

> Stoffflüsse im Schweizer Elektronikschrott

*Metalle, Nichtmetalle, Flammschutzmittel und polychlorierte Biphenyle
in elektrischen und elektronischen Kleingeräten*



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU

> Stoffflüsse im Schweizer Elektroniksrott

*Metalle, Nichtmetalle, Flammschutzmittel und polychlorierte Biphenyle
in elektrischen und elektronischen Kleingeräten*

*Résumé de cette publication: www.bafu.admin.ch/uz-1717-f
Riassunto della presente pubblicazione: www.bafu.admin.ch/uz-1717-i
Summary of this publication: www.bafu.admin.ch/uz-1717-e*

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU)

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

Autoren

Ruedi Taverna, GEO Partner AG, Zürich

Rolf Gloor, Urs Maier, Bachema AG, Schlieren

Markus Zennegg, Renato Figi, Empa Dübendorf

Edy Birchler, Immark AG, Regensdorf

Begleitung BAFU

Andreas Buser, Josef Tremp, Sektion Industriechemikalien

Zitierung

Taverna et al. 2017: Stoffflüsse im Schweizer Elektronikschrott.

Metalle, Nichtmetalle, Flammschutzmittel und polychlorierte Biphenyle in elektrischen und elektronischen Kleingeräten. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Zustand Nr. 1717: 164 S.

Gestaltung

Karin Nöthiger, 5443 Niederrohrdorf

Titelbild

Ruedi Taverna, GEO Partner AG, Zürich

Dank

Das BAFU möchte der Immark AG, die wie bereits bei einer früheren Arbeit für diese Studie einen grossen Betrag an Ressourcen und Know-how leistete, seinen Dank aussprechen.

PDF-Download

www.bafu.admin.ch/uz-1717-d

Eine gedruckte Fassung kann nicht bestellt werden.

© BAFU 2017

> Inhalt

Abstracts	5		
Vorwort	7		
Zusammenfassung	8		
<hr/>			
1 Einleitung	15		
1.1 Ausgangslage	15		
1.2 Problematik	15		
<hr/>			
2 Zielsetzung und Fragestellungen	17		
<hr/>			
3 Grundlagen	21		
3.1 Mengengerüst	21		
3.2 Versuchsanordnung	22		
<hr/>			
4 Methodisches Vorgehen	23		
4.1 Projektablauf	23		
4.2 Angewandte Methodik	23		
4.3 Versuchsplanung und Durchführung	24		
4.3.1 Systemdefinition	24		
4.3.2 Wahl der Prozesse	25		
4.3.3 Wahl der Güter, aggregiertes System	25		
4.3.4 Wahl der Stoffe	26		
4.3.5 Massenbestimmung der Güterflüsse	26		
4.3.6 Festlegung der Orte der Probenahme zur Bestimmung der Stoffkonzentrationen	26		
4.3.7 Probenahmekonzept	28		
4.3.8 Probenaufbereitungskonzept	28		
4.4 Laboruntersuchungen	29		
4.5 Auswertung, mathematisches Modell	29		
<hr/>			
5 Resultate	30		
5.1 Materialflüsse	30		
5.1.1 Input-Gerätetmix	30		
5.1.2 Outputmengen	30		
5.2 Stoffliche Zusammensetzung der Outputprodukte	32		
5.2.1 Schadstoffträger	32		
5.2.2 Hintergrundbeleuchtungen	34		
5.2.3 LCD-Panels	35		
5.2.4 Unterkorn	36		
5.2.5 Staub	37		
5.2.6 Cu-Kabel	38		
5.2.7 Leiterplatten	39		
5.2.8 Bildröhrenkomponenten	40		
5.2.9 Bildschirm- und Notebookgehäuse	41		
5.2.10 Feinkörnige KS-Fraktion	42		
5.2.11 Feinkörnige Metallfraktion	43		
5.2.12 Metallschrottfraktion	44		
5.2.13 Fe-Schrott	45		
5.3 Verteilung der Stoffe vom Input in die Outputprodukte (Transferkoeffizienten)	46		
5.3.1 Transferkoeffizienten der untersuchten Metalle	46		
5.3.2 Transferkoeffizienten der untersuchten Nichtmetalle	49		
5.3.3 Transferkoeffizienten der untersuchten Flammenschutzmittel	50		
5.3.4 Transferkoeffizienten der PCB	53		
5.4 Konzentrationen im Input (EEKG-Schrott Schweiz 2011)	55		
5.4.1 Konzentration der Metalle und Antimon im Schweizer EEKG-Schrott	55		
5.4.2 Konzentration der Nichtmetalle im Schweizer EEKG-Schrott	56		
5.4.3 Konzentration der FS im Schweizer EEKG-Schrott	57		
5.4.4 Konzentration der PCB im Schweizer EEKG-Schrott	59		
5.5 Frachten im EEKG-Schrott der Schweiz 2011	59		
5.5.1 Stofffrachten der Metalle und Antimon aus dem Schweizer EEKG-Schrott	60		
5.5.2 Stofffrachten der Nichtmetalle aus dem Schweizer EEKG-Schrott	61		
5.5.3 Stofffrachten der FS aus dem Schweizer EEKG-Schrott	61		
5.5.4 Stofffrachten der PCB im Schweizer EEKG-Schrott	62		
<hr/>			
6 Diskussion der Resultate	64		
6.1 Einfluss einzelner Fraktionen	64		
6.1.1 Metalle	64		

