Einengen des Probenvolumens auf 1 ml) aufkonzentriert worden. Zur Kalibration für die Messung von PCB und bromierten Flammschutzmitteln sind Mischungen aus nicht markierten Zielverbindungen verwendet worden. Zur Quantifizierung wurden 1,11-Dibromundecan für PCB und Decachlorbiphenyl (PCB-209) für die bromierten Flammschutzmittel als interne Standards verwendet.

### 4.4.3 Analytische Qualitätssicherung (AQS)

#### 4.4.3.1 Interne Qualitätssicherung

Die *Präzision* (*Streuung* bzw. Reproduzierbarkeit der Messwerte einer bestimmten Probe) sowie die *Richtigkeit der Messwerte* (systematische Abweichung des Messresultates vom "wahren" Gehalt) ist in Proben einzelner Fraktionen bestimmt worden. Zur Bestimmung der Streuung der Messungen in den untersuchten Outputfraktionen (Genauigkeit der Gehaltsbestimmungen) sind mehrere repräsentative Teilproben aller Outputfraktion (Mischproben) getrennt aufgearbeitet und analysiert worden. Zur Gewährleistung der Richtigkeit der Messwerte sind alle verwendeten Analysenverfahren durch Messungen von geeigneten Referenzproben mit bekanntem Gehalt der untersuchten Analyten abgesichert worden. Zusätzlich erfolgte auch eine Abschätzung der gesamten Messunsicherheit der einzelnen Messmethoden.

#### 4.4.3.2 Externe Qualitätssicherung

Zur Absicherung der von den beauftragten Laboratorien (Bachema AG, Schlieren, und Hans-Joachim Günther GmbH, Dortmund) erarbeiteten Analysenresultate sind einzelne homogenisierte Analysenproben verschiedener Outputfraktionen drei weiteren Laboratorien zur Bestimmung der Elementgehalte (Labor für Umweltanalytik des AUE BL, Liestal, und Labor des Institutes für terrestrische Ökologie der ETHZ (ITÖ), Schlieren) bzw. der bromierten Flammschutzmittel (Labor für Umweltanalytik des AUE BL, Liestal, und Abteilung organische Chemie der EMPA, Dübendorf) übergeben worden. Die PCB-Analysen sind keiner externen Qualitätssicherung unterzogen worden, weil die PCB-Analytik im beauftragten Labor (Bachema AG) für verschiedenste Probenmatrices gut etabliert ist.



Elementbestimmungen:

Für die Elementbestimmungen wurden im Labor für Umweltanalytik des AUE BL (UAN) drei mehrheitlich aus Kunststoffen, Staub oder Leiterplatten bestehende Proben im Mikrowellenofen mit Salpetersäure (unter Hochdruck) bzw. mit einem Gemisch aus Salpetersäure und Salzsäure (unter Mitteldruck) aufgeschlossen. Zwei mehrheitlich aus Metallen bestehenden Proben wurden im Labor UAN mit einem Gemisch aus Salpetersäure und Salzsäure durch Erhitzen in offenen Glasgefässen aufgeschlossen. Die Elementbestimmungen (ausser Quecksilber) in den aufgeschlossenen Probenlösungen wurden mittels ICP-OES durchgeführt. Quecksilber wurde mittels Fliessinjektions-Atomabsorptionsspektrometrie (FIAS) mit Hydridtechnik bestimmt. Zur Absicherung der Elementbestimmungen sind drei Proben (Kunststoffe, Staub und Leiterplatten) vom Labor des ITÖ mittels ED-XRF analysiert worden (gleiche Methode wie im Labor der Bachema AG).

Bestimmung bromierter Flammschutzmittel:

Für die Bestimmung der bromierten Flammschutzmittel wurden im Labor UAN sieben Proben (Kunststoffe, Metalle, Staub, Leiterplatten) je mit zwei unterschiedlichen Extraktionsverfahren (Batch-Extraktion mit Toluol bzw. Soxhlet-Extraktion mit einem 1:1-Gemisch aus Toluol/Isopropanol) extrahiert. TBBPA wurde direkt im Rohextrakt durch Zugabe einer Siliziumorganischen Verbindung derivatisiert. Anschliessend sind die Zielverbindungen mittels GC-ECD bestimmt worden. Zur Kalibration sind Mischungen aus nicht markierten Zielverbindungen verwendet worden. Zur Quantifizierung wurde Decachlorbiphenyl (PCB-209) als interner Standard verwendet.

Die EMPA Dübendorf hat in fünf Proben-Extrakten der Bachema AG bromierte Flammschutzmittel mittels Kapillargaschromatografie und hochauflösender Massenspektrometrie (GC-HRMS) gemessen. Zur Kalibration sind Mischungen nicht markierter und mit  $^{13}\text{C}$ -Isotopen markierter Analyten verwendet worden. Zur Quantifizierung wurden Mischungen von  $^{13}\text{C}$ -Isotopen markierten Analyten als interne Standards verwendet.

## 4.5 Auswertung, Mathematisches Modell

Die Auswertung der Versuchs- und Analysedaten wurde mittels statistisch-mathematischer Methoden durchgeführt. Unsicherheiten wurden mittels der Gauss'schen Fehlerfortpflanzung berechnet. Die Stoffflussanalysen-Software SIMBOX<sup>®</sup> der EAWAG wurde dazu verwendet. Das Vorgehen bei der Berechnung ist detailliert im Anhang 9.3.3 erläutert.

## 5 Resultate und Diskussion

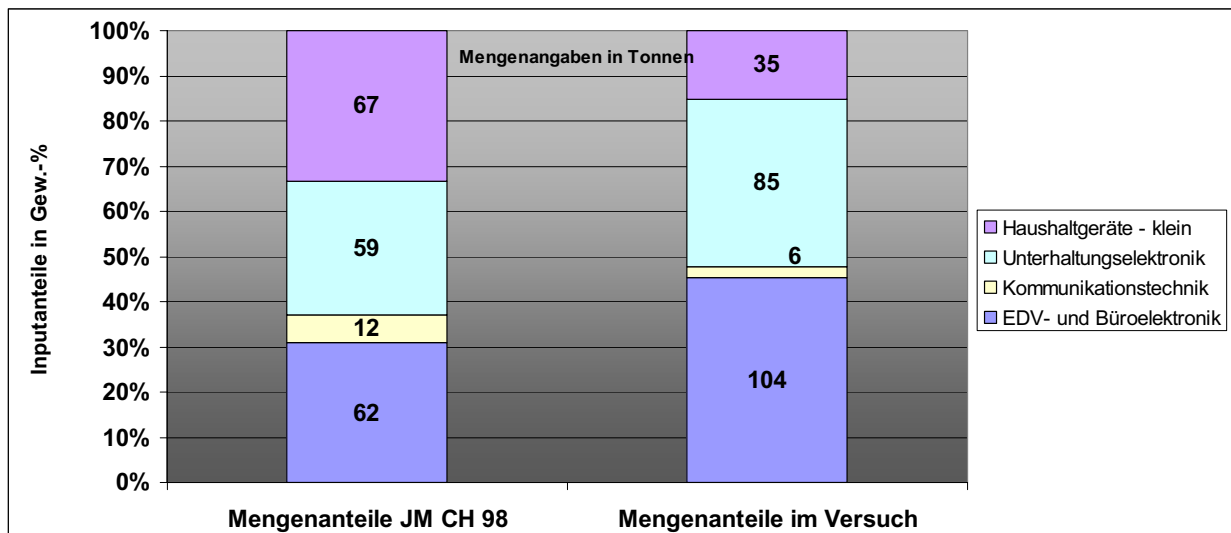
### 5.1 Materialflüsse / Güterbilanz

#### 5.1.1 Inputmaterialzusammensetzung

Während des Versuchs im August 2003 wurden 230 t EEKG-Schrott verarbeitet. Dies entspricht in etwa 2% des Jahresdurchsatzes im Betrieb. Dabei handelte es sich, wie geplant nur, um Elektro- und Elektronikkleingeräte. Der EEKG-Schrott Input bestand dabei aus rund 45% EDV- und Büroelektronik (104 t), 2.6% Kommunikationstechnikgeräte (6 t), 37% Unterhaltungselektronik (85 t) und 15% „Haushaltsgeräte klein“ (35 t).

Abbildung 5-1 zeigt den Vergleich der Fraktionsverteilung im realen Versuch mit der „SOLL-Verteilung“ für den Versuch anhand der Schweizer Mittelwerte für die ausgewiesenen Fraktionen. Dabei zeigt sich, dass der Anteil an „Haushaltsgeräten klein“ sowie Kommunikationsgeräte im Vergleich zum Schweizer Mittel im Versuchs-Mix jeweils nur etwa die Hälfte beträgt. Dies auf Kosten der beiden anderen Fraktionen EDV- und Büroelektronik sowie der Unterhaltungselektronik. Das Verhältnis der beiden im Versuch dominanten Fraktionen EDV- und Büroelektronik und Unterhaltungselektronik stimmt bei einer relativen Abweichung von ca. 15% relativ gut mit der Realität überein. Eine detaillierte Auflistung der Mengenanteile im Inputmenü ist im Anhang 9.4.1 vorzufinden.

Abbildung 5-1: Vergleich zwischen der mittleren prozentualen Fraktionszusammensetzung von Schweizer EEKG-Schrott im Jahre 1998 (JM CH 98) und den Mengenanteilen im realen Versuch (IST- Werte), Angaben in % und t/Versuch.



## 5.1.2 Anfallende Outputproduktmengen

Durch die Verarbeitung des EEKG-Schrott Inputs im Betrieb wurden unter Berücksichtigung der gewählten Systemgrenze folgende Arten von Outputprodukten produziert:

- **Fraktionen mit einem hohen Kunststoffanteil:**
  - händisch aussortierte/demontierte Kunststoff- Holz-Fraktionen: TV/PC-Gehäuse aus Kunststoff, TV-Gehäuse aus Holz und TV-Rückwände
  - Mechanisch aufbereitete feinkörnige Kunststofffraktionen
- **Grobkörnige Metallfraktionen:**
  - Metallschrottfaktionen (Nicht-Eisenmetalle)
  - Fe-Schrottfaktionen
- **Feinkörnige Metallfraktionen:** (vor der Aufgabe auf die nachgeschaltete Nachseparation)
- **Händisch aussortierte/demontierte Schadstoffträger:**
  - Batterien/ Akkumulatoren
  - Kondensatoren
  - Getterpillen
- **Diverse händisch aussortierte Wertstoff- /Schadstoffträger:**
  - Leiterplatten
  - Kupferkabel
  - Bildröhrenkomponenten (Bildröhren, Triplexröhren, Kathodenstrahler und Ablenkspulen)
- **Staub aus der Abluftreinigung:**

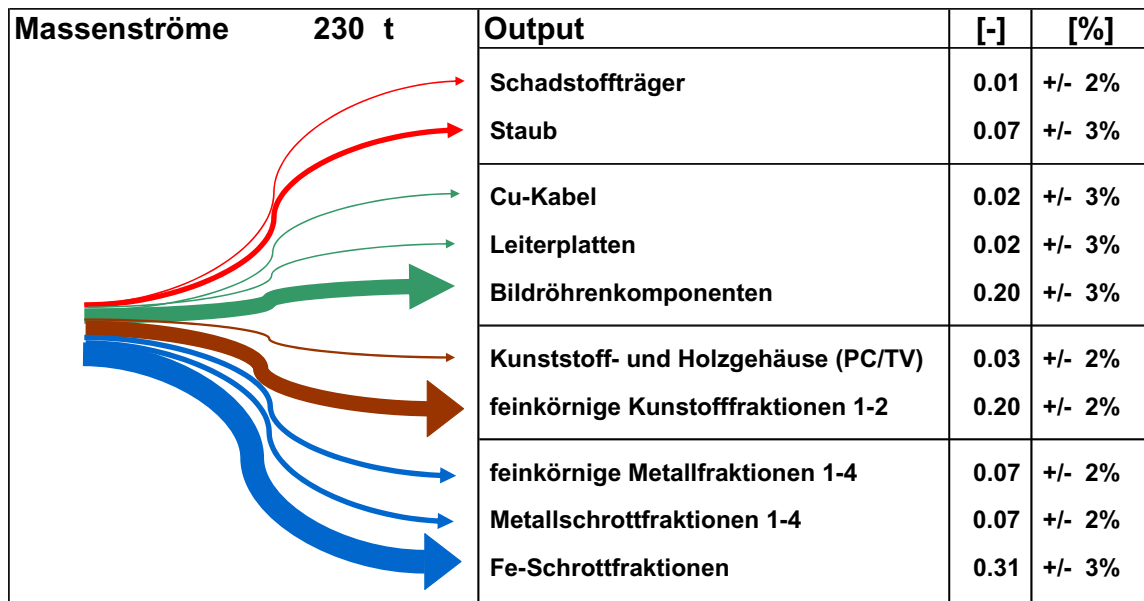
Abbildung 5-2 zeigt die prozentuale (Gewichts-)Verteilung des Inputmengenstrom auf die verschiedenen definierten Outputprodukte (-kategorien).

Etwa 45% des Inputs fallen als Metallfraktionen, rund 23 % als organische Fraktion (vor allem Kunststoff), 20 % in Form von Bildschirmröhrenkomponenten an. 7 % fallen als in der Abluftreinigung abgeschiedener Staub an. Gewichtsmässig nur noch eine untergeordnete Rolle spielen die Mengenanteile Leiterplatten und Cu-Kabelfraktion (je 2%) sowie die so genannten Schadstoffträger, wie Kondensatoren, Batterien und Bariumgetter (0.6%).

Vom gesamten Input werden in der modernen Recyclinganlage fast 30 % sehr feinkörnige Metall-, bzw. Kunststofffraktionen mit einem mittleren Korndurchmesser von < 10 mm produziert. Vor allem in diesem Korngrößenbereich wird laufend versucht, die Wertstoffgewinnung zu optimieren.

Der relative Fehler der einzelnen Verteilungskoeffizienten (Transferkoeffizienten für Massenfluss) bewegt sich zwischen 2 und 3 %.

Abbildung 5-2: Massenverteilung des EEGG-Schrott Input in die Outputgüter(-kategorien) inklusive der Angabe der rel. Unsicherheit als rel. Breite eines approximatives 95%-Konfidenzintervall ( $\approx \pm 2\sigma$ ) in %.



In Tabelle 5-1 werden die effektiven Mengen ausgewiesen, welche beim Versuch angefallen sind. Die relativen Unsicherheiten der Massenflüsse betragen  $< 3\%$ . Wie man in Abbildung 5-2 sieht, machen die brennbaren Abfälle, die in die KVA weitergegeben werden nur gut ein Promille der Menge aus. Weil sie für die hier behandelte stoffbezogenen Fragestellung keine relevante Rolle spielen, werden sie in der Folge nicht mehr separat aufgeführt. Im Anhang 9.4 befinden sich die Datentabellen für sämtliche Fraktionen und Stoffe.

Tabelle 5-1: Massenflüsse der Outputprodukte (-kategorien) während des Versuchs in Tonnen inkl. der Angabe der Unsicherheit (Breite eines approx. 95%-Konfidenzintervalls  $\approx \pm 2\sigma$ ).

Outputgüter	t im Versuch	Fehler [t]
brennbare Abfälle (KVA)	3.0	0.06
Schadstoffträger	1.3	0.02
Staub	16	0.3
Cu-Kabel	3.9	0.08
Leiterplatten	3.8	0.08
Bildröhrenkomponenten	45	1
Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	6.3	0.1
feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	45	1
feinkörnige Metallfraktionen 1-4	16	0.2
Metallschrottfaktionen 1-4	17	0.2
Fe-Schrottfaktionen	71	1
Total	230	5

## 5.2 Stoffliche Zusammensetzung der Produkte des Entsorgungsprozesses

Mit wenigen Ausnahmen wurden alle für die Analyse der in dieser Studie behandelten Stoffe relevanten Produkte des Entsorgungsprozesses gemäss dem in Kapitel 4.3 definierten Untersuchungskonzept beprobt und auf die interessierenden Stoffe analysiert. Eine Ausnahme betrifft Hg, Cd, Pb und Zn in der Batterien/Akku-Fraktion und Cl in der Cu -Kabelfraktion. Obwohl diese Konzentrationen einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag zu dem Gesamtergebnis liefern, wurde diese Fraktion nicht analysiert sondern Literaturwerte benutzt. Im Fall der Batterie/Akkufraktion wäre der Aufwand bezüglich der Aufbereitung der Proben in diesem Projekt zu gross gewesen, im Falle von Cl in Cu- Kabeln lagen aktuelle Angaben vor. In den folgenden Unterkapitel werden die Resultate der Stoffgehalte in den einzelnen Outputprodukte des Entsorgungsprozesses diskutiert und mit Literaturwerten verglichen.

### 5.2.1 Händisch aussortierte/demontierte Kunststoff-Holz-Fractionen

Tabelle 5-2 zeigt eine Gegenüberstellung der Stoffkonzentrationsbereiche für TV-Gehäuse in Holz, TV/PC-Gehäuse aus Kunststoff sowie TV-Rückwände. Metalle und P wurden in TV- Holz-Gehäusen und in TV-Rückwänden nur in einer Mischprobe analysiert. Deshalb kann keine Angabe zur Unsicherheit gemacht werden. In TV-Rückwänden wurden die Metalle und P nicht analysiert.

Tabelle 5-2: Mittlere Stoffkonzentrationen von händisch aussortierten/demontierten Kunststoff-/Holz-Fractionen inkl. der Angabe einer unteren und oberen Vertrauensgrenze als 95%-Konfidenzintervall (von  $\pm 2\sigma$ ). Angaben in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen.

Element / Stoff	TV-Gehäuse Holz			TV/PC-Gehäuse			TV-Rückwände		
	u.G. [mg/kg]	MW [mg/kg]	o.G. [mg/kg]	u.G. [mg/kg]	MW [mg/kg]	o.G. [mg/kg]	u.G. [mg/kg]	MW [mg/kg]	o.G. [mg/kg]
Al	1'100	1'100	1'100	25'000	44'000	63'000	-	-	-
Sb	57	57	57	11'000	16'000	21'000	-	-	-
Pb	22	22	22	110	230	350	-	-	-
Cd	6	6	6	50	78	106	-	-	-
Cr	7	7	7	-60	150	350	-	-	-
Fe	250	250	250	-380	1'200	2'800	-	-	-
Cu	160	160	160	-50	380	810	-	-	-
Ni	18	18	18	114	200	285	-	-	-
Hg	0.030	0.030	0.030	0.73	1.24	1.75	-	-	-
Zn	210	210	210	150	280	410	-	-	-
Sn	5	5	5	500	750	1'000	-	-	-
Cl	4'300	6'800	9'200	18'000	20'000	21'000	7'000	9'900	12'700
Br	70	160	240	41'000	44'000	46'000	18'000	26'000	34'000
P	50	50	50	1'400	2'300	3'300	-	-	-
PentaBDE	6	10	14	47	50	53	31	50	70
TBBPA	40	80	120	21'000	23'000	25'000	4'300	7'300	10'300
HBCD	6	10	14	47	50	53	-30	1'350	2'700
OctaBDE	6	10	14	6'900	7'500	8'100	4'000	7'700	11'300
DecaBDE	-10	20	50	4'300	4'800	5'200	4'000	13'000	22'000
PCB Summe	0.018	0.025	0.032	0.024	0.025	0.026	0.018	0.025	0.032

Sowohl für die meisten Metalle wie auch für die untersuchten organischen Verbindungen liegen die Gehalte der **Holzgehäuse** meistens um mehrere Faktoren unterhalb denjenigen der Kunststoffgehäuse von PC/TV auf einem sehr tiefen Niveau. Als Ausnahme sind die Konzentrationen von Zn, Cu (praktisch gleiches Niveau) und allenfalls Cl, welche mit fast 7 g/kg auch ansehnlich hoch liegt, zu erwähnen. Der relativ hohe Al- Gehalt in TV/PC-Gehäuse macht aufmerksam. Es scheint, dass schon vermehrt Al als Flammenschutzmittelalternative auch in PC/TV-Gehäusen Anwendung findet.

Sowohl in den **TV/PC-Gehäusen** als auch **TV-Rückwänden** werden hohe Br- und Cl-Gehalte gemessen, wobei die Gehalte in den TV/PC-Gehäusen für Br mit 43 g/kg und Cl mit 20 g/kg doppelt so hoch sind wie diejenigen in den TV-Rückwänden. Auch ein sehr hoher Gehalt wurde für Antimon festgestellt (16 g/kg). Sb wird in der Form von  $Sb_2O_3$  als Synergist eingesetzt, um die Brandschutzwirkung von bromierten Flammenschutzmitteln zu verstärken. Die Aluminiumkonzentration in den Kunststoffgehäusen ist 44 g/kg.

Von den polybromierten Diphenylether findet man für Octabromdiphenylether (OctaBDE) in TV/PC-Gehäusen wie auch in TV-Rückwänden einen ansprechend hohen, praktisch identischen Wert von 7.5 g/kg. Die höchste Konzentration von PBDs wird in den TV-Rückwänden für Decabromdiphenylether (DecaBDE) mit 13 g/kg gemessen. Die DecaBDE-Konzentration in den TV/PC-Gehäusen liegt bei rund einem Drittel davon. Die Konzentration an Pentabromdiphenylether (PentaBDE) beträgt in beiden Kunststofffraktionen 50 mg/kg, in der Holzfraktion fünf mal weniger.

In [Morf et al., 2002] wurden anhand Literaturangaben, BFS-Gehalte in TV/PC-Monitoren für Alt- und Neugeräte abgeschätzt. Diese Werte können mit dem Verhältnis von Gehäuse- zu Monitorgewicht (=0.18) auf den Kunststoffteil umgerechnet werden. Dabei werden für PentaBDE in Alt- und Neugeräten 0 mg/kg, für OctaBDE in Altgeräten 10.5 g/kg, in Neugeräten 9.4 g/kg, für DecaBDE in Altgeräten 15 g/kg und in Neugeräten 10 g/kg und für TBBPA 57 bzw. 56 g/kg Kunststoff geschätzt. Der Vergleich der Messungen mit den Resultaten aus [Morf et al., 2002] zeigt, dass PentaBDE im Gegensatz zur dortigen Schätzung sehr wohl noch gefunden wird. Die gemessene OctaBDE- Konzentration beträgt sowohl in TV/PC-Gehäusen und TV-Rückwänden etwa 75% des für Alt- und Neugeräte angegeben Wertes. DecaBDE in TV-Rückwänden liegt im Bereich zwischen dem Alt- und Neugerätewert für Monitore. In TV/PC-Gehäusen jedoch beträgt der gemessene DecaBDE- Wert im Vergleich zu Altgeräten nur ein Drittel, verglichen mit Neugeräten (Bezugsjahr: 2000) die Hälfte der in [Morf et al., 2002] geschätzten Konzentrationen.

Werte von additiv gebundenem Tetrabrombisphenol A (TBBPA), welches analytisch bestimmt werden konnte, liegen in den TV/PC-Gehäusen auf ansprechendem Niveau (23 g/kg), für die TV-Rückwände auf drei mal tieferem Niveau (7.3 g/kg). In den Holzfraktionen wird kaum TBBPA gefunden (80 mg/kg). TBBPA-Konzentrationen in Kunststoffen in alten und neuen Monitorgeräten werden in [Morf et al., 2002] mit 57 g/kg geschätzt. Diese Zahl beinhaltet jedoch auch reaktiv gebundenes TBBPA, das in dieser Untersuchung nicht bestimmt werden konnte.

Bedeutende HBCD- Konzentrationen wurden einzig in TV-Rückwänden gemessen (1.4 g/kg).

Die Phosphorkonzentration, welche in den TV/PC-Gehäusen mit gemessen worden ist, liegt bei rund 2.5 g/kg. In den Holzgehäusen kann sie vernachlässigt werden. PCB Konzentrationen liegen mit 0.03 mg/kg für alle drei Fraktionen auf einem sehr tiefen Niveau. Es überrascht, dass in der reinen TV/PC-Gehäuse Fraktion im Mittel 1.24 mg/kg Quecksilber gefunden wurde.

### 5.2.2 Händisch aussortierte/demontierte Batterien/Akkus, Cu-Kabel und Leiterplatten

In Tabelle 5-3 sind die Stoffkonzentrationsbereiche für die händisch aussortierten bzw. demontierten Kondensatoren, Cu-Kabel und Leiterplattenfraktionen dargestellt.

Tabelle 5-3: Mittlere Stoffkonzentrationen der händisch aussortierten/demontierten Kondensatoren-, Cu-Kabel- und Leiterplattenfraktion inkl. der Angabe einer unteren und oberen Grenze in Form eines 95%-Konfidenzintervalls (von ± 2σ). Angaben in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen.

Element / Stoff	Kondensatoren			Cu-Kabel			Leiterplatten		
	u.G. [mg/kg]	MW [mg/kg]	o.G. [mg/kg]	u.G. [mg/kg]	MW [mg/kg]	o.G. [mg/kg]	u.G. [mg/kg]	MW [mg/kg]	o.G. [mg/kg]
Al	-	-	-	-	-	-	15'000	27'000	39'000
Sb	-	-	-	-	-	-	1'900	2'100	2'200
Pb	-	-	-	11	16	21	10'000	12'000	14'000
Cd	-	-	-	1.4	2.7	4.0	430	500	570
Cr	-	-	-	-	-	-	1'000	1'100	1'200
Fe	-	-	-	-	-	-	39'000	67'000	69'000
Cu	-	-	-	200'000	300'000	400'000	150'000	170'000	190'000
Ni	-	-	-	-	-	-	8'100	10'500	13'000
Hg	-	-	-	-	-	-	0.4	1.7	2.9
Zn	-	-	-	49	59	69	16'000	19'000	22'000
Sn	-	-	-	-	-	-	22'000	28'000	32'000
Cl	-	-	-	320'000	400'000	480'000	2'700	6'800	11'000
Br	-	-	-	-	-	-	28'000	32'000	37'000
P	-	-	-	-	-	-	46	50	54
PentaBDE	-	-	-	15	25	35	10	17	23
TBBPA	-	-	-	3.1	5.0	7.0	26	43	61
HBCD	-	-	-	15	25	35	9	10	11
OctaBDE	-	-	-	-50	100	250	9	10	11
DecaBDE	-	-	-	60	170	280	18	27	36
PCB Summe	1'600	3'000	4'300	-5	32	68	0.023	0.025	0.027

In den **Kondensatoren** wurden nur bromierte Flammschutzmittel und PCB analytisch bestimmt. Die Werte der BFS lagen alle unterhalb der Bestimmungsgrenze. Für PCB wurde ein Mittelwert von rund 3 g/kg bestimmt, wobei Mischprobenwerte von 200 bis 8000 mg/kg gemessen wurden, da dieses heikle Material nur schlecht homogenisiert werden konnte.

In den **Kupferkabeln** wurde ebenfalls nur BFS und PCB analysiert. Die restlichen Konzentrationswerte entstammen Angaben vom Betrieb [Immark, 2004]. BFS wurden in kleinen Konzentrationen gefunden: PentaBDE und HBCD mit 25 mg/kg, OctaBDE und DecaBDE mit bis 250 mg/kg sowie TBBPA Spuren von 5 mg/kg. Die PCB-Werte variieren im Bereich 0- 60 mg/kg.

In den **Leiterplatten** wurden sehr hohe Metallkonzentrationen gefunden. Die grössten Konzentrationen wurden für Cu (171 g/kg), Fe (67 g/kg), Al und Sn (27 g/kg) gemessen. Aber auch die Elemente Zn (16 g/kg), Pb (12 g/kg) , Ni (10 g/kg) und Sb ( 2.1 g/kg) erreichten hohen mittlere Konzentrationen. Die Werte von Cd und Hg betragen 500 mg/kg bzw. 1.7 mg/kg.

In [Demmelhuber, 1994] werden für Leiterplatten folgende Konzentrationsbereiche angegeben: Cu 10-20%, Pb 1-5%, Ni 1-3 %, Sn 0.8-0.9 %, Fe 0.5-10%, Zn 0.3-0.4 %. Von [Angerer, 1993] veröffentlichte Werte betragen für Al 48-64 g/kg, Fe 108 g/kg, Ni 3-7 g/kg, Cu 37-45 g/kg, Zn 14-

22 g/kg, Cd 350-400 mg/kg, Sn 31-34 g/kg, Hg 8-9 mg/kg und Sb 2.8-4.5 g/kg. Aktuelle Werte für geschredderte Platinen liegen bei folgenden Werten: Fe 0.3-30 %, Ni 0.08-8.4 %, Cr 0.05-0.3 %, Cu 13-21 %, Zn 0.7-1.2 %, Cd <0.05 %, Sn 5.3-11 %, Hg <1 mg/kg und Sb 0.17-0.53 % [Wolf, 1998]. Demzufolge liegen die in dieser Studie gemessenen Konzentrationen für Cu, Fe im Vergleich dazu am oberen Ende der angegebenen Bereiche. Die gemessene Sn-Konzentration liegt mehr als 3 mal über dem angegebenen Wertebereich. Pb und Ni liegen am unteren Ende des angegebenen Bereichs. In [Mark & Lehner, 1997] werden für Leiterplatten folgende mittlere Konzentrationen angegeben: Cu 20%, Zn 1.5%, Al 3 %, Ni 0.5%, Fe 5%, Sb 0.06 %. Diese Werte können bis auf Sb gut bestätigt werden. Für die restlichen Metalle ist kein Vergleich möglich.

Die Bromkonzentration betrug im Mittel 32 g/kg. Das Brom scheint, wie aus der Literatur bekannt ist, in reaktiver Form als TBBPA gebunden zu sein. Bromgehalte in Leiterplatten werden in der Literatur für einen Bereich 14 – 27 g/kg [Wolf, 1998, Demmelhuber, 1994 und Angerer, 1993] angegeben. Demnach liegt der hier bestimmte Wertebereich von 28 -37 g/kg oberhalb der zitierten Literaturwerte. Aus Literaturangaben wurden in [Morf et al., 2002] mittlere Bromflammschutzkonzentrationen in Leiterplatten geschätzt (PentaBDE: 0 mg/kg; DecaBDE, OctaBDE und TBBPA : 150'000 mg/kg). Gefunden wurden analytisch für PentaBDE: 10-25 mg/kg, für DecaBDE: 20- 40 mg/kg, für OctaBDE und HBCD je rund 10 mg/kg. Dies bedeutet, dass in [Morf et al., 2002] für Leiterplatten für PentaBDE zu tiefe Konzentration, und für Octa- und DecaBDE jedoch zu hohe Konzentrationen angegeben worden sind.

Die gemessene Chlorkonzentration von 2.5–11 g/kg liegt im oberen Bereich angegebener Literaturwerte (1.7-3.1 g/kg) [Wolf, 1998, Demmelhuber, 1994 und Angerer, 1993].

Für die gemessene HBCD- und PCB-Konzentration von 10 bzw. 0.03 mg/kg standen keine Vergleichswerte zur Verfügung.

### 5.2.3 Mechanisch aufbereitete feinkörnige Kunststoff- und Metallfraktionen und abgeschiedener Staub

In Tabelle 5-4 werden die Stoffkonzentrationsbereiche der mechanisch aufbereiteten feinkörnigen Kunststoff- und Metallfraktionen sowie des Staubes aus der Abluftreinigungsanlage einander gegenübergestellt.

In den **feinkörnigen Kunststofffraktionen 1 und 2** kann anhand der Analysenresultate ein Bromgehalt von 16 g/kg bestimmt werden. Die Cl-Konzentration beträgt 7.7 g/kg, diejenige von Phosphor 1.2 g/kg. Dies sind höhere Werte als in der **feinkörnigen Metallfraktion 1- 4** gefunden werden. Die relativ hohen Restgehalte an Nichtmetallen in der Summe der Metallfraktionen 1-4 sind primär eine Folge der Nichtberücksichtigung des Prozesses „Nachseparation feinkörnige Metallfraktion 1 A und 1 B“. Würde man diesen Prozess mitbilanzieren, würde offensichtlich, dass eine weitere Abreicherung der Nichtmetalle Cl, Br und P in der Metallfraktion erreicht werden kann. Dies ist aber nicht Gegenstand dieser Untersuchung, wie in Kapitel 4.3.1 erläutert und begründet wurde.

In der feinkörnigen Kunststofffraktion 1-2 werden im Mittel 4.2 g/kg additiv gebundenes TBBPA, 1.7 g/kg OctaBDE, 1.3 g/kg OctaBDE und 140 mg/kg PentaBDE gefunden. Die HBCD-Konzentration liegt im Bereich von 50 mg/kg vor. Der PCB-Wert liegt bei rund 6 mg/kg. Im Vergleich



dazu liegen BFS- Werte in der Summe der feinkörnigen Metallfraktionen 1-4 mit Ausnahme von OctaBDE (auch 1.3 g/kg!) deutlich tiefer. Doch auch Werte, wie von DecaBDE 300 mg/kg und TBBPA 940 mg/kg sind ziemlich gross für die Metallfraktion und rühren von Restkunststoffanteilen in den Metallfraktionen her, die in der ausserhalb der Systemgrenze liegenden – nicht berücksichtigten Nachseparation noch deutlich reduziert werden.

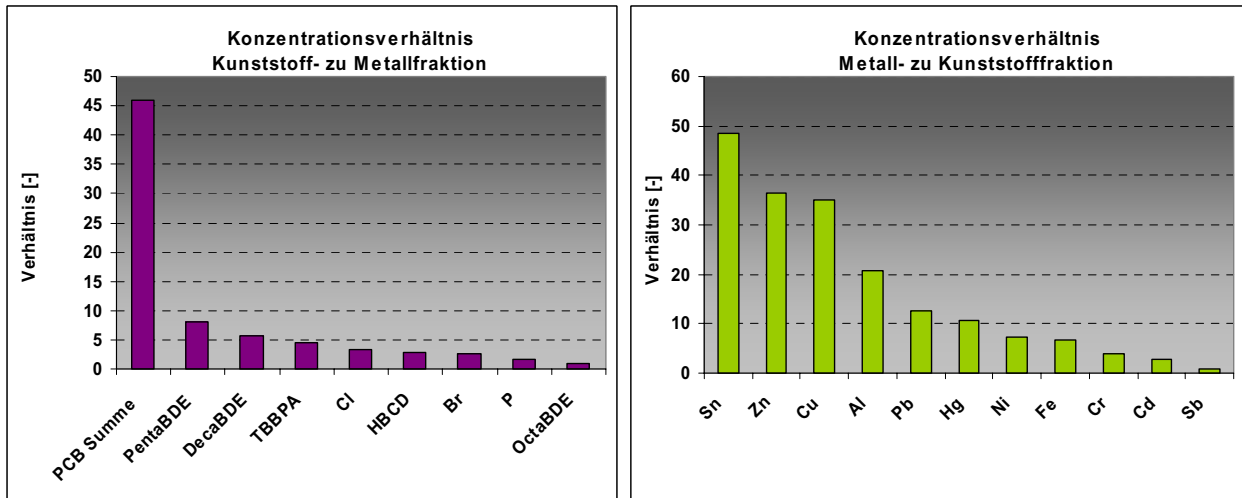
Umgekehrt sieht die Situation beim Vergleich dieser beiden Fraktionen bei den Metallkonzentrationen aus. Mit Ausnahme von Sb (2.3 g/kg im Kunststoff, 1.8 g/kg in den Metallfraktionen) heben sich die Konzentrationen in der Metallfraktion um ein Mehrfaches von denjenigen der Kunststofffraktion ab. Trotzdem liegen die meisten Schwermetallkonzentrationen in der feinkörnigen Kunststofffraktion 1-2 in einem sehr hohen Konzentrationsbereich für Kunststoffe.

Tabelle 5-4: Mittlere Stoffkonzentrationen der feinkörnigen Kunststoff- resp. Metallfraktionen sowie der Staubfraktion inkl. der Angabe einer unteren und oberen Grenze in Form eines 95%-Konfidenzintervalls (von ± 2σ). Angaben in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen.

Element / Stoff	feinkörnige Kunststofffrakt. 1-2			feinkörnige Metallfrakt. 1-4			Staub (Vorz.+Prallm.)		
	u.G. [mg/kg]	MW [mg/kg]	o.G. [mg/kg]	u.G. [mg/kg]	MW [mg/kg]	o.G. [mg/kg]	u.G. [mg/kg]	MW [mg/kg]	o.G. [mg/kg]
Al	13'000	15'000	18'000	310'000	320'000	340'000	15'000	20'000	24'000
Sb	1'600	2'300	3'000	1'700	1'800	1'900	850	1'700	2'500
Pb	10	1'200	2'400	14'000	16'000	17'000	-200	5'900	12'100
Cd	80	140	190	360.0	390.0	420.0	210	340	480
Cr	450	950	1'450	3'400	3'600	3'900	330	740	1'150
Fe	4'800	7'900	10'900	50'000	53'000	56'000	49'000	69'000	89'000
Cu	3'800	7'400	11'000	240'000	260'000	280'000	4'300	6'000	7'800
Ni	350	630	920	4'300	4'600	4'900	1'600	2'300	3'000
Hg	-0.15	0.10	0.35	0.7	1.0	1.3	1.1	1.7	2.4
Zn	900	1'200	1'400	39'000	43'000	47'000	7'900	18'700	29'500
Sn	270	440	610	20'000	22'000	23'000	3'000	4'300	5'500
Cl	7'300	7'700	8'000	2'100	2'300	2'600	2'600	4'600	6'700
Br	15'000	16'000	17'000	5'900	6'300	6'800	3'600	3'400	9'200
P	100	1'200	2'300	590	750	900	-300	200	700
PentaBDE	130	140	160	16	18	20	18	49	81
TBBPA	3'900	4'200	4'400	810	940	1'070	100	700	1'200
HBCD	47	50	53	16	18	20	6	10	14
OctaBDE	1'200	1'250	1'300	1'000	1'300	1'600	120	230	340
DecaBDE	1'600	1'700	1'800	230	300	360	170	290	420
PCB Summe	4.7	5.5	6.3	0.09	0.12	0.15	10	27	45

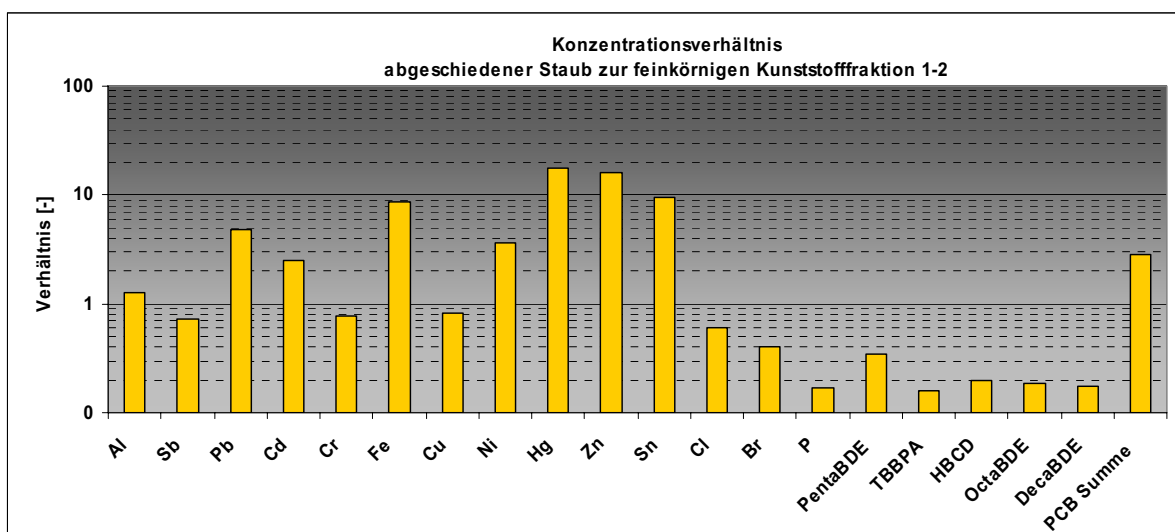
Abbildung 5-3 zeigt schön die Unterschiede der Stoffkonzentrationen der Metalle, Nichtmetalle und organischen Verbindungen in den beiden Arten feinkörniger Outputprodukte. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass der Prozess „Nachseparation feinkörnige Metallfraktion 1 A und 1 B“ ausserhalb der Systemgrenzen lag. Würde man diesen Prozess mitbilanzieren, würde eine weitere Abreicherung von kunststoffgebundenen Elementen/Verbindungen in der Metallfraktion erreicht werden und die Verhältnisse in Abbildung 5-3 noch deutlicher ausfallen. Zu erwähnen ist, dass zur Analyse die feinkörnige Metallfraktion manuell in Kunststoff und Metall aufsortiert wurde. Das in der feinkörnigen Metallfraktion vorhandene Quecksilber wurde dabei überwiegend in der aussortierten Kunststofffraktion gefunden.

Abbildung 5-3: Verhältnis zwischen den mittleren Stoffkonzentrationen in den beiden feinkörnigen Fraktionen „feinkörnige Metallfraktionen 1-4“, „feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2“ für alle untersuchten Stoffe.



Die Stoffkonzentrationen des in der Abluftreinigung **abgeschiedenen Staubes** zeigen gegenüber der Konzentration in den feinkörnigen Kunststofffraktionen 1-2 für die Elemente Hg und Zn eine Anreicherung von über einem Faktor zehn. Für die Elemente Fe, Sn, Pb, Ni, Cd und PCB und Al sind es immer noch Anreicherungsfaktoren zwischen 1.3 und 9. Die Staub- Konzentrationen von Sb, Cr, Cu liegen etwas unterhalb derjenigen in den feinkörnigen Kunststofffraktionen. Die Konzentrationen von Cl und Br betragen 40- 60% der Kunststofffraktionswerte und die BFS-Konzentrationen im Staub (mit Ausnahme von PentaBDE mit rund 35%) weniger als 10% der Gehalte in der Kunststofffraktion. Der mittlere PCB-Summengehalt variiert zwischen 10 und 45 mg/kg.

Abbildung 5-4: Vergleich zwischen den mittleren Stoffkonzentrationen im abgeschiedenen Staub und der feinkörnigen Kunststofffraktion 1-2 für alle untersuchten Stoffe.



## 5.3 Verteilung der Stoffe vom Input in die Outputprodukte des Entsorgungsprozesses (Transferkoeffizienten)

### 5.3.1 Transferkoeffizienten

Die Verteilung der Stoffflüsse vom EEKG-Schrott Input in die verschiedenen Outputprodukte des Entsorgungsbetriebs in Regensdorf während des Versuchs wird mittels Transferkoeffizienten beschrieben. Dabei wird die Unsicherheit berücksichtigt. Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 zeigen die mittleren Transferkoeffizienten aller untersuchten Stoffe vom EEKG-Schrott Input in die verschiedenen Outputfraktionen des untersuchten Betriebs. Dabei ist für die Interpretation der Resultate zu beachten, dass - wie in Kapitel 4.3.1 erläutert und begründet wurde der Prozess „Nachseparation feinkörnige Metallfraktion 1 A und 1 B“ - nicht berücksichtigt wurde. Würde man diesen Prozess mitbilanzieren, würde eine weitere Abreicherung von kunststoffgebundenen Elemente/Verbindungen festzustellen sein.

Die Resultate beziehen sich auf die während des Versuchs im August 2003 umgesetzten Stofffrachten. Die Pfeildicken sind proportional zur jeweils transferierten Stoffmenge. Angegeben wird auch die relative Breite eines approximativen 95%-Konfidenzintervalls (von  $\pm \approx 2\sigma$ ).

#### **Al, Cr, Fe, Ni und Cu**

Die Stoffverteilung dieser Metallgruppe ist sehr ähnlich. 95% von Fe, Cr und Ni, 82% von Al und 76% von Cu gelangen ausschliesslich in die drei Metallfraktionen. Rund 6% vom Al und Fe befinden sich in den Bildröhrenkomponenten. 12% des Kupfers befinden sich in den Cu-Kabeln, 7% in der Leiterplattenfraktion. Immerhin 8% des Al werden in den Kunststofffraktionen „Kunststoff- und Holzgehäuse“, „feinkörnige Kunststofffraktionen“ gefunden. Für Cu sind es noch 4%, für Fe, Cr, Ni < 2%.

#### **Zn und Sn**

Diese beiden Metalle werden zu 60- 64 % in die feinkörnige Metallfraktionen 1-4 transferiert. 5% der beiden Elemente wird in den beiden Kunststofffraktionen gefunden. 20% des Sn bzw. 6% des Zn befindet sich in der Leiterplattenfraktion. Umgekehrt enden 25% des Zn und nur 12% des Sn im Staub. Der Anteil an Zn in den Schadstoffträgern (Batterien) beträgt ca. 3%.

#### **Sb, Pb**

30% (Pb) bzw. 37% (Sb) der beiden Elemente befinden sich in der Fraktion Bildschirmröhrenkomponenten. Pb wird zu nahezu 40%, Sb nur zu 8% in die feinkörnige Metallfraktion 1-4 transferiert. 47% des Sb, aber nur 8% des Bleis werden in die Kunststofffraktionen verteilt. 7% für Sb bzw. 14% für Pb werden im Staub der Abluftreinigung wieder gefunden. Immerhin 7% des Bleis befinden sich in der Leiterplattenfraktion (Blei an Lötstellen). In Batterien und Akkus (Schadstoffträger) werden rund 2% des Pb-Gesamtinputs gefunden.

Abbildung 5-5: Mittlere Transferkoeffizienten von Al, Pb, Cr, Cu, Hg, Sb, Cd, Fe, Ni und Zn vom EEKG-Schrott Input in die verschiedenen Outputfraktionen, während des Versuchs im August 2003 im untersuchten Betrieb inkl. der Angabe der rel. Breite eines approx. 95%-Konfidenzintervalls ( $\pm \approx 2\sigma$ ); angegeben ist auch der gesamte Inputstofffluss während des Versuchs in kg.

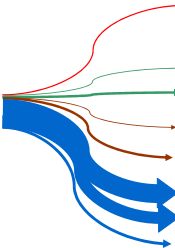
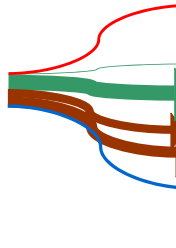
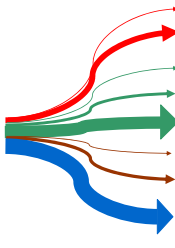
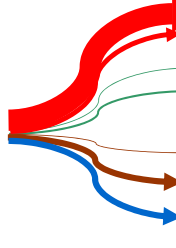
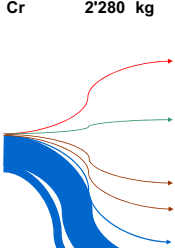
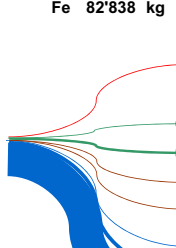
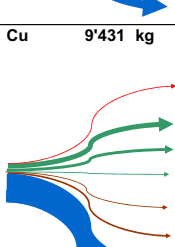
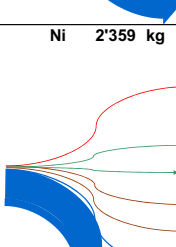
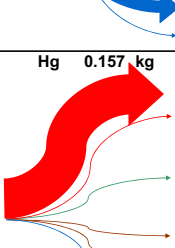
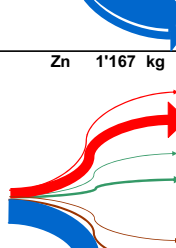
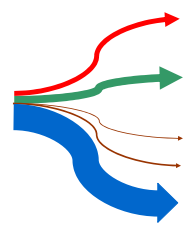
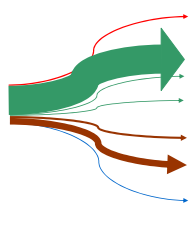
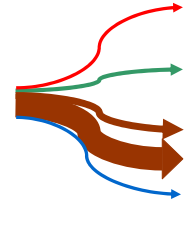
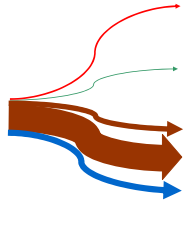
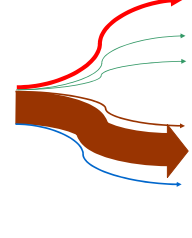
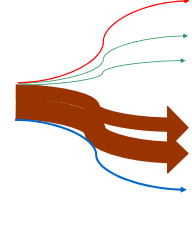
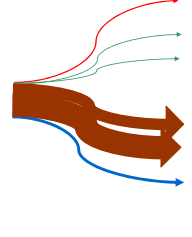
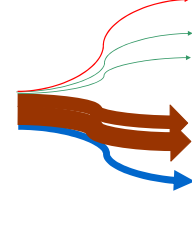
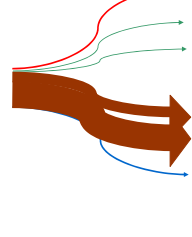
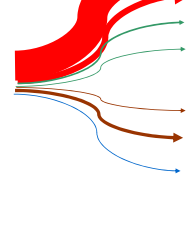
	<b>Al</b> 11'301 kg	<b>Output</b>	<b>[-]</b>	<b>[%]</b>		<b>Sb</b> 383 kg	<b>Output</b>	<b>[-]</b>	<b>[%]</b>
		Schadstoffträger	-	-			Schadstoffträger	-	-
		Staub	0.03	+/- 24%			Staub	0.07	+/- 51%
		Cu-Kabel	-	-			Cu-Kabel	-	-
		Leiterplatten	0.01	+/- 43%			Leiterplatten	0.02	+/- 14%
		Bildröhrenkomponenten	0.06	+/- 12%			Bildröhrenkomponenten	0.37	+/- 15%
		Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.02	+/- 43%			Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.20	+/- 33%
	feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.06	+/- 17%		feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.27	+/- 32%		
	feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.46	+/- 6%		feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.08	+/- 10%		
	Metallschrottfractionen 1-4	0.29	+/- 20%		Metallschrottfractionen 1-4	-	-		
	Fe-Schrottfractionen	0.07	+/- 23%		Fe-Schrottfractionen	-	-		
	<b>Pb</b> 658 kg	<b>Output</b>	<b>in %</b>	<b>[%]</b>		<b>Cd</b> 42 kg	<b>Output</b>	<b>in %</b>	<b>[%]</b>
		Schadstoffträger	0.02	+/- 17%			Schadstoffträger	0.52	+/- 8%
		Staub	0.14	+/- 105%			Staub	0.13	+/- 40%
		Cu-Kabel	0.00	+/- 36%			Cu-Kabel	0.00	+/- 49%
		Leiterplatten	0.07	+/- 26%			Leiterplatten	0.05	+/- 16%
		Bildröhrenkomponenten	0.30	+/- 20%			Bildröhrenkomponenten	-	-
		Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.00	+/- 55%			Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.01	+/- 36%
	feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.08	+/- 100%		feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.15	+/- 40%		
	feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.38	+/- 15%		feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.15	+/- 9%		
	Metallschrottfractionen 1-4	-	-		Metallschrottfractionen 1-4	-	-		
	Fe-Schrottfractionen	-	-		Fe-Schrottfractionen	-	-		
	<b>Cr</b> 2'280 kg	<b>Output</b>	<b>[-]</b>	<b>[%]</b>		<b>Fe</b> 82'838 kg	<b>Output</b>	<b>[-]</b>	<b>[%]</b>
		Schadstoffträger	-	-			Schadstoffträger	-	-
		Staub	0.01	+/- 58%			Staub	0.01	+/- 29%
		Cu-Kabel	-	-			Cu-Kabel	-	-
		Leiterplatten	0.00	+/- 19%			Leiterplatten	0.00	+/- 43%
		Bildröhrenkomponenten	-	-			Bildröhrenkomponenten	0.06	+/- 9%
		Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.00	+/- 143%			Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.00	+/- 126%
	feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.02	+/- 54%		feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.00	+/- 38%		
	feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.03	+/- 13%		feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.01	+/- 5%		
	Metallschrottfractionen 1-4	0.75	+/- 24%		Metallschrottfractionen 1-4	0.09	+/- 10%		
	Fe-Schrottfractionen	0.20	+/- 24%		Fe-Schrottfractionen	0.82	+/- 3%		
	<b>Cu</b> 9'431 kg	<b>Output</b>	<b>[-]</b>	<b>[%]</b>		<b>Ni</b> 2'359 kg	<b>Output</b>	<b>[-]</b>	<b>[%]</b>
		Schadstoffträger	-	-			Schadstoffträger	-	-
		Staub	0.01	+/- 30%			Staub	0.02	+/- 33%
		Cu-Kabel	0.12	+/- 34%			Cu-Kabel	-	-
		Leiterplatten	0.07	+/- 14%			Leiterplatten	0.02	+/- 28%
		Bildröhrenkomponenten	0.01	+/- 21%			Bildröhrenkomponenten	0.00	+/- 25%
		Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.00	+/- 105%			Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.00	+/- 45%
	feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.04	+/- 49%		feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.01	+/- 47%		
	feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.45	+/- 8%		feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.03	+/- 11%		
	Metallschrottfractionen 1-4	0.30	+/- 19%		Metallschrottfractionen 1-4	0.73	+/- 24%		
	Fe-Schrottfractionen	0.01	+/- 21%		Fe-Schrottfractionen	0.19	+/- 24%		
	<b>Hg</b> 0.157 kg	<b>Output</b>	<b>[-]</b>	<b>[%]</b>		<b>Zn</b> 1'167 kg	<b>Output</b>	<b>in %</b>	<b>[%]</b>
		Schadstoffträger	0.98	+/- 1%			Schadstoffträger	0.03	+/- 16%
		Staub	0.01	+/- 36%			Staub	0.25	+/- 60%
		Cu-Kabel	-	-			Cu-Kabel	0.00	+/- 23%
		Leiterplatten	0.00	+/- 76%			Leiterplatten	0.06	+/- 23%
		Bildröhrenkomponenten	-	-			Bildröhrenkomponenten	-	-
		Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.00	+/- 41%			Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.00	+/- 43%
	feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.00	+/- 255%		feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.05	+/- 25%		
	feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.01	+/- 29%		feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.60	+/- 14%		
	Metallschrottfractionen 1-4	-	-		Metallschrottfractionen 1-4	0.01	+/- 18%		
	Fe-Schrottfractionen	-	-		Fe-Schrottfractionen	-	-		

Abbildung 5-6: Mittlere Transferkoeffizienten von Sn, Cl, Br, P, Penta-, Octa-, und DecaBDE, TBBPA, HBCD und PCB Summe vom EEKG-Schrott Input in die verschiedenen Outputfraktionen, während des Versuchs im August 2003 im untersuchten Betrieb inkl. der Angabe der rel. Breite eines approx. 95%-Konfidenzintervalls ( $\pm \approx 2\sigma$ ); angegeben ist auch der gesamte Inputstofffluss während des Versuchs in kg.

Input	Output	[-]	[%]	Input	Output	[-]	[%]
Sn 543 kg 	Schadstoffträger	-	-	Cl 2'211 kg 	Schadstoffträger	-	-
	Staub	0.12	+/- 30%		Staub	0.03	+/- 46%
	Cu-Kabel	-	-		Cu-Kabel	0.71	+/- 25%
	Leiterplatten	0.19	+/- 19%		Leiterplatten	0.01	+/- 62%
	Bildröhrenkomponenten	-	-		Bildröhrenkomponenten	0.02	+/- 18%
	Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.01	+/- 34%		Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.05	+/- 14%
	feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.04	+/- 39%		feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.16	+/- 12%
feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.64	+/- 8%	feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.02	+/- 17%		
Metallschrottfractionen 1-4	-	-	Metallschrottfractionen 1-4	-	-		
Fe-Schrottfractionen	-	-	Fe-Schrottfractionen	-	-		
Br 1'262 kg 	Schadstoffträger	-	-	P 82 kg 	Schadstoffträger	-	-
	Staub	0.08	+/- 44%		Staub	0.04	+/- 247%
	Cu-Kabel	-	-		Cu-Kabel	-	-
	Leiterplatten	0.10	+/- 15%		Leiterplatten	0.00	+/- 61%
	Bildröhrenkomponenten	-	-		Bildröhrenkomponenten	-	-
	Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.17	+/- 7%		Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.13	+/- 72%
	feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.57	+/- 6%		feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.65	+/- 102%
feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.08	+/- 8%	feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.15	+/- 64%		
Metallschrottfractionen 1-4	-	-	Metallschrottfractionen 1-4	-	-		
Fe-Schrottfractionen	-	-	Fe-Schrottfractionen	-	-		
PentaBDE 7.9 kg 	Schadstoffträger	-	-	TBBPA 326 kg 	Schadstoffträger	-	-
	Staub	0.10	+/- 65%		Staub	0.03	+/- 86%
	Cu-Kabel	0.01	+/- 40%		Cu-Kabel	0.00	+/- 39%
	Leiterplatten	0.01	+/- 41%		Leiterplatten	0.00	+/- 41%
	Bildröhrenkomponenten	-	-		Bildröhrenkomponenten	-	-
	Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.04	+/- 12%		Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.35	+/- 10%
	feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.81	+/- 13%		feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.57	+/- 8%
feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.04	+/- 14%	feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.05	+/- 15%		
Metallschrottfractionen 1-4	-	-	Metallschrottfractionen 1-4	-	-		
Fe-Schrottfractionen	-	-	Fe-Schrottfractionen	-	-		
HBCD 3.9 kg 	Schadstoffträger	-	-	OctaBDE 121 kg 	Schadstoffträger	-	-
	Staub	0.04	+/- 44%		Staub	0.03	+/- 47%
	Cu-Kabel	0.03	+/- 45%		Cu-Kabel	0.00	+/- 147%
	Leiterplatten	0.01	+/- 25%		Leiterplatten	0.00	+/- 12%
	Bildröhrenkomponenten	-	-		Bildröhrenkomponenten	-	-
	Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.28	+/- 81%		Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.33	+/- 11%
	feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.57	+/- 18%		feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.46	+/- 8%
feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.07	+/- 24%	feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.17	+/- 22%		
Metallschrottfractionen 1-4	-	-	Metallschrottfractionen 1-4	-	-		
Fe-Schrottfractionen	-	-	Fe-Schrottfractionen	-	-		
DecaBDE 117 kg 	Schadstoffträger	-	-	PCB Summe 3.0 kg 	Schadstoffträger	0.73	+/- 57%
	Staub	0.04	+/- 42%		Staub	0.15	+/- 72%
	Cu-Kabel	0.01	+/- 64%		Cu-Kabel	0.04	+/- 121%
	Leiterplatten	0.00	+/- 34%		Leiterplatten	0.00	+/- 35%
	Bildröhrenkomponenten	-	-		Bildröhrenkomponenten	-	-
	Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.26	+/- 20%		Kunststoff- und Holzgehäuse (PC/TV)	0.00	+/- 27%
	feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.65	+/- 8%		feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2	0.08	+/- 29%
feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.04	+/- 22%	feinkörnige Metallfraktionen 1-4	0.00	+/- 35%		
Metallschrottfractionen 1-4	-	-	Metallschrottfractionen 1-4	-	-		
Fe-Schrottfractionen	-	-	Fe-Schrottfractionen	-	-		

### **Cd, Hg**

Für diese beiden Schadstoffe haben die Stoffanteile aus den Batterien/Akkumulatoren (Fraktion „Schadstoffträger“) eine grosse Bedeutung auf die Stoffverteilungskoeffizienten. Aus Literaturdaten abgeschätzten Konzentrationen in Batterien/Akkus (siehe Anhang 9.4.2) ergeben für Hg und Cd Transferkoeffizienten für diese Outputfraktion von 0.98 bzw. 0.52. Für Hg und Cd beträgt der Anteil im Staub rund 1 bzw. 13 %. Die Anteile in den restlichen Outputfraktionen können für Hg vernachlässigt werden. Max. 3% der Hg-Menge im EEKG-Schrott Input befindet sich in der dargestellten Fraktion „brennbare Abfälle“. Cd findet man zu je 15% in den feinkörnigen Fraktionen (Metalle und Kunststoffe!) wieder; zu 5% in den Leiterplatten.

### **Brom und bromierte Flammschutzmittel**

Brom sowie alle untersuchten bromierten Flammschutzmittelverbindungen werden zu  $\geq 80\%$  in die drei Fraktionen „Kunststoff- und Holzgehäuse“, „feinkörnige Kunststofffraktionen 1- 2“ transferiert (TBBPA und DecaBDE zu 92%, Br, PentaBDE, HBCD zu rund 85%, OctaBDE zu 79%). Nur 1% des PentaBDE und HBCD, kein Octa-/ DecaBDE und kein additiv gebundenes TBBPA definiert sich in den Leiterplatten, jedoch 10% des Brom (als vermutlich mehrheitlich reaktiv gebundenes TBBPA). Die Aufteilung in die beiden Fraktionen „Kunststoff- und Holzgehäuse“, „feinkörnige Kunststofffraktionen 1- 2“ ist unterschiedlich. PentaBDE wird zu nahezu 100% in die feinkörnige Fraktion verteilt, für die restlichen BFS sind es 60-70% bzw. für Brom 75%. In die Staubfraktion gelangen 8-10% des Broms und des PentaBDE bzw. 3- 4% der restlichen BFS. Der Stoffflussanteil, welcher in der feinkörnigen Metallfraktion 1-4 anfällt, ist für alle bromierten Stoffe mit  $\geq 4\%$  nicht vernachlässigbar. Rund 4-5% ist dieser Anteil für Penta-, DecaBDE und TBBPA, 7-8% für Br und HBCD. Für OctaBDE beträgt dieser Anteil sogar 17%.

### **Phosphor**

Phosphor verhält sich gemäss der Schätzungen aus diesem Projekt nahezu identisch wie HBCD mit dem einzigen Unterschied, dass mit 15% ein relativ grosser Teil dieses mit grosser Wahrscheinlichkeit in phosphorierten Flammschutzmittelverbindungen eingesetzten Elements in der feinkörnigen Metalloutputfraktion 1- 4 endet. 3% der P-Menge geht in die hier nicht dargestellte Fraktion „brennbare Abfälle“.

### **Chlor**

71% des Chlors befindet sich in Cu-Kabeln und endet auch in der Cu-Kabeloutputfraktion. 20% werden in die beiden Fraktionen „Kunststoff- und Holzgehäuse“, „feinkörnige Kunststofffraktionen 1- 2“ in einem Verhältnis von eins zu drei vorgefunden. 3% werden im Staub wieder gefunden. Restmengen von je 1-2% werden in die Fraktionen Bildschirmröhrenkomponenten, Leiterplatten, und feinkörnige Metallfraktionen 1- 4 verteilt. 1% der Cl-Menge ist in der hier nicht dargestellte Fraktion „brennbare Abfälle“, und wird vernachlässigt.

### **PCB Summe**

73% dieser Schadstoffgruppe kann mittels händischer Aussortierung/Demontage aus dem verarbeiteten Material entfernt und einer speziellen Entsorgung zugeführt werden. Durch die Entstaubung im Betrieb (Abluftreinigung) werden immerhin 15% des gesamten PCB-Inputs in der Staubfraktion abgeschieden, die sonst als diffuse Emissionen aus dem Verarbeitungsprozess entweichen würden. Nicht zu vernachlässigende Restmengen verteilen sich in die Fraktionen Cu-Kabel (4%) und feinkörnige Kunststofffraktionen 1 -2 (8%).

### 5.3.2 Stoffflüsse

Neben der dimensionslosen Darstellung der Stoffverteilung in Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 sind in Tabelle 5-5 sowohl In- und Outputstoffflüsse in Kilogramm angegeben. Anhand dieser Stoffflüsse können auf betrieblicher und nationaler Ebene Abschätzungen zu den während eines Jahres umgesetzten Stofffrachten gemacht werden.

Tabelle 5-5: Stoffverteilung vom EEKG-Schrott Input in die verschiedenen Outputfraktionen, während des Versuchs im August 2003 im Betrieb der IMMAG AG / DRISA AG in kg. (Werte gerundet), Fehlerangaben siehe Anhang.

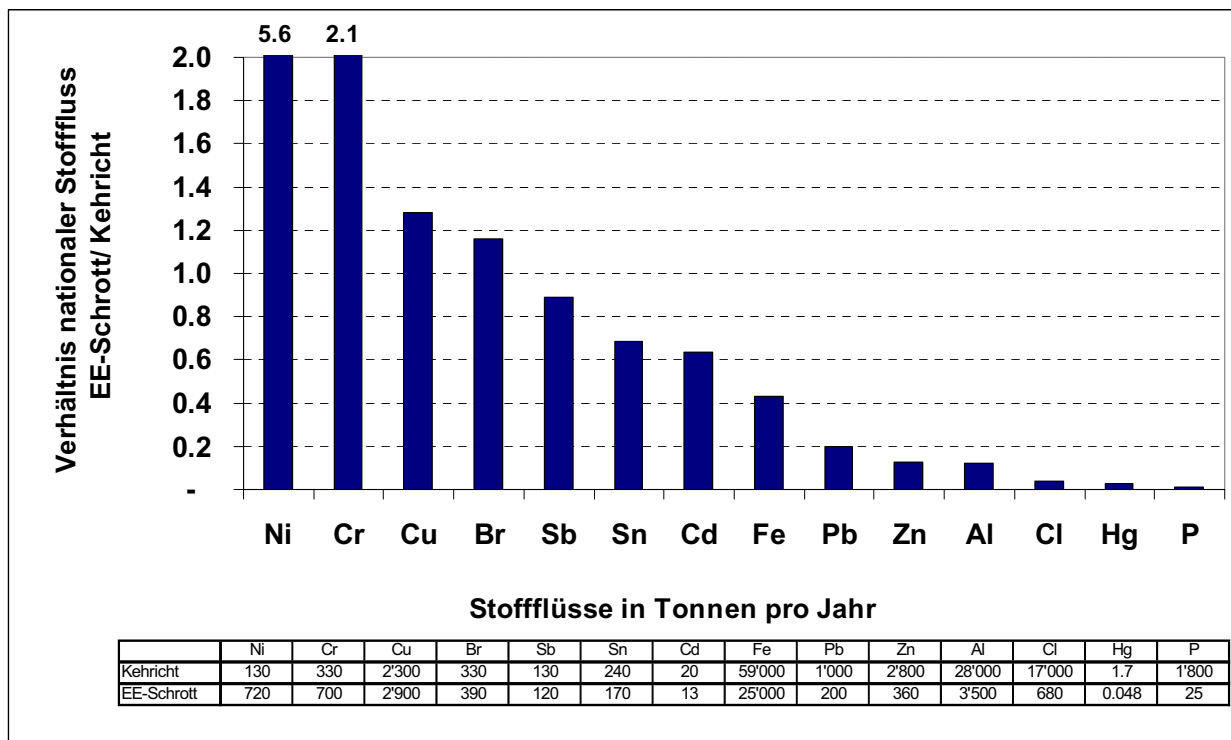
Element / Stoff	Input EEKG- Schrott [kg]	Schad- stoff- träger [kg]	Staub [kg]	Cu-Kabel [kg]	Leiter- platten [kg]	Bild- röhren- kompo- nenten [kg]	Kunst- stoff- und Holz- gehäuse (PC/TV) [kg]	fein- körnige Kunst- stoff- fraktionen 1-2 [kg]	fein- körnige Metall- fraktionen 1-4 [kg]	Metall- schrott- fraktionen 1-4 [kg]	Fe-Schrott- fraktionen [kg]
Al	11'000	4.1	310	-	100	680	210	690	5'200	3'300	800
Sb	380	-	26	-	8	140	76	100	30	-	-
Pb	660	16	94	0.06	45	200	1.1	55	250	-	-
Cd	42	21	5.4	0.01	1.9	-	0.37	6.2	6.3	-	-
Cr	2'300	2.6	12	-	4.3	-	0.69	42	59	1'700	450
Fe	83'000	230	1'100	-	250	4'800	5.8	350	860	7'400	69'000
Cu	9'400	4.1	95	1'200	640	55	1.9	330	4'200	2'800	93
Ni	2'400	21	36	-	40	0.07	0.96	28	75	1'700	450
Hg	0.16	0.09	0.028	-	0.0063	-	0.0059	0.0044	0.017	-	-
Zn	1'200	37	300	0.23	73	-	1.5	53	700	6.8	-
Sn	540	-	67	-	100	-	3.5	20	350	-	-
Cl	2'200	-	72	1'600	26	42	110	340	38	-	-
Br	1'300	-	100	-	120	-	220	720	100	-	-
P	82	-	3.2	-	0.19	-	11	53	12	-	-
PentaBDE	7.9	-	0.8	0.098	0.06	-	0.28	6.4	0.29	-	-
TBBPA	330	-	10	0.020	0.16	-	114	190	15	-	-
HBOD	3.9	-	0.16	0.098	0.04	-	1.1	2.2	0.29	-	-
OctaBDE	120	-	3.6	0.39	0.04	-	40	56	21	-	-
DecaBDE	120	-	4.6	0.66	0.10	-	31	76	4.8	-	-
PCB Summe	3.0	2.2	0.43	0.12	0.000094	-	0.00016	0.25	0.0019	-	-



Für die BFS können damit z.B. die Resultate mit der in der nationalen Stoffflussanalyse [Morf et al., 2002] für Ende der 90er Jahre geschätzten Stoffflüsse der Schweiz verglichen werden. Dort wurde für die Summe BFS in EDV- und Büroelektronik, Kommunikationstechnik, Unterhaltungselektronik und Haushaltgeräte klein (als Abfälle anfallende Menge: 115'000 t/a) folgende Stoffflüsse geschätzt: 0.6 t PentaBDE, 45 t OcaBDE, 137 t DecaBDE und 203 t TBBPA (reaktiv und additiv). Rechnet man die Stoffflüsse während des Versuchs für die gleichen EEKG-Schrott Fraktionen und entsorgte Gesamtmenge, wie in [Morf et al., 2002] auf nationale Verhältnisse um, dann ergibt dies für PentaBDE rund 4 t, für Octa- und DecaBDE je rund 60 t und für (nur) additiv gebundenes TBBPA 164 t.

Für einzelne untersuchte Stoffe können z.B. jährliche Stofffrachten im untersuchten EEKG-Schrott mit Stofffrachten im Kehricht oder anderen Abfall- /Recyclingfraktionen verglichen werden. Abbildung 5-7 zeigt einen Vergleich der jährlich in der Schweiz umgesetzten Metall- und Nichtmetallfrachten im EEKG-Schrott und im Kehricht [Datenquelle: Morf, 2004]. Dabei zeigt sich, dass der heute in Recyclingprozessen separat behandelte EEKG-Schrott im Vergleich zum Kehricht für die meisten betrachteten Elemente bedeutende Stofffrachten enthält. Für die Legierungselemente Ni und Cr sind dies 600 bzw. 200 %, für Eisen als Hauptelement von Stählen 40% und für Cu (Hauptanwendung für elektrische Leiter und Anschlüsse) 125% der im Kehricht enthaltene Stoffmenge. Für die beiden mit Flammschutz in Verbindung stehenden Elemente Br und Sb sind 120 bzw. 90% der im Kehricht enthaltenen Stoffmenge in der EEKG - Schrottfraktion enthalten. Für Pb sind es noch 20%, für Zn und Al noch rund 10%. Die Anteile für Cl, Hg und P sind mit <5% in erster Näherung vernachlässigbar.

Abbildung 5-7: Vergleich zwischen den mittleren Stofffrachten in EEKG-Schrott (Elektro- und Elektronikkleingeräte) und Kehricht in der Schweiz zu Beginn des 21-igsten Jahrhunderts; Datenbasis: Kehrichtanalyse 2003 [Morf, 2004] und Daten aus dem Versuch. (Werte gerundet).