6.1.2	Flammschutzmittel	66	9.5	Nicht oder nur teilweise analysierte Fraktionen	124
6.1.3	PCB	71	9.6	Zusammensetzung des Batterieoutputs	126
6.2	Vergleich der Konzentrationen im EE-Schrott 2003 und 2011	72	9.6.1	Kleinversuch Batteriemix Immark	126
6.2.1	Entwicklung bei den Metallen und Antimon	72	9.6.2	Batteriegehalte und Gewichtsanteile gemäss Batrec und Versuch Immark	127
6.2.2	Entwicklung bei den Nichtmetallen	74	9.7	Konzentration von CCFL-Röhren aus Hintergrundbeleuchtungen	128
6.2.3	Entwicklung bei den Flammschutzmitteln	75	9.8	Konzentrationen der einzelnen Outputgüter (Resultate Bachema)	130
6.2.4	Entwicklung bei den PCB	76	9.8.1	Metalle	130
6.3	Vergleich der Resultate mit anderen neueren Studien	76	9.8.2	Nichtmetalle und PCB	136
6.3.1	Vergleich der Resultate der Hg-Gehalte von Hintergrundbeleuchtungen	76	9.8.3	Flammschutzmittel Bachema	138
6.3.2	Vergleich der Resultate der Gehalte in Gehäusen von CRT- und LCD-PC- und -TV-Geräten	77	9.8.4	Flammschutzmittel EMPA	142
7	Schlussfolgerungen	85	9.9	Schätzung der Gehalte in hoch- und minderwertigen Leiterplatten	148
7.1	Ressourcenpotenzial	85	9.10	Analysenresultate EMPA zur Qualitätssicherung	148
7.2	Schadstoffsituation	85	9.10.1	Elemente	148
7.2.1	Mittlere Gehalte im EEKG-Schrott	85	9.10.2	Organische Verbindungen	150
7.2.2	Output	86	9.11	Konzentrationen im EEKG-Schrott bei Abwesenheit einzelner Fraktionen	153
7.3	Offene Fragen, Datenlücken	87	9.12	Konzentrationen im EEKG-Schrott	157
8	Literaturverzeichnis	89	9.13	Gegenüberstellung der Resultate der Untersuchung 2003 und 2011	158
9	Anhang	91	Verzeichnisse	159	
9.1	Probenahmeschema	91			
9.2	Analytik	92			
9.2.1	Methodenbeschrieb Bachema	92			
9.2.2	Übersicht der Aufbereitungsmethoden der Bachema	97			
9.2.3	Methodenbeschrieb EMPA	100			
9.3	Qualitätskontrolle der Analytik	108			
9.3.1	Untersuchung auf Organika	108			
9.3.2	Untersuchung auf Anorganika	115			
9.4	Auswertung – statisch-mathematisches Modell	117			
9.4.1	Bestimmung der Stoffkonzentrationen	117			
9.4.2	Bestimmung der Stoffflüsse	120			
9.4.3	Berechnung der Konzentrationen im Input und deren Unsicherheit	121			
9.4.4	Bestimmung der Transferkoeffizienten	122			
9.4.5	Bestimmung der Unsicherheiten der mittleren Transferkoeffizienten mittels des Gauss'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes	123			
9.4.6	Ausgleichsrechnung für die Stoffbilanzen	123			

> Abstracts

This report documents the content of selected metals, plus other elements, halogenated flame retardants and polychlorinated biphenyls (PCBs) in electrical and electronic waste (“e-waste”) in Switzerland in 2011. Representative samples of outputs were collected at a large-scale recycling facility, and the concentrations and levels of the various substances were calculated in a substance flow analysis. The highest concentrations of metal content were recorded for iron, aluminium and copper. Concentrations of cadmium, brominated flame retardants decaBDE, octaBDE and pentaBDE, and PCBs have fallen since the initial study carried out in 2003, while the content of mercury has risen as a consequence of the increased use of LCD monitors.

Dieser Bericht dokumentiert die Gehalte an ausgewählten Metallen, weiteren Elementen, halogenierten Flammschutzmitteln und polychlorierten Biphenylen (PCB) im Schweizer Elektronikschrott im Jahr 2011. In einer grossen Recyclinganlage wurden repräsentative Proben der Outputgüter entnommen und im Rahmen einer Stoffflussanalyse die Konzentrationen und Frachten der einzelnen Stoffe bestimmt. Die höchsten Gehalte wurden für die Metalle Eisen, Aluminium und Kupfer ermittelt. Die Konzentrationen von Cadmium, der bromierten Flammschutzmittel DecaBDE, OctaBDE und PentaBDE sowie von PCB sind seit der Untersuchung von 2003 gesunken, während die Quecksilber-Konzentration infolge des Aufkommens von LCD-Bildschirmen angestiegen ist.

Le présent document fait état des teneurs en certains métaux et autres éléments, en agents ignifuges halogénés et en polychlorobiphényles (PCB) des déchets électroniques produits en Suisse en 2011. Dans une grande installation de recyclage, des échantillons représentatifs ont été prélevés sur les produits de sortie afin de déterminer les concentrations ainsi que les quantités des diverses substances à l’aide d’une analyse des flux de substances. Le fer, l’aluminium et le cuivre présentent les teneurs les plus élevées. Les concentrations du cadmium, des agents ignifuges bromés que sont le décaBDE, l’octaBDE et le pentaBDE, ainsi que des PCB ont baissé depuis 2003 alors que celle du mercure a augmenté du fait de l’apparition des écrans LCD.

Il presente rapporto informa sul tenore di metalli selezionati, altri elementi, sostanze ignifughe alogenate e bifenili policlorurati (PCB) nei rottami elettronici svizzeri nel 2011. Nell’ambito di un’analisi dei flussi di sostanze sono state determinate le concentrazioni e i carichi delle singole sostanze in campioni rappresentativi del materiale in uscita (output) di un grande impianto di riciclaggio. I tenori più elevati sono stati riscontrati per il ferro, l’alluminio e il rame. La concentrazione di cadmio, delle sostanze ignifughe bromate DecaBDE, OctaBDE e PentaBDE nonché di PCB è diminuita rispetto all’indagine del 2003, mentre la concentrazione di mercurio è aumentata in seguito alla crescente diffusione degli schermi LCD.

Keywords:

Electrical and electronic waste (“e-waste”), recycling, substance flow analysis, metals, non-metals, flame retardants, polychlorinated biphenyls

Stichwörter:

Elektronikschrott, Recycling, Stoffflussanalyse, Metalle, Nichtmetalle, Flammschutzmittel, polychlorierte Biphenyle

Mots-clés:

déchets électroniques, recyclage, analyse de flux de substances, métaux, non-métaux, agents ignifuges, polychlorobiphényles

Parole chiave:

rottami elettronici, riciclaggio, analisi dei flussi di sostanze, metalli, non metalli, sostanze ignifughe, bifenili policlorurati

> Vorwort

Pro Person und Jahr fallen in der Schweiz rund 27 Kilogramm ausgediente elektrische und elektronische Geräte an. Rund ein Drittel davon sind Kleingeräte wie Fernseher, Computer oder Staubsauger, die beim Handel oder an den Sammelstellen von SENS und SWICO zurückgegeben werden. Die Separatsammlung hat einerseits den Zweck, verwertbare Materialien wie Metalle oder Glas zurückzugewinnen und so die Stoffkreisläufe zu schliessen. Andererseits erlauben die Sortierung und sachgerechte Aufarbeitung ein Ausschleusen und eine anschliessende umweltverträgliche Entsorgung der enthaltenen Schadstoffe wie etwa Blei, Cadmium, Quecksilber, PCB oder Flammschutzmittel.