## 5.4 Stoffliche Zusammensetzung von Schweizer Elektro- und Elektronik-Kleingeräte-Schrott im Jahr 2003

### 5.4.1 Elektro- und Elektronikkleingeräte-Schrott

Die Summe aller Outputstoffflüsse dividiert durch den Gesamt-Input Massenstrom ergibt die stoffliche Zusammensetzung des EEKG-Schrotts, was dem gesamten Abfallinput im Versuch entspricht (Tabelle 5-6). Weil im Versuch ein zur aktuellen mittleren Schweizer EEKG-Schrott-Fraktionszusammensetzung ähnlicher Input-Mix zusammengestellt wurde, können die ermittelten Gehalte im EEKG-Schrott bei der ansprechend grossen „Stichprobe“ als gute Näherung für die stoffliche Zusammensetzung von Schweizer Elektro- und Elektronik-Kleingeräte-Schrott verwendet werden.

Die Unsicherheit der Resultate konnte dank des wohlüberlegten Probenahme- und Probeaufbereitungskonzept auf einem sehr tiefen Niveau gehalten werden. Die relativen Breiten der angegebenen approximativen 95%-Konfidenzintervalle betragen für die meisten Stoffe weniger als  $\pm 20\%$ . Einzig die Mittelwerte von Hg ( $\pm 32\%$ ), P ( $\pm 61\%$ ) und PCB ( $\pm 35\%$ ) sind mit grösserer Unsicherheit behaftet. Für Phosphor, weil Messung in nur einzelnen Analysen in relevanten Outputgütern (indikative Messung) durchgeführt wurden. Für PCB, weil infolge einer schwierigen Probeaufbereitung der Kondensatorfraktion eine grosse Inhomogenität der Mischproben folgte.

Tabelle 5-6: Mittlere Stoffkonzentrationen des während des Versuchs verarbeiteten EEKG-Schrott (Elektro- und Elektronikkleingeräte) inkl. der Angabe einer unteren und oberen Grenze in Form eines approx. 95%-Konfidenzintervalls (von  $\pm \approx 2\sigma$ ) sowie der relativen Abweichung in %. Angaben in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Element / Stoff	Input EEKG- Schrott			rel. Abw.
	u.G. [mg/kg]	MW [mg/kg]	o.G. [mg/kg]	
Al	46'000	49'000	53'000	7%
Sb	1'500	1'700	1'900	12%
Pb	2'400	2'900	3'400	18%
Cd	130	180	230	27%
Cr	8'300	9'900	11'600	17%
Fe	350'000	360'000	370'000	3%
Cu	38'000	41'000	44'000	8%
Ni	8'600	10'300	11'900	16%
Hg	0.47	0.68	0.90	32%
Zn	4'300	5'100	5'900	16%
Sn	2'200	2'400	2'500	7%
Cl	8'300	9'600	11'000	14%
Br	5'200	5'500	5'800	5%
P	140	360	580	61%
PentaBDE	31	34	38	10%
TBBPA	1'300	1'400	1'500	6%
HBCD	13	17	21	22%
OctaBDE	500	530	560	6%
DecaBDE	470	510	550	7%
PCB Summe	8	13	17	35%

Messungen der stofflichen Zusammensetzung von EEKG-Schrott sind bis heute praktisch keine publiziert worden. So wurden z.B. in einer Studie aus Deutschland [Niedersächsisches Umweltministerium, 1998] Resultate eines Untersuchungsprogramms des Arbeitskreises „Elektronikschrott“ der Kommission der Niedersächsischen Landesregierung publiziert, welche mit den hier publizierten Resultaten teilweise vergleichbar sind. Das Untersuchungsprogramm zur Schadstoffrelevanz von Elektrokleingeräten wurde im Jahre 1996 durchgeführt. Dabei wurden ca. 11 Tonnen Elektrokleingeräte in 9 t schadstoffarme und 2 t schadstoffreiche Komponenten getrennt. Diese Fraktionen zerlegt bzw. mechanisch aufbereitet und die resultierenden Fraktionen beprobt und analysiert. Als eines der Resultate wurde für verschiedene Stoffe auch die mittlere chemische Zusammensetzung des untersuchten Elektrokleingeräteschrotts bestimmt (Tabelle 5-7).

Tabelle 5-7: Mittlere Stoffkonzentrationen in mg/kg einer Elektrokleingeräte- Schrottfraktion in Deutschland im Jahre 1996 [Niedersächsisches Umweltministerium, 1998]

Stoff	Al	Sb	Pb	Cd	Cr	Fe	Cu	Ni	Hg	Zn	Sn	Cl	Br	PBDE	PCB
Konz. [mg/kg]	100000	900	4000	480	650	380000	110000	1800	1.9*	14000*	2600*	8400	3400	340	63

\* nur Konzentration der Reststoffe der Aufbereitung

Die Resultate in Tabelle 5-7 zeigen praktisch identische Werte für Fe, und sehr ähnliche für Cl, Sn. Die Konzentrationen von Sb, Br liegen im Versuch 1996 deutlich tiefer, was ev. den noch verminderten Einsatz von BFS hinweisen könnte. Diese Vermutung wird auch durch die damals drei mal kleinere PBDE- Konzentration gestützt. Die im Jahre 1996 in Deutschland bestimmten Al, Pb-, Cd-, Cu-, Zn-Konzentrationen in Elektrokleingeräteschrott liegen im Vergleich zu den Werten dieser Studie deutlich höher. Die Differenz bei Cd und Pb könnte ein Indiz für die verminderte Anwendung der beiden Schadstoffe sein. Die z.T. grossen Differenzen der Nichteisenmetalle Al, Cu, Zn sowie Cr und Ni scheint doch auf die deutlich unterschiedliche Fraktionszusammensetzung des untersuchten EEKG-Schrotts hinzuweisen. (Anteil Haushaltsgeräte, Küchengeräte 52%, Unterhaltungselektronik 15%, IT- Geräte nur 6%! Dieser Umstand, zusammen mit der Tatsache, dass damals vor schon bald 10 Jahren nur 11 statt 230 t Material untersucht worden sind und sicher z.T. unterschiedliche Methoden zur Anwendung kamen, bedeutet, dass Vergleiche mit Vorsicht angestellt werden.

In einer nicht publizierten Untersuchung bei Solenthaler Recycling AG in der Schweiz (Eichert et al., 2002) wurden in einem Versuch Umweltgrenzwerte des SWICO verifiziert, verfahrenstechnische Prozesse auf Ihre Eignung untersucht, Optimierungspotentiale ermittelt und die Verteilung von Wertstoffen im Prozess untersucht. Dazu wurden Güterflüsse bestimmt und Stoffkonzentrationen ausgewählter Elementen ( Au, Ag, Pt, Pd, Pb, Ni, Cd, Hg, Cr, Sn und Cu) in einzelnen Outputfraktionen ermittelt. Die Outputfraktionen können nicht den hier untersuchten Fraktionen zugeordnet werden. Damit können auch keine Stoffkonzentrationen in den Produkten der Verarbeitung verglichen werden. Vergleichbare Zahlen hinsichtlich der Stoffkonzentration im Input (EE-Schrott) liegen nicht vor. Auch waren bei der Untersuchung 15% Grossgeräte mit eingeschlossen. Die prozentuale Zusammensetzung der Inputfraktionen mit 13% Unterhaltungselektronik, 63% EDV-Elektronik, 8% Kleingeräte sowie 15% Grossgeräte weicht deutlich von der Zusammensetzung des hier untersuchten Abfalls ab. Dies würde nur sehr bedingt einen Vergleich der EEKG-Zusammensetzungen in den beiden Versuchen erlauben.

### 5.4.2 BFS in EEKG-Schrott – Vergleich mit nationaler SFA- Studie

Für einen Teil der untersuchten Flammenschutzmittelverbindungen können, wie schon für die Stoffflüsse in Kapitel 5.3 ausgeführt, auch auf Stoffkonzentrationsebene die Resultate mit den Abschätzungen der nationalen Stoffflussanalyse [Morf et al., 2002] verglichen werden.

Die mit den Messungen ermittelten mittleren Konzentrationen betragen mit 35 mg/kg für PentaBDE etwa sieben mal mehr als in [Morf et al., 2002] anhand von Literaturwerten und Abschätzungen zum Lager in den privaten Haushalten und in der Industrie und im Gewerbe geschätzt wurde. Für OctaBDE liegt der im Versuch ermittelte Konzentrationsbereich von 500-560 mg/kg um nahezu einen Viertel höher; die Konzentration von DecaBDE dagegen liegt etwa um die Hälfte tiefer als in der Stoffflussanalyse geschätzt. Der Gehalt für additiv gebundenes TBBPA im EEKG-Schrott lag im Versuch in einem Bereich von 1300-1500 mg/kg. Dies entspricht 80% des Gehalts an (additiv und reaktiv gebundenem) TBBPA aus [Morf et al., 2002]. Unter einer Annahme von 5.3 % reaktiv gebundenem TBBPA in Leiterplatten (3.2% Br als 100% reaktiv gebundenes TBBPA, mit 60% Br-Anteil), die nicht detektiert werden konnten, würde eine Erhöhung der Gesamt-TBBPA-Konzentration von rund 60% resultieren. Bei der Addition zu den analysierten additiv gebundenem TBBPA würde damit die Gesamt-TBBPA-Konzentration (additiv+ reaktiv) bei 140% des in [Morf et al., 2002] bestimmten Wertes betragen und könnte auf eine leichte Steigerung des TBBPA- Einsatzes hindeuten.

Wird die mittlere Bromkonzentration des EEKG-Schrotts im Versuch (5.5 g/kg) verglichen mit der in [Morf, 2003] aus den in den vier Flammenschutzmittelsubstanzen (Penta-, Octa-, DecaBDE und TBBPA) bestimmten mittleren Bromgehalt von 2.3 g/kg, stellt sich die Frage, wie diese Differenz zustande kommt. Die Bromkonzentration, welche im Versuch auf die analysierten BFS (Penta-, Octa-, DecaBDE, additives TBBPA und HBCD) sowie auf das nicht analysierte reaktiv gebundene TBBPA in Leiterplatten (3.2 % Br) zurückgeführt werden kann, ist praktisch identisch der in [Morf, 2003] bestimmten Br-Konzentration (2.2 g Br/kg). Dies bedeutet, dass von den 1260 kg Brom im EEKG-Schrott Input nur rund 40% den analysierten Substanzen (Penta-, Octa-, DecaBDE, HBCD, additiv gebundenes TBBPA) und dem in Leiterplatten reaktiv gebundenen TBBPA (das nur als Br gemessen werden konnte) zugeordnet werden können. Für 60% des Brom Inputs ist nicht bekannt in welcher chemischen Form das Brom in den EEKG vorliegt! Handelt es sich um reaktiv gebundenes TBBPA oder um andere polymere Bromverbindungen?

### 5.4.3 Metalle, Cl und PCB in EEKG-Schrott – Vergleich mit RESH

Ein Vergleich der Konzentrationen ausgewählter Stoffe im EEKG-Schrott (Input zur Entsorgungsanlage) zu RESH (Reststoffe aus Shredderanlagen, nach der Grossshredderanlage, die Abfälle zur Entsorgung) aus der Altautoentsorgung in der Schweiz zeigt Tabelle 5-8.

Einzig die Cd- Konzentration liegt in einem ähnlichen Wertebereich wie diejenige in RESH. Die Konzentrationen von Cl liegt leicht unterhalb der RESH- Konzentration, Zn, Pb, Hg und PCB liegen deutlich unterhalb den Stoffwerten im RESH. Dafür werden im EEKG-Schrott deutlich höhere Konzentrationen Fe, Cu, Cr und Ni als im RESH gefunden.

Tabelle 5-8: Vergleich der Stoffkonzentrationen im EEKG-Schrott mit RESH (Reststoffe aus Shredderanlagen) in der Schweiz. Angaben in mg/kg (Datenquelle für RESH- Werte: Tremp et al., 1995)

		<b>u.G.</b>	<b>MW</b>	<b>o.G.</b>
<b>Cl</b>	EEKG- Schrott	8300	<b>9600</b>	11000
	RESH	12800	<b>16000</b>	19200
<b>Fe</b>	EEKG- Schrott	350000	<b>360000</b>	370000
	RESH	111000	<b>140000</b>	151000
<b>Zn</b>	EEKG- Schrott	4300	<b>5100</b>	5900
	RESH	16500	<b>20000</b>	23500
<b>Cu</b>	EEKG- Schrott	38000	<b>41000</b>	44000
	RESH	18100	<b>25000</b>	31900
<b>Pb</b>	EEKG- Schrott	2400	<b>2900</b>	3400
	RESH	6900	<b>8100</b>	9300
<b>Cr</b>	EEKG- Schrott	8300	<b>9900</b>	11600
	RESH	1030	<b>1800</b>	2570
<b>Ni</b>	EEKG- Schrott	8600	<b>10300</b>	11900
	RESH	890	<b>1200</b>	1710
<b>Cd</b>	EEKG- Schrott	130	<b>180</b>	230
	RESH	50	<b>150</b>	250
<b>Hg</b>	EEKG- Schrott	0.47	<b>0.68</b>	0.9
	RESH	2.7	<b>4.9</b>	7.1
<b>PCB</b>	EEKG- Schrott	8	<b>13</b>	17
	RESH	52	<b>109</b>	199

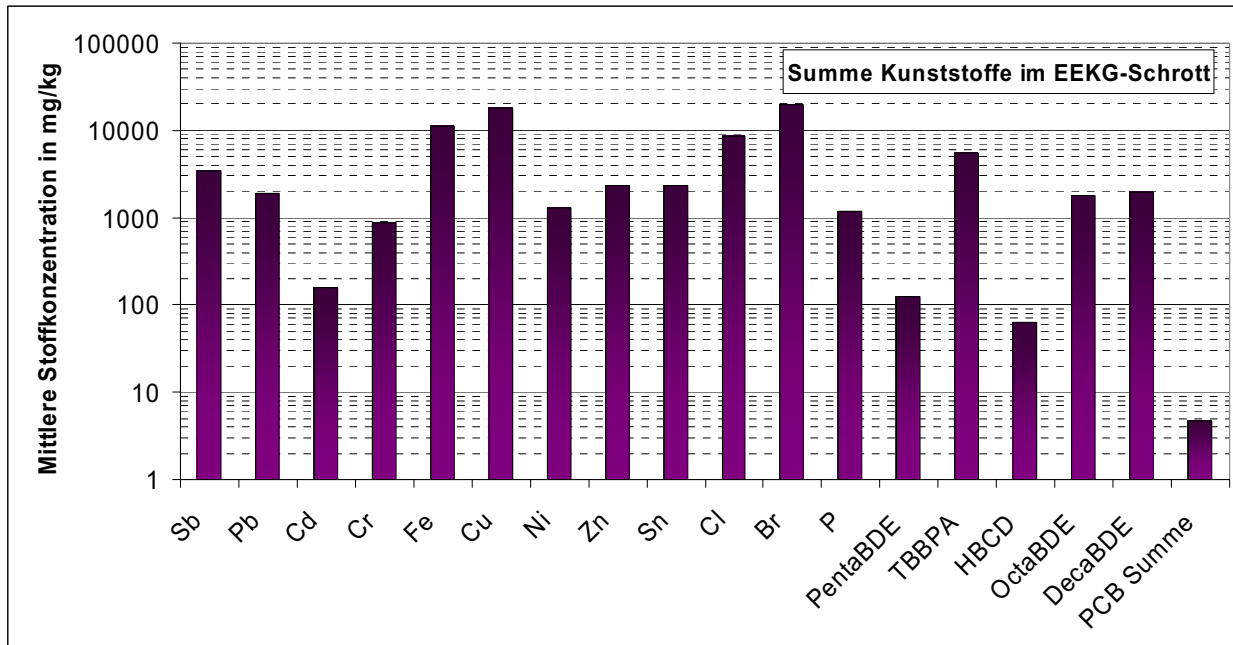
#### 5.4.4 Kunststoffanteil im EEKG-Schrott – Vergleiche mit der Literatur

Die Versuchsanlage erlaubt die mittleren Stoffkonzentrationen der Summe aller Kunststofffraktionen im EEKG-Schrott Input zu berechnen. Diese Summe ist im grossen und ganzen identisch mit der Summe aller im Versuch angefallenen Outputfraktionen PC/TV-Gehäuse TV-Rückwände, feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2 und Leiterplatten.

Abbildung 5-8 zeigt die mittleren Konzentrationen für alle untersuchten Stoffe in der „synthetischen“ Kunststofffraktion (Outputfraktionen PC/TV-Gehäuse TV-Rückwände, feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2 und Leiterplatten) aus dem Versuch.

Der mittlere Gehalt in der „synthetischen“ Kunststoffmischung liegt für Brom bei 20 g/kg für Chlor bei 8.7 g/kg (Abbildung 5-8). Diese Werte liegen ziemlich genau in der Mitte der in [Vehlow& Mark, 1997] angegebenen Bandbreite für Brom von 5 – 40 g/kg und Chlor 2 – 23 g/kg von verschiedensten Kunststofffraktionen in EEKG-Schrott.

Abbildung 5-8: Masse und mittlere Stoffkonzentrationen des Kunststoffinputs im EEKG-Schrott des Versuchs im August 2003 (= Summe der Outputfraktionen PC/TV-Gehäuse, TV-Rückwände, feinkörnige Kunststofffraktionen 1-2 und Leiterplatten) in kg (Masse) bzw. mg/kg (Konzentrationen).



Für die bromierten Flammschutzmittel werden folgende mittlere Konzentrationen ermittelt: Additiv gebundenes TBBPA 5.6 g/kg, OctaDBPE 2 g/kg, DecaBDE 1.8 g/kg, PentaBDE 125 mg/kg und HBCD 60 mg/kg. In der nationalen Stoffflussanalyse für die Schweiz [Morf et al. 2002] wurden für die EEKG-Schrott Anteile EDV- und Büroelektronik, Kommunikationstechnikgeräte, Unterhaltungselektronik und „Haushaltsgeräte klein“ mittels Angaben aus der Literatur Stoffflüsse für ausgewählte BFS bestimmt. Daraus lässt sich die mittleren Flammschutzmittelgehalte für den Kunststoffanteil der Summe dieser Fraktionen errechnen und mit den oben dargestellten Konzentrationen vergleichen. Dabei zeigt der Vergleich zu den in der Stoffflussstudie mittels Literaturwerten geschätzten Werten (PentaBDE: 17 mg/kg; OctaBDE: 1.2 g/kg; DecaBDE: 3.8 g/kg und TBBPA: 5.7 g/kg), dass der gemessene PentaBDE- Wert von 125 mg/kg rund um den Faktor 7 grösser ist, der gemessene OctaBDE- Wert um fast 70% grösser ist und die gemessene DecaBDE- Konzentration von 1.8 g/kg dagegen nur rund die Hälfte beträgt. Der aus den Messungen bestimmte mittlere TBBPA- Wert (nur additiv gebunden) ist praktisch gleich gross wie der in der SFA geschätzte TBBPA- Wert (additiv und reaktiv gebundenes TBBPA). Trotz der im Vergleich zur SFA unterschiedlichen Fraktionszusammensetzung des EEKG-Schrott Input von 45 statt 31% EDV- und Büroelektronik, 2.6 statt 6% Kommunikationstechnikgeräte, 37 statt 30% Unterhaltungselektronik und 15% statt 33% „Haushaltsgeräte klein“ ist diese unterschiedliche Fraktionsverteilung als Ursache für die Differenzen unwahrscheinlich. Dies allein schon aus der Tatsache, dass PentaBDE, welches in [Morf et al., 2002] nur in Unterhaltungselektronik vermutet wurde, im Versuch bei halbem Unterhaltungselektronikanteil in siebenfacher Konzentration bestimmt wird.

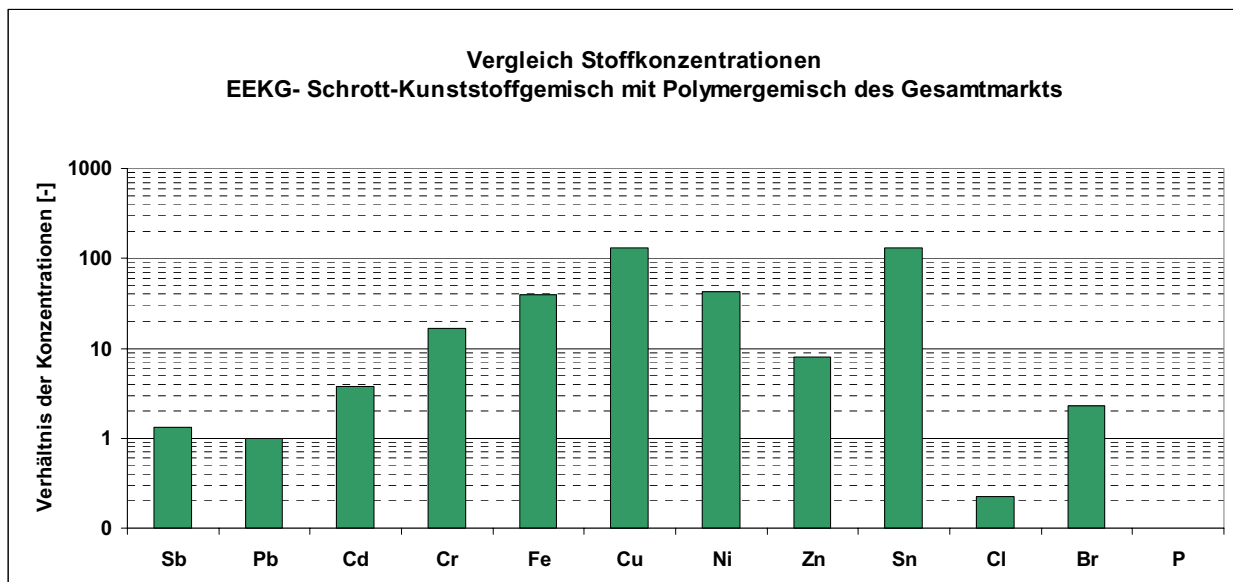
Phosphor- und Aluminiumkonzentration (mögliche Basisstoffe für alternative Flammschutzsubstanzen) liegen bei 1.2 g/kg respektive 19 g/kg. [Vehlow & Mark, 1997] geben für Phosphor in für P in verschiedenen Kunststofffraktionen in EEKG-Schrott Werte zwischen 2.6 – 8.2 g/kg an. Der Gehalt an PCB liegt bei 5 mg/kg.

Anhand der Messungen wurden mittlere Metallgehalte für Cd, Hg, Pb, Sb bei 160 mg/kg, 0.31 mg/kg, 1900 mg/kg respektive 3500 mg/kg bestimmt. Der Cd-Wert liegt dabei deutlich oberhalb, Pb, Sb am oberen Rand der in [Vehlow& Mark, 1997] zitierten Werte von verschiedenen Kunststofffraktionen in EEKG-Schrott (Cd: 30- 120 mg/kg; Pb: 100-2000 mg/kg; Sb: 2 – 13 g/kg). Ähnlich hohe Stoffkonzentrationen wie für Al wird für andere potentielle Wertstoffe, wie Cu (18 g/kg), Fe (11 g/kg), Ni (1.3 g/kg) respektive Cr (0.9 g/kg) gemessen. Die Konzentrationen der beiden Elemente Zn und Sn liegen je bei 2.3 g/kg. Vergleicht man diese Konzentrationen mit in [Vehlow& Mark, 1997] zusammengestellten Werten von verschiedenen Kunststofffraktionen in EEKG-Schrott (Cu: 0.08-105 g/kg; Zn: 1.5-5 g/kg; Sn: 0.06-2 g/kg; Ni: 0.17–0.55 g/kg; Cr: 0.14-0.4 g/kg und Fe: 0.4–3.3 g/kg), zeigt sich, dass die gemessenen Werte für Cu und Zn im mittleren Wertebereich, für Sn am oberen Rand und für Ni, Cr und Fe deutlich oberhalb des dort publizierten Wertebereichs liegen.

Interessant ist ein Vergleich zwischen den Stoffkonzentrationen des Kunststoffinputs im EEKG-Schrott aus dem Versuch im August 2003 und Gehalten einer mittleren Polymermischung aus dem Gesamtkunststoffmarkt [Vehlow& Mark, 1997].

Abbildung 5-9 zeigt für ausgewählte Stoffe z.T. sehr grosse Differenzen. In der Kunststoffmischung des EEKG-Schrotts kommt einzig das Element Chlor in tieferen Konzentrationen vor. Die Sb- und Pb-Konzentrationen liegen auf praktisch gleichem Niveau. Die Bromkonzentration ist in der Kunststoffmischung des EEKG-Schrotts doppelt so hoch. Für die restlichen Metallgehalte der Kunststoffmischung liegen um Faktor 4 bis >100 über den Gehalten im mittleren Polymer-Mix des Kunststoffmarktes.

Abbildung 5-9: Vergleich zwischen den mittleren Stoffkonzentrationen des Kunststoffinputs im EEKG-Schrott aus dem Versuch im August 2003 und Gehalten einer mittleren Polymermischung aus dem Gesamtkunststoffmarkt [Vehlow& Mark, 1997].



## 5.5 Vorschlag für ein zukünftiges Monitoringkonzept

Ein Ziel des Projekts war es auch, die Frage zu beantworten, wie der untersuchte oder andere ähnliche Entsorgungsbetriebe in Zukunft untersucht werden sollen, um Veränderungen in der stofflichen Zusammensetzung der Abfälle und damit zusammenhängenden Änderungen der Stoffflüsse möglichst effizient und repräsentativ feststellen und abbilden zu können.

Die Definition eines zukünftigen Stoffflussmonitorings wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Folgende Aspekte spielen dabei eine entscheidende Rolle:

- Visionen und Leitbilder (z.B. Leitbild der Abfallwirtschaft, Umweltmanagementleitbild der Firma) und davon abgeleitete Ziele
- Anforderungen aus der Umweltschutzgesetzgebung (Grenzwerte, Verbote, Einschränkungen etc.) oder aus der Marktwirtschaft (z.B. Marktpreise für Recycling-Metalle)
- Anforderungen bezüglich der Unsicherheit, um definierte Veränderungen/Trends signifikant zu erkennen (z.B. 5 % Abnahme einer Stoffkonzentration in 5 Jahren) .

Die Wahl des Messkonzepts ist eine Optimierungsaufgabe, bei der die Kosten für das Monitoring unter Berücksichtigung der Unsicherheit dem Informationsgewinn (Nutzen) gegenübergestellt werden. Nutzenaspekte, die schlecht quantifizierbar sind oder erst in Zukunft beziffert werden können, sollten einbezogen werden. So führt z.B. die ganzheitliche Betrachtungsweise mittels der Stoffflussanalyse zu mehr Transparenz und mehr Vertrauen bei Behörden und Bevölkerung. Die bessere Vertrauensbasis schafft potentiellen Mehrwert bei zukünftigen Investitionsvorhaben, der heute kaum quantifizierbar ist.

Anhand der Resultate dieser Untersuchung kann ein erster Vorschlag für ein zukünftiges Stoffflussmonitoring gemacht werden. Folgende Erkenntnisse aus dem abgeschlossenen Projekt sind dabei wertvoll:

### Anfall und Verarbeitung von EEKG-Schrott in der Praxis

#### ➤ Zeitliches Verhalten der Abfallzusammensetzung in der Praxis

Die Abklärungen und Untersuchungen zeigen, dass die Anlieferung der verschiedenen EEKG-**Schrottfaktionen** über die Zeit sehr unterschiedlich (kurzzeitig systematische Variationen) sind. Einmal kommt eine grosse Lieferung eines Grossverteilers, einmal eine Lieferung alte PCs, dann wieder zwei Container Telefone usw. Dies bedeutet, dass zur Erzeugung von repräsentativen Resultaten (z.B. Jahresmittelwerten) entweder in analoger Weise zum abgeschlossenen Projekt, ein „typisches mittleres Jahres-Inputmenü“ zusammengestellt wird, welches als Stichprobe die untersuchte Gesamtheit gut repräsentiert. Oder der untersuchte Betrieb wird über das ganze Jahr in einem noch zu definierenden Rhythmus an den richtigen Probenahmestellen im Prozess beprobt und die Stichproben zu Mischproben vereint. Variante 1 bedeutet für den Betrieb einmal pro Jahr einen erhöhten Logistikaufwand, Variante 2 einen kleinen Probenahme und- aufbereitungsaufwand über das ganze Jahr verteilt.

Vieles deutet darauf hin, dass neben der Fraktionszusammensetzung, die sich in sehr schnellen Zyklen (einige wenige Jahre) komplett ändert (z.B. Wechsel von Röhren-



Bildschirmen zu LCD-Bildschirmen), die **stoffliche Zusammensetzung** des Abfalls auch stark variiert. Dies wird noch verstärkt durch Massnahmen auf der Stoffseite (z.B. Einführung einer neuen Generation von Flammschutzhemmenden Substanzen, bleifreies Löten etc.). Dies bedeutet, dass zur Beobachtung mittelfristiger Trends eine periodische Analyse in Zeiträumen von z.B. jeweils 5 Jahren nicht ausreicht, solche Änderungen als signifikant feststellen zu können. Für eine verlässliche Bewertung von Massnahmen wird eine regelmässige Messung (mindestens auf Basis von jährlichen Untersuchungen) notwendig.

➤ **Laufende Weiterentwicklung der Verfahrens- /Aufbereitungstechnik**

Infolge sich ändernder Marktverhältnisse, Änderungen auf Gesetzesebene und laufend neuen Innovationen in der Verfahrensentwicklung wird der Prozess der EE-Schrott Aufbereitung laufend modifiziert. Solche systematischen Verfahrensänderungen können spürbare Änderungen der Stoffverteilung bewirken. Dies birgt den Nachteil, dass in Anlehnung an die in [ Morf, 1998] für die Kehrlichtverbrennung entwickelte Methodik, nicht mit der Probenahme/Analyse in nur einzelnen relevanten Outputprodukten und der Verwendung konstant angenommener Stoffverteilung im Prozess (Transferkoeffizienten) gearbeitet werden kann. Es ist infolge der auftretenden systematischen Verfahrensänderungen notwendig die Transferkoeffizienten laufend zu hinterfragen und bei Bedarf zu kontrollieren.

### **Erfahrungen mit der Probenahme, -aufbereitung und Analyse**

Die in diesem Projekt gesammelten Erfahrungen in der Methodik der Probenahme, Probeaufbereitung und Analytik sowie die erarbeiteten Resultate erlauben (a) den Aufwand für ein zukünftiges Monitoring abzuschätzen und (b) die Kosten eines zukünftigen Monitorings im Vergleich zu den im vorliegenden Bericht beschriebenen Untersuchungen stark zu reduzieren.

Wenn aus abfallwirtschaftlichen und anderen Überlegungen die maximal akzeptierbare Unsicherheit (z.B. ein relativer Fehler  $< \pm 20\%$ ) zur signifikanten Bestimmung einer Veränderung einer Stoffkonzentration im EE-Schrott (z.B. Reduktion um 5%) über eine definierte Zeit (z.B. 5 Jahre) definiert wird, kann der damit verbundene Aufwand abgeschätzt werden. Die Wahl der untersuchten Stoffe beeinflusst zusätzlich die Kosten.

### **Erkenntnisse anhand der ermittelten Stoffverteilungen**

Die in Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 dargestellten Stoffverteilungen aller untersuchten Stoffe können genutzt werden, den Probenahmeaufwand zu optimieren. Es wird stark von der Problem- bzw. Fragestellung sowie der Prozessführung im Betrieb abhängen, wie viel Aufwand betrieben werden muss. So kann z.B. zur Bestimmung der BFS- Gehalte im EEKG-Schrott neben den beiden Kunststofffraktionen praktisch auf Analysen verzichtet werden. Falls man sich aber für das Verhältnis der in den Metallfraktionen „verloren gegangenen“ BFS-Menge zur BFS-Menge im Gesamtinput interessiert, müssten auch die Metallfraktionen genauer untersucht werden. Anhand der nun bekannten Stoffverteilungen können genauere Aufwand- Nutzen Überlegungen dazu gemacht werden.

### Anzahl zu untersuchender Prozesse in der Schweiz

Um eine repräsentative Aussage bezüglich der Zusammensetzung des Schweizer EEKG-Schrotts zu machen, reicht es, in einer ähnlichen Konstellation wie für den untersuchten Betrieb (grosses Einzugsgebiet, marktführende Stellung, für die Schweiz repräsentativer Input-Mix) in erster Näherung jeweils pro Messung einen Betrieb in der Schweiz zu untersuchen. Dies muss nicht immer derselbe Betrieb sein, obwohl die Wiederholung von Messungen im selben Betrieb den Vorteil beinhaltet durch die Nutzung von Erfahrungen Kosten zu sparen.

Wenn aber das zukünftige Ziel darin besteht, die EE-Schrott Verarbeitung in der Schweiz hinsichtlich Unterschieden in der Stoffverteilung und das Emissionsverhaltens zu untersuchen, würde es nicht ausreichen, nur einen Betrieb zu untersuchen. In diesem Fall müsste ein Technologievergleich Klarheit über die Gesamtschweizerischen Verhältnisse schaffen. Messungen in verschiedenen Betrieben wären notwendig.

### Konkreter Diskussionsvorschlag eines zukünftigen Stofffluss - Monitorings

Vorschlag zur Beobachtung des Trends der stofflichen Zusammensetzung des EEKG-Schrotts für die Schweiz.

Untersuchter Betrieb:	Mit Vorteil wieder IMMARK AG / DRISA AG
Zeitliche Systemgrenze:	Jeweils 1 Jahr
Stoffe:	Ähnliche Stoffpalette wie im vorliegenden Projekt (ev. zusätzlich weitere Flammschutzverbindungen)
Probenahme:	Übers ganze Jahr verteilt. Wobei in etwa jeweils pro 4 Monate 1 Mischprobe à 20 Stichproben erstellt werden, d.h. alle 4 Arbeitstage eine respektive jede Woche 2 Stichproben gezogen werden.
Beprobte Güter:	Nach Stoff unterschiedlich und abhängig von Fragestellung.
Massenbilanzen:	Jährliche Massenbilanzen des gesamten Inputs- und aller Outputströme
Probeaufbereitung:	Probeaufbereitung vor Ort übers ganze Jahr laufend aufbereiten; im Labor 1x pro Jahr alle erstellten Proben.
Analytik und Auswertung:	1 x pro Jahr mit Berichterstattung gemäss gemeinsamer Absprache

Dieser Vorschlag kann bei vertretbarem Aufwand, aber mit deutlichem Mehrnutzen als Ergänzung der bisherigen Erfolgskontrolle auf Fraktions- /Masseebene auch für Stoffe umgesetzt werden.

## 6 Schlussfolgerungen

### 6.1 Schlussfolgerungen methodischer Art

#### **Ganzheitliche Betrachtungsweise mittels Stoffflussanalysen**

Im Gegensatz zu in der Regel wenig robusten Einzeldaten, liefert die Stoffflussanalyse neben der statistisch gut abgesicherten stofflichen Zusammensetzung des EEKG-Schrott Inputs auch die Stoffverteilung in den Outputprodukten (Transferkoeffizienten). Dies erlaubt eine ganzheitliche Darstellung des untersuchten Prozesses. So kann der Fokus auf prioritäre Aspekte gelenkt und können Optimierungs- bzw. Gefährdungspotenziale früh erkannt und genutzt werden.

Auch diese Messkampagne bestätigt, dass eine umfassende Stoffflussanalyse wichtige Informationen zur Überprüfung von Analyse-Resultaten aus dem Labor liefert. Anhand von Input-Output-Vergleichen bzw. der Gegenüberstellung von einzelnen Stofffrachten können Analysewerte einzelner Fraktionen gut auf deren Plausibilität geprüft werden. Eine solche zusätzliche Qualitätskontrolle ist anhand einzelner Analysewerte kaum möglich.

#### **Repräsentative Aussagen dank guter Versuchsvorbereitung**

Es zeigte sich, dass sich eine gezielte Versuchsvorbereitung im Hinblick auf die Qualität der Resultate lohnt. Dank Vorbereitungen im Logistikbereich (Abfallanlieferung) gelang es zusammen mit dem Betrieb, eine dem aktuellen Schweizer Mittel recht gut entsprechende Abfallinput-Mischung für den Versuch bereit zu stellen. Die Erstellung provisorischer Stoffbilanzen anhand von Literaturdaten lieferte zusätzlich wertvolle Grundlagen für die optimale Versuchsplanung.

#### **Optimiertes Probenahme- und Probeaufbereitungskonzept minimiert die Heterogenität der untersuchten Güter**

Die Analyseresultate bestätigen, dass sich das für den Versuch entwickelte Probenahme-, Probeaufbereitungs-, und Analysekonzept bewährt hat. Die Heterogenität in den Outputproduktströmen konnte zu einem grossen Teil reduziert werden. Die Anzahl Stichproben pro Mischprobe, die Anzahl Mischproben im Versuch, sowie die gewählte Aufbereitungstechnik vor Ort und im Labor erlaubten die Unsicherheit der Stoffkonzentrationen und -flüsse im Gesamtinput für die meisten Stoffe tief zu halten.

#### **Interne und externe Qualitätssicherungsmaßnahmen**

Resultate aus speziellen Aufbereitungs- und Extraktionsversuchen, Vergleichsmessungen im Labor sowie aus in externen Labors durchgeführten Analysen dienten zur Qualitätssicherung auf Laborebene. Die Resultate der Untersuchungen zeigen mehrheitlich gute Übereinstimmung der Analysewerte.

## 6.2 Schlussfolgerungen inhaltlicher Art

### Unsicherheit der Resultate

Das gewählte Versuchskonzept ermöglichte die Unsicherheit der mittleren EEKG-Schrott Konzentrationen, geschätzt als approximatives 95%-Konfidenzintervall für die meisten Stoffe kleiner  $\pm 20\%$  zu halten. Einzig die Unsicherheit für Hg ( $\pm 32\%$ ) begründet durch einzelne Ausreisserwerte sowie durch wenig gesicherte Werte der aktuellen Batteriekonzentration, für P ( $\pm 60\%$ ), das mit nur wenigen Analysen gemessen wurde sowie die PCB-Summe ( $\pm 35\%$ ), bedingt durch die erschwerten Bedingungen bei der Kondensatoraufbereitung, sind grösser. Die relativen Fehler der Inputstofffrachten bewegen sich in ähnlichen Bandbreiten. Die relative Unsicherheit der Transferkoeffizienten variiert je nach Stoff und Transfer zwischen 0% und  $\pm 250\%$ .

### Zusammensetzung des EEKG-Schrott Input

#### Massenströme/Fraktionen

Obwohl die Fraktionen EDV- und Büroelektronik (45%) und Unterhaltungselektronik (37%) gegenüber den Fraktionen „Haushaltsgeräte klein“ (15%) und Kommunikationsgeräte (2.6%) im Vergleich zum Schweizer Mittel jeweils stärker berücksichtigt wurden, spiegeln die über die Outputprodukte bestimmten Anteile von 45% Metall, rund 23% Kunststoff, 20% Bildschirmröhrenkomponenten (Glas + Metall), 7% Staub (Metall + Kunststoff), Leiterplatten und Cu-Kabelfraktion mit je 2% sowie Schadstoffträger von rund 0.6% recht gut die mittlere Schweizer Fraktionszusammensetzung aus [SWICO, 2002] wieder. Die im Versuch ermittelte stoffliche Zusammensetzung kann dank dieser ähnlichen Fraktionsanteile und der grossen „Stichprobe“ von 230 t in erster Näherung als gute Schätzung für die mittlere stoffliche Zusammensetzung von Schweizer Elektro- und Elektronik-Kleingeräte-Schrott im Jahre 2003 verwendet werden.

#### Stoffliche Zusammensetzung

Bis heute sind nur wenige Messungen der stofflichen Zusammensetzung von EEKG-Schrott publiziert worden. In einer Untersuchung aus Deutschland [Niedersächsisches Umweltministerium, 1998] wurden Stoffkonzentrationen in Elektrokleingeräten im Jahre 1996 ermittelt. Obwohl die Untersuchung im Vergleich zu dieser Studie zum Teil sehr ähnliche Resultate und einzelne erklärbare Differenzen lieferte (z.B. tiefere Werte für Sb, Br, PBDE als Indiz einer damals noch verminderten Anwendung von BFS), ist ein direkter Vergleich der Daten nur bedingt möglich. Zu viele unterschiedliche Voraussetzungen, wie eine deutlich abweichende Zusammensetzung des untersuchten EEKG-Schrotts, eine viel kleinere Stichprobe in der deutschen Studie (11 t im Vergleich zu 230 t) und z.T. methodische Unterschiede unterscheiden die beiden Arbeiten.

Bezüglich der untersuchten bromierten Flammschutzmittel können die Resultate mit Werten in der nationalen Stoffflussanalyse für die Schweiz [Morf et al., 2002] und der umfangreichen Marktuntersuchung der kantonalen Labors [Kuhn et al., 2004; Wegmann et al., 1999] verglichen werden. Dabei kann für TBBPA (gesteigerte Werte) ein zu erwartender zunehmender Trend bestätigt werden und für OctaBDE (Differenz liegt im Fehlerbereich) stimmen die Resultate recht gut überein. Für PentaBDE zeigen die Messungen sehr stark abweichende Resultate (siebenfacher Mehrbefund). Für DecaBDE wird gegenüber der in der Stoffflussanalyse für Ende der 90er Jahre geschätzten Werte und dem Trend der globalen Produktionsmenge ein eher unerwarteter Minderbefund diagnostiziert. Das mittlere Br/Sb- Verhältnis von etwas mehr als

drei liegt im Bereich von Literaturwerten, jedoch etwas über den in [Kuhn et al., 2004] gefundenen Werten von zwei bis drei. Ob diese Werte bzw. Differenzen als punktuelle Abweichungen oder Trends zu verstehen sind, kann erst über eine längere Beobachtungsdauer verifiziert werden.

Vergleicht man die mittleren Stoffkonzentrationen von ausgewählten Elementen im EEKG-Schrott mit aktuellen Gehalten im schweizer Kehricht [Morf, 2003], dann stellt man fest, dass in der rund 30 mal kleineren EEKG-Schrott Menge die jährlich umgesetzten Stofffrachten für Ni 5 mal, Cr 2 mal, Cu 1.3 mal und Br fast 1.2 mal grösser als diejenigen im gesamten Schweizer Kehricht sind. Die Schwermetallfrachten an Cd, Sn und Sb betragen rund 60-90% der jährlichen Fracht im Kehricht. Dies bedeutet, dass selbst relativ kleine Mengen an EEKG-Schrott im Kehricht dessen Zusammensetzung für bestimmte Elemente deutlich erhöhen kann. Die erstmals ermittelten statistisch abgesicherten Schweizer EEKG-Schrott Konzentrationen erlauben nun zusammen mit Messungen für Kehricht selber [Morf, 2003] genauere Abschätzungen zu deren Einfluss auf die Zusammensetzung des Kehrichts und der Verbrennungsprodukte aus dessen thermischen Behandlung.

Ein Vergleich der EEKG-Schrott Konzentrationen mit Stoffkonzentrationen in RESH (Reststoffe aus Shredderanlagen der Altautoentsorgung) zeigt für vergleichbare Stoffe nur für Cd ähnliche Werte. Die Konzentrationen von Cl liegt leicht unterhalb derjenigen im RESH. Die Konzentrationen von Zn, Pb und Hg betragen rund 2.5 bis 7 mal weniger als im RESH, PCB sogar mehr als Faktor 8 weniger. Dafür werden im EEKG-Schrott im Vergleich zu RESH für Fe, Cu, Cr und Ni um 1.5 bis 8-fach höhere Konzentrationen gefunden. Auch dieser Vergleich unterstreicht die stark unterschiedlichen stofflichen Eigenschaften zweier Metall-Kunststoffgemische in der Abfallwirtschaft.

Im Gegensatz zum gesamten EEKG-Schrott wurden verschiedentlich Konzentrationswerte des gesamten Kunststoffgemischanteils im EEKG-Schrott publiziert. Berechnungen für den gesamten Kunststoffanteil im EEKG-Schrott Input zeigen, dass Werte für Cl, Br, Cu, Zn in ähnlichen Wertebereichen wie in der Literatur liegen. Cd, Pb, Sb, Sn, Ni, Cr, und Fe liegen am oberen Rand bzw. z.T. deutlich über den publizierten Werten. P-Werte liegen deutlich unterhalb der publizierten Werte. Diese Vergleiche sind eine erste Standortbestimmung. Sie dienen dazu erste Überlegungen zu möglichen Ursachen von deutlichen Unterschieden anzustellen. Um Veränderungen im positiven und negativen Sinn signifikant erkennen zu können, bedarf es aber Beobachtungen über längere Zeiträume.

Vergleicht man die mittleren Element-Gehalte des gesamten Kunststoffgemischanteils im EEKG-Schrott mit einer mittleren Polymermischung aus dem Gesamtkunststoffmarkt [Vehlow & Mark, 1997], erkennt man – mit Ausnahme von Cl, Sb und Pb – für die untersuchten Schwermetalle riesige Differenzen (bis Faktor 100). Dieses Erkenntnis ist nicht neu, unterstreicht aber die Notwendigkeit einer differenzierten Betrachtung hinsichtlich der „letzten Senke Problematik“ in Verwertungs- und Entsorgungsfragen auf stofflicher Ebene (Elemente und Verbindungen).

## **Zusammensetzung von Einzelfractionen im EEKG-Schrott Input sowie den Produkten der Schrottverwertung**

Die Stoffflussanalyse erlaubt aus den Versuchsergebnissen auch Aussagen zu statistisch gut abgesicherten Zusammensetzungen von Einzelfractionen im EEKG-Schrott Input (z.B. TV/PC-Gehäuse, TV- Rückwände, Leiterplatten etc.) sowie den Produkten der Schrottverwertung (z.B. feinkörnige Kunststofffraction aus der mechanischen Aufbereitung) zu machen. Daraus können direkte Vergleiche zu in der Literatur veröffentlichten Gehalten in diesen typischen EEKG-Schrott Fractionen sowie Aussagen zur Qualität von produzierten Outputfractionen gemacht werden.

Ein Vergleich der Gehalte in den verschiedenen Einzelfractionen im EEKG-Schrott Input mit Literaturdaten zeigt einige übereinstimmende Werte (z.B. Metallkonzentrationen in Leiterplatten), aber auch grosse Unterschiede (z.B. PentaBDE in Kunststoffgehäusen, TV-Rückwänden und Cu-Kabeln, sowie Sb in Leiterplatten). Solche Unterschiede bedürfen einer zukünftigen Erklärung, oder müssten genauer beobachtet werden.

Die Betrachtung von Stoffkonzentrationen in den Produkten der EE-Schrott Verwertung zeigt, dass neben den naturgemäss hohen Metallgehalten in Metalloutputfractionen bzw. hohen Gehalten an organischen Verbindungen und deren Bausteine Cl, Br, P in den Kunststoffoutputfractionen, noch sehr hohe Gehalte an organischen Verbindungen und Cl, Br, P in Metalloutputfractionen bzw. umgekehrt auch grosse Metallkonzentrationen in den Kunststoffoutputfractionen vorgefunden werden. Auch dieser Aspekt unterstreicht die Wichtigkeit, dass bezüglich der „letzten Senke Problematik“ in Verwertungs- und Entsorgungsfragen auf stofflicher Ebene (Elemente und Verbindungen) genügend Beachtung geschenkt wird. Im Fall des untersuchten Betriebs kann davon ausgegangen werden, dass durch die Nachseparation eines Teils der feinkörnigen Metallfraction eine weitere deutliche Abreicherung an kunststoffgebundenen Elementen/ Verbindungen dieser Fraction erreicht wird. Dies wurde aber innerhalb dieses Projekts aus verschiedenen Gründen (Schutz des verfahrenstechnischen Detail-Know-hows etc.) nicht untersucht.

Mittels der händischen Demontage/ Aussortierung von Batterien, Kondensatoren u.a. Schadstoffträgern kann eine starke Schadstoffentfrachtung von PCB und Hg in den Outputfractionen erreicht werden. Dies kann für andere Schadstoffe (Cd, Pb, Sb etc.) leider mittels Handauslese und mechanischer Aufbereitung nur schwach oder gar nicht erreicht werden.

Staub, welcher über die Abluftreinigungsanlage dem Prozess entzogen wird und so nicht in die Umwelt gelangt, ist z.T. stark mit Schadstoffen aufkonzentriert (z.B. Hg). Er enthält rund 10-45 mg/kg PCB und nicht vernachlässigbare Anteile an BFS. Fehlende effiziente Luftreinhaltevorkehrungen würden eine starke Belastung von Mensch und Umwelt bedeuten.

## Stoffverteilung bei der EEKG-Schrott Aufbereitung

Die Betrachtung der Stoffverteilungen der einzelnen untersuchten Stoffe zeigt für den untersuchten EE-Schrott Verarbeitungsbetrieb folgende ähnliche „Stoffverteilungsmuster“.

### *Stark kunststoffgebundene Stoffe*

Br und die untersuchten BFS werden zu einem Anteil von >80% in den Kunststoffoutputfraktionen gefunden. Dabei überwiegt in der Regel der Transfer in die feinkörnige Outputfraktion. Anteile, welche in die Metallfraktionen transferiert werden sind nicht vernachlässigbar und betragen zwischen 4 und 17%. In die Staubfraktion gelangen zwischen 3 und 10%. Anteile in den restlichen Outputgütern sind näherungsweise vernachlässigbar. Phosphor gehört auch zu dieser Gruppe.

### *Stark metallgebundene Stoffe*

Fe, Cr und Ni mit einem Anteil von >95%, Al mit 82%- und Cu mit einem 76%-Anteil, welcher in die metallischen Outputfraktionen transferiert wird, repräsentieren eine Gruppe von sich sehr ähnlich verhaltenden Stoffen. Für Cr und Ni spielen andere Outputprodukte praktisch keine Rolle. Bildröhren spielen für Fe und Al eine untergeordnete, aber nicht vernachlässigbare Rolle. Für Cu spielen Cu-Kabel und Leiterplatten eine weniger grosse Rolle.

### *Stark aufkonzentrierbare Schadstoffe*

Für Hg und für die PCB-Summe gelingt durch die händische Demontage/Aussortierung eine Anreicherung von 98% bzw. 73% in der Outputfraktion „Schadstoffträger“. Bezieht man den in der Abluftreinigung gesammelten Staub mit ein, dann können für Hg und die PCB-Summe sogar 99% bzw. 88% von den restlichen Strömen ferngehalten werden. Für PCB sind andere nicht vernachlässigbare Outputgüter die Cu-Kabel (4%) und die feinkörnigen Kunststoffe (8%); für Hg für Restspuren die feinkörnige Metallfraktion.

### *Auf wenig Outputprodukte verteilte Stoffe*

Die Elemente Cl, Sn und Zn verteilen sich zu über 90% in weniger als drei von den zehn Outputprodukten. Cl verteilt sich zu 71% in Cu-Kabel und 21% in die beiden Kunststofffraktionen; Zn zu 60% in die feinkörnige Metallfraktion, 25% in den Staub und zu 6% in die Leiterplatten. Sn verteilt sich in die feinkörnige Metallfraktion (64%), in den Staub (12%) und in die Leiterplatten (19%).

### *Stark uniform verteilte Stoffe*

Die Elemente Cd, Pb und Sb werden mit Anteilen von >5% in jeweils fünf der zehn Outputprodukte verteilt. Cd wird zu 50% in den Schadstoffträger, zu je ca. 15% im Staub, in den feinkörnigen Kunststoff- und feinkörnigen Metallfraktionen und zu 5% in den Leiterplatten wieder gefunden. Wichtigste Outputgüter für Pb sind die feinkörnige Metallfraktion (38%) und die Bildröhrenkomponenten (30%). Für Sb sind die Kunststofffraktionen mit 57% sowie die Bildröhrenkomponenten mit 37% am Wichtigsten.

Diese Betrachtung der Stoffverteilungen ist hilfreich, um den untersuchten Entsorgungsprozess aus stofflicher Sicht zu bewerten und Ressourcenpotenziale bzw. Umweltbelastungen als Folge bestimmter Aktivitäten oder Prozessfahrweisen früh zu erkennen. Auch können die Transferkoeffizienten als Basis für einen Vergleich von Behandlungsprozessen mit unterschiedlicher Technologie / Stand der Technik hinsichtlich Ressourceneffizienz, in Produkten akkumulierten Schadstoffpotenzialen oder diffusen Emissionen in die Umwelt genutzt werden.

## 6.3 Datenlücken, Handlungs- und Forschungsbedarf

### **Regelmässige Kontrolle auf stofflicher Ebene (Stoffbuchhaltung); Ermittlung von zeitlichen Veränderungen (Trends)**

Die statistisch gut abgesicherten Resultate des im August 2003 durchgeführten Versuchs zeigen im Vergleich mit anderen verfügbaren Daten erste interessante Erkenntnisse auf stofflicher Ebene (Elemente/Verbindungen). Um jedoch zeitliche Veränderungen der stofflichen Zusammensetzung signifikant erkennen zu können, bedarf es Beobachtungen über längere Zeiträume. Mittels des in Kapitel 5.5 skizzierten Stoffflussmonitoringkonzeptes für EEKG-Schrott könnte diese Information gewonnen werden. Ziel wäre eine Integration eines solchen Stoffflussmonitoringkonzeptes in die schon bestehenden Ansätze einer Stoffbuchhaltung der lizenzierten Verwertungs- und Entsorgungsbetriebe. Erst die Erarbeitung dieser Grundlagen erlaubt eine seriöse Bewertung des Erfolgs von Massnahmen z.B. hinsichtlich der Verwendung von Stoffen in Elektro- und Elektronikgeräten, freiwilligen Vereinbarungen sowie von geplanten Verordnungen für gewisse BFS und Schwermetalle.

### **Schwache Datenbasis für Batteriefraktion**

Im Laufe dieses Projekts musste festgestellt werden, dass keine oder nur sehr unsichere aktuelle Daten zu den Stoffkonzentrationen der in der Schweiz entsorgten Batteriefractionen vorhanden sind. Weil die im EEKG-Schrott und (wenn auch nur zu geringen Anteilen) im Kehricht enthaltenen Batterien/Akkumulatoren, mit grosser Wahrscheinlichkeit vor allem für Hg, aber auch in geringerem Ausmass für Cd-, Pb- und Zn- Stoffflüsse eine Rolle spielen, wäre es notwendig eine bessere aktuelle Datenbasis zu erarbeiten.

### **Daten zu alternativen Flammenschutzverbindungen**

Untersuchungen zu alternativen Flammenschutzverbindungen drängen sich aus zwei Gründen auf:

Die Untersuchungen des hier vorliegenden Projekts beschränken sich auf fünf wichtige, zur Zeit in Diskussion stehende bromierte Flammenschutzmittel und liefert erste Daten zu aktuellen Phosphorgehalten. Phosphor ist Grundelement von verschiedensten phosphorierten Flammenschutzmitteln. Zu den in EE-Geräten verwendeten Mengen an phosphorierten Flammenschutzmitteln, anderen alternativen BFS (z.B. TBBPA-Derivate) oder Flammenschutzmitteln auf Basis anderer Elemente (z.B. Fluor in perfluorobutane sulfonic acid) sind heute praktisch keine Daten vorhanden.

Die im Versuch vorgefundene Tatsache, dass nur 40% des gesamten Brominputs mittels der Bromfrachten in den analysierten Verbindungen (Penta-, Octa-, DecaBDE, additives TBBPA und HBCD) oder bekanten Anwendungen (reaktiv gebundenes TBBPA in Leiterplatten) erklärt werden können, wirft die Frage auf. Für 60% des Brominputs ist demnach nicht bekannt in welcher Verbindung das Brom in den EEKG angewandt wird!

Unter Berücksichtigung der Priorität hinsichtlich des möglichen Gefährdungspotenzials dieser Stoffe ist anzustreben, dazu Informationen zu erarbeiten. Das wertvolle Probenmaterial aus dem Stoffflussanalysenversuch im August 2003, sowie allenfalls zukünftige Messungen sollten genutzt werden, auch solche alternative Substanzen deren Priorität gemäss zu untersuchen.



### **Dioxine / Furane**

Beim hier vorliegenden Projekt wurde auf Grund der Zielsetzung auf eine Untersuchung der chlorierten/bromierten Dioxine/Furane verzichtet. Deshalb liegen z.T. keine gesicherten Daten zu aktuellen Dioxin- / Furanbelastung von Schweizer EEKG-Schrott sowie deren Verteilung/Zerstörung bzw. Entstehung im Prozess der EE-Schrott Aufbereitung vor. Im untersuchten Prozess kann infolge der vorherrschenden Prozessbedingungen mit relativ grosser Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden kann, dass keine bedeutenden Mengen an neu gebildeten Dioxinen/Furanen entstehen. Literaturangaben zeigen für TV-Geräte Dioxin-/Furankonzentrationen von 3-70 mg/kg, für Leiterplatten 10 bis 130 mg/kg PBDD/PBDF [Sakai et a., 2001]. Anhand von Angaben in [Mark & Lehner, 2000] folgt bei einer geschätzten ITE-Konzentration von ca. 0.02 µg/kg für EEKG-Schrott, dass im Jahr in der Schweiz ohne De novo-Synthese in den mechanischen Verarbeitungsprozessen etwa 0.4 g I-TEQ umgesetzt werden. In älteren oder einfacheren Aufbereitungsverfahren muss in Folge unbeabsichtigter Wärmeentwicklung im Bereich von 250 - 350°C mit zusätzlich relevanten Mengen an neu entstandenen Dioxinen / Furanen gerechnet werden.

### **Emissionen in die Umwelt – Unterschiede für verschiedene Aufbereitungsprozesse**

In diesem Projekt wurde auch darauf verzichtet die Emissionen in die Umwelt (Atmosphäre) zu bestimmen. Die Resultate der Konzentrationen in den Stäuben zeigen jedoch, dass eine allenfalls nicht vorhandene Luftreinhaltevorkehrung (z.B. Staubfilter) für Mensch und Umwelt eine starke Belastung bedeuten würde. Die Frage, wie gross die Emissionen in Verarbeitungsprozessen ohne umfangreiche Abluftreinigungsanlagen sind, sind in einem zukünftigen Projekt zu beantworten.

### **Restflüsse an kunststoffgebundenen Elementen / Verbindungen in wiederverwerteten Metallschrotten**

In diesem Projekt wurde auf die Bilanzierung der Nachseparation eines Teils der feinkörnigen Metallfraktion und (weitere Abreicherung der kunststoffgebundenen Elementen / Verbindungen in den Metallfraktionen) und auf die Analyse von kleinen Restgehalten in Metallschrotten (Fe-Grobschrottfraktion, feinkörniger Fe-Schrott, Metallschrottfraktion 1 bis 4) verzichtet. Die Frage, wie gross Restgehalte der untersuchten Nichtmetalle bzw. organischen Verbindungen sind, wäre in einem zukünftigen Projekt zu beantworten.

## 7 Literatur

- Angerer, G., Bätcher, K., Bars, p. (1993), Verwertung von Elektronikschrott, Erich Schmidt Verlag, 1993.
- APME (1997), Feedstock recycling of electrical and electronic plastic waste (depolymerisation and conversion into syncrude), Association of plastic manufacturers in Europe, technical paper.
- BUWAL, 2000, Wegleitung zur Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung von elektrischen und elektronischen Geräten (VREG), Vollzug Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 2000.
- Baccini, P., Brunner, P.H. (1991), The metabolism of the anthroposphere, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London.
- Baccini, P., Bader H.P. (1996), Regionaler Stoffhaushalt: Erfassung, Bewertung und Steuerung, Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Berlin, Heidelberg, New York, Oxford.
- Bader, H.-P., Scheidegger, R. (2000) SIMBOX Version 2.5, Bedienungsanleitung, EAWAG/S+E, Dübendorf.
- Batrec (2004), persönliche Mitteilung H.J. von Gunten (Batrec AG), 4.3.04.
- Demmelhuber, S., (1994), Elektronikschrottreycling: Völlig falsche Entsorgung, Funkschau Nr. 24, 1994
- Eichert, C., Smoktun, B., Solenthaler, Ch. (2002) Mechanische Aufbereitung von Elektro- und Elektronikschrott, Ergebnisse des Versuchs bei der Solenthaler Recycling AG am 28.01. 2002. (nicht veröffentlicht).
- Eichert, C., Smoktun, B., Solenthaler, Ch. (2002) Mechanische Aufbereitung von Elektro- und Elektronikschrott, Ergebnisse des Versuchs bei der Solenthaler Recycling AG am 28.01. 2002. (nicht veröffentlicht).
- Immark (2004), persönliche Mitteilung M. Stengele (Immark AG), verschiedene Daten
- Kuhn, E., Frey, T., Arnet, R., Känzig, A. (2004), Schwerpunktaktion „Bromierte Flammschutzmittel in Kunststoffprodukten des Schweizer Marktes“ Methodenentwicklung, Ringversuch und Analysen, BUWAL-Umwelt Materialien Publikation, in Vorbereitung.
- Mark, F. E., Lehner, T. (2000), Plastic recovery from waste electrical& electronic equipment in non-ferrous metal processes, Association of plastic manufacturers in Europe, technical paper.
- Morf, L., Smutny, R., Taverna, R., Daxbeck, H. (2002), Stoffflussanalyse ausgewählter Polybromierter Flammschutzmittel (PBDE und TBBPA) für die Schweiz, Schriftenreihe Umwelt Nr. 338, Umweltgefährdende Stoffe, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 2002.
- Morf, L., Brunner P. H. (1999) Online-Messung der Stoffbilanz auf der MVA Spittelau, Phase A, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft, Technische Universität, Wien.
- Morf, L. (2003) „Die KVA als Instrument der Erfolgskontrolle in der Abfallwirtschaft der Schweiz“, BUWAL, Amt für Umwelt Kanton Thurgau, Amt für Umwelt Kanton St. Gallen, Entsorgungsamtsamt der Stadt St. Gallen, Verband KVA Thurgau.
- Morf, L., Brunner, P. H. (1998), The MSW Incinerator as a Monitoring Tool for Waste Management, Environ. Sci. & Technol., 32, 12, 1825.
- Morf, L. (2004), eigene Annahmen.
- Niedersächsisches Umweltministerium (1998), VV 13, Kommission der Niedersächsischen Landesregierung zur Vermeidung und Verwertung von Abfällen (3. Regierungskommission), Abschlussbericht des Arbeitskreises 13 „Elektronikschrott“, Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover.

- Sakai, S.; Watanabe, J.; Takatsuki, H.; Kimura, T.; Inoue, S. (2001) Presence of PBDDs/DFs in Flame Retardant Materials and their Behavior in High-Temperature Melting Processes. BFR 2001", At The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants.
- S.EN.S (2002), Countdown, Stiftung Entsorgung Schweiz S.EN.S , Zürich. <http://www.sens.ch>.
- S.EN.S (2004), Fachbericht 2003 der technischen Kontrollstelle an die S.EN.S, <http://www.sens.ch>
- Sjördin, A., Carlsson, H., Thuresson, K., Sjörlin, S., Bergman, A., Östman, C. (2001), Flame retardants in indoor air at an electronics recycling plant and at other work environments, Environ. Sci.& Technol., 2001, 35, 448-454.
- Sjördin, A., Carlsson, H., Thuresson, K., Sjörlin, S., Bergman, A., Östman, C. (2001), Flame retardants in indoor air at an electronics recycling plant and at other work environments, Environ. Sci.& Technol., 2001, 35, 448-454.
- SWICO (2002), Tätigkeitsbericht 2002. SWICO Kommission Umwelt“, Schweizerischer Wirtschaftsverband der Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik (SWICO), Zürich. <http://www.swico.ch>.
- Tremp J. et al. (1995), Bericht über die Untersuchung der stofflichen Zusammensetzung und des Auswaschverhaltens von Rückständen aus einer Shredderanlage (RESH) im Hinblick auf die Entsorgung in Reaktordeponien, Umweltschutzzlabor, Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft.
- VREG, 1998, Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung von elektrischen und elektronischen Geräten (VREG), Vollzug Umwelt, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 2000.
- Wegmann L. et al. (1999), Marktüberwachung bromierte Flammschutzmittel in Kunststoffen, Umweltschutzzlabor, Amt für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft.
- Wolf, F. (1998), Untersuchungen zur Gefahrstoffbelastung beim Entlöten von Computerplatinen; Diplomarbeit an der märkischen Fachhochschule Iserlohn.
- Vehlow, J., Mark, F. E. (1997), Electrical and electronic plastic waste co-combustion with municipal solid waste for energy recovery, Association of plastic manufacturers in Europe, technical paper.
- Zessner, M., Lampert, Ch, Kroiss, H, Morf, L. (2003), Optimierte Stoffflussmonitoring für die Abwasserentsorgung Wiens“ (OSMA- Wien), Phase A, Zwischenbericht, Institut für Wassergüte und Abfallwirtschaft.
- Zimmermann et al. (1996) Ökoinventare von Entsorgungsanlagen – Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen, ETH Zürich.

## 8 Glossar

### **Art der Probenahme**

Die Art der Probenahme beschreibt die zeitliche oder örtliche Struktur der Probenahme der Einzelproben. Es werden zwei Arten von Probenahme unterschieden: zufällige und systematische Probenahme.

### **Elektrogrossgeräte**

Unter Elektrogrossgeräte fallen die elektrisch betriebenen grossen Haushaltsgeräte wie Kochherd, Backöfen, Wasch- und Reinigungsgeräte sowie die mobilen Heizungs-, Belüftungsgeräte. Die Geräte werden vom Netz mit Strom versorgt.

### **Elektrokleingeräte**

Unter Elektrokleingeräte fallen kleine Elektrogeräte z.B. Rasierapparate, Haarentfernungsgeräte, Haarföhne, Eierkocher, Tauchsieder, Kaffeemühlen etc.

### **Kühl- und Klimageräte**

Kühl- und Klimageräte (Kühlschränke, -truhen, Klimageräte), Eismaschinen (falls Kühlkreislauf vorhanden), mobile Klimageräte, Luftbefeuchter.

### **Elektronikgeräte**

Unter Elektronikgeräte fallen alle Geräte und Baugruppen, deren Hauptbestandteile elektronische Komponenten sind. Zu dieser Gruppe gehören gemäss Art. 2 VREG folgende Gerätekategorien: Unterhaltungselektronik, Büro-, Informations- und Kommunikationstechnik, sowie elektronische Bestandteile von Geräten inkl. Elektronikkleingeräte.

### **Elektro- und Elektronikgeräte**

Summe aller Elektrogrossgeräte, Elektrokleingeräte, Kühl- und Klimageräte und Elektronikgeräte.

### **Elektro- und Elektronikschrott (EE-Schrott)**

Gesamtmenge an zur Entsorgung/ Wiederverwertung anfallende Elektro- und Elektronikgeräte.

### **Elektro- und Elektronik-Kleingeräte (EEKG)-Schrott**

Summe der Unterhaltungselektronik, Büro-, Informations- und Kommunikationstechnik, sowie elektronische Bestandteile von Geräten inkl. Elektronikkleingeräte.

### **Fluss**

Gibt die Masse an, welche pro Zeiteinheit von einem Prozess in einen anderen oder aus dem System fließt. Ein Beispiel für einen Güterfluss ist die Abwassermenge pro Jahr ( $m^3/a$ ), für einen Stofffluss Kohlenstoffmenge pro Jahr ( $t/a$ ).

### **Gut**

Besteht aus einem oder mehreren Stoffen. Es ist eine handelbare Substanz, die einen Handelswert besitzt. Dieser kann positiv (z.B. Trinkwasser) oder negativ (z.B. Hausmüll) sein.

### **Mischprobe**

Besteht aus verschiedenen Teilproben bzw. Stichproben.

**Mittelwert**

Unter Mittelwert wird allgemein das arithmetische Mittel einer Messreihe verstanden.

**Probeanzahl**

Ist die Anzahl Proben während einer bestimmten Zeitperiode oder aus einer vorgegebenen gesammelten Menge.

**Probegewicht**

Bedeutet das Gewicht bzw. die Masse einer Probe.

**Prozess**

Bezeichnet den Transport, die Lagerung oder die Transformation von Gütern oder Stoffen. Der Prozess selbst wird als "Black Box" verstanden, d.h. die Vorgänge innerhalb des Prozesses werden im allgemeinen nicht untersucht. Einzelne Prozesse können gegebenenfalls in Unterprozesse unterteilt werden. So kann der Prozess "KVA" beispielsweise in die Unterprozesse "Verbrennung" und "Kessel" etc. unterteilt werden.

**Stoff**

Ist ein Element des Periodensystems (z.B. Kohlenstoff, Chlor) oder eine chemische Verbindung wie zum Beispiel Kohlendioxid, Sulfat. Stoffe bestehen ausschließlich aus einer Art Atome oder Moleküle.

**Struktur der Probenahme**

Unter Struktur der Probenahme wird verstanden, wie einzelne gezogene Proben zur Auswertung benutzt werden.

**System**

Stellt die zeitliche und räumliche Abgrenzung des zu untersuchenden Gebietes mitsamt den darin befindlichen Prozessen, Güter- und Stoffflüssen dar. Das System ist ein Begriff, welcher die Einordnung von Teilen in einen ganzheitlichen Zusammenhang bezeichnet. Ein System kann ein Betrieb (z.B. EE-Schrott Verarbeitungsbetrieb), eine Region (Kanton Zürich), eine Nation (z.B. Schweiz) oder auch eine sozialwissenschaftlich definierte Einheit (z.B. Privathaushalt) sein.

**Systemdefinition**

Die Systemdefinition ist einer der Schritte der Stoffflussanalyse. Sie enthält die Unterschritte der Wahl der untersuchten Stoffe, die Systemgrenzen (zeitlich und räumlich) und die untersuchten Güter und Prozesse.

**Transferkoeffizient**

Der Transferkoeffizient beschreibt die Verteilung eines Gutes oder Stoffes und dem Transfer innerhalb eines Prozesses auf verschiedene Produkte (der Transferkoeffizient kann auch als Verteilungskoeffizient bezeichnet werden, in der „pathway analysis“ spricht man häufig von einem „partitioning coefficient“).

**Unsicherheit**

Unsicherheit sind die zufälligen Fehler in der Angabe der Messergebnisse. Es ist ein weitläufiger Begriff, der i.a. mit fehlender oder unvollständiger Information in Verbindung gebracht wird. In der vorliegenden Arbeit wird Unsicherheit im Wesentlichen als Resultat eines Zufalls- oder stochastischen Experiments betrachtet.

## 9 Anhang

### 9.1 Anhang 1 – Versuchsdaten

#### 9.1.1 Güterflüsse

Tabelle 9-1 zeigt alle Güterflüsse inklusive deren Unsicherheit für den gesamten Inputstrom und die verschiedenen Outputströme während des Versuchs im untersuchten Betrieb.