Beim vorliegenden Bericht handelt es sich um die Neuauflage einer Studie von 2003, durch welche Veränderungen von Stoffen in Altgeräten erfasst wurden. Es wurden wiederum rund 220 Tonnen eines repräsentativen Gemischs an Elektro- und Elektronikkleingeräten in einer modernen Recyclinganlage untersucht und die Konzentration und Massenflüsse von ausgewählten Stoffen im Input der Anlage sowie deren Aufteilung in verschiedene Outputfraktionen ermittelt. Die Ergebnisse liefern wertvolle Hinweise für die Beurteilung der Wirksamkeit der Separatsammlung und der Recyclingverfahren. Die Resultate dieser Studie zeigen, dass die Beschränkungen und Verbote beim Cadmium und bei den persistenten organischen Schadstoffen (POP) wirksam sind und zu einer Verminderung der Gehalte im Elektro- und Elektronikschrott führten. Gegenüber der ersten Studie von 2003 wurden in der vorliegenden Studie ein Dutzend zusätzlicher Flammschutzmittel analysiert, die als potenzielle Ersatzstoffe für verbotene Stoffe in Frage kommen. Zwei davon lagen in ähnlichen Konzentrationen vor wie die «traditionellen» Flammschutzmittel.

Martin Schiess
Chef der Abteilung Luftreinhaltung und Chemikalien
Bundesamt für Umwelt (BAFU)

> Zusammenfassung

Ausgangslage und Ziele

Die Zusammensetzung des Schrotts von elektrischen und elektronischen Kleingeräten (EEKG) in der Schweiz wurde erstmals 2003 bestimmt. Seither hat sich die Gerätezusammensetzung stark verändert und es traten neue Beschränkungen und Verbote für bestimmte Flammschutzmittel in Kraft, namentlich in der Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV, SR 814.81). Mit der vorliegenden Untersuchung aus dem Jahr 2011 wurden die aktuellen Konzentrationen und Stoffflüsse für diverse Stoffe in EEKG in der Schweiz bestimmt und Veränderungen seit 2003 aufgezeigt. Die folgenden chemischen Stoffe wurden untersucht (weitere Angaben zu den organischen Verbindungen in Tab. 8 und Tab. 9):

Tab. 1 > Untersuchte Stoffe

Metalle und Antimon	Nichtmetalle	Organische Verbindungen
Al, Sb, Pb Cd, Cr, Fe, Cu, Ni, Hg, Zn, Sn	Br, Cl, P	Polychlorierte Biphenyle: PCB 28, 52, 101, 118, 123, 126, 138, 153, 156, 157, 167, 180, 189 und Summe PCB Flammschutzmittel: PBDE (BDE 28, 47, 99, 100, 153, 154, 183, 197, 206, 207, 208, 209) und daraus PentaBDE, OctaBDE und DecaBDE; HBCDD, TBBPA, DecaBB, TBP, DBE-DBCH, PBT, PBEB, HBB, Mirex, EH-TBB, BTBPE, BEH-TEBP, DDC-CO, DBDPE, TTBP-TAZ

Vorgehen

Die Untersuchung konnte wie 2003 auf der Anlage der Firma Immark AG in Regensdorf durchgeführt werden. Dafür wurde im März 2011 rund 220 t EEKG-Schrott mit repräsentativer Zusammensetzung der verschiedenen Gerätekategorien in der Anlage verarbeitet. Während zweier Tage wurden nach einem festgelegten Probenahmeplan Stichproben aus sämtlichen Produktmassenströmen (Outputs) der Anlage entnommen und vor Ort zu Mischproben vereinigt. Die Proben wurden vom selben Analyzelabor wie beim ersten Versuch analysiert. Zur Qualitätskontrolle und zur Erreichung tieferer Bestimmungsgrenzen bei verschiedenen Flammschutzmitteln wurden ausgewählte Proben zusätzlich von der EMPA untersucht.

Zur Bestimmung der Stoffflüsse wurden die mittels Analysen von Mischproben der diversen Outputs ermittelten Stoffkonzentrationen mit den Massenflüssen der Outputs multipliziert. Die Konzentrationen der untersuchten Stoffe im EEKG-Schrott (Input) wurden aus den Stoffkonzentrationen in den Outputmassenflüssen berechnet. Damit konnten auch die Transferkoeffizienten vom Input in die einzelnen Outputs bestimmt werden. Zur Ermittlung der jährlichen Stoffflüsse wurden die Resultate aus dem Versuch auf den schweizweit pro Jahr anfallenden EEKG-Schrott von 70 000 t/a hochgerechnet.

Resultate und Schlussfolgerungen

Für die Bestimmung der Zusammensetzung des EEKG-Schrotts ist es von entscheidender Bedeutung, für den Versuch eine repräsentative Mischung der im Jahresmittel zur Entsorgung anfallenden Gerätekategorien zu haben. Mit Hilfe der Daten der SWICO, der SENS und der EMPA konnte der folgende Gerätemix ermittelt werden:

- > Haushaltsgeräte klein (SENS+SWICO): 25 %
- > Unterhaltungselektronik (SWICO): 36 %
- > Kommunikationstechnik (SWICO): 3 %
- > EDV- und Büroelektronik (SWICO): 36 %


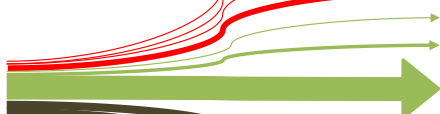


Der im Versuch verwendete Inputmix stimmt sehr gut mit der von SENS und SWICO ermittelten Gerätezusammensetzung überein: Haushalt klein (+3,4 %), Unterhaltungselektronik (-18 %), Kommunikation (± 0 %), EDV- und Büroelektronik (+4,8 %).

Die Massenverteilung des Outputs entspricht grob der folgenden Verteilung: 50 % Metalle, 30 % Kunststoffe, 20 % separate Behandlung. Der grösste Massenstrom entfällt auf den Fe-Schrott, gefolgt von den feinkörnigen Kunststofffraktionen. 16 % des EEKG-Schrotts stammen aus alten Bildröhrenkomponenten. Dieser Anteil wird als Folge der Umstellung des Marktes auf Flachbildschirme sukzessive verschwinden. Die für die Rückgewinnung von Aluminium (Al), Kupfer (Cu) und anderen wertvollen Metallen wichtigen Fraktionen Metallschrott, feinkörniges Metall und Unterkorn machen zusammen knapp 20 % der Masse aus. Abb. 1 zeigt die Aufteilung gemäss den aggregierten Outputfraktionen.

Inputmaterial

Material- und Stoffflüsse

Abb. 1 > Verteilung des EEKG-Schrotts in die aggregierten Outputfraktionen

Massenströme 220 t	Output	[-]	[-]
	Schadstoffträger	0,00	0,05
	Hintergrundbeleuchtung	0,00	
	LCD-Panels	0,01	
	Staub	0,04	
	Cu-Kabel	0,01	0,19
	Leiterplatten	0,02	
	Bildröhrenkomponenten	0,16	
	Bildschirm-/Notebookgehäuse	0,05	0,28
	Feinkörnige KS-Fraktionen	0,23	
	Unterkorn	0,02	
	Feinkörnige Metall-Fraktionen	0,03	0,48
	Metallschrottfraktion	0,14	
	Fe-Schrott	0,29	

Aufgrund des sorgfältig zusammengestellten Input-Mixes und der repräsentativen Probenahme der Outputs wird erwartet, dass die Resultate der Analysen die tatsächlichen Gehalte an den Stoffen im durchschnittlichen Schweizer EEKG-Schrott gut wiedergeben.