Tabelle 9-1: Güterflüsse in kg und deren Unsicherheit im Versuch (nicht gerundete Werte)

Güterfluss	Masse [kg]	Fehler Masse [kg]
Input Elektronikschrott	229'173	4'583
Brennbare Abfälle (KVA)	3'013	60
Batterien / Akkus	568	11
Kondensatoren	731	15
Staub	15'775	311
Cu-Kabel	3'910	78
Leiterplatten	3'754	75
Bildröhrenkomponenten 1	42'433	849
Bildröhrenkomponenten 2	-	-
Bildröhrenkomponenten 3	122	2
Bildröhrenkomponenten 4	2'785	56
Bildröhrenkomponenten 5	2.0	0.0
TV-Gehäuse Holz	950	19
TV/PC-Gehäuse	4'703	94
TV-Rückwände	620	12
Feinkörnige KS-Fraktion 1	30'210	604
Feinkörnige KS-Fraktion 2	14'603	292
Feinkörnige Metall-Fraktion 1	10'991	155
Feinkörnige Metall-Fraktion 2	5'256	76
Metallschrottfraktion 1	175	4
Metallschrottfraktion 2	9'914	198
Metallschrottfraktion 3	3'857	77
Metallschrottfraktion 4	2'980	60
Fe-Grobschrottfraktion	68'763	1'375
Feinkörniger Fe-Schrott	2'566	51

## 9.2 Anhang 2 – Qualitätssicherung

Mehrfaches Aufarbeiten und Messen derselben Probe unter möglichst identischen Bedingungen in demselben Labor ermöglicht eine Schätzung der Präzision (Laborpräzision). Damit ist jedoch noch keine sichere Aussage über die Richtigkeit der Analysen möglich. Vergleichende analytische Bestimmungen ausgewählter Proben in mehreren Laboratorien, die unterschiedliche Verfahren zur Probenaufarbeitung und unabhängige, d. h. auf anderen Messprinzipien beruhende Analysenmethoden verwenden, ermöglichen es, systematische Messfehler zu erkennen und zusätzliche Informationen zur Richtigkeit zu erhalten.

Das Vorgehen zur Qualitätssicherung der im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Analysen (Analytische Qualitätssicherung, AQS) ist in Kapitel 4.4.3 beschrieben. Es wird unterschieden zwischen "interner" und "externer" Qualitätssicherung. Erstere bezieht sich auf die AQS in den beiden beauftragten analytischen Laboratorien (Bachema AG, Zürich und Hans-Joachim Günther GmbH, Dortmund) in denen die Proben untersucht worden sind. Letztere bezieht sich auf die Untersuchungen einiger ausgewählter Proben und Extrakte in drei weiteren Laboratorien (Labor für Umweltanalytik, Liestal; Abteilung Organische Chemie der EMPA, Dübendorf; Institut für terrestrische Ökologie der ETH Zürich (ITÖ), Schlieren).

### 9.2.1 Interne analytische Qualitätssicherung

Die Bestimmungsunsicherheit der eingesetzten Untersuchungsverfahren (kumulative Unsicherheit der Probenaufarbeitung im Labor und der Analysenmethode) wurde nach der Methode von J. Morkowski (1996/2000) ermittelt. Für jeden Teilschritt der Probenaufarbeitung und Analyse wurde der relative Fehler ermittelt bzw. geschätzt und daraus die kombinierte Bestimmungsunsicherheit errechnet. Aus der kombinierten Bestimmungsunsicherheit lässt sich das 1-Alpha Konfidenzintervall eines Messwertes für eine bestimmte Irrtumswahrscheinlichkeit (Alpha) berechnen. Nähere Angaben zum statistischen Modell finden sich im Kapitel 9.3.3 weiter hinten im Anhang.

Die Laborpräzision für die Elementanalysen mittels XRF wurde mit einer aufbereiteten Probe von Leiterplatten ermittelt. Bei dieser Fraktion kann Inhomogenität – trotz der kleinen Korngrösse (<0.1 mm) des gemahlene Probengutes und sorgfältiger Homogenisierung – nicht ganz ausgeschlossen werden, weil neben Kunststoffen geringe Anteile von Metallpartikeln vorhanden sind. Aus der fein gemahlene und gut durchmischten Probe wurden je 5 Teilproben gewonnen und in geschütteter Form sowie als Pressling mit XRF untersucht.

Die nachfolgende Tabelle 9-2, Tabelle 9-3 und Tabelle 9-4 geben die Ergebnisse der XRF-Bestimmungen dieser Proben wieder.

Tabelle 9-2: Ergebnisse der quantitativen Bestimmungen von Elementen in 5 Teilproben einer Mischprobe aus Leiterplatten mittels RFA. Den Proben wurde zwecks Matrix-Modifikation für die Kalibrierung mit geogenen Referenzmaterialien (Geo Eichung) je ein Teil Gips und Quarz zugegeben.

Element	Teilprobe 1 Nr. 2975	Teilprobe 2 Nr. 2976	Teilprobe 3 Nr. 2977	Teilprobe 4 Nr. 2978	Teilprobe 5 Nr. 2979	Mittelwert aus 5 Teilproben	S rel. [%]
Konzentrationen in [mg/kg]							
Al	59200	60200	62400	61500	58400	60300	2.7
Sb	219	226	225	222	219	222	1.5
Pb	11100	11300	11100	11300	11300	11200	1.0
Br	58700	59700	58900	58500	59900	59100	1.1
Cl	303	286	306	314	288	299	4.0
Cd	<3.2	<3.2	<3.2	<3.2	<3.2	<3.2	---
Cr	1860	1880	1850	1870	1930	1880	1.7
Fe	11900	11700	12200	11800	12200	11960	1.9
Cu	78600	81700	78000	78800	81400	79700	2.2
Ni	1990	2050	1950	2020	2080	2018	2.5
P	1040	1320	370	--- (*)	240	743	70.1
Sn	25800	26900	26500	26500	26800	26500	1.6
Zn	1170	1250	1210	1320	1200	1230	4.7

(\*) Ausreisser wurde nicht berücksichtigt.

Tabelle 9-3: Ergebnisse der quantitativen Bestimmungen von Brom und Chlor in 5 Teilproben einer Mischprobe aus Leiterplatten mittels RFA. Für die Messungen wurden die pulverförmigen Proben ohne Zusätze verwendet. Die Messung wurde mit der Turboquant Methode einer universellen Gerätekalibrierung für Feststoffproben durchgeführt.

Element	Teilprobe 1 Nr. 2975	Teilprobe 2 Nr. 2976	Teilprobe 3 Nr. 2977	Teilprobe 4 Nr. 2978	Teilprobe 5 Nr. 2979	Mittelwert aus 5 Teilproben	S rel. [%]
Konzentrationen in [mg/kg]							
Br	68690	68100	66800	66600	67450	67500	1.3
Cl	814	736	738	746	748	756	4.3

Tabelle 9-4: Ergebnisse der quantitativen Bestimmungen von Quecksilber in 5 Teilproben einer Mischprobe aus Leiterplatten mittels RFA. Für die Messungen wurden die pulverförmigen Proben ohne Zusätze verwendet. Die Messung wurde mit der Turboquant Methode einer universellen Gerätekalibrierung für Feststoffproben durchgeführt.

Element	Teilprobe 1 Nr. 2975	Teilprobe 2 Nr. 2976	Teilprobe 3 Nr. 2977	Teilprobe 4 Nr. 2978	Teilprobe 5 Nr. 2979	Mittelwert aus 5 Teilproben	S rel. [%]
Konzentrationen in [mg/kg]							
Hg	0.20	0.18	0.24	0.22	0.20	0.21	11.0



Zwecks Überprüfung der Laborpräzision mit einer weiteren Analysenmethode wurden aufbereitete Proben von Leiterplatten und gemischten Kunststoffen in einem offenen Aufschlussgefäß mit Königswasser aufgeschlossen und die Lösung anschliessend mit ICP-OES analysiert. Die Ergebnisse dieser Vergleichsuntersuchungen sind in Tabelle 9-5 und Tabelle 9-6 enthalten.

Tabelle 9-5: Ergebnisse der quantitativen Bestimmungen von Metallen in 3 Teilproben einer Mischprobe aus Leiterplatten mittels ICP-OES.

Element	Teilprobe 1	Teilprobe 2	Teilprobe 3	Mittelwert aus 3 Teilproben	S rel. [%]
Pb	24600	24900	24500	24700	0.8
Cr	2000	1960	1870	1940	3.4
Fe	12700	12600	12100	12500	2.6
Cu	174000	173000	174000	174000	0.3
Ni	2530	2570	2680	2590	3.0
Sn	42500	42800	42400	42600	0.5
Zn	3470	3490	3410	3460	1.2

Tabelle 9-6: Ergebnisse der quantitativen Bestimmungen von Metallen in 6 Teilproben aus einer Mischprobe von aufbereiteten Kunststoffen (Probe Nr. 13437) der Korngrößenfraktionen 2-5 und 5-10 mm mittels ICP-OES.

Element	Teilprobe 1	Teilprobe 2	Teilprobe 3	Teilprobe 4	Teilprobe 5	Teilprobe 6	Konzentrationen in [mg/kg]		S rel. [%]
							Mittelwert aus 6 Teilproben	Mittelwert aus 6 Teilproben	
Cr	--- (*)	258	189	--- (*)	282	199	241	241	18.8
Cu	1880	1900	2150	1540	1990	2130	2060	2060	10.8
Ni	385	215	122	267	241	121	181	181	54.8
Su	179	170	140	147	177	142	160	160	11.4
Zn	595	611	572	417	582	485	534	534	14.3

(\*) Ausreisser wurde nicht berücksichtigt.

Zur Bestimmung der Laborpräzision der Analysen ausgewählter polybromierter Flammschutzmittel wurde eine Kunststoffprobe mit Toluol extrahiert und der Toluolextrakt mit den Zielverbindungen aufgestockt. In dieser Lösung wurde eine 7-fache Bestimmung der Flammschutzmittel vorgenommen. Die Ergebnisse dieser Vergleichsmessungen sind in Tabelle 9-7 enthalten.

Tabelle 9-7: Ergebnisse der 7-fachen quantitativen Bestimmungen von polybromierten Flammschutzmitteln mit GC/ECD in einem aufgestockten Toluol-Extrakt einer Kunststoffprobe.

Verbindung	Analyse 1	Analyse 2	Analyse 3	Analyse 4	Analyse 5	Analyse 6	Analyse 7	Mittelwert aus 6 Teilproben	S rel. [%]
PentaBDPE1	1.07	1.09	1.12	1.09	1.10	1.10	1.09	1.09	1.38
PentaBDPE2	1.28	1.28	1.28	1.28	1.26	1.27	1.25	1.27	0.96
PentaBDPE Summe	2.35	2.37	2.40	2.37	2.36	2.37	2.34	2.37	0.80
TBBPA	6.64	7.00	7.15	6.88	7.00	7.32	6.99	7.00	3.03
HBCD	3.22	3.30	3.33	3.24	3.33	3.37	3.29	3.30	1.60
OctaBDE1	2.39	2.51	2.50	2.40	2.42	2.45	2.48	2.45	1.97
OctaBDE2	2.25	2.33	2.22	2.20	2.23	2.26	2.26	2.25	1.85
OctaBDE Summe	4.64	4.84	4.72	4.60	4.65	4.71	4.74	4.70	1.69
DecaBDE	4.21	4.30	4.34	4.35	4.41	4.37	4.46	4.35	1.84

## 9.2.2 Externe analytische Qualitätssicherung

Tabelle 9-8: Angaben zu den Proben, die für die externe analytische Qualitätssicherung untersucht worden sind.

Proben-Nr.	Probenmaterial	Vorbehandlung der Proben im Labor Bachema	durchgeführte Analysen im Rahmen der externen AQS
13403	Bildschirmgerätegehäuse; Mischprobe Nr. 3	Die Mischprobe wurde gemahlen und homogenisiert; Korngrösse <0.1 mm	UAN: polybromierte Flammschutzmittel; Probenaufarbeitung mit zwei unterschiedlichen Extraktionsmethoden, Einzelstoffbestimmung mittels GC/ECD  EMPA: polybromierte Flammschutzmittel; Einzelstoffbestimmung im Toluol-Extrakt mittels GC/HRMS
13405	TV-Rückwände; Mischprobe Nr. 1	Die Mischprobe wurde gemahlen und homogenisiert; Korngrösse <0.1 mm	UAN: polybromierte Flammschutzmittel; Probenaufarbeitung mit zwei unterschiedlichen Extraktionsmethoden, Einzelstoffbestimmung mittels GC/ECD  EMPA: polybromierte Flammschutzmittel; Einzelstoffbestimmung im Toluol-Extrakt mittels GC/HRMS
13425	Staub aus Prallmühle und Feinseparator; Mischprobe 1	Die Mischprobe wurde homogenisiert	UAN: Elemente (Metalle und Phosphor); Druckaufschluss mit Mikrowellen, Elementbestimmung mit ICP/OES; polybromierte Flammschutzmittel; Probenaufarbeitung mit zwei unterschiedlichen Extraktionsmethoden, Einzelstoffbestimmung mittels GC/ECD  ITÖ: Elemente (Metalle und Phosphor); Elementbestimmung mittels XRF
13427	Staub aus Prallmühle und Feinseparator; Mischprobe 3	Toluol-Extrakt aus homogenisierter Mischprobe	EMPA: polybromierte Flammschutzmittel; Einzelstoffbestimmung im Toluol-Extrakt mittels GC/HRMS

13437	gemischte Kunststoffe, Korngrösse 5-10 mm; Mischprobe 3	Die Mischprobe wurde gemahlen und homogenisiert; Korngrösse <0.1 mm	UAN: Elemente (Metalle und Phosphor) und polybromierte Flammschutzmittel; ITÖ: Elemente (Metalle und Phosphor); Elementbestimmung mittels XRF EMPA: polybromierte Flammschutzmittel; Einzelstoffbestimmung im Toluol-Extrakt mittels GC/HRMS ITÖ: Elemente (Metalle und Phosphor); Elementbestimmung mittels XRF
13459	gemischte Metalle <2 mm aus elektr. Abscheider; Mischprobe 1	Die Mischprobe wurde homogenisiert; keine Zerkleinerung	UAN: Elemente (Metalle und Phosphor) und polybromierte Flammschutzmittel;
13465	Metalle <2 mm mit Kunststoffen; Mischprobe 1	Die Mischprobe wurde homogenisiert; keine Zerkleinerung	UAN: Elemente (Metalle und Phosphor) und polybromierte Flammschutzmittel;
13676	Leiterplatten >8 mm	Die Mischprobe wurde gemahlen und homogenisiert; Korngrösse <0.1 mm	UAN: Elemente (Metalle und Phosphor) und polybromierte Flammschutzmittel; ITÖ: Elemente (Metalle und Phosphor); Elementbestimmung mittels XRF EMPA: polybromierte Flammschutzmittel; Einzelstoffbestimmung im Toluol-Extrakt mittels GC/HRMS

UAN: Labor für Umweltanalytik des Amtes für Umweltschutz und Energie BL, Liestal

EMPA: Abteilung Organische Chemie, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Dübendorf

ITÖ: Institut für terrestrische Ökologie der ETH Zürich, Schlieren

### 9.2.2.1 Quantitative Bestimmung von Elementen; Methodenbeschreibung der durchgeführten Untersuchungen zur externen Qualitätssicherung

#### A. Aufarbeitung der Proben

Die Aufarbeitung der für die externe AQS ausgewählten Proben erfolgte durch die Firma Bachema. Das Probenmaterial wurde homogenisiert und, sofern möglich, auf <0.1 mm gemahlen.

##### A.1. Aufschluss der Proben

Teile der gemahlene Proben 13425, 13676 und 13437 wurden mittels Mikrowellenaufschluss mit HNO<sub>3</sub> in Hochdruckgefässen aufgeschlossen. Je eine Teilprobe wurde zudem in einem zweiten Aufschlussverfahren mit HNO<sub>3</sub> / HCl in Mitteldruckgefässen aufgeschlossen. Die Einwaagen betragen je ca. 250 mg. Die Proben 13459 und 13465 mit grossem Metallanteil (Korngrössen ca. 2 mm) wurden mit HNO<sub>3</sub> / HCl in offenen Glasgefässen aufgeschlossen. Von diesen inhomogenen Proben sind je 2 g Probenmaterial eingewogen und aufgeschlossen worden. Von jeder Probe wurden vier gleiche Teilproben aufgeschlossen.

#### B. Messung und Auswertung

In den Lösungen der aufgeschlossenen Proben wurden die Schwermetalle Al, Sb, Pb, Cd, Cr, Fe, Cu, Ni, Sn und Zn mittels ICP-OES (PE Optima 4300 DV) bestimmt. Hg wurde mittels Hydridbildung und AAS (PE 1100B mit FIAS-200) bestimmt.

#### C. Qualitätssicherung

Zur Überprüfung des Aufschluss- und Messverfahren wurden folgende Referenzmaterialien mit aufgeschlossen resp. mit gemessen: Buffalo River Sediment (Standard Reference Material 2704; National Institute of Standards and Technology, NIST, Gaithersburg, Maryland), Polyethylen (IMEP-10; The International Measurement Evaluation Programme, IMEP; Institute for Reference Materials and Measurements IRRM, European Commission Joint Research Centre, Ispra, Italien), St. Louis (MO) Staub (Standard Reference Material 1648; National Institute of Standards and Technology, NIST, Gaithersburg, Maryland) und Trinkwasser (Standard Reference Material 1643d; National Institute of Standards and Technology, NIST, Gaithersburg, Maryland). Alle Proben wurden 2 bis 3-fach aufgeschlossen. Die Streuungen betragen bei den feingemahlene Proben max. 20%. Bei den zwei inhomogenen Proben, die wegen der Metallanteile nicht gemahlen werden konnten, ergaben sich Standardabweichungen bis zu 92%.

### 9.2.2.2 Quantitative Bestimmung von Elementen; Resultate der externen Qualitätssicherung

Tabelle 9-9: Ergebnisse der quantitativen Elementbestimmungen in ausgewählten Proben im Rahmen der externen AQS.

Probe	Labor	Element													
		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Al	Fe	Sn	P	Sb	Hg		
<b>13425</b>	Aufschluss UAN	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	2	2	2
<b>Staub</b>	UAN	210	800	6800	2800	24000	18000	15000	91000	5400	460	1400	1400	2.7	
aus Prallmühle und Feinseparator	ITÖ	140	780	4900	2100	37000	9500	25000	71000	6200	1600	2200	2200	37	
MP 1	Bachema Bachema / Aufschl. ICP-OES	220 200	860 838	4800 5940	1900 2400	38000 32100	9300 14300	16000 15030	70000 77700	4100 4630	<1000 <1000	2200 1600	2200 1600	2.2 -	
<b>13676</b>	Aufschluss UAN	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2
<b>Leiterplatten</b> >8 mm aus MP 1	UAN	<1.0	1600	180000	3400	27000	1800	33000	15000	45000	3600	400	400	0.40	
	ITÖ	<0.7	3700	230000	4500	26000	2400	130000	31000	93000	600	260	260	46	
	Bachema Bachema / Aufschl. ICP-OES	<2.0 <5	1900 1940	67000 174000	1900 2590	10000 24700	1200 3460	74000 32100	13000 12500	28000 42600	<1000 <1000	310 536	310 536	0.37 -	
<b>13437</b>	Aufschluss UAN	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	2	2	2	2
<b>Kunststoffe</b> 2-5 5-10 mm MP 3	UAN	120	110	2300	120	470	610	1300	870	220	1200	3700	3700	6.6	
	ITÖ	94	130	1200	110	490	730	8500	1200	92	1100	3500	3500	2.9	
	Bachema Bachema / Aufschl. ICP-OES	150 86	140 232	920 1980	93 221	510 426	570 593	8700 1580	1300 1770	170 163	1100 <1000	4500 4060	4500 4060	0.71 -	
<b>13465</b>	Aufschluss UAN	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<b>Metalle</b> <2mm mit Kunststoff MP 1	UAN	62	1500	620000	5800	62000	50000	8700	53000	73000	14000	220	220	-	
	Standardabw. (n = 4)	58 92%	140 9%	71000 12%	490 8%	8900 14%	11000 23%	2700 31%	14000 25%	16000 21%	1200 8%	160 73%	160 73%	-	
	Bachema / Schmelzanaly- se Günther	200	1500	700000	6900	60000	60000	7800	58000	82000	-	100	100	0.9	

Tabelle 9-10: Ergebnisse der quantitativen Elementbestimmungen in Referenzmaterialien im Labor UAN.

Referenzmaterialien	Labor bzw. Datenquelle	Element															
		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Al	Fe	Sn	P	Sb	Hg				
		Konzentration [mg/L] bzw. [mg/kg]															
<b>Grundwasser</b>	Aufschluss UAN	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	UAN [mg/L]	0.009	0.023	0.027	0.071	0.015	0.103									<0.100	
	Sollwerte [mg/L]	0.007	0.019	0.021	0.058	0.018	0.073										0.054
<b>Buffalo River Sediment</b>	Aufschluss UAN	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	UAN [mg/kg]	3.50	106	95.0	42.0	155	428	36900	33800	936	<2.5	<2.0					
	Sollwerte [mg/kg]	3.45	135	98.6	44.1	161	438	61100	41100	998	3.79	1.47					
<b>Polyethylen</b>	Aufschluss UAN	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	UAN [mg/kg]	124	108			102											
	Sollwerte [mg/kg]	120	101			97.4											
<b>St. Louis (MO) Staub</b>	Aufschluss UAN	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	UAN [mg/kg]	76.0	169	593	77.6	6380	4840	22900	51600								
	Sollwerte [mg/kg]	75.0	403	609	82.0	6550	4760	34200	39100								

Legende zum Aufschluss UAN: 1 Hochdruckaufschluss Mikrowelle (HNO<sub>3</sub>)  
 2 Mitteldruckaufschluss Mikrowelle (HNO<sub>3</sub>/HCl)  
 3 Aufschluss im offenen System (HNO<sub>3</sub>/HCl)

### 9.2.2.3 Quantitative Bestimmung von ausgewählten polybromierten Flammschutzmitteln; Methodenbeschreibung der durchgeführten Untersuchungen zur externen Qualitätssicherung

#### 9.2.2.3.1 Bestimmung von ausgewählten polybromierten Flammschutzmitteln im Labor für Umweltanalytik (UAN) des AUE BL, Liestal

##### A. Aufarbeitung der Proben

###### A.1. Extraktion mittels Schütteln

Vom Probenmaterial wurden ca. 1 g (bei den metallhaltigen Proben ca. 5 g) genau eingewogen und mit 40 ml Toluol bei Raumtemperatur während 48 Stunden abwechselnd auf der Schüttelmaschine und im Ultraschallbad extrahiert. Die Extraktion wurde mit weiteren 40 ml Toluol, danach mit zweimal 10 ml Toluol wiederholt. Die vereinigten Extrakte wurden mit Toluol auf 100 ml aufgefüllt.

###### A.2. Soxhlet-Extraktion

Vom Probenmaterial wurden ca. 1 g (bei den metallhaltigen Proben ca. 5 g) genau eingewogen mit 80 ml Toluol/1-Propanol 1:1 während 24 Stunden im Soxhletapparat extrahiert. Der Extrakt wurde mit Toluol auf 100 ml aufgefüllt.

###### A.3. Derivatisierung

10 bis 20 ml des Toluolextrakts wurden über einen 0.45 µm Spritzenfilter (Mixed cellulose ester) filteriert. 1 ml dieses Filtrats wurde für die Messung mit 100 µl internem Standard (PCB 209 in Toluol, 10 µg/ml) versetzt. 100 µl dieser Lösungen wurden mit 100 µl Trimethylsilyl-N,N'-dimethylcarbammat (Silylierungsreagenz) gemischt und während 30 min bei 40°C derivatisiert. Bei Messwerten über dem Messbereich wurde 1 ml des entsprechend verdünnten Extrakts wie oben beschrieben derivatisiert.

##### B. Messung und Auswertung

###### B.1. GC-Bedingungen

Gaschromatograph:	Carlo Erba HRGC 5300 Mega Series
Autosampler:	CTC A200S
Injektor:	300°C, 4 mm Glas-Insert für Split-Injektion
Kapillarsäule:	BGB-1, Länge = 25 m, ID = 0.25 mm, Filmdicke = 0.1 µm
Vorsäule:	desaktiviert, Länge = 1 m, ID = 0.32 mm
Trärgas:	Wasserstoff, Säulenvordruck 27 kPa
Injektion:	1 µl, splitless für 10 sec, danach 20 ml/min Splitfluss
Temperaturprogramm:	100°C 3 min, 10°/min ↗ 230°C, 5°/min ↗ 310°C, 10 min
Detektor:	ECD, 330°C, Basis 320°C, Makeup-Gas Stickstoff
Datenverarbeitung:	Carlo Erba ChromCard, Version 1.22

###### B.2. Kalibration

Für die Erstellung der Kalibrationsfunktionen wurden sechs Standardlösungen im Konzentrationsbereich 0.2 bis 5 µg/ml gemessen. Quantifiziert wurde über die Peakflächen, die Berechnung erfolgte nach der Methode des internen Standards.



B.3. Referenzsubstanzen

- Tetrabrombisphenol A (TBBPA), 97%, Aldrich
- Pentabromdiphenylether (PeBDE), techn., EGT USC912
- Octabromdiphenylether (OcBDE), techn., Great Lakes
- Decabromdiphenylether (DeBDE), 98%, Great Lakes
- Hexabromcyclododecan (HBCD), 95%, Fluka AG

B.4. Chemikalien

- Toluol, z.R., EGT To0081
- 1-Propanol, LiChrosolv, Merck 1024
- Trimethylsilyl-N,N'-dimethylcarbammat, purum, Fluka 39860
- Decachlorbiphenyl (PCB 209), 98.5%, Dr. Ehrenstorfer C20020900

**C. Qualitätssicherung**

- Die Richtigkeit des Verfahrens wurde mit drei Kunststoffproben, deren Gehalt zuvor in einem Ringversuch ermittelt wurden, überprüft. Die Abweichung zum Ringversuchsmedian war bei allen Komponenten <4%.
- Die Präzision der Messung lag je nach Komponente zwischen 1 und 13% als RSD (durchschnittlich 7% als RSD)
- Die Messunsicherheit für das Verfahren wird auf 20% geschätzt.

#### 9.2.2.3.2 Bestimmung von polybromierten organischen Flammschutzmitteln in fünf Proben aus der Aufbereitung von Elektro- und Elektronikschrott im Labor der Abteilung Organische Chemie der EMPA Dübendorf

Die nachfolgende Methodenbeschreibung wurde dem Prüfbericht Nr. 432'670 der EMPA entnommen.

**A. Probenmaterial**

Die in Tabelle 9-11 aufgeführten Proben wurden der EMPA Abteilung Organische Chemie per Post zugestellt.

Tabelle 9-11: Beschreibung des Probenmaterials

Proben-Nr.:	Probenmaterial:	Aussehen:
13403	Bildschirmgehäuse, MP3	Klarer, farbloser Extrakt
13405	TV-Rückwände, MP1	Klarer, grün-schwarzer Extrakt
13427	Staub aus Prallmühle und Feinseparator, MP1	Klarer, farbloser bis schwach gelber Extrakt
13437	Kunststoffe KG 2-5 und 5-10 mm, MP3	Klarer, farbloser bis schwach gelber Extrakt
13676	Leiterplatten, Fraktion >8 mm, MP1	Klarer, farbloser Extrakt

## B. Prüfung

### B.1. Prüfverfahren

Je nach vorgegebenem Konzentrationsbereich wurde ein Aliquot der Probe unverdünnt oder mit Toluol 1:10 oder 1:100 verdünnt für die GC/MS Analyse verwendet. Zu einem Aliquot der unverdünnten oder verdünnten Probe wurden die isotoopenmarkierten internen Standards zugegeben und nach Zugabe von etwas Toluol wurden 3 µl in den Gaschromatographen injiziert.

### B.2. Gaschromatographie / Massenspektrometrie

Nach der vorgängig beschriebenen Probenaufbereitung wurden die polybromierten Diphenylether, Tetrabrombisphenol A und Hexabromcyclododecan mittels Gaschromatographie und hochauflösender Massenspektrometrie (HRGC/HRMS) quantitativ bestimmt. Die Quantifizierung erfolgte durch Vergleich mit den isotoopenmarkierten Standards (Isotoopenverdünnungsanalyse) über die Signalfächen bzw. in der Nähe der Nachweisgrenze über die Signalhöhen.

### B.3. Referenzmaterialien

**Kalibrationsstandards:** Mischung von nicht markierten und  $^{13}\text{C}_{12}$ -isotoopenmarkierten polybromierten Diphenylethern (EO-5099, Cambridge Isotope Laboratories)  
 Bromkal 70-5 Diphenylether, nicht markiert (EO-4958-1.2)  
 Octabromdiphenylether Great Lakes technisch  
 Decabromdiphenylether Great Lakes technisch  
 Hexabromcyclododecan, gamma-Isomer, nicht markiert (ULM-4836-1.2, Cambridge Isotope Laboratories)

**Interne Standards:** Mischung von sieben  $^{13}\text{C}_{12}$ -isotoopenmarkierten polybromierten Diphenylethern (BDE-28, 47, 99, 100, 153, 183 und 209, Cambridge Isotope Laboratories)  
 Tetrabrombisphenol A, Ring- $^{13}\text{C}_{12}$ -isotoopenmarkiert (CLM-4694-1.2, Cambridge Isotope Laboratories)

### B.4. Prüfmittel

**Gaschromatograph:** Varian 3400 mit Autosampler CTC A200S  
**Kapillarsäule:** 30 m × 0.25 mm, RTX-5-Sil MS, Filmdicke 0.10 µm  
**Massenspektrometer:** doppelfokussierendes Massenspektrometer Finnigan MAT 95, ausgerüstet mit Systemsteuerungssoftware ICL 10.0 und Applikationssoftware ICIS 8.03

### B.5. Prüfbedingungen

**Trärgas:** Helium, 100 kPa  
**Injektion:** 3 µL splitlos bei 300°C für BDE und TBBPA, bei 260°C für HBCD  
**GC-Programm BDE:** 150 °C (1 min), 10 °C min<sup>-1</sup> bis 220 °C, 6 °C min<sup>-1</sup> bis 300 °C (20 min)  
**GC-Programm TBBPA:** gleich wie für BDE  
**GC-Programm HBCD:** 110°C (1 min), 20 °C min<sup>-1</sup> bis 220 °C, 4 °C min<sup>-1</sup> bis 270 °C (10 min)  
**Quellentemperatur:** 200 °C  
**Ionisierung:** Elektronenstoss (EI), Detektion der positiven Ionen  
**Elektronenenergie:** 70 eV  
**Massenauflösung:** m/Δm = 7'000 (10 % Tal)  
**Einzelionendetektion:** Es wurden jeweils die m/z-Werte der beiden häufigsten Isotoopenkombinationen der nativen und der  $^{13}\text{C}_{12}$ -markierten Verbindungen im

Molekülionencluster oder eines Fragmentions registriert (Tabelle 9-12).

Tabelle 9-12: Übersicht über die massenspektrometrisch detektierten Einzelionen der nativen und der  $^{13}\text{C}_{12}$ -markierten Zielverbindungen

	Nativ		$^{13}\text{C}_{12}$ -markiert		Beschreibung der detektierten Ionen:
	m/z	m/z	m/z	m/z	
TriBDE	405.8028	407.8008	417.8431	419.8411	$[\text{M}+2]^+$ und $[\text{M}+4]^+$
TetraBDE	483.7132	485.7113	495.7535	497.7516	$[\text{M}+2]^+$ und $[\text{M}+4]^+$
PentaBDE	563.6128	565.6199	575.6621	577.6602	$[\text{M}+4]^+$ und $[\text{M}+6]^+$
HexaBDE	641.5323	643.5303	653.5726	655.5706	$[\text{M}+4]^+$ und $[\text{M}+6]^+$
HeptaBDE	561.6061	563.6042	573.6464	575.6445	$[\text{M}-\text{Br}_2]^++4$ und $[\text{M}-\text{Br}_2]^++6$
OctaBDE	639.5167	641.5147	651.5570	653.5550	$[\text{M}-\text{Br}_2]^++4$ und $[\text{M}-\text{Br}_2]^++6$
NonaBDE	719.4252	721.4232	731.4655	733.4635	$[\text{M}-\text{Br}_2]^++6$ und $[\text{M}-\text{Br}_2]^++8$
DecaBDE	797.3358	799.3338	809.3761	811.3741	$[\text{M}-\text{Br}_2]^++6$ und $[\text{M}-\text{Br}_2]^++8$
TBBPA	541.7552	543.7532	553.7954	555.7934	$[\text{M}+2]^+$ und $[\text{M}+4]^+$
HBCD	560.7287	562.7267	---	---	$[\text{M}+4]^+$ und $[\text{M}+6]^+$

### C. Qualitätssicherung und Messunsicherheit

Alle Untersuchungen wurden nach den Grundsätzen der Qualitätssicherung (ISO/IEC 17025) durchgeführt. Nach unseren Erfahrungen beträgt die Messunsicherheit für die Bestimmung der bromierten Diphenylether (Tri- bis Heptabrom), TBBPA und HBCD ca. 20 % (Probenahme nicht einbezogen). Für Decabromdiphenylether liegt die Messunsicherheit wahrscheinlich bei < 50 %.

### 9.2.2.4 Quantitative Bestimmung von ausgewählten polybromierten Flammschutzmitteln; Resultate der externen Qualitätssicherung

Probe [Labor-Nr.]	Bezeichnung der Fraktion	Aufarbeitung	Verdünnung	Labor	polybromierte Flammschutzmittel					
					TBBPA	PentaBDE	HBCD	OctaBDE	DecaBDE	Konzentration in [g/kg]
13403	Bildschirmgeräte- Gehäuse MP 3	"schütteln"	1:50	UAN	26.3	- (unv.)	- (unv.)	9.02 (1:20)	7.92 (1:20)	
		Soxhlet	1:50	UAN	24.0	- (unv.)	- (unv.)	8.78 (1:20)	5.65 (1:20)	
		---		UAN Mittelwert	25.2	<0.02	<0.02	8.90	6.79	
		keine (Extrakt von Bachema)		EMPA	25.0	0.01	0.19	10.8	7.33	
		"schütteln"		Bachema	24.60	<0.10	<0.10	8.90	5.60	
13405	TV Rückwände MP 1	"schütteln"	1:20	UAN	6.01	- (unv.)	2.89	7.62	9.39	
		Soxhlet	1:20	UAN	6.38	- (unv.)	3.23	7.70	9.68	
		---		UAN Mittelwert	6.20	<0.02	3.06	7.66	9.54	
		keine (Extrakt von Bachema)		EMPA	7.10	0.01	2.60	11.2	13.4	
		"schütteln"		Bachema	7.60	<0.10	2.70	8.40	10.40	
13425	Staub aus Prallmühle und Feinseparator MP 1	"schütteln"	1:2	UAN	0.65	0.08 (unv.)	- (unv.)	0.27 (unv.)	0.30 (unv.)	
		Soxhlet	1:2	UAN	0.49	0.08 (unv.)	- (unv.)	0.26 (unv.)	0.19 (unv.)	
		---		UAN Mittelwert	0.57	0.08	<0.02	0.27	0.25	
		"schütteln"		Bachema	0.49	0.07	<0.02	0.25	0.28	
13427	Staub aus Prallmühle und Feinseparator MP 3	keine (Extrakt von Bachema)		EMPA	0.61	0.12	0.04	0.42	0.76	
		"schütteln"		Bachema	0.81	0.08	<0.02	0.21	0.31	
13437	Kunststoffe 2-5 5-10 mm MP 3	"schütteln"	1:10	UAN	3.66	- (unv.)	- (unv.)			
		Soxhlet	1:10	UAN	3.54			1.75	2.48	
		---		UAN Mittelwert	3.60	<0.02	<0.02	1.75	2.48	
		keine (Extrakt von Bachema)		EMPA	3.60	0.017	0.094	1.98	2.50	
		"schütteln"		Bachema	4.30	<0.02	0.08	1.50	1.50	

<b>13459</b>	<b>Metalle &lt;2 mm</b> elektr. Abscheider MP 1	schütteln	1:5	<b>UAN</b>	<b>0.21</b>	<b>0.03 (unv.)</b>	<b>&lt;0.02 (unv.)</b>	<b>0.06 (unv.)</b>	<b>0.10 (unv.)</b>
<b>13465</b>	<b>Metalle &lt;2 mm</b> <b>mit Kunststoff</b> MP 1	"schütteln" keine (Extrakt von Bachema) "schütteln"	unv.	<b>UAN</b> <b>EMPA</b> <b>Bachema</b>	<b>&lt;0.02</b> - <b>0.02</b>	<b>&lt;0.02</b> - <b>0.02</b>	<b>&lt;0.02</b> - <b>&lt;0.02</b>	<b>&lt;0.02</b> - <b>&lt;0.02</b>	<b>0.05</b> - <b>&lt;0.02</b>
<b>13676</b>	<b>Leiterplatten</b> >8 mm MP 1	"schütteln" Soxhlet ---	unv. unv.	<b>UAN</b> <b>UAN</b> <b>UAN Mittelwert</b>	0.06 0.04 <b>0.05</b>	0.03 0.03 <b>0.03</b>	- <b>&lt;0.02</b> <b>0.028</b>	0.03 0.03 <b>0.034</b>	0.05 <b>0.05</b> <b>0.089</b>
		keine (Extrakt von Bachema) "schütteln"		<b>EMPA</b> <b>Bachema</b>	<b>0.098</b> <b>0.07</b>	<b>0.028</b> <b>0.03</b>	<b>0.0035</b> <b>&lt;0.02</b>	<b>0.034</b> <b>0.02</b>	<b>0.089</b> <b>0.04</b>

(unv.): Messung des unverdünnten Extraktes

#### Bemerkungen zu den Resultaten der EMPA:

Die Berechnung als Penta- und Octabromdiphenylether erfolgte durch die Bestimmung des Anteils der Hauptkomponenten in den technischen Produkten (siehe unter Kalibrationsstandards unter B.2.3. Referenzmaterialien unter Kapitel 9.2.2.3.2) anhand von <sup>13</sup>C<sub>12</sub> isotopenmarkierten internen Standards. Die drei Hauptkomponenten in Bromkal 70-5 waren die BDE Kongenere 47, 99 und 100, sie ergaben als Summe einen Anteil von 79.4 % im technischen Gemisch. In der Literatur sind ähnliche Werte zu finden, so berichten Sjödin et al. über einen Anteil von 78.8 % für die Summe der drei erwähnten Hauptkongenere (A. Sjödin et al., J. Chromatogr. A 822 (1998) 83 – 89).

Für die Berechnung als Pentabromdiphenylether wurde die Summe der BDE-Kongenere 47, 99 und 100 mit dem Faktor 1.26 multipliziert. Im technischen Octabromdiphenylether wurde der Anteil des Heptabromkongeners BDE-183 mit 34.8 % bestimmt, in der Literatur sind etwas höhere Gehalte für den BDE-183 angegeben (42 – 47 %). Die Zusammensetzung eines technischen Gemisches von polybromierten Diphenylethern und auch seine Reinheit kann analog wie bei den polychlorierten Biphenylen von Batch zu Batch streuen. Die Berechnung als Octabromdiphenylether erfolgte durch Multiplikation des Gehaltes an BDE-183 mit dem Faktor 2.87.

### 9.2.2.5 Diskussion der Ergebnisse der externen AQS

#### A. Interlabor-Vergleich der quantitativen Bestimmung von Elementen (vgl. Kapitel 9.2.2.2)

Für die Elementbestimmungen im Rahmen der externen AQS sind fünf repräsentative Proben mit unterschiedlichen Probenmatrices (Staub, Leiterplatten, ein Gemisch aus Kunststoffen, ein Gemisch aus Metallen mit Kunststoffen und ein Gemisch von Metallen) verwendet worden. Die Proben aus Staub, Leiterplatten und Kunststoffen lagen als pulverförmiges Mahlgut (Korngrösse  $<0.1$  mm) vor und konnten problemlos mittels Druckaufschluss für die ICP-OES Messung aufgeschlossen werden. Viel schwieriger war das Aufbereiten der Proben mit grossem Metallanteil. Diese Proben mit Korngrössen bis 2 mm konnten nicht gemahlen werden und mussten wegen der Inhomogenität des Probengutes in wesentlich grösserer Menge eingewogen und in offenen Gefässen mit Königswasser aufgeschlossen werden. Diese Randbedingungen ergeben erwartungsgemäss eine grössere Messunsicherheit. Für die Messung mit XRF waren nur die gemahlten Proben verwendbar.

Die Vergleichsmessungen zeigen für die Elementbestimmungen in diesen analytisch anspruchsvollen Proben insgesamt eine befriedigende Übereinstimmung der Resultate der Laboratorien Bachema bzw. Günther mit UAN und ITÖ. Die Messungen ergaben jedoch auch einige bedeutende Abweichungen in den Ergebnissen, die zum Teil mit der unvermeidbaren Inhomogenität der Proben, zum Teil mit Matrix-Effekten bei den XRF Analysen erklärbar sind.

Für die Staubprobe (Nr. 13425) zeigt sich für die meisten Elemente eine recht gute Übereinstimmung der Resultate; die Standardabweichung der Resultate liegt – mit Ausnahme von Hg – zwischen 4 und 33 % des Mittelwertes. Die Streuungen scheinen für die Messungen dieser Probe mehrheitlich zufällig verteilt. Für Zn zeigen die XRF Messungen einen deutlichen Minderbefund im Vergleich zu den ICP-OES Messungen; für Antimon trifft das Gegenteil zu. Für Hg liegt das Resultat des Labors ITÖ mehr als das 10-Fache höher als die Ergebnisse von Bachema und UAN, welche gut übereinstimmen.

Für die Kunststoff-Probe (Nr. 13437) zeigt sich ebenfalls ein zufrieden stellende Übereinstimmung der Resultate der drei Labors; die Standardabweichung liegt – hier mit Ausnahme von Al und Hg – zwischen 8 und 40% des Mittelwertes. Beim Al stimmen die Resultate der ICP-OES Messungen sowie diejenigen der XRF Messungen jeweils gut überein. Für Hg streuen die Ergebnisse stark.

Für die Leiterplatten-Probe (Nr. 13676) liegt die Streuung der Messwerte für die meisten Elementen deutlich höher als bei der Staub- und Kunststoffprobe; die Standardabweichung beträgt – mit Ausnahme von Hg - zwischen 36 und 69 % des Mittelwertes. Für Hg zeigt sich dieselbe Situation wie bei der Staub-Probe.

Bei den Metallproben zeigen die Mittelwerte 4-fach Bestimmungen im Labor UAN grösstenteils eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Analysen aus den Schmelzen im Labor Günther. Einzig beim Antimon liegen für beide Metallproben grosse Differenzen vor. Dieses Ergebnis ist umso erfreulicher, als es sich bei diesen Proben in Punkto Heterogenität und Korngrösse des Probenmaterials um die schwierigsten Proben handelt.

Die teilweise sehr hohen Messwerte für Hg im Labor ITÖ könnte durch ein Problem mit der Kalibrierung begründet sein.

## **B. Interlabor-Vergleich der quantitativen Bestimmung von polybromierten Flammschutzmitteln (vgl. Kapitel 9.2.2.4)**

Für die Bestimmungen von polybromierten Flammschutzmitteln im Rahmen der externen AQS sind 8 repräsentative Proben mit unterschiedlichen Probenmatrices (Kunststoffe von Bildschirmgerätegehäusen und TV-Rückwänden, Staub, Leiterplatten, ein Gemisch aus Kunststoffen, ein Gemisch aus Metallen mit Kunststoffen und ein Gemisch von Metallen) verwendet worden. Ausser den beiden Metallproben lagen alle Proben als pulverförmiges Mahlgut (Korngrösse <0.1 mm) vor. Die Metallproben lagen in Korngrössen <2 mm vor. Dem Labor der EMPA wurden vom Labor Bachema die Toluol-Extrakte der Proben zur Verfügung gestellt.

Die Ergebnisse zeigen insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung der Analysenbefunde zwischen den Laboratorien Bachema, EMPA und UAN. Die im Labor UAN durchgeführten Vergleichsmessungen zweier Extraktionsverfahren haben ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung der Messresultate ergeben, was als Indiz dafür gewertet werden kann, dass die polybromierten Flammschutzmittel quasi vollständig aus der Probenmatrix extrahiert werden konnten. Aus der guten Übereinstimmung der Ergebnisse der Vergleichsmessungen zwischen Bachema und EMPA, die an denselben Extrakten mit unterschiedlichen Mess- und Quantifizierungsmethoden erfolgt sind, ergibt sich eine gute Absicherung für die Richtigkeit der Messresultate des Labors Bachema. Insbesondere hat sich damit gezeigt, dass die Messungen mit GC/ECD und die Quantifizierung über die Signalfächen der Hauptkomponenten der technischen Gemische sowie die Kalibrierung mit technischen Gemischen gut vergleichbare Messwerte liefert wie die Messung mit GC/HRMS und die Quantifizierung über die Signalfächen von Einzelkongeneren sowie die Kalibrierung mit isotonenmarkierten Standards. Einzig für tiefe Konzentrationen von TBBPA haben die GC/ECD Messungen im Vergleich mit den GC/HRMS Messungen deutlich tiefere Befunde ergeben.

Es hat sich ferner gezeigt, dass für TBBPA die Reproduzierbarkeit, Bestimmungsgrenze und Richtigkeit der Messergebnisse deutlich besser sind, wenn diese Zielverbindung nach der Extraktion in der Messlösung derivatisiert wird.

## 9.3 Anhang 3 – Methodisches Vorgehen

### 9.3.1 Probenahmekonzept für den Versuch

#### 9.3.1.1 Struktur der Probenahme

Prinzipiell ist die **zufällige** (zufällig über die Zeitachse verteilte) oder **systematische** (in zeitlich regelmäßigen Abständen verteilte) **Probenahme** möglich. Beide Vorgehensweisen führen bei deren korrekten Ausführung zu identischen Resultate. Die Wahl der Struktur erfolgt in der Regel auf Basis von Randbedingungen in der Praxis/ verfahrenstechnische Vorgaben.

Die Probenahme erfolgte grundsätzlich zufällig über die gesamte Versuchsperiode. Diese Vorgehensweise eignete sich besser, weil die entsprechenden Maschinenlinien nur zeitweise in Betrieb waren (kein kontinuierlicher Betrieb einzelner Verfahrensschritte), weil eine Probenahme an den laufenden Maschinen z.T. nicht möglich war oder weil einzelne Stoffe eines Gutes eine längere Aufbereitungszeit als andere derselben Charge benötigten. Einzelne Proben konnten jedoch in festen Zeitabständen entnommen werden. Dabei wurden die Zeitabstände gleichmässig über die Versuchsdauer von 3 Tagen à je ca. 8.5 Stunden aufgeteilt. In Tabelle 9-13 wird für jedes Gut die angewandte Vorgehensweise aufgezeigt.

Tabelle 9-13: Überblick über die Struktur der Probenahme der einzelnen Güter

Güter/Gütergruppen	Struktur der Probenahme
<b>OUTPUT</b>	
<b>Schadstoffträger</b>	
- Kondensatoren	Systematisch (während Vorzerkleinerung)*
- Batterien/ Akkumulatoren	Keine Probenahme
<b>Staub</b>	Zufällig
<b>Cu-Kabel</b>	Zufällig
<b>Leiterplatten</b>	Systematisch (während Vorzerkleinerung)*
<b>Bildröhrenkomponenten 1 bis 5</b>	Keine Probenahme
<b>Kunststoff- und Holzgehäuse</b>	
- TV-Gehäuse Holz	Systematisch (während Vorzerkleinerung)*
- TV/PC-Gehäuse	Systematisch (während Vorzerkleinerung)*
- TV- Rückwände	Systematisch (während Vorzerkleinerung)*
<b>Feinkörnige Kunststofffraktionen 1 und 2</b>	Zufällig für Fraktion 1, Systematisch für Fraktion 2
<b>Feinkörnige Metallfraktion 1- 4</b>	Systematisch für Unterfraktion2A der Fraktion 2, Unterfraktion 2B der Fraktion 2, sowie Unterfraktionen 1A/1B der Fraktion 1 Zufällig
<b>Metallschrottfraktion 1-4</b>	Keine Probenahme
<b>Fe-Schrottfraktion (Fe-Grobschrottfraktion und feinkörniger Fe- Schrott)</b>	Keine Probenahme
<b>Gereinigte Abluft</b>	Keine Probenahme
<b>INNERER FLUSS</b>	
<b>Summe Feinkorn</b>	Zufällig

\* Bedeutet bezüglich der Versuchsdauer betrachtet eigentlich auf zufällige Probenahme, weil die aufbereitete Menge durch die Vorzerkleinerung wieder stark vermischt wurde.



### 9.3.1.2 Art der Probenahme

Die Art der Probenahme im Versuch erfolgte ausschliesslich in der Form von Mischproben. Gemäss dem Probenahmeplan wurden aus dem Gutstrom Stichproben gezogenen und zu Mischproben vereint. Die Probenahme erfolgte je nach Güterstrom mittels Probenahmegefässen über den gesamten Querschnitt des Gutstromes. Eine Ausnahme bildete die Probenahme einer der beiden feinkörnigen Kunststofffraktion und des Staubs aus der Abluftreinigung. Diese Fraktionen mussten aus betrieblich/ verfahrenstechnischen Gründen anstatt aus einem fallenden/abgeworfenen Gutstrom mittels Schaufeln zufällig verteilt aus dem Sammelcontainer beprobt werden.

### 9.3.1.3 Anzahl der Proben / Frequenz der Probenahme / Rückstellproben

Alle zu analysierenden Proben bestehen aus Mischproben bestehend aus 20 resp. 16 Stichproben à 1 kg resp. 0.5 kg. Entsprechend wiegen die einzelnen Mischproben 20 kg resp. 8 kg. Diese Mischproben wurden mittels Riffelteiler auf Probengrössen von ca. 2 kg herunter gebrochen. Das übrig bleibende Material der Mischproben wurde beschriftet und bei der Immark AG gelagert. Die nachfolgende Tabelle 9-14 zeigt für jeden analysierten Fluss die Anzahl Mischproben, welche während der gesammelten Versuchsdauer für jeden Gutstrom gebildet wurden. Dazu wird angegeben aus wie viel Stichproben eine Mischprobe jeweils besteht. Ebenfalls erwähnt sind die vorgegebenen Stich- und Mischprobengewichte.

Tabelle 9-14: Probenahme, -aufbereitungs- und Analysekonzept

Güter/Gütergruppen	Anzahl Mischproben (MP) im Versuch	Anzahl Stichproben (SP) pro Mischprobe	Stichproben-Gewicht [kg]	Mischproben-Gewicht [kg]
<b>OUTPUT</b>				
<b>Schadstoffträger</b>				
- Kondensatoren	4	20	1	20
- Batterien/ Akkumulatoren	keine	Keine	-	-
<b>Staub (jeweils für beide Arten)</b>	4	Je 16	0.5	8
<b>Cu-Kabel</b>	4	20	1	20
<b>Leiterplatten</b>	6	20	1	20
<b>Bildröhrenkomponenten 1 bis 5</b>	keine	Keine	-	-
<b>Kunststoff- und Holzgehäuse</b>				
- TV-Gehäuse Holz	2	20	1	20
- TV/PC-Gehäuse	6	20	1	20
- TV- Rückwände	2	20	1	20
<b>Feinkörnige Kunststofffraktion 1</b>	6	20	1	20
<b>Feinkörnige Kunststofffraktion 2</b>	6	20	1	20
<b>Feinkörnige Metallfraktion 1-4 (je)</b>	6	20	0.5	10
<b>Metallschrottfraktion 1-4 (pro Fraktion)</b>	6	20	1	20
<b>Fe-Schrottfraktion</b>	keine	Keine	-	-
<b>Gereinigte Abluft</b>	keine	Keine	-	-
<b>INNERER FLUSS</b>				
<b>Summe Feinkorn</b>	6	20	1	20

Die Probenahmehäufigkeit richtete sich nach der Versuchsdauer und der Anzahl herzustellen-der Mischproben. Bei den Güterströmen, bei denen eine systematische Beprobung möglich war, wurde versucht die Probenahme möglichst gleichmässig über die Versuchsdauer zu verteilen. Das ergab einen 12 Minuten-Rhythmus zwischen den einzelnen Stichproben-Entnahmen. In der Praxis mussten einzelne Stichproben kurz hintereinander entnommen werden, um wieder in den vorgegebenen Rhythmus zu kommen. Bei den Güterströmen, bei denen die Beprobung zufällig erfolgte, wurden die Proben zufällig über die Tage gezogen (die Frequenz der Probenahme schwankt hier zwischen ein paar Minuten und max. ca. ½ Stunde).

## 9.3.2 Probeaufbereitungskonzept

### Probeaufbereitung im Betrieb

Tabelle 9-15 fasst die Aufbereitung der Mischproben im Betrieb zusammen.

Tabelle 9-15: Aufbereitung der Proben im Betrieb

Güter/Gütergruppen	Aufbereitung
<b>OUTPUT</b>	
<b>Schadstoffträger</b>	
- Kondensatoren	Vorzerkleinerung der aussortierten Kondensatoren mittels eines Wellenrotorschredders unter CO <sub>2</sub> -Kühlung auf eine Korngrösse von 15 mm. Danach werden die Mischproben mittels eines Riffelteilers in mehreren Schritten auf Laborgrösse geteilt. Das Teilungsverhältnis betrug in etwa 1:10.
- Batterien/ Akkumulatoren	Keine Probenahme
<b>Staub</b>	Probenaufteilung mittels sorgfältiger Anwendung der alternativen Probeteilungsmethode mit Schaufeln auf sauberer Unterlage in 4 gleich grosse Haufen à ca. 2 kg.
<b>Cu-Kabel</b>	Vorzerkleinerung der aussortierten Cu-Kabel mittels eines Wellenrotorschredders auf eine Korngrösse von 15 mm. Danach werden die Mischproben mittels eines Riffelteilers in mehreren Schritten auf Laborgrösse geteilt. Das Teilungsverhältnis betrug in etwa 1:10.
<b>Leiterplatten</b>	Vorzerkleinerung der aussortierten Leiterplatten mittels eines Wellenrotorschredders auf eine Korngrösse von 15 mm. Danach werden die Mischproben mittels eines Riffelteilers in mehreren Schritten auf Laborgrösse geteilt. Das Teilungsverhältnis betrug in etwa 1:10.
<b>Bildröhrenkomponenten 1 bis 5</b>	Keine Probenahme
<b>Kunststoff- und Holzgehäuse</b>	
- TV-Gehäuse Holz - TV/PC-Gehäuse - TV- Rückwände	Für alle Fraktionen separate Vorzerkleinerung der aussortierten Gehäuse mittels eines Wellenrotorschredders auf eine Korngrösse von 15 mm. Danach werden die Mischproben mittels eines Riffelteilers in mehreren Schritten auf Laborgrösse geteilt. Das Teilungsverhältnis betrug in etwa 1:10.
<b>Feinkörnige Kunststofffraktionen 1 und 2</b>	Mischproben wurden mittels eines Riffelteilers in mehreren Schritten auf Laborgrösse geteilt. Das Teilungsverhältnis betrug in etwa 1:10.
<b>Feinkörnige Metallfraktion 1-4</b>	Mischproben wurden mittels eines Riffelteilers in mehreren Schritten auf Laborgrösse geteilt. Das Teilungsverhältnis betrug in etwa 1:10.
<b>Metallschrottfraktion 1-4</b>	Keine Probenahme
<b>Fe-Schrottfraktion (Fe-Grobschrottfraktion und feinkörniger Fe- Schrott)</b>	Keine Probenahme
<b>INNERER FLUSS</b>	
<b>Summe Feinkorn</b>	Mischproben wurden in etwa im Teilungsverhältnis 1:10 mittels eines Riffelteilers in mehreren Schritten auf Laborgrösse geteilt.

Die in Tabelle 9-15 beschriebenen Aufbereitungsschritte wurden bewusst im Betrieb durchgeführt. Dort konnten die gesamten, während des Versuchs angefallenen Mengen der Fraktionen Cu- Kabel, Leiterplatten, TV/PC-Gehäuse und Rückwände, Kondensatoren mittels industrieller Zerkleinerungsaggregate zerkleinert werden. Dies wirkt sich stark homogenisierend auf die untersuchte Probe aus. Des weiteren bestand während des Versuchs auch genügend Zeit, um für die jeweils 20 kg schweren, feinkörnigen Mischproben eine erste Teilung auf ca. 2-4 kg durchzuführen. Damit konnte der Transportaufwand ins Labor gesenkt werden.

## Probeaufbereitung im Labor

Tabelle 9-16 zeigt die vorgenommenen Probeaufbereitungsschritte im Labor.

Tabelle 9-16: Probeaufbereitung im Labor

Güter/Gütergruppen	Anzahl Mischproben	Aufbereitete Mischproben (Nummer)	RT	H	HM	HS	RT	MS	RT	MZ
<b>OUTPUT</b>										
<b>Schadstoffträger</b>										
- Kondensatoren	6	1./2./3./4.								
- Batterien/ Akku	Keine Probenahme									
<b>Staub (jeweils für beide Arten)</b>	4	Jeweils 1./3.	Ganze Probe: grosse Anteile aussortieren, vorzerkleinern, mischen, teilen (RT 1/10) Ultrazentrifugalmühle							X
<b>Cu-Kabel</b>	4	1./3.				(2)		(2)		
<b>Leiterplatten</b>	6	1./3./6.	1/2	1)	X	1/6	X	1.3.6.	MP1-MP6	1/2
<b>Bildröhrenkomp. 1 bis 5</b>	Keine Probenahme									
<b>Kunststoff- und Holzgehäuse</b>										
- TV-Gehäuse Holz	2	1./2.			X		1/2	X	1/6	X
- TV/PC-Gehäuse	6	1./2./3./4.			X		1/2	X	1/6	X
- TV- Rückwände	2	1./2.			X		1/2	X	1/6	X
<b>Feinkörnige Kunststofffraktion 1</b>	6	1./3./4./6.			X		KF	X	1/6	X
<b>Feinkörnige Kunststofffraktion 2</b>	6	1./3./4./6.							1/10	X
<b>Feinkörnige Metallfraktion 1 - 4</b>										
<b>Unterfraktion 1 A</b>	6	1./3./6.		X	Kunststoffe		X	1/6	X	1.3.6.
					Metalle			1/2		
<b>Unterfraktion 1 B</b>	6	1./3./6.	1/2							
<b>Unterfraktion 2 A</b>	6	1./3./6.	1/2							
<b>Unterfraktion 2 B</b>	6	1*./3*./6.	1/2						1/2	
<b>Metallschrottfraction 1-4</b>	Keine Probenahme									
<b>Fe-Schrottfraction</b>	Keine Probenahme									
<b>Gereinigte Abluft</b>	Keine Probenahme									
<b>INNERER FLUSS</b>										
<b>Summe Feinkorn</b>	6	1./2./3./4./5./6.	1/2							
			1/2							

\* Gesamtfraction

1) Auslese "reine" Leiterplatten >8mm, übrige Fraktion nur wägen

H: Handsortierung Gesamtfraction: Kunststoffe hart, Kunststoffe weich, Alu, Kabel, Leiterplatten, übr. Metalle, Übriges

HM: Handsortierung Gesamtfraction: Metallauslese, Alu und übrige Metalle

HS: Handsortierung Gesamtfraction: spezial; RT: Riffelteiler; MS: Mahlen mit Schneidmühle < 1mm; MZ: Mahlen mit Ultrazentrifugalmühle < 0.1 mm

### 9.3.3 Auswertung – statisch-mathematisches Modell

Im Modell wird generell davon ausgegangen, dass das untersuchte System sich im stationären Zustand (zeitunabhängige Größen) befindet. Diesem Umstand wurde in der Versuchsplanung Rechnung getragen (Berücksichtigung der Verweilzeiten im System).

Bei der Auswertung der Daten wird unterschieden zwischen Güterflüssen, Stoffkonzentrationen und Stoffflüssen.

#### 9.3.3.1 Bestimmung der Stoffkonzentrationen

Die in einem Gut bestimmte Stoffkonzentration wird durch ihren Mittelwert sowie dessen Unsicherheit charakterisiert.

Der wahre Mittelwert (Erwartungswert) einer Stoffkonzentration in einer Gutmenge über eine Zeitperiode (Versuchsdauer) lässt sich anhand mehrerer Analysewerte aus Teilprobenströmen durch das arithmetische Mittel charakterisieren. Dies ist, bei einem geeigneten Probenahme bzw. -aufbereitungskonzept, ein unverzerrter Schätzer der mittleren Stoffkonzentration.

**Erwartungswert der Stoffkonzentration eines Elements aus  $n_{MP}$  Mischproben eines Outputguts:**

$$E(\bar{c}) = \mu \quad (1)$$

mit dem Schätzer:

$$\hat{\mu} = \bar{c} = \sum_{j=1}^{n_{MP}} c_{[j]} / n_{MP} \quad (2)$$

**Unsicherheit der Stoffkonzentration eines Elements aus  $n_{MP}$  Mischproben eines Outputguts:**

Die Unsicherheiten der mittleren Stoffkonzentration eines Gutes für eine bestimmte Gutmenge kann mittels der Streuung ( z.B.  $\pm 1\sigma$  oder  $\pm 2\sigma$ ) oder als  $(1-\alpha)$ -Konfidenzintervall angegeben werden.

Die Unsicherheit von direkt gemessenen Größen (Stoffkonzentrationen in den Outputfraktionen des untersuchten Prozesses) wird in der Form von 95%-Konfidenzintervallen beschrieben.

Die Unsicherheit von nicht direkt gemessenen Größen (Stoffkonzentrationen im Input) wird in der Form von approximativen 95%-Konfidenzintervallen ( $\approx \pm 2\sigma$ ) beschrieben.

Die Varianz des Mittelwertes einer Konzentration eines Outputs  $\sigma_{\bar{c}}^2$  über den gesamten Versuch wird wie folgt bestimmt:

$$\sigma_{\bar{c}}^2 = \sigma_P^2 + \sigma_A^2 \quad (3)$$

mit

$\sigma_P^2$  Varianz infolge Probenahme und Probeaufbereitung

$\sigma_A^2$  Varianz infolge Analysenvorbereitung und Analyse im Labor (Analysefehler)

Die relative Breite des 95%-Konfidenzintervalls für die mittlere Stoffkonzentration eines Stoffes in einem Outputgut des untersuchten Prozesses wird wie folgt berechnet:

$$\Delta_{\bar{c}} = \frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}} \cdot \sigma_{\bar{c}}}{\bar{c}} \quad (4)$$

Für den Analysefehler  $\sigma_A^2$ :

a) für die Metallbestimmung mittels RFA:

$$\sigma_A^2 = \sigma_{Einw.}^2 + \sigma_{PH}^2 + \sigma_{Anal.}^2 \quad (5)$$

$\sigma_{Einw.}^2$  Varianz infolge Einwaage

$\sigma_{PH}^2$  Varianz infolge Pillenherstellung

$\sigma_{Anal.}^2$  Varianz infolge der Analyse

b) für die Bestimmung der Flammschutzmittel mittels GC-ECDIMS:

$$\sigma_A^2 = \sigma_{Einw.}^2 + \sigma_{Extraktion}^2 + \sigma_{Verdünnung}^2 + \sigma_{Standardzugabe}^2 + \sigma_{Anal.}^2 \quad (6)$$

$\sigma_{Einw.}^2$  Varianz infolge Einwaage

$\sigma_{Extraktion}^2$  Varianz infolge Extraktion mit Toluol

$\sigma_{Verdünnung}^2$  Varianz infolge allfälliger Verdünnung

$\sigma_{Standardzugabe}^2$  Varianz infolge Zugabe eines internen Standards

$\sigma_{Anal.}^2$  Varianz infolge der Analyse

Für die mittlere Varianz  $\sigma_A^2(\bar{c})$  gilt

$$\sigma_A^2(\bar{c}) = \frac{[\Delta_A \cdot \bar{c}]^2}{n \cdot \varepsilon} \quad (7)$$

mit

n: Anzahl Mischproben

ε: Anzahl Analysenwiederholungen (=3)

$\Delta_A$ : rel. Fehler  $\frac{\sigma_A}{\bar{C}_A}$  von BACHEMA angegeben

- für Metalle (RFA) und Cl, Br, P: 5.5%

- für die Flammenschutzmittel, PCB: 7.5%

Für den Probenfehler  $\sigma_P^2$  gilt:

$$\sigma_P^2 = \sigma_{PN}^2 + \sigma_{PA(Vorort)}^2 + \sigma_{PA(Labor)}^2 \quad (8)$$

$\sigma_{PN}^2$  beinhaltet die Varianzanteile infolge der Probenahme vor Ort während des Versuchs

$\sigma_{PA(Vorort)}^2$  beinhaltet die Varianzanteile infolge der Probeaufbereitung vor Ort (Vorzerkleinerungen, Mischen, Verjüngung)

$\sigma_{PA(Labor)}^2$  beinhaltet die Varianzanteile infolge der Probeaufbereitung im Labor (Zerkleinerung, Verjüngen etc.)

Für die mittlere Varianz  $\sigma_P^2(\bar{c})$  gilt

$$\sigma_P^2(\bar{c}) = \frac{\sigma_P^2}{n \cdot m} \quad (9)$$

mit

$\sigma_P^2$  geschätzt anhand der Varianz der Mischprobenstoffkonzentrationen

n: Anzahl Mischproben

m: Anzahl Teilproben in einer Mischprobe

Sind die Stichprobengewichte innerhalb der einzelnen Mischproben annähernd gleichverteilt, kann in Gleichung 3 die Mischprobenvarianz  $\sigma_W$  in erster Näherung vernachlässigt werden. Neben der Mischprobenvarianz gilt es auch, die Autokovarianz (zeitliche Varianzkomponente einer Messserie) bei Bedarf zu berücksichtigen. Mit der Wahl von nicht zu kleinen Zeitabständen zwischen zwei Stichproben nimmt die Grösse der Autokovarianz schnell ab und kann in erster Näherung vernachlässigt werden.



### 9.3.3.2 Bestimmung der Stoffflüsse

Der mittlere Stofffluss des Stoffes  $e$  im Gut  $g$  für die betrachtete Zeiteinheit,  $\bar{m}_{g,e}$ , berechnet sich durch die Multiplikation des Massenflusses,  $\dot{m}_g$ , eines Gutes innerhalb einer definierten Zeiteinheit und der entsprechenden mittleren Stoffkonzentration  $\bar{c}_{g,e}$  für dieselbe Zeiteinheit (Gleichung 6).

$$\bar{m}_{g,e} = \dot{m}_g \cdot \bar{c}_{g,e} \quad (10)$$

Für die Varianz des mittleren Stoffflusses  $Var(\bar{m}_{g,e})$  als Produkt einer Masse und Stoffkonzentration gilt für angenähert unabhängige Größen Gleichung 11 ohne das Produkt der Varianzen:

$$Var(\bar{m}_{g,e}) = Var(\dot{m}_g \cdot \bar{c}_{g,e}) \approx E[\bar{c}_{g,e}]^2 \cdot Var(\dot{m}_g) + E[\dot{m}_g]^2 \cdot Var(\bar{c}_{g,e}) + Var(\dot{m}_g) \cdot Var(\bar{c}_{g,e}) \quad (11)$$

#### Berücksichtigung der Probeaufbereitung bei der Bestimmung der Stoffflüsse

Multipliziert man Masse und Konzentration zur Bestimmung des Stoffflusses, ist zu beachten, welche Konzentration mit welchem Massenfluss verknüpft wird. Wichtig ist dabei, dass zur Bestimmung der Stoffkonzentration der Gesamtmenge die gesamte Probeaufbereitung von der *Stichprobenebene* bis zur *Analyseprobenebene* der jeweiligen Probe (Korrekturfaktoren für Sortier- und allfällige Siebreste) bei Bedarf berücksichtigt werden.

#### Fehler der Massenflüsse

Die Fehler der Massenflüsse werden für jedes Gut geschätzt und in der Berechnung berücksichtigt.

### 9.3.3.3 Die Berechnung der stofflichen Zusammensetzung des Inputs und deren Unsicherheit

Die mittleren Stoffkonzentrationen **der untersuchter Elemente im Abfallinput (EEKG-Schrott)** während des Versuchs wird anhand der gewichteten Summenbildung aller Outputstoffflüsse bestimmt (Gleichung 12).

$$\bar{C}_{Abfall}^k = \frac{1}{\dot{m}_{Abfall}} \cdot \left[ \sum_{j=1}^n \dot{m}_j \cdot \bar{C}_j^k - \sum_{i=1}^m \dot{m}_i \cdot \bar{C}_i^k \right] \quad (12)$$

Die **Streuung (Varianz) der Stoffkonzentrationen im Abfallinput** um ihren Mittelwert wird durch Gleichung 13 bestimmt.

$$\text{Var}(\bar{C}_{\text{Abfall}}^k) \cong \frac{1}{\dot{m}_{\text{Abfall}}^2} \cdot \left[ \sum_{i=1}^m \dot{m}_i^2 \cdot \text{Var}(\bar{c}_i^k) + \sum_{j=1}^n \dot{m}_j^2 \cdot \text{Var}(\bar{c}_j^k) + \sum_{i=1}^m \bar{c}_i^2 \cdot \text{Var}(\dot{m}_i^k) + \sum_{j=1}^n \bar{c}_j^2 \cdot \text{Var}(\dot{m}_j^k) \right] \quad (13)$$

Unter der Annahme der Vernachlässigung zufälliger Fehler bei der Erfassung von Güterflüssen werden die beiden Varianzterme der Güterflüsse in Gleichung 13 nicht berücksichtigt.

Unter der Annahme der approximativen Normalverteilung lässt sich mit den so errechneten Varianzen für die einmalige Beobachtung ein approximatives 100(1- $\alpha$ )% Konfidenzintervall berechnen (Gleichung 14).

$$f(x_1, \dots, x_n) - z_{1-\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(f(x_1, \dots, x_n))} \leq \mu \leq f(x_1, \dots, x_n) + z_{1-\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(f(x_1, \dots, x_n))} \quad (14)$$

Dabei ist  $z_{1-\frac{\alpha}{2}}$  das  $\left(1-\frac{\alpha}{2}\right)$ -Quantil der Standardnormalverteilung. Im vorliegenden Fall wird ein  $\alpha=0,05$  angenommen und es wird im allgemeinen gerundet ( $\approx 2\sigma$ ).

Der **mittlere Gesamtstoffstrom durch das untersuchte System während des Versuches** wird aus der Summe der mittleren Stoffströme über alle Outputs berechnet. Die Schätzung der Unsicherheit erfolgt durch die Gauss'schen Fehlerfortpflanzung.

#### 9.3.3.4 Bestimmung der Transferkoeffizienten

Für den mittleren Transferkoeffizienten  $\bar{T}_{p,e}$  des Stoffes e vom Input (Abfall) in die Outputfraktion p gilt nach [Baccini & Brunner, 1991] für definierte Systemgrenzen Gleichung 15.

$$\bar{T}_{p,e} = \frac{\bar{\dot{m}}_{p,e}}{\sum_{i=1}^P \bar{\dot{m}}_{p(i),e}} \quad (15)$$

wobei der Nenner die Summe der mittleren Stoffflüsse aller relevanten Outputgüter p(i),  $\bar{\dot{m}}_{p(i),e}$ , (mit  $i = 1 \dots P$ ) bedeutet.

Bem.: Die Transferkoeffizientenberechnung erfolgt nur für Stoffflüsse, welche einem mathematischen Ausgleich unterworfen worden sind (Bilanzdifferenz mathematisch ausgeglichen).

#### Bestimmung der Unsicherheiten der mittleren Transferkoeffizienten mittels des Gauss'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes

Dabei wird auf Gleichung 15 die allgemeine Formel der Gauss'schen Fehlerfortpflanzung (Gleichung 16) angewendet und an den Erwartungswerten  $x_i = \mu_i$  und  $x_j = \mu_j$  ausgewertet.

$$\text{Var}[f(x_1, x_2, \dots, x_n)] \approx \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]_{x_i=\mu_i}^2 \cdot \text{Var}(x_i) + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]_{x_i=\mu_i} \left[ \frac{\partial f}{\partial x_j} \right]_{x_j=\mu_j} \cdot \text{cov}(x_i, x_j) \quad (16)$$

Wird vereinfachend die Unabhängigkeit der einzelnen Parameter vorausgesetzt, können in Gleichung 15 die Kovarianzterme null gesetzt werden.