Zusammensetzung des EEKG-Schrotts

Die häufigsten drei Metalle im Schweizer EEKG-Schrott sind Eisen (Fe, 35 Gewichtsprozent), Al (rund 6 Gewichtsprozent) und Cu mit rund 5 Gewichtsprozent. Sämtliche übrigen Metalle liegen im Bereich von bis zu einem Gewichtsprozent vor. Die Gehalte an den untersuchten Nichtmetallen Phosphor (P), Chlor (Cl) und Brom (Br) liegen alle im Promillebereich des gesamten Inputs. Der Unsicherheitsbereich bei P ist mit über 90 % hoch und liegt in der grossen Streuung der Messresultate begründet. Die am häufigsten vorgefundenen halogenierten Flammenschutzmittel sind Tetrabrombisphenol A (TBBPA), Decabromdiphenylether (DecaBDE), Decabromdiphenylethan (DBDPE), 1,2-Bis(2,4,6-tribromphenoxy)ethan (BTBPE) und Octabromdiphenylether (OctaBDE). Diese fünf Stoffe sind in Gehalten >100 mg/kg vorhanden. Die Unsicherheiten von rund 30 % spiegeln die heterogene Verteilung in den Fraktionen wider. Der PCB-Gehalt im EEKG-Schrott liegt bei 2 mg/kg (± 1 mg/kg). Hauptquelle für PCB im EEKG-Schrott sind Kondensatoren in Elektrogeräten.

In Tab. 2 sind die ermittelten Konzentrationen der analysierten Stoffe im EEKG-Schrott in der Schweiz im Jahr 2011 zusammengestellt.

Tab. 2 > Konzentrationen der untersuchten Stoffe im EEKG-Schrott in der Schweiz 2011

Stoff	Mittelwert und Unsicherheit [mg/kg]		Stoff	Mittelwert und Unsicherheit [mg/kg]	
PentaBDE	2,4	\pm 0,69	Al	62 000	\pm 9 300
OctaBDE	120	\pm 33	Sb	1 000	\pm 100
DecaBDE (BDE 209)	390	\pm 45	Pb	3 000	\pm 320
HBCDD	14	\pm 4,1	Cd	15	\pm 3,2
TBBPA	630	\pm 85	Cr	4 500	\pm 320
DecaBB	4,5	\pm 2,7	Fe	350 000	\pm 32 000
TBP*	18	\pm 1,4	Cu	49 000	\pm 4 300
DBE-DBCH*	19	\pm 1,0	Ni	3 600	\pm 250
PBT*	3,7	\pm 0,20	Hg	1,5	\pm 0,15
PBEB*	3,7	\pm 0,20	Zn	7 900	\pm 700
HBB	2,9	\pm 1,7	Sn	2 000	\pm 220
Mirex*	3,7	\pm 0,20	Br	4 500	\pm 510
EH-TBB*	3,7	\pm 0,20	Cl	6 900	\pm 1 600
BTBPE	150	\pm 14	P	530	\pm 500
BEH-TEBP*	3,7	\pm 0,20			
DDC-CO	33	\pm 11			
DBDPE	340	\pm 200			
TTBP-TAZ	14	\pm 4,8			
Summe PCB [#]	2,0	\pm 1,0			

* Häufig unter der Bestimmungsgrenze

[#] Die Summe PCB nach Altlastenverordnung (AltIV) berechnet sich aus der Summe der sechs PCB-Kongenerere 28, 52, 101, 138, 153, 180, multipliziert mit dem Faktor 4,3.

Die Transferkoeffizienten geben an, welche Anteile der einzelnen Stoffe bei der Aufbereitung in welche Output-Fractionen transferiert werden.

Transferkoeffizienten

Für die einzelnen Stoffe lassen sich jeweils typische Verteilungsmuster feststellen (vgl. Tab. 3):

Tab. 3 > Verteilungsmuster der einzelnen Stoffe

Gruppe	Stoff	Fraktion
Metalle und Antimon	Al, Zn, Cu	1. Metallschrottfraction, 2. Feinkörnige Metallfraction
	Cr, Ni	1. Metallschrottfraction, 2. Fe-Schrott
	Fe	Fe-Schrott
	Sn	1. Feinkörnige Metallfraction, 2. Leiterplatten
	Sb	1. Bildschirmkomponente, 2. Feinkörnige Kunststofffraction
	Pb	Disperse Verteilung
	Cd	1. Feinkörnige Kunststofffraction, 2. Schadstoffträger
	Hg	1. Hintergrundbeleuchtungen, 2. Schadstoffträger, 3. Staub
Nichtmetalle	P	1. Bildschirm- und Notebookgehäuse, 2. Feinkörnige Kunststofffraction
	Cl	1. Cu-Kabel, 2. Feinkörnige Kunststofffraction, 3. Metallschrottfraction
	Br	1. Feinkörnige Kunststofffraction, Leiterplatten
Flammschutzmittel	Alle ausser PentaBDE	1. Feinkörnige Kunststofffraction, 2. Bildschirm- und Notebookgehäuse
	PentaBDE	1. Staub, 2. Feinkörnige Kunststofffraction
PCB	Alle ausser PCB 28	1. Staub, 2. Schadstoffträger, 3. Feinkörnige Kunststofffraction
	PCB 28	1. Staub, 2. Feinkörnige Kunststofffraction

Mengenmässig sind Fe (24 000 t/a), Al (4300 t/a) und Cu (3300 t/a) die drei wichtigsten untersuchten Elemente im EEKG-Schrott. Von den Schwermetallen Cadmium (Cd) und Quecksilber (Hg) fallen ca. 1 t/a, resp. 100 kg/a an. Bei den halogenierten Flammschutzmitteln entfällt der grösste Massenstrom auf TBBPA mit gut 40 t/a, gefolgt von DecaBDE und DBDPE mit je rund 25 t/a. Die PCB-Fracht beträgt ca. 140 kg/a. Wegen der sehr heterogenen Verteilung der PCB in den Gerätebauteilen und den tiefen Messwerten ist dieser Wert jedoch mit einer relativ grossen Unsicherheit von $\pm 33\%$ behaftet (vgl. Tab. 4).