Unter der Annahme der approximativen Normalverteilung lässt sich mit den so errechneten Varianzen für die einmalige Beobachtung analog zur Stoffkonzentration im Input ein approximatives  $100(1-\alpha)\%$  Konfidenzintervall berechnen (siehe Gleichung 14).

### 9.3.3.5 Ausgleichsrechnung für die Stoffbilanzen

Bestimmt man anhand der Messungen aller Güterflüsse und Stoffkonzentrationen die Stoffflüsse inklusive deren Unsicherheiten im In- und Output eines Systems, so besteht auch unter Berücksichtigung einer allfälligen Lageränderung in der Regel eine Differenz zwischen der In- und Outputsumme. Diese Differenz ist bedingt durch zufällige und systematische Fehler.

Bei der Ausgleichsrechnung geht es im allgemeinen darum, aus einem kompletten Satz von Messwerten inklusive deren Unsicherheiten die statistisch besten Schätzwerte zu bestimmen. Es werden jeweils die besten Werte für die Mittelwerte und deren Unsicherheiten berechnet, so dass die Bilanzgleichungen erfüllt sind.

Mittels SIMBOX<sup>®</sup> wird die Gauss'sche Ausgleichsrechnung, auch bekannt als die „Methode der kleinsten Fehlerquadrate“ verwendet. Details zur Methode sind in Baccini& Bader, 1996, zu finden.

## 9.4 Anhang 4 – Detailresultate

In diesem Anhang sind alle Resultate der Stoffflussanalyse im Detail inklusive der vollständigen Angabe aller Fehler zusammengestellt.

### 9.4.1 Fraktionsanteile im Inputmenü des Versuchs

Bildschirmgeräte ESRA Simach				
Stück	TV Geräte 279	Monitore 255	Totalgewicht	
Gewicht Wareneingang			11'890 kg	100.00 %
Bildröhren	4930	1925	6'855 kg	57.65 %
Strahlerkanone	30	30	60 kg	0.50 %
Ablenkspulen	220	180	400 kg	3.36 %
Kondensatoren			20 kg	0.17 %
Alublech		175	175 kg	1.47 %
Goldstecker		55	55 kg	0.46 %
Kabel	120	160	280 kg	2.35 %
Leiterplatten mind	479	385	864 kg	7.27 %
Eisenschrott	340	420	760 kg	6.39 %
Kunststoff		875	875 kg	7.36 %
TV-Rückwände	620		620 kg	5.21 %
TV-Holz, Entsorgung	950		950 kg	7.99 %
	7689	4205	11'914 kg	100.20 %
Manuelle Demontage Regensdorf				
Input			62'507 kg	
Bildröhren			35'578 kg	56.92 %
Strahlerkanone			62 kg	0.10 %
Ablenkspulen			2'385 kg	3.82 %
Getterpillen			2 kg	0.00 %
Goldstecker			7 kg	0.01 %
Kabel			588 kg	0.94 %
Leiterplatten mind			81 kg	0.13 %
Leiterplatten hochw			106 kg	0.17 %
Batterien (Blei Gelee)			298 kg	0.48 %
Kunststoff			4'703 kg	7.52 %
Elektronik für Anlage			18'696 kg	29.91 %
			62'506 kg	100.00 %
Triage Drisa Lausen				
Büroelektronik			17'015 kg	Verarbeitung auf Anlage Regensdorf
Unterhaltungselektronik			8'862 kg	Verarbeitung auf Anlage Regensdorf
Telekommunikation			116 kg	Verarbeitung auf Anlage Regensdorf
Mobiletelefone			36 kg	Verarbeitung auf Anlage Regensdorf
Fotoapparate			2 kg	Verarbeitung auf Anlage Regensdorf
Haushaltskleingeräte			5'005 kg	Verarbeitung auf Anlage Regensdorf
Kabel			726 kg	Verarbeitung auf Anlage Regensdorf
Kunststoff			935 kg	
Sammelschrott			504 kg	
Batterien			35 kg	
Leiterplatten hochw.			97 kg	
Leiterplatten minderw.			277 kg	
Tonermodule			176 kg	
Batterien ( Blei Gelee)			26 kg	
			33'812 kg	
Triage Regensdorf				
Fotokopierer			4'200 kg	Verarbeitung auf Anlage Regensdorf
Telefone			9'520 kg	Verarbeitung auf Anlage Regensdorf
Elektronik gemischt			105'035 kg	Verarbeitung auf Anlage Regensdorf
Tonermodule			315 kg	
Leiterplatten			412 kg	
Kunststoff			1'203 kg	
Kabel			256 kg	
			120'941 kg	
<b>Material Gesamt</b>			<b>229'173 kg</b>	
Material für Anlage gesamt			168'487 kg	

## 9.4.2 Konzentrationen der nicht ausgewerteten Fraktionen

Angegebene Werte sind ungerundet. u.G. und o.G. bedeuten untere bzw. obere Grenzen eines 95%-Konfidenzintervalls, rel. Abw. bedeutet die relative Abweichung des Fehlers in %.

Tabelle 9-17: Aus der Literatur übernommene Konzentrationen der nicht beprobten Fraktionen

Input / Output	Konzentration Al [mg/kg]	Konzentration Sb [mg/kg]	Konzentration Pb [mg/kg]	Konzentration Cd [mg/kg]	Konzentration Cr [mg/kg]	Konzentration Fe [mg/kg]	Konzentration Cu [mg/kg]	Konzentration Ni [mg/kg]	Konzentration Hg [mg/kg]	Konzentration Zn [mg/kg]	
Brennbare Abfälle (KVA)	u.G.	10'200	45	344.00	6.9	130	21'300	720	39	0.58	1'000
	MW	11'000	51	400.00	7.6	130	23'000	880	50	0.64	1'100
	o.G.	11'800	57	456.00	8.3	130	24'700	1'040	61	0.70	1'200
	rel. Abw.	7%	12%	14%	9%	0%	7%	18%	22%	9%	9%
Batterien / Akkus	u.G.	3'595	-	13'977	18'830	2'250	205'736	3'587	18'100	82	32'956
	MW	7'196	-	27'977	37'689	4'504	411'801	7'196	36'229	165	65'965
	o.G.	10'798	-	41'976	56'549	6'758	617'867	10'806	54'358	247	98'974
	rel. Abw.	50%	-	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Cu-Kabel Konzentrationen Flamm- schutzmittel und PCB wurden in Versuch gemessen	u.G.	-	-	11	1.4	-	-	200'000	-	-	49
	MW	-	-	16	2.7	-	-	300'000	-	-	59
	o.G.	-	-	21	4.0	-	-	400'000	-	-	69
	rel. Abw.	-	-	32%	48%	-	-	33%	-	-	17%
Bildröhrenkomponenten 1	u.G.	14'400	2'970	4'140	-	-	100'000	-	-	-	-
	MW	16'000	3'300	4'600	-	-	110'000	-	-	-	-
	o.G.	17'600	3'630	5'060	-	-	120'000	-	-	-	-
	rel. Abw.	10%	10%	10%	-	-	9%	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 2	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 3	u.G.	-	-	64'000	-	-	440'000	-	170'000	-	-
	MW	-	-	80'000	-	-	490'000	-	210'000	-	-
	o.G.	-	-	96'000	-	-	540'000	-	250'000	-	-
	rel. Abw.	-	-	20%	-	-	10%	-	19%	-	-
Bildröhrenkomponenten 4	u.G.	-	-	-	-	-	540'000	240'000	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	600'000	300'000	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	660'000	360'000	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	10%	20%	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 5	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraction 1	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	1'000'000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraction 2	u.G.	-	-	-	-	-	675'000	200'000	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	750'000	250'000	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	825'000	300'000	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	10%	20%	-	-	-
Metallschrottfraction 3	u.G.	320'000	-	-	-	175'000	-	30'000	175'000	-	800
	MW	450'000	-	-	-	250'000	-	50'000	250'000	-	1'000
	o.G.	580'000	-	-	-	325'000	-	70'000	325'000	-	1'200
	rel. Abw.	29%	-	-	-	30%	-	40%	30%	-	20%
Metallschrottfraction 4	u.G.	320'000	-	-	-	175'000	-	30'000	175'000	-	800
	MW	450'000	-	-	-	250'000	-	50'000	250'000	-	1'000
	o.G.	580'000	-	-	-	325'000	-	70'000	325'000	-	1'200
	rel. Abw.	29%	-	-	-	30%	-	40%	30%	-	20%
Fe-Grobschrottfraction	u.G.	8'700	-	-	-	5'100	-	1'040	5'100	-	-
	MW	11'300	-	-	-	6'300	950'000	1'300	6'300	-	-
	o.G.	13'900	-	-	-	7'500	-	1'560	7'500	-	-
	rel. Abw.	23%	-	-	-	19%	-	20%	19%	-	-

Input / Output	Konzentration Sn [mg/kg]	Konzentration Cl [mg/kg]	Konzentration Br [mg/kg]	Konzentration P [mg/kg]	Konzentration PentaBDE [mg/kg]	Konzentration TBBPA [mg/kg]	Konzentration HBCD [mg/kg]	Konzentration OctaBDE [mg/kg]	Konzentration DecaBDE [mg/kg]	Konzentration PCB Summe [mg/kg]
Brennbare Abfälle (KVA)	u.G.	63	6'140	119	633	-	-	-	-	-
	MW	94	6'600	130	720	-	-	-	-	-
	o.G.	125	7'060	141	807	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	33%	7%	8%	12%	-	-	-	-	-
Batterien / Akkus	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu-Kabel	u.G.	-	320'000	-	-	15	3.1	15	47	62
	MW	-	400'000	-	-	25	5.0	25	100	170
	o.G.	-	480'000	-	-	35	7.0	35	247	278
	rel. Abw.	-	20%	-	-	39%	39%	39%	147%	63%
Bildröhrenkomponenten 1	u.G.	-	900	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	1'000	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	1'100	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	10%	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 2	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 3	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 4	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 5	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraction 4	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraction 1	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraction 3	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraction 2	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe-Grobschrottfraction	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-

## Quellen:

Batrec (2004): Persönliche Mitteilung H.J. Von Gunten (Batrec AG), 4.3.2004

Immark, 2004: Persönliche Mitteilung M. Stengele (Immark AG), diverse Daten

Morf, L. (2003) „Die KVA als Instrument der Erfolgskontrolle in der Abfallwirtschaft der Schweiz“, BUWAL, Amt für Umwelt Kanton Thurgau, Amt für Umwelt Kanton St. Gallen, Entsorgungsamt der Stadt St. Gallen, Verband KVA Thurgau.

Morf, L. (2004): Eigene Annahmen

Zimmermann et al. (1996): "Ökoinventare von Entsorgungsprozessen : Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen", Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich

## 9.4.3 Detaillierte Resultate auf Ebene der Stoffkonzentrationen

Tabelle 9-18: Berechnete resp. angenommene Stoffkonzentrationen inkl. Batterien/Akkus (ungerundet)

Input / Output	Güterfluss Masse [kg]	Konzentration Al [mg/kg]	Konzentration Sb [mg/kg]	Konzentration Pb [mg/kg]	Konzentration Cd [mg/kg]	Konzentration Cr [mg/kg]	Konzentration Fe [mg/kg]	Konzentration Cu [mg/kg]	Konzentration Ni [mg/kg]	Konzentration Hg [mg/kg]	Konzentration Zn [mg/kg]	
Input EEKG- Schrott	u.G.	224'590	45'991	1'477	2'367	132	8'293	351'359	37'939	8'639	0.47	4'275
	MW	229'173	49'312	1'673	2'873	181	9'948	361'465	41'154	10'293	0.68	5'090
	o.G.	233'756	52'633	1'868	3'379	230	11'602	371'571	44'369	11'948	0.90	5'906
	rel. Abw.	2%	7%	12%	18%	27%	17%	3%	8%	16%	32%	16%
Brennbare Abfälle (KVA)	u.G.	2'953	10'200	45	344.00	6.9	130	21'300	720	39	0.58	1'000
	MW	3'013	11'000	51	400.00	7.6	130	23'000	880	50	0.64	1'100
	o.G.	3'073	11'800	57	456.00	8.3	130	24'700	1'040	61	0.70	1'200
	rel. Abw.	2%	7%	12%	14%	9%	0%	7%	18%	22%	9%	9%
Batterien / Akkus	u.G.	557	3'595	-	13'977	18'830	2'250	205'736	3'587	18'100	82	32'956
	MW	568	7'196	-	27'977	37'689	4'504	411'801	7'196	36'229	165	65'965
	o.G.	580	10'798	-	41'976	56'549	6'758	617'867	10'806	54'358	247	98'974
	rel. Abw.	2%	50%	-	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Kondensatoren	u.G.	717	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	731	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	746	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Staub	u.G.	15'464	15'218	847	-222	208	329	48'927	4'286	1'638	1.1	7'903
	MW	15'775	19'701	1'677	5'938	344	741	69'039	6'020	2'301	1.7	18'696
	o.G.	16'087	24'183	2'506	12'098	480	1'153	89'151	7'755	2'963	2.4	29'488
	rel. Abw.	2%	23%	49%	104%	39%	56%	29%	29%	29%	36%	58%
Cu-Kabel	u.G.	3'832	-	-	11	1.4	-	-	200'000	-	-	49
	MW	3'910	-	-	16	2.7	-	-	300'000	-	-	59
	o.G.	3'988	-	-	21	4.0	-	-	400'000	-	-	69
	rel. Abw.	2%	-	-	32%	48%	-	-	33%	-	-	17%
Leiterplatten	u.G.	3'679	15'494	1'892	9'675	432	1'023	38'634	150'503	8'138	0.4	16'127
	MW	3'754	26'967	2'067	12'000	500	1'133	67'400	171'333	10'533	1.7	19'333
	o.G.	3'829	38'439	2'242	14'325	568	1'243	96'166	192'164	12'929	2.9	22'539
	rel. Abw.	2%	43%	8%	19%	14%	10%	43%	12%	23%	76%	17%
Bildröhrenkomponenten 1	u.G.	41'584	14'400	2'970	4'140	-	-	100'000	-	-	-	-
	MW	42'433	16'000	3'300	4'600	-	-	110'000	-	-	-	-
	o.G.	43'282	17'600	3'630	5'060	-	-	120'000	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	10%	10%	10%	-	-	9%	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 2	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 3	u.G.	120	-	-	64'000	-	-	440'000	-	170'000	-	-
	MW	122	-	-	80'000	-	-	490'000	-	210'000	-	-
	o.G.	124	-	-	96'000	-	-	540'000	-	250'000	-	-
	rel. Abw.	2%	-	-	20%	-	-	10%	-	19%	-	-
Bildröhrenkomponenten 4	u.G.	2'729	-	-	-	-	-	540'000	240'000	-	-	-
	MW	2'785	-	-	-	-	-	600'000	300'000	-	-	-
	o.G.	2'841	-	-	-	-	-	660'000	360'000	-	-	-
	rel. Abw.	2%	-	-	-	-	-	10%	20%	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 5	u.G.	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TV-Gehäuse Holz	u.G.	931	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	950	1'100	57	22	6.0	7.2	248	163	18	0.030	211
	o.G.	969	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TV/PC-Gehäuse	u.G.	4'609	25'351	11'201	107	50	-63	-374	-51	114	0.7	150
	MW	4'703	44'250	16'100	228	78	145	1'192	382	200	1.2	280
	o.G.	4'797	63'149	20'999	349	106	352	2'758	814	285	1.8	410
	rel. Abw.	2%	43%	30%	53%	36%	143%	131%	113%	43%	41%	46%
TV-Rückwände	u.G.	608	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	620	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	632	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Feinkörnige KS-Fraktion 1	u.G.	29'606	6'145	2'947	364	35	-100	-179	-1'217	51	0.09	396
	MW	30'210	8'615	4'950	547	119	405	1'985	3'655	305	0.56	622
	o.G.	30'814	11'085	6'953	729	203	910	4'149	8'527	559	1.02	848
	rel. Abw.	2%	29%	40%	33%	71%	125%	109%	133%	83%	84%	36%
Feinkörnige KS-Fraktion 2	u.G.	14'311	13'741	3'742	-886	21	1'019	11'646	10'467	724	0.06	1'647
	MW	14'603	19'350	5'260	2'840	43	2'265	19'750	15'100	1'450	0.30	2'305
	o.G.	14'895	24'959	6'778	6'566	64	3'511	27'854	19'733	2'176	0.54	2'963
	rel. Abw.	2%	29%	29%	131%	50%	55%	41%	31%	50%	81%	29%
Feinkörnige Metall-Fraktion 1	u.G.	10'836	411'350	2'014	2'236	371	4'364	38'208	118'785	3'518	0.49	37'088
	MW	10'991	434'375	2'172	2'748	410	4'727	40'940	134'611	3'853	0.59	43'193
	o.G.	11'147	457'401	2'329	3'259	449	5'091	43'672	150'437	4'188	0.69	49'298
	rel. Abw.	1%	5%	7%	19%	10%	8%	7%	12%	9%	17%	14%
Feinkörnige Metall-Fraktion 2	u.G.	5'180	77'169	965	38'667	286.2	1'235	71'067	484'455	5'587	1.1	38'812
	MW	5'256	84'137	1'111	42'104	336.6	1'391	77'618	519'908	6'153	2.0	42'276
	o.G.	5'332	91'105	1'257	45'541	386.9	1'547	84'170	555'362	6'719	2.9	45'740
	rel. Abw.	1%	8%	13%	8%	15%	11%	8%	7%	9%	45%	8%
Metallschrottfraktion 1	u.G.	172	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	175	1'000'000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	179	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraktion 2	u.G.	9'716	-	-	-	-	-	675'000	200'000	-	-	-
	MW	9'914	-	-	-	-	-	750'000	250'000	-	-	-
	o.G.	10'112	-	-	-	-	-	825'000	300'000	-	-	-
	rel. Abw.	2%	-	-	-	-	-	10%	20%	-	-	-
Metallschrottfraktion 3	u.G.	3'780	320'000	-	-	-	175'000	-	30'000	175'000	-	800
	MW	3'857	450'000	-	-	-	250'000	-	50'000	250'000	-	1'000
	o.G.	3'934	580'000	-	-	-	325'000	-	70'000	325'000	-	1'200
	rel. Abw.	2%	29%	-	-	-	30%	-	40%	30%	-	20%
Metallschrottfraktion 4	u.G.	2'920	320'000	-	-	-	175'000	-	30'000	175'000	-	800
	MW	2'980	450'000	-	-	-	250'000	-	50'000	250'000	-	1'000
	o.G.	3'039	580'000	-	-	-	325'000	-	70'000	325'000	-	1'200
	rel. Abw.	2%	29%	-	-	-	30%	-	40%	30%	-	20%
Fe-Grobschrottfraktion	u.G.	67'388	8'700	-	-	-	5'100	-	1'040	5'100	-	-
	MW	68'763	11'300	-	-	-	6'300	950'000	1'300	6'300	-	-
	o.G.	70'138	13'900	-	-	-	7'500	-	1'560	7'500	-	-
	rel. Abw.	2%	23%	-	-	-	19%	-	20%	19%	-	-
Feinkörniger Fe-Schrott	u.G.	2'515	8'700	-	-	-	5'100	-	1'040	5'100	-	-
	MW	2'566	11'300	-	-	-	6'300	950'000	1'300	6'300	-	-
	o.G.	2'618	13'900	-	-	-	7'500	-	1'560	7'500	-	-
	rel. Abw.	2%	23%	-	-	-	19%	-	20%	19%	-	-

Input / Output		Konzentration Sn [mg/kg]	Konzentration Cl [mg/kg]	Konzentration Br [mg/kg]	Konzentration P [mg/kg]	Konzentration PentaBDE [mg/kg]	Konzentration TBBPA [mg/kg]	Konzentration HBCD [mg/kg]	Konzentration OctaBDE [mg/kg]	Konzentration DecaBDE [mg/kg]	Konzentration PCB Summe [mg/kg]
Input EEKG- Schrott	u.G.	2'204	8'253	5'220	140	31	1'336	13	496	473	8
	MW	2'368	9'649	5'507	358	34	1'421	17	529	509	13
	o.G.	2'532	11'045	5'794	576	38	1'506	21	561	545	17
	rel. Abw.	7%	14%	5%	61%	10%	6%	22%	6%	7%	35%
Brennbare Abfälle (KVA)	u.G.	63	6'140	119	633	-	-	-	-	-	-
	MW	94	6'600	130	720	-	-	-	-	-	-
	o.G.	125	7'060	141	807	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	33%	7%	8%	12%	-	-	-	-	-	-
Batterien / Akkus	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kondensatoren	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1629
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2'959
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4'289
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45%
Staub	u.G.	3'012	2'586	3'571	-284	18	95	6	121	170	10
	MW	4'262	4'585	6'384	204	49	653	10	229	293	27
	o.G.	5'512	6'583	9'197	691	81	1'210	14	337	415	45
	rel. Abw.	29%	44%	44%	239%	64%	85%	38%	47%	42%	64%
Cu-Kabel	u.G.	-	320'000	-	-	15	3.1	15	-47	62	-5
	MW	-	400'000	-	-	25	5.0	25	100	170	32
	o.G.	-	480'000	-	-	35	7.0	35	247	278	68
	rel. Abw.	-	20%	-	0%	39%	39%	39%	147%	63%	116%
Leiterplatten	u.G.	22'507	2'684	27'639	46	10	26	9	9	18	0.023
	MW	27'467	6'833	32'333	50	17	43	10	10	27	0.025
	o.G.	32'426	10'983	37'028	54	23	61	11	11	36	0.027
	rel. Abw.	18%	61%	15%	8%	40%	41%	11%	11%	34%	8%
Bildröhrenkomponenten 1	u.G.	-	900	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	1'000	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	1'100	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	10%	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 2	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 3	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 4	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 5	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TV-Gehäuse Holz	u.G.	4.5	4'270	71	50	6.1	38	6.1	6.1	-10	0.018
	MW	4.5	6'750	155	50	10	80	10	10	20	0.025
	o.G.	4.5	9'230	239	50	14	122	14	14	50	0.032
	rel. Abw.	0%	37%	54%	0%	39%	53%	39%	39%	148%	29%
TV/PC-Gehäuse	u.G.	498	18'374	41'151	1'406	47	21'269	47	6871	4'328	0.024
	MW	747	19'738	43'475	2'340	50	23'225	50	7500	4'775	0.025
	o.G.	996	21'101	45'799	3'274	53	25'181	53	8129	5'222	0.026
	rel. Abw.	33%	7%	5%	40%	7%	8%	7%	8%	9%	5%
TV-Rückwände	u.G.	-	7'008	18'509	-	31	4'335	-32	3'990	4'047	0.018
	MW	-	9'850	26'050	-	50	7'300	1'350	7'650	13'000	0.025
	o.G.	-	12'692	33'591	-	70	10'265	2'732	11'310	21'953	0.032
	rel. Abw.	-	29%	0.29	-	39%	41%	102%	48%	69%	29%
Feinkörnige KS-Fraktion 1	u.G.	26	7'574	13'162	-981	47	4'602	47	1'508	1'560	2.3
	MW	247	8'000	14'145	605	50	5'000	50	1'625	1'700	3.4
	o.G.	467	8'426	15'128	2'191	53	5'398	53	1'742	1'840	4.4
	rel. Abw.	89%	5%	7%	262%	7%	8%	7%	7%	8%	30%
Feinkörnige KS-Fraktion 2	u.G.	613	6'413	18'741	1'715	332	2'169	47	428	1'555	8.8
	MW	878	6'775	19'800	2'400	375	2'375	50	475	1'675	10
	o.G.	1'143	7'137	20'859	3'085	418	2'581	53	522	1'795	11
	rel. Abw.	30%	5%	5%	29%	11%	9%	7%	10%	7%	12%
Feinkörnige Metall-Fraktion 1	u.G.	3'843	3'063	7'901	867	22	1'201	22	1'507	343	0.11
	MW	4'603	3'386	8'541	1'101	25	1'390	25	1'903	437	0.13
	o.G.	5'364	3'709	9'181	1'335	27	1'580	27	2'299	530	0.14
	rel. Abw.	17%	10%	7%	21%	11%	14%	11%	21%	22%	11%
Feinkörnige Metall-Fraktion 2	u.G.	52'703	118	1'471	-	1.8	-5.7	1.8	1.8	-5.7	0.02
	MW	56'710	141	1'742	-	3.0	7.6	3.0	3.0	7.5	0.11
	o.G.	60'717	164	2'013	-	4.2	20.8	4.2	4.2	20.8	0.19
	rel. Abw.	7%	16%	16%	-	39%	175%	39%	39%	175%	78%
Metallschrottfraktion 4	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraktion 1	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraktion 3	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraktion 2	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe-Grobschrottfraktion	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Feinkörniger Fe-Schrott	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Angegebene Werte sind ungerundet. u.G. und o.G. bedeuten untere bzw. obere Grenzen eines 95%-Konfidenzintervalls, rel. Abw. bedeutet die relative Abweichung des Fehlers in %.



## 9.4.4 Detaillierte Resultate auf Ebene der Stoffflüsse

Tabelle 9-19: Berechnete Stoffflüsse inkl. Batterien/Akkus (ungerundet)

Input / Output	Güterfluss Masse [kg]	Stofffluss Al [kg]	Stofffluss Sb [kg]	Stofffluss Pb [kg]	Stofffluss Cd [kg]	Stofffluss Cr [kg]	Stofffluss Fe [kg]	Stofffluss Cu [kg]	Stofffluss Ni [kg]	Stofffluss Hg [kg]	Stofffluss Zn [kg]	
Input EEKG- Schrott	u.G.	224'590	10'574	339	543	30	1'903	81'220	8'719	1'983	0.11	981
	MW	229'173	11'301	383	658	42	2'280	82'838	9'431	2'359	0.16	1'167
	o.G.	233'756	12'028	427	774	53	2'656	84'456	10'144	2'735	0.21	1'352
	rel. Abw.	2%	6%	12%	18%	27%	17%	2%	8%	16%	32%	16%
Brennbare Abfälle (KVA)	u.G.	2'953	31	0.14	1.0	0.021	0.38	64	2.2	0.12	0.0017	3.0
	MW	3'013	33	0.15	1.2	0.023	0.39	69	2.7	0.15	0.0019	3.3
	o.G.	3'073	36	0.17	1.4	0.025	0.40	75	3.1	0.18	0.0021	3.6
	rel. Abw.	2%	8%	12%	14%	9%	2%	8%	18%	22%	10%	9%
Batterien / Akkus	u.G.	557	2.0	-	8	11	1.3	117	2.0	10	0.0	19
	MW	568	4.1	-	16	21	2.6	234	4.1	21	0.1	37
	o.G.	580	6.1	-	24	32	3.8	351	6.1	31	0.1	56
	rel. Abw.	2%	50%	-	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%	50%
Kondensatoren	u.G.	717	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	731	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	746	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Staub	u.G.	15'464	240	13	-3	3.3	5	773	68	26	0.018	125
	MW	15'775	311	26	94	5.4	12	1'089	95	36	0.028	295
	o.G.	16'087	381	40	191	7.6	18	1'406	122	47	0.037	465
	rel. Abw.	2%	23%	49%	104%	39%	56%	29%	29%	29%	36%	58%
Cu-Kabel	u.G.	3'832	-	-	0.042	0.005	-	-	781	-	-	0.19
	MW	3'910	-	-	0.061	0.011	-	-	1'173	-	-	0.23
	o.G.	3'988	-	-	0.081	0.016	-	-	1'565	-	-	0.27
	rel. Abw.	2%	-	-	32%	48%	-	-	33%	-	-	17%
Leiterplatten	u.G.	3'679	58	7.1	36	1.6	3.8	145	564	31	0.0015	60
	MW	3'754	101	7.8	45	1.9	4.3	253	643	40	0.0063	73
	o.G.	3'829	144	8.4	54	2.1	4.7	361	722	49	0.0110	85
	rel. Abw.	2%	43%	9%	19%	14%	10%	43%	12%	23%	76%	17%
Bildröhrenkomponenten 1	u.G.	41'584	610	126	175	-	-	4'233	-	-	-	-
	MW	42'433	679	140	195	-	-	4'668	-	-	-	-
	o.G.	43'282	748	154	215	-	-	5'102	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	10%	10%	10%	-	-	9%	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 2	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 3	u.G.	120	-	-	0.022	-	-	0.15	-	0.06	-	-
	MW	122	-	-	0.028	-	-	0.17	-	0.07	-	-
	o.G.	124	-	-	0.034	-	-	0.19	-	0.09	-	-
	rel. Abw.	2%	-	-	20%	-	-	10%	-	19%	-	-
Bildröhrenkomponenten 4	u.G.	2'729	-	-	-	-	-	98	44	-	-	-
	MW	2'785	-	-	-	-	-	110	55	-	-	-
	o.G.	2'841	-	-	-	-	-	121	66	-	-	-
	rel. Abw.	2%	-	-	-	-	-	10%	20%	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 5	u.G.	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	2.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TV-Gehäuse Holz	u.G.	931	1.0	0.053	0.020	0.0056	0.0067	0.23	0.15	0.017	0.000028	0.20
	MW	950	1.0	0.054	0.021	0.0057	0.0068	0.24	0.15	0.017	0.000029	0.20
	o.G.	969	1.1	0.055	0.021	0.0058	0.0070	0.24	0.16	0.017	0.000029	0.20
	rel. Abw.	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%	2%
TV/PC-Gehäuse	u.G.	4'609	119	53	0.5	0.23	-0.3	-1.8	-0.2	0.5	0.0034	0.7
	MW	4'703	208	76	1.1	0.37	0.7	5.6	1.8	0.9	0.0058	1.3
	o.G.	4'797	297	99	1.6	0.50	1.7	13.0	3.8	1.3	0.0082	1.9
	rel. Abw.	2%	43%	30%	53%	36%	143%	131%	114%	43%	41%	46%
TV-Rückwände	u.G.	608	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	620	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	632	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Feinkörnige KS-Fraktion 1	u.G.	29'606	252	17	11	3.1	-4	-34	1	-0.010	12	
	MW	30'210	327	41	16	5.5	11	61	111	8	0.011	19
	o.G.	30'814	401	66	22	7.9	26	126	256	16	0.012	26
	rel. Abw.	2%	23%	59%	34%	44%	132%	107%	131%	89%	105%	36%
Feinkörnige KS-Fraktion 2	u.G.	14'311	281	41	-16	0.34	14	173	153	9	-0.0001	24
	MW	14'603	363	62	38	0.65	31	292	221	20	0.0034	34
	o.G.	14'895	444	83	92	0.96	48	410	288	30	0.0069	43
	rel. Abw.	2%	22%	34%	141%	48%	54%	41%	31%	52%	103%	28%
Feinkörnige Metall-Fraktion 1	u.G.	10'836	4'530	22	25	4.1	48	421	1'307	39	0.0053	408
	MW	10'991	4'774	24	30	4.5	52	450	1'480	42	0.0065	475
	o.G.	11'147	5'018	26	36	4.9	56	479	1'652	46	0.0076	542
	rel. Abw.	1%	5%	7%	19%	9%	8%	7%	12%	9%	17%	14%
Feinkörnige Metall-Fraktion 2	u.G.	5'180	406	5.1	204	1.5	6.5	374	2'550	29	0.006	204
	MW	5'256	442	5.8	221	1.8	7.3	408	2'733	32	0.011	222
	o.G.	5'332	478	6.6	239	2.0	8.1	442	2'915	35	0.015	240
	rel. Abw.	1%	8%	13%	8%	15%	11%	8%	7%	9%	45%	8%
Metallschrottfraktion 1	u.G.	172	172	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	175	175	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	179	179	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	2%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraktion 2	u.G.	9'716	-	-	-	-	-	6'677	1'980	-	-	-
	MW	9'914	-	-	-	-	-	7'436	2'479	-	-	-
	o.G.	10'112	-	-	-	-	-	8'194	2'977	-	-	-
	rel. Abw.	2%	-	-	-	-	-	10%	20%	-	-	-
Metallschrottfraktion 3	u.G.	3'780	1'233	-	-	-	674	-	116	674	-	3.1
	MW	3'857	1'736	-	-	-	964	-	193	964	-	3.9
	o.G.	3'934	2'238	-	-	-	1'254	-	270	1'254	-	4.6
	rel. Abw.	2%	29%	-	-	-	30%	-	40%	30%	-	20%
Metallschrottfraktion 4	u.G.	2'920	953	-	-	-	521	-	89	521	-	2.4
	MW	2'980	1'341	-	-	-	745	-	149	745	-	3.0
	o.G.	3'039	1'729	-	-	-	969	-	209	969	-	3.6
	rel. Abw.	2%	29%	-	-	-	30%	-	40%	30%	-	20%
Fe-Grobschrottfraktion	u.G.	67'388	598	-	-	-	350	64'018	71	350	-	-
	MW	68'763	777	-	-	-	433	65'325	89	433	-	-
	o.G.	70'138	956	-	-	-	516	66'631	107	516	-	-
	rel. Abw.	2%	23%	-	-	-	19%	2%	20%	19%	-	-
Feinkörniger Fe-Schrott	u.G.	2'515	23	-	-	-	13	2'390	2.7	13	-	-
	MW	2'566	30	-	-	-	16	2'439	3.3	16	-	-
	o.G.	2'618	36	-	-	-	19	2'487	4.0	19	-	-
	rel. Abw.	2%	23%	-	-	-	19%	2%	20%	19%	-	-

Input / Output	Stofffluss Sn [kg]	Stofffluss Cl [kg]	Stofffluss Br [kg]	Stofffluss P [kg]	Stofffluss PentaBDE [kg]	Stofffluss TBBPA [kg]	Stofffluss HBCD [kg]	Stofffluss OctaBDE [kg]	Stofffluss DecaBDE [kg]	Stofffluss PCB Summe [kg]	
Input EEKG- Schrott	u.G.	507	1'895	1'201	32	7.08	307	3.0	114	109	1.94
	MW	543	2'211	1'262	82	7.87	326	3.9	121	117	2.97
	o.G.	579	2'528	1'323	132	8.66	344	4.8	128	124	3.99
	rel. Abw.	7%	14%	5%	61%	10%	6%	22%	6%	7%	34%
Brennbare Abfälle (KVA)	u.G.	0.19	18	0.36	1.9	-	-	-	-	-	-
	MW	0.28	20	0.39	2.2	-	-	-	-	-	-
	o.G.	0.38	21	0.43	2.4	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	33%	7%	9%	12%	-	-	-	-	-	-
Batterien / Akkus	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kondensatoren	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.2
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.2
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.1
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45%
Staub	u.G.	48	41	56	-4.5	0.28	1	0.10	1.9	2.7	0.15
	MW	67	72	101	3.2	0.78	10	0.16	3.6	4.6	0.43
	o.G.	87	104	145	10.9	1.28	19	0.22	5.3	6.5	0.71
	rel. Abw.	29%	44%	44%	239%	64%	85%	38%	47%	42%	64%
Cu-Kabel	u.G.	-	1'250	-	-	0.06	0.01	0.06	-0.18	0.24	-0.02
	MW	-	1'564	-	-	0.10	0.02	0.10	0.39	0.66	0.12
	o.G.	-	1'878	-	-	0.14	0.03	0.14	0.97	1.09	0.27
	rel. Abw.	-	20%	-	-	39%	39%	39%	147%	63%	116%
Leiterplatten	u.G.	84	10	104	0.17	0.038	0.10	0.033	0.033	0.067	0.000086
	MW	103	26	121	0.19	0.063	0.16	0.038	0.038	0.100	0.000094
	o.G.	122	41	139	0.20	0.088	0.23	0.042	0.042	0.134	0.000101
	rel. Abw.	18%	61%	15%	8%	40%	41%	11%	11%	34%	8%
Bildröhrenkomponenten 1	u.G.	-	38	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	42	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	47	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	10%	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 2	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 3	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 4	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 5	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TV-Gehäuse Holz	u.G.	0.0042	4.1	0.068	0.047	0.006	0.036	0.0058	0.0058	-0.0090	0.000017
	MW	0.0043	6.4	0.147	0.048	0.010	0.076	0.0095	0.0095	0.0190	0.000024
	o.G.	0.0044	8.8	0.227	0.048	0.013	0.116	0.0132	0.0132	0.0470	0.000031
	rel. Abw.	2%	37%	54%	2%	39%	53%	39%	39%	148%	29%
TV/PC-Gehäuse	u.G.	2.3	86	193	7	0.22	100	0.22	32	20	0.00011
	MW	3.5	93	204	11	0.24	109	0.24	35	22	0.00012
	o.G.	4.7	100	216	15	0.25	119	0.25	38	24.61	0.00012
	rel. Abw.	33%	7%	6%	40%	7%	9%	7%	9%	10%	5%
TV-Rückwände	u.G.	-	4.3	11	-	0.019	2.7	-0.02	2.5	2.5	0.000011
	MW	-	6.1	16	-	0.031	4.5	0.84	4.7	8.1	0.000016
	o.G.	-	7.9	21	-	0.043	6.4	1.69	7.0	13.6	0.000020
	rel. Abw.	-	29%	29%	-	39%	41%	102%	48%	69%	29%
Feinkörnige KS-Fraktion 1	u.G.	0.5	231	397	-30	1.4	139	1.4	46	47	0.07
	MW	7.1	244	427	18	1.5	151	1.5	49	51	0.10
	o.G.	14	258	457	66	1.6	164	1.6	53	56	0.13
	rel. Abw.	93%	6%	7%	262%	7%	8%	7%	7%	8%	31%
Feinkörnige KS-Fraktion 2	u.G.	9	94	273	25	4.3	32	0.68	6.2	23	0.13
	MW	13	99	289	35	4.9	35	0.73	6.9	24	0.15
	o.G.	17	105	305	45	5.5	38	0.78	7.6	26	0.16
	rel. Abw.	30%	6%	6%	29%	12%	9%	7%	10%	7%	12%
Feinkörnige Metall-Fraktion 1	u.G.	51	34	87	10	0.24	13	0.24	17	3.77	0.0012
	MW	51	37	94	12	0.27	15	0.27	21	4.80	0.0014
	o.G.	51	41	101	15	0.30	17	0.30	25	5.83	0.0015
	rel. Abw.	0%	9%	7%	21%	11%	14%	11%	21%	21%	11%
Feinkörnige Metall-Fraktion 2	u.G.	298	0.62	7.7	-	0.010	-0.030	0.010	0.010	-0.030	0.00012
	MW	298	0.74	9.2	-	0.016	0.040	0.016	0.016	0.040	0.00056
	o.G.	299	0.86	10.6	-	0.022	0.109	0.022	0.022	0.109	0.00099
	rel. Abw.	0%	16%	15%	-	39%	175%	39%	39%	175%	78%
Metallschrottfraktion 4	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraktion 1	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraktion 3	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraktion 2	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe-Grobschrottfraktion	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Feinkörniger Fe-Schrott	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Angegebene Werte sind ungerundet. u.G. und o.G. bedeuten untere bzw. obere Grenzen eines 95%-Konfidenzintervalls, rel. Abw. bedeutet die relative Abweichung des Fehlers in %.