Frachten aus dem EEKG-Schrott

Tab. 4 > Jahresfrachten einzelner Stoffe für die Schweiz und deren Unsicherheiten

Stoff	Mittelwert und Unsicherheit [t/a]		Stoff	Mittelwert und Unsicherheit [t/a]	
PentaBDE	0,16	± 0,057	Al	4 300	± 1 100
OctaBDE	8,4	± 2,8	Sb	69	± 16
DecaBDE (BDE 209)	27	± 6,2	Pb	210	± 47
HBCDD	1,0	± 0,34	Cd	1,0	± 0,30
TBBPA	43	± 10	Cr	310	± 66
DecaBB	0,31	± 0,20	Fe	24 000	± 5 200
TBP*	1,2	± 0,27	Cu	3 400	± 730
DBE-DBCH*	1,3	± 0,27	Ni	250	± 52
PBT*	0,25	± 0,05	Hg	0,10	± 0,023
PBEB*	0,25	± 0,05	Zn	550	± 120
HBB	0,20	± 0,12	Sn	140	± 31
Mirex*	0,25	± 0,05	Br	310	± 71
EH-TBB*	0,25	± 0,05	Cl	480	± 140
BTBPE	10	± 2,3	P	37	± 35
BEH-TEBP*	0,25	± 0,053			
DDC-CO	2,3	± 0,88			
DBDPE	23	± 15			
TTBP-TAZ	1,0	± 0,38			
Summe PCB [#]	0,14	± 0,046			

* Häufig unter der Bestimmungsgrenze

[#] Die Summe PCB nach Altlastenverordnung (AltIV) berechnet sich aus der Summe der sechs PCB-Kongeneren 28, 52, 101, 138, 153, 180, multipliziert mit dem Faktor 4,3.

Gewisse Elemente und Verbindungen werden überproportional in einzelne Output-Fractionen transferiert. Dies kann der Tab. 5 entnommen werden. Bei einigen Flamm- schutzmitteln sowie bei den PCB ist aufgrund der grossen Unsicherheitsbereiche der Anteil der angegebenen Output-Fraktion jedoch nicht signifikant höher als der Anteil der nächstwertigen Fraktion.

Anteile in einzelnen Output-
Fraktionen

Tab. 5 > Anteile in einzelnen Output-Fractionen

Gruppe	Stoff	Fraktion	Anteil	Signifikanz
Metalle	Cd	Feinkörnige Kunststofffraktion	55 %	Ja
		Schadstoffträger	30 %	Ja
	Hg	Hintergrundbeleuchtungen	60 %	Ja
		Schadstoffträger	20 %	Ja
Flamm- schutzmittel	DecaBDE	Sämtliche Gehäuse (CRT+LCD)	40 %	Ja
	OctaBDE	Sämtliche Gehäuse (CRT+LCD)	40 %	Nein
	TBBPA	Sämtliche Gehäuse (CRT+LCD)	30 %	Ja
	HBCDD	CRT-Gehäuse	30 %	Nein
	BTBPE	CRT-Gehäuse	40 %	Ja
	DDC-CO	CRT-Gehäuse	40 %	Nein
	TTBP-TAZ	LCD-Gehäuse + Notebooks	45 %	Nein
PCB	Summe PCB [#]	Staub	38 %	Nein

[#] Die Summe PCB nach Altlastenverordnung (AltIV) berechnet sich aus der Summe der sechs PCB-Kongeneren 28, 52, 101, 138, 153, 180, multipliziert mit dem Faktor 4,3.

Die Veränderungen der im EEKG-Schrott ermittelten Stoffkonzentrationen zwischen den beiden Untersuchungen von 2003 und 2011 lassen darauf schliessen, dass die Beschränkungen und Verbote beim Cadmium und bei persistenten organischen Schadstoffen (POP) wie den polybromierten Diphenylethern sowie bei den PCB wirksam sind. Andererseits lässt sich auch erkennen, dass technische Entwicklungen in der Elektronikindustrie bzw. Veränderungen beim Gerätemix, wie beispielsweise die Einführung von Flüssigkristall-Flachbildschirmen (LCD-Bildschirme) mit Kaltkathoden-Fluoreszenzleuchtröhren (CCFL-Röhren) als Ersatz für Kathodenstrahlröhren-Bildschirme (CRT-Bildschirme), die Gehalte an bestimmten Stoffen im EEKG-Schrott verändern können. Infolgedessen ist die Konzentration von Quecksilber, das als Leuchtmittel in CCFL-Röhren eingesetzt wird, zwischen 2003 und 2011 im EEKG-Schrott angestiegen. Bei einem Teil der untersuchten Stoffe wurden Konzentrationsveränderungen festgestellt, die nicht signifikant sind (vgl. Tab. 6).

Entwicklung seit 2003

Die grössten Veränderungen im EEKG-Schrott traten bei den Schadstoffen auf. Die Konzentrationen der heute verbotenen Stoffe PentaBDE, OctaBDE und PCB nahmen um bis zu über 90 % ab. Die Veränderungen sind alle signifikant. Bei den Metallen gab es ebenfalls bei den Schadstoffen die grössten Veränderungen. Der Cd-Gehalt nahm um über 90 % ab, während der Hg-Gehalt um über 120 % zunahm. Da CCFL-Röhren händisch ausgebaut, aussortiert und separat entsorgt werden, ist diese Konzentrationszunahme beim Quecksilber mit keiner entsprechenden Emission gekoppelt. Weitere signifikante Veränderungen gab es bei Nickel (Ni), Chrom (Cr), Antimon (Sb) und Zinn (Sn), welche alle signifikante Konzentrationsabnahmen verzeichnen. Zink (Zn) und Cu hingegen verzeichnen signifikante Konzentrationszunahmen. Während die Gehalte an Cl und Br signifikant zurückgingen, ist die starke Zunahme bei P infolge der grossen Unsicherheitsbereiche der Messwerte nicht signifikant.

Tab. 6 > Veränderung der Konzentrationen seit 2003

Stoff	Veränderung		Signifikanz	Stoff	Veränderung		Signifikanz
	[mg/kg]	[%]			[mg/kg]	[%]	
PentaBDE	-32	-93 %	Ja	Al	+13 000	+27 %	Nein
OctaBDE	-408	-77 %	Ja	Sb	-700	-41 %	Ja
DecaBDE (BDE 209)	-120	-24 %	Ja	Pb	+100	+3 %	Nein
HBCDD	-3	-18 %	Nein	Cd	-165	-92 %	Ja
TBBPA	-770	-55 %	Ja	Cr	-5 400	-55 %	Ja
Summe PCB [#]	-11	-85 %	Ja	Fe	-10 000	-3 %	Nein
				Cu	+8 000	+20 %	Ja
				Ni	-6 700	-65 %	Ja
				Hg	+1	+121 %	Ja
				Zn	+2 800	+55 %	Ja
				Sn	-400	-17 %	Ja
				Br	-1 000	-18 %	Ja
				Cl	-2 700	-28 %	Ja
				P	+170	+47 %	Nein

[#] Die Summe PCB nach Altlastenverordnung (AltV) berechnet sich aus der Summe der sechs PCB-Kongenere 28, 52, 101, 138, 153, 180, multipliziert mit dem Faktor 4,3.

In der Schweiz fallen jährlich rund 24 000 t Fe, 4 300 t Al und 3 300 t Cu aus dem EEKG-Schrott an. Bezogen auf die totale Fe-Schrottmenge von ca. 1,2 Mio. t/a sind das rund 2 %. Der grob geschätzte jährliche Al-Schrott-Anfall beträgt rund 140 000 t. Der Anteil aus dem EEKG-Schrott beträgt demnach rund 3 %. Bei Cu fallen jährlich insgesamt rund 38 000 t an, der Anteil aus dem EEGK-Schrott beträgt hier knapp 10 %.

Ressourcenpotenzial

Durch das Recycling dieser Metalle lässt sich eine erhebliche Menge an Energie einsparen. Die Verwendung von Recyclingmaterial anstelle von Erzen spart bei Al 95 % (Igora 2012), bei Cu 90 % (Kupferinstitut 2012) und im Falle von Stahl 70 % (Stahlpromotion 2012) an Primärenergie ein.

Der deutliche Rückgang der mittleren Gehalte an Schadstoffen im EEKG-Schrott seit 2003 zeigt, dass regulatorische Vorgaben und Beschränkungen sowie technische Entwicklungen in wenigen Jahren eine wesentliche Veränderung der Schadstoffsituation bewirken können. Dies gilt insbesondere für die Schadstoffe PentaBDE, OctaBDE und die PCB.

Schadstoffsituation

Auf der Frachtseite wirkt sich die rund 40 %ige Zunahme der Mengen seit 2003 aus. Stoffe wie HBCDD oder DecaBDE, welche heute zwar eine tiefere Konzentration aufweisen, verzeichnen gegenüber 2003 eine Frachtzunahme oder blieben konstant.

Offene Fragen und Datenlücken

Bei einigen Fraktionen mussten mangels Analysen Schätzungen vorgenommen werden (hoch- und minderwertige Leiterplatten). Bei anderen Fraktionen wie den Batterien oder den Kondensatoren ist die statistische Aussagekraft eingeschränkt, weil die beprobten Mengen klein waren. Eine höhere Probenanzahl hätte aber den finanziellen Rahmen des Projektes gesprengt.

Ein anderes Problem bereiteten die Bestimmungsgrenzen (BG) der Analysemethoden zur Messung der «neuen» Flammschutzmittel und der PCB. Die Gehalte in den Proben lagen oft unter der BG. Für die Berechnungen wurde in diesem Fall mit der halben BG gearbeitet. Dadurch dürften etliche Gehalte (z. B. PCB in Kunststofffraktionen) eher überschätzt werden.

1 > Einleitung

1.1 Ausgangslage

Elektro- und Elektronikgeräte (EE-Geräte) haben je nach Gerätetyp und Anwendung eine auf wenige Jahre beschränkte Verwendungsphase und werden danach der Entsorgung zugeführt. Weil diese Geräte in der Regel relevante Gehalte an Wert- und Schadstoffen aufweisen, werden sie in speziellen Anlagen zerlegt und aufbereitet. Die aus den Aufbereitungsverfahren gewonnenen Stofffraktionen werden entweder als Rohstoffe wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt oder in thermischen Abfallbehandlungsanlagen (KVA) verwertet und die Schadstoffe zerstört. Um die Gehalte an relevanten Schadstoffen in EE-Altgeräten, die in der Schweiz der Verwertung zugeführt werden, sowie die Transferkoeffizienten für einzelne Outputfraktionen und die Stoffflüsse in einer repräsentativen Elektroschrottbehandlungsanlage zu bestimmen, wurde im Jahr 2003 eine repräsentative Studie in der Firma Immark AG in Regensdorf durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Studie wurden in einem Bericht in der BUWAL-Schriftenreihe Umwelt Nr. 374 unter dem Titel «Metallische und nichtmetallische Stoffe im Elektronikschrott» sowie in zwei peer-reviewten wissenschaftlichen Fachzeitschriften publiziert (Morf et al. 2005, Morf et al. 2007).

Kurze Lebensdauer und hohe Gehalte an Wert- und Schadstoffen in EEGK

Sowohl die relativen Anteile von verschiedenen Gerätetypen im EE-Schrott als auch die stoffliche Zusammensetzung von EE-Altgeräten verändern sich im Verlauf von wenigen Jahren. Es ist deshalb notwendig, die stoffliche Zusammensetzung im EE-Schrott periodisch wieder zu bestimmen. Da auch die technischen Verfahren zur Behandlung des EE-Schrotts verändert und verbessert werden, müssen sinnvollerweise auch die Transferkoeffizienten und Stoffflüsse wieder neu bestimmt werden.

Ändernde stoffliche Zusammensetzung

1.2 Problematik

EE-Altgeräte enthalten gesundheits- und umweltgefährdende Stoffe, die durch Recyclingprozesse freigesetzt werden und infolgedessen in die Umwelt gelangen können oder mit rezyklierten Sekundärrohstoffen wieder in Produkte und so allenfalls im Lebenszyklus dieser Produkte später in die Umwelt gelangen können. Unter diesen Stoffen befinden sich auch persistente organische Schadstoffe (POP) wie polychlorierte Biphenyle (PCB) und polybromierte Diphenylether, die unter dem Stockholmer Übereinkommen (POP-Konvention) geregelt sind. Die Schweiz ist als Vertragspartei des Stockholmer Übereinkommens verpflichtet, dem Sekretariat der POP-Konvention zuhanden der Vertragsparteienkonferenz über bestehende Vorkommen dieser Stoffe zu berichten. Dabei sind insbesondere auch Daten über die Belastung von EE-Schrott und Recyclingprodukten aus der EE-Schrott-Verwertung zu liefern. Mit der vorliegenden Studie wurden diese Daten erhoben. Zudem wollte man auch die Gehalte von weiteren Schadstoffen (Schwermetallen) in EE-Geräten erfassen, die in der RoHS-Richtlinie (*Restriction of (the use of certain) Hazardous Substances*) der Europäischen Union

Gefahr des Transfers von Schadstoffen in Recyclingprodukte

bzw. im Anhang 2.18 der Schweizer Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) geregelt sind. Tab. 7 gibt eine Übersicht über die betroffenen Stoffe (Abkürzungen siehe Tab. 8 und Tab. 9).

Tab. 7 > Übersicht über Verbote und Beschränkungen von Stoffen in EE-Geräten

Die Konzentrationshöchstwerte beziehen sich auf homogenes Material.