## 9.4.5 Detaillierte Resultate auf Ebene der Transferkoeffizienten

Tabelle 9-20: Berechnete Transferkoeffizienten inkl. Batterien/Akkus (ungerundet)

Input / Output	Güterfluss Masse [kg]	Transferkoeff. Masse [-]	Transferkoeff. Al [-]	Transferkoeff. Sb [-]	Transferkoeff. Pb [-]	Transferkoeff. Cd [-]	Transferkoeff. Cr [-]	Transferkoeff. Fe [-]	Transferkoeff. Cu [-]	Transferkoeff. Ni [-]	Transferkoeff. Hg [-]	Transferkoeff. Zn [-]
Input EEKG- Schrott	u.G.	224'590	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	MW	229'173	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	o.G.	233'756	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	rel. Abw.	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Brennbare Abfälle (KVA)	u.G.	2'953	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.01	0.00
	MW	3'013	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.01	0.00
	o.G.	3'073	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.00	0.02	0.00
	rel. Abw.	2%	3%	10%	17%	23%	28%	17%	8%	20%	27%	33%
Batterien / Akkus	u.G.	557	0.00	0.00	-	0.01	0.22	0.00	0.00	0.00	0.24	0.02
	MW	568	0.00	0.00	-	0.02	0.52	0.00	0.00	0.01	0.60	0.03
	o.G.	580	0.00	0.00	-	0.04	0.81	0.00	0.00	0.01	0.95	0.05
	rel. Abw.	2%	3%	50%	-	53%	57%	53%	50%	51%	52%	59%
Kondensatoren	u.G.	717	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	731	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	746	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Staub	u.G.	15'464	0.07	0.02	0.03	-0.01	0.07	0.00	0.01	0.01	0.09	0.10
	MW	15'775	0.07	0.03	0.07	0.14	0.13	0.01	0.01	0.02	0.18	0.25
	o.G.	16'087	0.07	0.03	0.10	0.29	0.19	0.01	0.02	0.01	0.26	0.40
	rel. Abw.	2%	3%	24%	51%	105%	48%	58%	29%	30%	33%	47%
Cu-Kabel	u.G.	3'832	0.02	-	-	0.00	0.00	-	0.08	-	-	0.00
	MW	3'910	0.02	-	-	0.00	0.00	-	0.12	-	-	0.00
	o.G.	3'988	0.02	-	-	0.00	0.00	-	0.17	-	-	0.00
	rel. Abw.	2%	3%	-	-	36%	55%	-	34%	-	-	23%
Leiterplatten	u.G.	3'679	0.02	0.01	0.02	0.05	0.03	0.00	0.00	0.06	0.01	0.01
	MW	3'754	0.02	0.01	0.02	0.07	0.05	0.00	0.00	0.07	0.02	0.04
	o.G.	3'829	0.02	0.01	0.02	0.09	0.06	0.00	0.00	0.08	0.02	0.07
	rel. Abw.	2%	3%	43%	14%	26%	30%	19%	43%	14%	28%	82%
Bildröhrenkomponenten 1	u.G.	41'584	0.18	0.05	0.31	0.24	-	0.05	-	-	-	-
	MW	42'433	0.19	0.06	0.37	0.30	-	0.06	-	-	-	-
	o.G.	43'282	0.19	0.07	0.42	0.36	-	0.06	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	3%	12%	15%	20%	-	10%	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 2	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 3	u.G.	120	0.00	-	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-
	MW	122	0.00	-	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-
	o.G.	124	0.00	-	-	0.00	-	0.00	-	0.00	-	-
	rel. Abw.	2%	3%	-	-	27%	-	-	-	11%	-	25%
Bildröhrenkomponenten 4	u.G.	2'729	0.01	-	-	-	-	0.00	0.00	-	-	-
	MW	2'785	0.01	-	-	-	-	0.00	0.01	-	-	-
	o.G.	2'841	0.01	-	-	-	-	0.00	0.01	-	-	-
	rel. Abw.	2%	3%	-	-	-	-	10%	21%	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 5	u.G.	2.0	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	2.0	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	2.0	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TV-Gehäuse Holz	u.G.	931	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	MW	950	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	o.G.	969	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	rel. Abw.	2%	3%	7%	12%	18%	27%	17%	3%	8%	16%	32%
TV/PC-Gehäuse	u.G.	4'609	0.02	0.01	0.13	0.00	0.00	-0.00	-0.00	0.00	0.02	0.00
	MW	4'703	0.02	0.02	0.20	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
	o.G.	4'797	0.02	0.03	0.26	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00
	rel. Abw.	2%	3%	43%	33%	56%	45%	144%	131%	114%	46%	52%
TV-Rückwände	u.G.	608	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	620	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	632	0.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	3%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Feinkörnige KS-Fraktion 1	u.G.	29'606	0.13	0.02	0.04	0.02	0.06	0.00	0.00	0.00	-0.06	0.01
	MW	30'210	0.13	0.03	0.11	0.03	0.13	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02
	o.G.	30'814	0.14	0.04	0.17	0.03	0.20	0.01	0.03	0.01	0.07	0.02
	rel. Abw.	2%	3%	24%	60%	38%	52%	133%	107%	131%	91%	1060%
Feinkörnige KS-Fraktion 2	u.G.	14'311	0.06	0.02	0.10	-0.02	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02
	MW	14'603	0.06	0.03	0.16	0.06	0.02	0.01	0.00	0.02	0.01	0.02
	o.G.	14'895	0.07	0.04	0.22	0.14	0.02	0.02	0.00	0.03	0.01	0.04
	rel. Abw.	2%	3%	23%	36%	143%	55%	57%	41%	32%	55%	108%
Feinkörnige Metall-Fraktion 1	u.G.	10'836	0.05	0.39	0.06	0.04	0.08	0.02	0.01	0.14	0.02	0.03
	MW	10'991	0.05	0.42	0.06	0.05	0.11	0.02	0.01	0.16	0.02	0.04
	o.G.	11'147	0.05	0.45	0.07	0.06	0.13	0.03	0.01	0.18	0.02	0.05
	rel. Abw.	1%	2%	7%	12%	23%	22%	14%	7%	13%	14%	29%
Feinkörnige Metall-Fraktion 2	u.G.	5'180	0.02	0.04	0.01	0.28	0.03	0.00	0.00	0.26	0.01	0.03
	MW	5'256	0.02	0.04	0.02	0.34	0.04	0.00	0.00	0.29	0.01	0.07
	o.G.	5'332	0.02	0.04	0.02	0.39	0.05	0.00	0.01	0.32	0.02	0.10
	rel. Abw.	1%	2%	10%	16%	17%	24%	18%	8%	9%	16%	52%
Metallschrottfraktion 1	u.G.	172	0.00	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	175	0.00	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	179	0.00	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	2%	3%	7%	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraktion 2	u.G.	9'716	0.04	-	-	-	-	0.08	0.21	-	-	-
	MW	9'914	0.04	-	-	-	-	0.09	0.26	-	-	-
	o.G.	10'112	0.04	-	-	-	-	0.10	0.32	-	-	-
	rel. Abw.	2%	3%	-	-	-	-	10%	21%	-	-	-
Metallschrottfraktion 3	u.G.	3'780	0.02	0.11	-	-	-	0.28	0.01	0.27	-	0.00
	MW	3'857	0.02	0.15	-	-	-	0.42	0.02	0.41	-	0.00
	o.G.	3'934	0.02	0.20	-	-	-	0.57	0.03	0.55	-	0.00
	rel. Abw.	2%	3%	30%	-	-	-	34%	41%	34%	-	26%
Metallschrottfraktion 4	u.G.	2'920	0.01	0.08	-	-	-	0.21	0.01	0.21	-	0.00
	MW	2'980	0.01	0.12	-	-	-	0.33	0.02	0.32	-	0.00
	o.G.	3'039	0.01	0.15	-	-	-	0.44	0.02	0.42	-	0.00
	rel. Abw.	2%	3%	30%	-	-	-	34%	41%	34%	-	26%
Fe-Grobschrottfraktion	u.G.	67'388	0.29	0.05	-	-	-	0.14	0.77	0.01	0.14	-
	MW	68'763	0.30	0.07	-	-	-	0.19	0.79	0.01	0.18	-
	o.G.	70'138	0.31	0.09	-	-	-	0.24	0.81	0.01	0.23	-
	rel. Abw.	2%	3%	24%	-	-	-	25%	3%	21%	25%	-
Feinkörniger Fe-Schrott	u.G.	2'515	0.01	0.00	-	-	-	0.01	0.03	0.00	0.01	-
	MW	2'566	0.01	0.00	-	-	-	0.01	0.03	0.00	0.01	-
	o.G.	2'618	0.01	0.00	-	-	-	0.01	0.03	0.00	0.01	-
	rel. Abw.	2%	3%	24%	-	-	-	25%	3%	21%	25%	-

Input / Output	Transferkoeff Sn [-]	Transferkoeff Cl [-]	Transferkoeff Br [-]	Transferkoeff P [-]	Transferkoeff PentaBDE [-]	Transferkoeff TBBPA [-]	Transferkoeff HBCD [-]	Transferkoeff OctaBDE [-]	Transferkoeff DecaBDE [-]	Transferkoeff PCB Summe [-]
Input EEKG- Schrott	u.G.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	MW	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	o.G.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	rel. Abw.	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Brennbare Abfälle (KVA)	u.G.	0.00	0.01	0.00	0.01	-	-	-	-	-
	MW	0.00	0.01	0.00	0.03	-	-	-	-	-
	o.G.	0.00	0.01	0.00	0.04	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	34%	16%	10%	62%	-	-	-	-	-
Batterien / Akkus	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kondensatoren	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	0.32
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	0.73
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	1.14
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	57%
Staub	u.G.	0.09	0.02	0.04	-0.06	0.04	0.00	0.02	0.02	0.04
	MW	0.12	0.03	0.08	0.04	0.10	0.03	0.04	0.03	0.04
	o.G.	0.16	0.05	0.12	0.14	0.16	0.06	0.06	0.04	0.06
	rel. Abw.	30%	46%	44%	247%	65%	86%	44%	47%	42%
Cu-Kabel	u.G.	-	0.53	-	-	0.01	0.00	0.01	-0.00	0.00
	MW	-	0.71	-	-	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01
	o.G.	-	0.88	-	-	0.02	0.00	0.04	0.01	0.01
	rel. Abw.	-	25%	-	-	40%	39%	45%	147%	64%
Leiterplatten	u.G.	0.15	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
	MW	0.19	0.01	0.10	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
	o.G.	0.23	0.02	0.11	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
	rel. Abw.	19%	62%	15%	61%	41%	41%	25%	12%	34%
Bildröhrenkomponenten 1	u.G.	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	18%	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 2	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 3	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 4	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bildröhrenkomponenten 5	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TV-Gehäuse Holz	u.G.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.00
	MW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	o.G.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	rel. Abw.	7%	39%	54%	61%	40%	53%	45%	39%	148%
TV/PC-Gehäuse	u.G.	0.00	0.04	0.15	0.04	0.03	0.30	0.05	0.26	0.17
	MW	0.01	0.04	0.16	0.13	0.03	0.34	0.06	0.29	0.19
	o.G.	0.01	0.05	0.17	0.23	0.03	0.37	0.07	0.32	0.22
	rel. Abw.	34%	16%	7%	73%	12%	10%	23%	10%	12%
TV-Rückwände	u.G.	-	0.00	0.01	-	0.00	0.01	-0.01	0.02	0.02
	MW	-	0.00	0.01	-	0.00	0.01	0.21	0.04	0.07
	o.G.	-	0.00	0.02	-	0.01	0.02	0.44	0.06	0.12
	rel. Abw.	-	32%	29%	-	40%	41%	105%	48%	69%
Feinkörnige KS-Fraktion 1	u.G.	0.00	0.09	0.31	-0.38	0.17	0.42	0.30	0.37	0.39
	MW	0.01	0.11	0.34	0.22	0.19	0.46	0.39	0.41	0.44
	o.G.	0.03	0.13	0.37	0.82	0.21	0.51	0.48	0.44	0.49
	rel. Abw.	93%	15%	9%	269%	12%	10%	23%	9%	11%
Feinkörnige KS-Fraktion 2	u.G.	0.02	0.04	0.21	0.14	0.52	0.10	0.14	0.05	0.19
	MW	0.02	0.04	0.23	0.43	0.62	0.11	0.19	0.06	0.21
	o.G.	0.03	0.05	0.25	0.71	0.72	0.12	0.23	0.06	0.23
	rel. Abw.	31%	15%	7%	67%	16%	11%	23%	12%	10%
Feinkörnige Metall-Fraktion 1	u.G.	0.08	0.01	0.07	0.05	0.03	0.04	0.05	0.14	0.03
	MW	0.09	0.02	0.07	0.15	0.03	0.05	0.07	0.17	0.04
	o.G.	0.11	0.02	0.08	0.24	0.04	0.05	0.09	0.21	0.05
	rel. Abw.	17%	17%	8%	64%	15%	15%	25%	22%	23%
Feinkörnige Metall-Fraktion 2	u.G.	0.50	0.00	0.01	-	0.00	-0.00	0.00	0.00	-0.00
	MW	0.55	0.00	0.01	-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	o.G.	0.60	0.00	0.01	-	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
	rel. Abw.	9%	21%	16%	-	40%	175%	45%	39%	175%
Metallschrottfraktion 4	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraktion 1	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraktion 3	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Metallschrottfraktion 2	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe-Grobschrottfraktion	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Feinkörniger Fe-Schrott	u.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	MW	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	o.G.	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	rel. Abw.	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Angegebene Werte sind ungerundet. u.G. und o.G. bedeuten untere bzw. obere Grenzen eines 95%-Konfidenzintervalls, rel. Abw. bedeutet die relative Abweichung des Fehlers in %.

## 9.5 Anhang 5 - Resultate und Diskussion der Ausgleichsrechnung

Zur Kontrolle der Summe der einzelnen Outputgüter wurde der Inputstrom in die mechanische Aufbereitung (Summe Feinkorn) ebenfalls beprobt. Die Summe der einzelnen Elementflüsse der Outputgüter aus der mechanischen Aufbereitung sollte dabei gleich den Elementflüssen des Inputstromes (Summe Feinkorn) sein. Diese Bedingung wurde z.T. sehr gut erfüllt (für die Elemente Fe, Cu, Ni, Zn, Sn, Br, TBBPA und DecaBDE, mit einer Abweichung von 0% für Cu bis max. 26% für Fe). Für die restlichen 12 Elemente stimmte diese Kontrolle schlechter überein (Faktor 0.3 für OctaBDE bis 3.0 für Cr), wobei das Element P im Inputstrom nicht analysiert worden war.

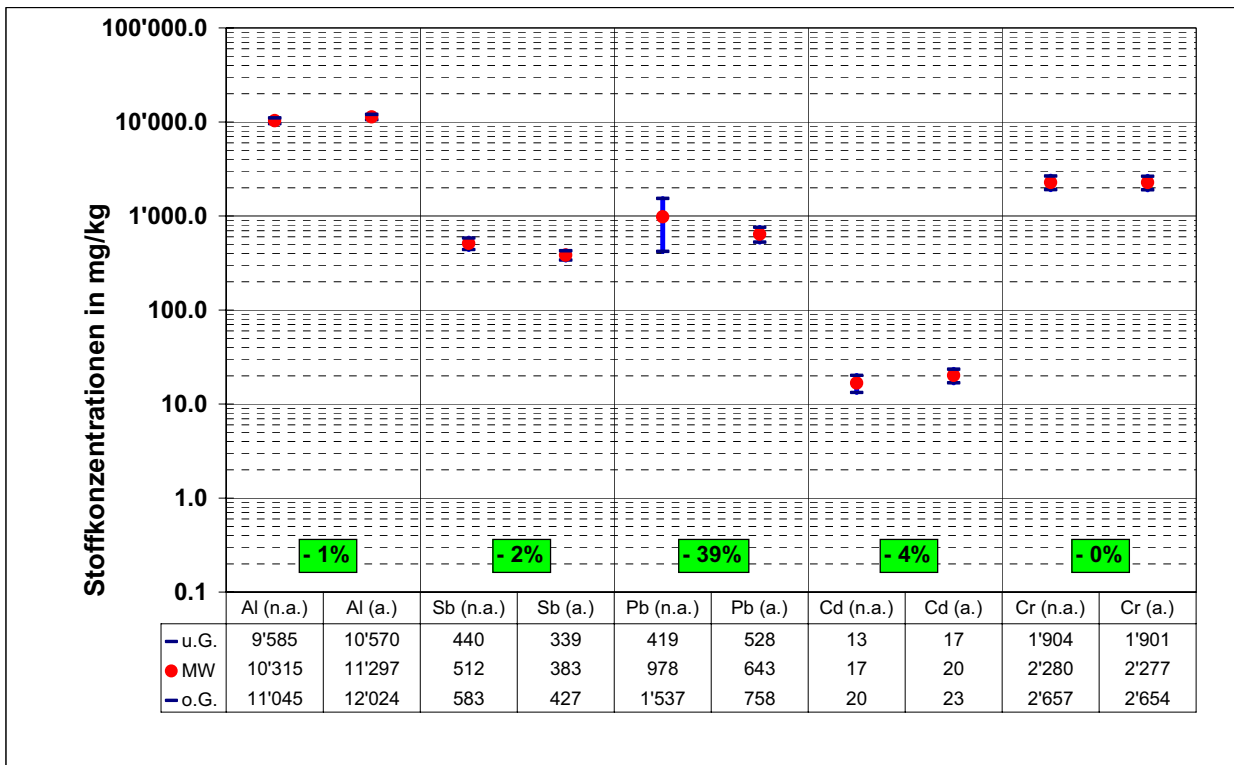
Mit Hilfe einer Ausgleichsrechnung (SIMBOX<sup>®</sup>) wurde die Summe der einzelnen Elementflüsse der Outputströme der mechanischen Aufbereitung mit den entsprechenden Elementflüssen des Inputstromes (Summe Feinkorn) zur Deckung gebracht (vgl. Kap. 9.3.3.5). Beim Ausgleich wurde die Fehlerrechnung für den Inputstrom aufgrund der gezogenen 6 Mischproben durchgeführt und bei den einzelnen Outputströmen aufgrund der je 20 Stichproben je Mischprobe. Beim Fluss „Summe Feinkorn“ wurde also mit einem grösseren Fehler gerechnet. Dies, weil hier von einer grösseren Inhomogenität des Probenmaterials gegenüber den Outputströmen ausgegangen werden muss.

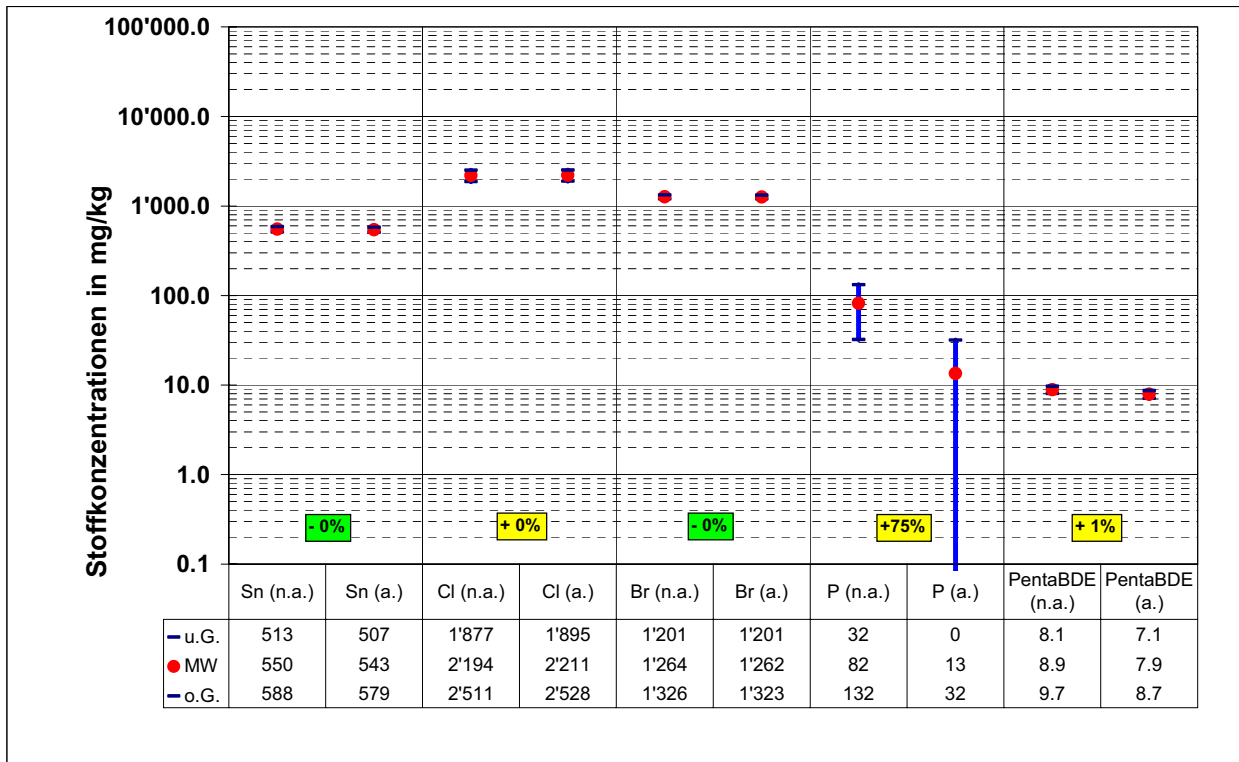
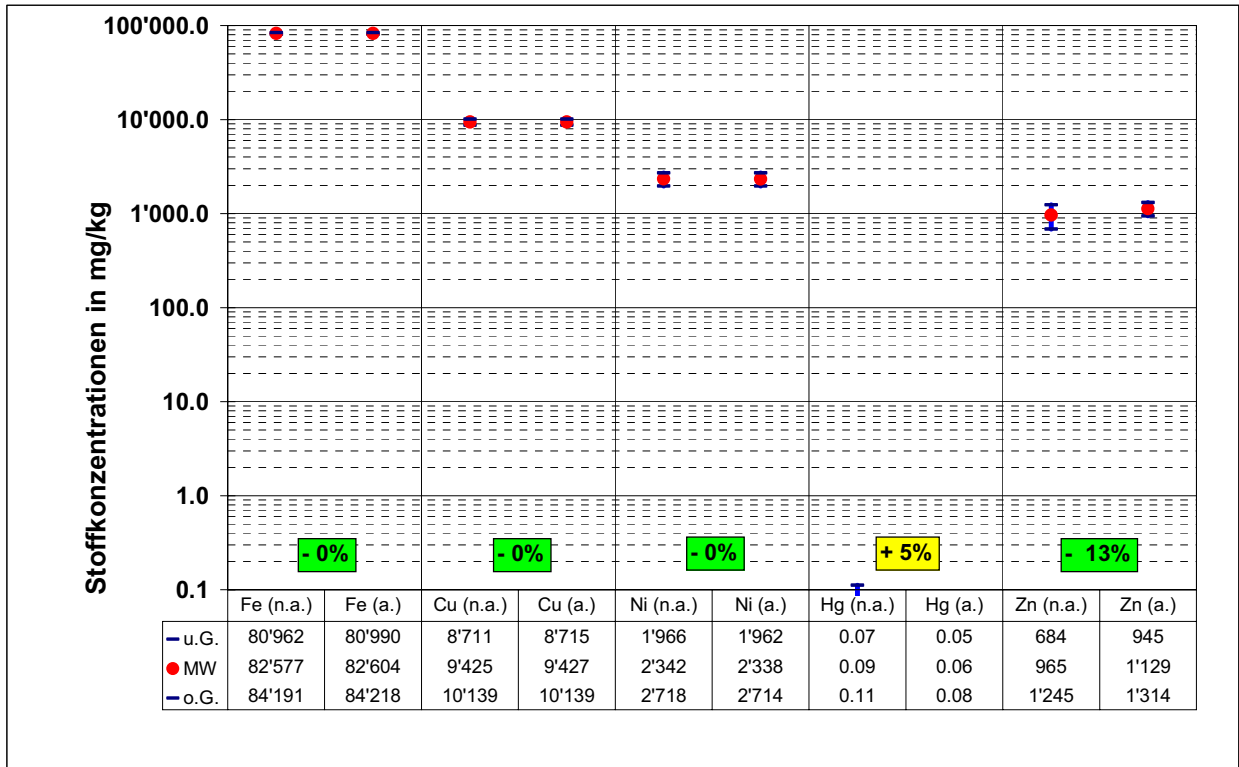
Der Vergleich der Stoffflüsse der einzelnen Elemente „ausgeglichen“ und „nicht ausgeglichen“ über sämtliche Outputgüter der mechanischen Aufbereitung zeigt, dass mit Ausnahme des Sb sämtliche Werte innerhalb der Fehlerbereiche der beiden Berechnungsarten liegen (vgl. Tabelle 9-21 und Abbildung 9-1). Da durch den Ausgleich eine weitere Bedingung in die Berechnung eingeführt werden konnte, kann davon ausgegangen werden, dass die ausgeglichenen Werte den effektiven Werten näher kommen als die unausgeglichenen Werte. Der Vergleich der relativen Fehler bestätigt diese Überlegung: Mit Ausnahme des Cl (+0%), PentaBDE (+1%) und Hg (+4.5%) verringerte sich der relative Fehler bei den ausgeglichenen Werten überall (-0% bis -169% für die PCB Summe). Für die weitere Berechnung wurden deshalb die ausgeglichenen Werte verwendet. Nicht verwendet werden konnte der Ausgleich des Element P, weil wie oben erwähnt, dafür keine Inputgrössen zur Verfügung standen und somit der Ausgleich keine vernünftigen Resultate lieferte (negativer Stofffluss für die feinkörnige Kunststofffraktion 1).

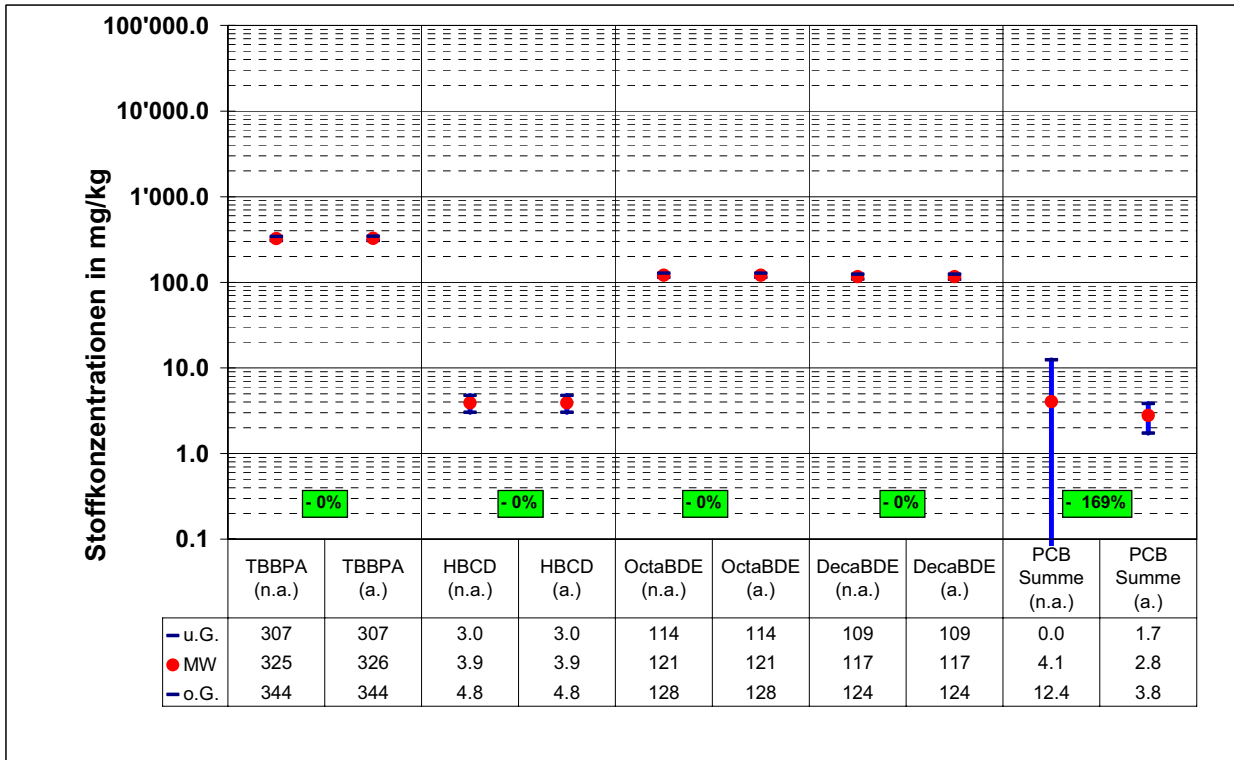
Tabelle 9-21: Vergleich der Fehlerbereiche „abgeglichen“ / „nicht abgeglichen“ (ohne Batterien)

Elemente / Stoffe	nicht abgeglichen				abgeglichen			
	u.G. [kg]	MW [kg]	o.G. [kg]	Rel. Abw. [%]	u.G. [kg]	MW [kg]	o.G. [kg]	Rel. Abw. [%]
Al	9'585	10'315	11'045	7%	10'570	11'297	12'024	6%
Sb	440	512	583	14%	339	383	427	12%
Pb	419	978	1'537	57%	528	643	758	18%
Cd	13	17	20	21%	17	20	23	16%
Cr	1'904	2'280	2'657	17%	1'901	2'277	2'654	17%
Fe	80'962	82'577	84'191	2%	80'990	82'604	84'218	2%
Cu	8'711	9'425	10'139	8%	8'715	9'427	10'139	8%
Ni	1'966	2'342	2'718	16%	1'962	2'338	2'714	16%
Hg	0.072	0.092	0.112	22%	0.047	0.063	0.080	26%
Zn	684	965	1'245	29%	945	1'129	1'314	16%
Sn	513	550	588	7%	507	543	579	7%
Cl	1'877	2'194	2'511	14%	1'895	2'211	2'528	14%
Br	1'201	1'264	1'326	5%	1'201	1'262	1'323	5%
P	32	82	132	61%	-5	13	32	136%
PentaBDE	8.1	8.9	9.7	9%	7.1	7.9	8.7	10%
TBBPA	307	325	344	6%	307	326	344	6%
HBCD	3.0	3.9	4.8	22%	3.0	3.9	4.8	22%
OctaBDE	114	121	128	6%	114	121	128	6%
DecaBDE	109	117	124	7%	109	117	124	7%
PCB Summe	-4	4	12	207%	1.7	2.8	3.8	38%

Abbildung 9-1: Vergleich der Fehlerbereiche für die Stoffkonzentrationen der untersuchten Stoffe „nicht ausgeglichen“, und „ausgeglichen“ (ohne Batterien)







## 9.6 Anhang 6 - BFS Literaturdaten

Tabelle 9-22: Abschätzung der BFS-Mengen bzw. Konzentrationen in Schrott von EE- Kleingeräten sowie im Kunststoffanteil des EE- Kleingeräteschrotts in der Schweiz 1998; Literaturquelle [Morf et al., 2002].

ENTSORGTE ABFÄLLE	Schweiz, 1998 [Morf et al., 2002]	Entsorgte Abfälle	PentaBDE	OctaBDE	DecaBDE	TBBPA
		[1'000 t]	[t]	[t]	[t]	[t]
EDV- und Büroelektronik		14	0	16	33	134
Kommunikationstechnik		2.7	0	0.9	3.1	14
Unterhaltungselektronik		13	0.6	23	49	32
Haushaltgeräte - klein		15	0	1.1	10	7.8
Haushaltgeräte - gross		43	0.03	2.2	19	13
Spezialgeräte		10	0	0.5	5.3	40
EE-Kleinteile		71	0	3.3	42	16
Verkehrsmittel		330	2.4	9	106	66
Baumaterialien und Textilien		24	27	5.2	102	66
<b>Total</b>		<b>522</b>	<b>30</b>	<b>62</b>	<b>369</b>	<b>389</b>

		Menge in t	PentaBDE	OctaBDE	DecaBDE	TBBPA
Elektro- und Elektronikkleingeräte	Tonnen	115'500	0.60	45	137	204
	g/kg		0.005	0.39	1.2	1.8
Kunststoffanteil	g/kg	35'805	0.017	1.2	3.8	5.7