Stoff	Stockholmer Übereinkommen	ChemRRV	Konzentrationshöchstwerte gemäss RoHS-Richtlinie bzw. ChemRRV in Massenprozent
PCB	Anlagen A und C	Anhänge 1.1 und 2.14	–
Mirex	Anlage A	Anhang 1.1	–
HBCDD	Anlage A	Anhang 1.1	–
PBB	Anlage A ¹	Anhänge 1.1, 1.2 und 2.18	0,1
PBDE	Anlage A ²	Anhänge 1.1, 1.2 und 2.18	0,1
Pb	–	Anhang 2.18	0,1
Hg	–	Anhang 2.18	0,1
Cd	–	Anhang 2.18	0,01
Cr(VI) ³	–	Anhang 2.18	0,1

¹ Betrifft nur Hexabrombiphenyl.

² Tetra- bis Heptabromdiphenylether sowie Decabromdiphenylether.

Tetrabromdiphenylether und Pentabromdiphenylether sind Hauptkomponenten von technischen Gemischen, die als «kommerzielles Pentabromdiphenylether (c-PentaBDE)» bezeichnet werden.

Hexabromdiphenylether und Heptabromdiphenylether sind Hauptkomponenten von technischen Gemischen, die als «kommerzielles Octabromdiphenylether (c-OctaBDE)» bezeichnet werden.

Decabromdiphenylether wurde an der 8. Vertragsstaatenkonferenz des Stockholmer Übereinkommens im Mai 2017 in die Anlage A aufgenommen.

³ Sechswertiges Chrom.

2 > Zielsetzung und Fragestellungen

Die vorliegende Studie knüpft an die im Jahr 2003 durchgeführte Untersuchung an und liefert – bei Verwendung des gleichen methodischen Ansatzes – aktuelle Daten über die Gehalte an ausgewählten gesetzlich geregelten Substanzen und Metallen sowie weiteren ausgewählten Stoffen in EE-Altgeräten bzw. EE-Schrott sowie Transferkoeffizienten und Stoffflüsse. Die Resultate werden für die Erfolgskontrolle bezüglich der Effektivität der Massnahmen zur Umsetzung der POP-Konvention und der ChemRRV herangezogen. Folgende Stoffe – chemische Elemente und organische Verbindungen – werden untersucht:

Gleicher methodischer Ansatz wie in der vorangegangenen Untersuchung

a) Metalle:

- Aluminium (Al), Blei (Pb), Cadmium (Cd), Chrom (Cr), Eisen (Fe), Kupfer (Cu), Nickel (Ni), Quecksilber (Hg), Zink (Zn), Zinn (Sn)

b) Halbmetall:

- Antimon (Sb)

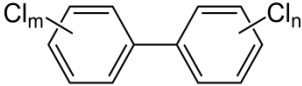
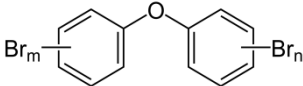
c) Nichtmetalle:

- Brom (Br), Chlor (Cl), Phosphor (P)

d) Organische Verbindungen:

- Siehe Tabellen Tab. 8 und Tab. 9.

Tab. 8 > Untersuchte Stoffgruppen

Polychlorierte Biphenyle (PCB 28, 52, 101, 118, 123, 126, 138, 153, 156, 157, 167, 180, 189 sowie Summe PCB nach Altlastenverordnung [AltIV] ⁴)	Polybromierte Diphenylether (BDE 28, 47, 99, 100, 153, 154, 183, 197, 206, 207, 208, 209 sowie technische Gemische ⁵ PentaBDE, OctaBDE und DecaBDE ⁶)
	

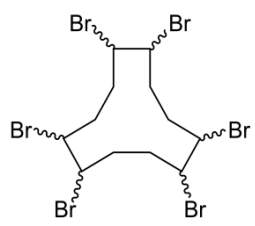
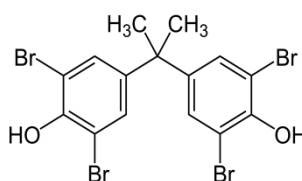
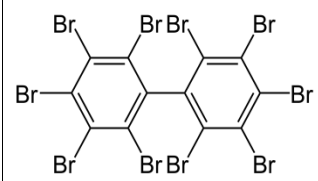
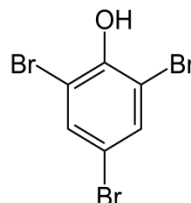
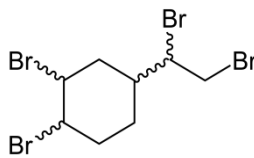
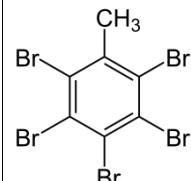
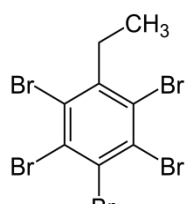
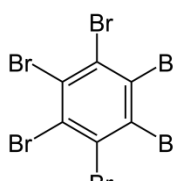
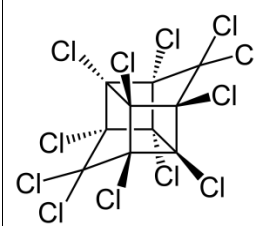
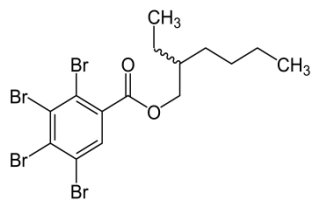
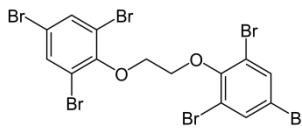
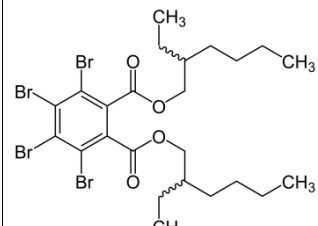
⁴ Die Summe PCB nach Altlastenverordnung (AltIV) berechnet sich aus der Summe der sechs PCB-Kongenere 28, 52, 101, 138, 153, 180, multipliziert mit dem Faktor 4,3.

⁵ Die technischen Gemische «PentaBDE», «OctaBDE» und (in geringem Ausmass) «DecaBDE» setzen sich aus etlichen vier- bis zehnfach bromierten Diphenylether-Kongeneren zusammen (La Guardia et al. 2006).

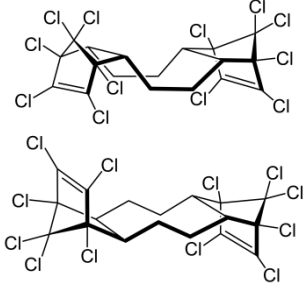
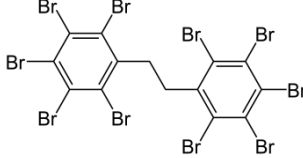
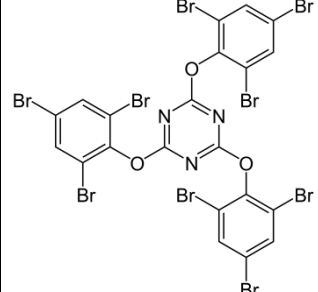
⁶ Als alternative Abkürzungen erscheinen in der Literatur auch «DBDE», «OBDE» und «PBDE» bzw. «DBDO», «OBDO» und «PBDO» («O» von «Oxid» statt «E» von «Ether»), welche jedoch aus Gründen der Verständlichkeit hier nicht verwendet wurden. «DecaBDE» wird zudem auch als «Bis(pentabromphenyl)ether» bezeichnet.

Tab. 9 > Untersuchte Einzelsubstanzen⁷ (Flammschutzmittel)

Die Abkürzungen richten sich nach der Nomenklatur von Bergman et al. (2012).

Name	Hexabromcyclododecan	Tetrabrombisphenol A	Decabrombiphenyl
Abk.	HBCDD	TBBPA	DecaBB
CAS-Nr.	3194-55-6	79-94-7	13654-09-6
Struktur			
Name	2,4,6-Tribromphenol	1,2-Dibrom-4-(1,2-dibromethyl)cyclohexan	2,3,4,5,6-Pentabromtoluol
Abk.	TBP	DBE-DBCH	PBT
CAS-Nr.	118-79-6	3322-93-8	87-83-2
Struktur			
Name	2,3,4,5,6-Pentabrommethylbenzol	Hexabrombenzol	1,2,3,4,5,5,6,7,8,9,10,10-Dodecachlorpenta-cyclo[5.3.0.0.2.6.0.3.9.0.4.8]decan
Abk.	PBEB	HBB	Mirex
CAS-Nr.	85-22-3	87-82-1	2385-85-5
Struktur			
Name	2-Ethylhexyl-2,3,4,5-tetrabrombenzoat	1,2-Bis(2,4,6-tribromphenoxy)ethan	Bis(2-ethylhexyl)tetrabrom-phthalat
Abk.	EH-TBB	BTBPE	BEH-TEBP
CAS-Nr.	183658-27-7	37853-59-1	26040-51-7
Struktur			

⁷ Bei Bindungen kennzeichnen gewellte Linien eine undefinierte Stereochemie; dickere Linien und Keile dienen der Veranschaulichung der Geometrie.

Name	1,2,3,4,7,8,9,10,13,13,14,14-Dodecachlor-1,4,4a,5,6,6a,7,10,10a,11,12,12a-dodecahydro-1,4:7,10-dimethanodibenzo[a,e]cycloocten	Decabromdiphenylethan	2,4,6-Tris(2,4,6-tribromphenoxy)-1,3,5-triazin
Abk.	DDC-CO ⁸	DBDPE	TTBP-TAZ
CAS-Nr.	13560-89-9	84 852-53-9	25 713-60-4
Struktur			

Die Abkürzungen richten sich nach der Nomenklatur von Bergman et al. (2012)

Gegenüber der Studie von 2003 wurde alle Substanzen in Tab. 9 mit Ausnahme von HBCDD und TBBPA zusätzlich untersucht. Alle untersuchten FS werden additiv eingesetzt. TBBPA und TBP werden je nach Anwendung als reaktive FS verwendet, d. h. sie reagieren mit der Polymermatrix und sind dementsprechend nicht mehr bzw. noch noch in Spuren in ihrer ursprünglichen Form im Kunststoff vorhanden (Bergman et al. 2012).

Die Untersuchung ist auf relevante Produkte (Outputgüter) aus der Behandlung von Elektro- und Elektronik-Kleingeräten (EEKG) beschränkt, weil diese Geräte für die Erfassung der Schadstoffverteilung auf die erzeugten Produkte der EE-Schrott-Behandlung als relevant betrachtet werden. Elektrogrossgeräte sind nicht in die Bilanzierung der Stoffflüsse einbezogen worden, weil sie für die Verteilung der Schadstoffe auf die relevanten Outputgüter weniger relevant sind und weil bei deren Einbezug in die Stoffbilanzierung methodische Probleme zu lösen gewesen wären, die den Rahmen dieses Projektes gesprengt hätten. Die Untersuchungen konnte wieder in der Entsorgungsanlage der Immark AG in Regensdorf durchgeführt werden. Die Anlage entspricht dem aktuellen Stand der Technik in der Behandlung von EE-Schrott in der Schweiz und zählt in dieser Abfallkategorie landesweit zu den grössten Entsorgungsanlagen. Ein Teil der Probenmenge (Gehäuse Bildschirme und Notebooks) stammte aus der Sortieranlage in Sirnach, wurde aber in der Anlage in Regensdorf dem Versuch beigegeben.

Beschränkung auf EEKG

Die Resultate aus der aktuellen Untersuchung werden mit den Resultaten der ersten Untersuchung von 2003 verglichen.

⁸ Als alternative Bezeichnung wird in der Literatur oft «Dechloran Plus» verwendet. Zur besseren Übersicht sind bei DCC-CO die beiden im technischen Produkt auftretenden Isomere – *syn* und *anti* – explizit angegeben.

Folgende Fragestellungen werden im Bericht behandelt:

1. Aus welchen Gerätetypen und Materialien setzt sich der gewählte Abfallinput (Elektro- und Elektronik-Kleingeräte) zusammen bzw. wie gross sind die umgesetzten Material- und Stoffflüsse im untersuchten Entsorgungsbetrieb während des Referenzversuchs?
2. Welches sind die Produkte und wie gross sind die einzelnen Materialflüsse der Produkte, welche den untersuchten Entsorgungsbetrieb verlassen (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. Wie hat sich die Zusammensetzung des Elektronikschrotts in den letzten acht Jahren verändert?

3 > Grundlagen

3.1 Mengengerüst

Für die Bestimmung des zur Entsorgung anfallenden Gerätemixes der Elektro- und Elektronikgeräte in der Schweiz wurden die Werte des Jahres 2009 verwendet. Die Daten stammen aus dem Fachbericht der SENS (SENS 2010) und dem Tätigkeitsbericht der SWICO (SWICO 2010). Die bei der SWICO aufgeführten «übrigen Geräte» konnten mit Hilfe der EMPA St. Gallen (Böni 2012) aufgeteilt werden. Als beste Schätzung wurde von der folgenden Verteilung ausgegangen:

Gerätemix gemäss 2009

- > Haushaltsgeräte klein (SENS+SWICO): 25 %
- > Unterhaltungselektronik (SWICO): 36 %
- > Kommunikationstechnik (SWICO): 3 %
- > EDV- und Büroelektronik (SWICO): 36 %

Daraus resultierten die in Tab. 28 aufgeführten Mengen.

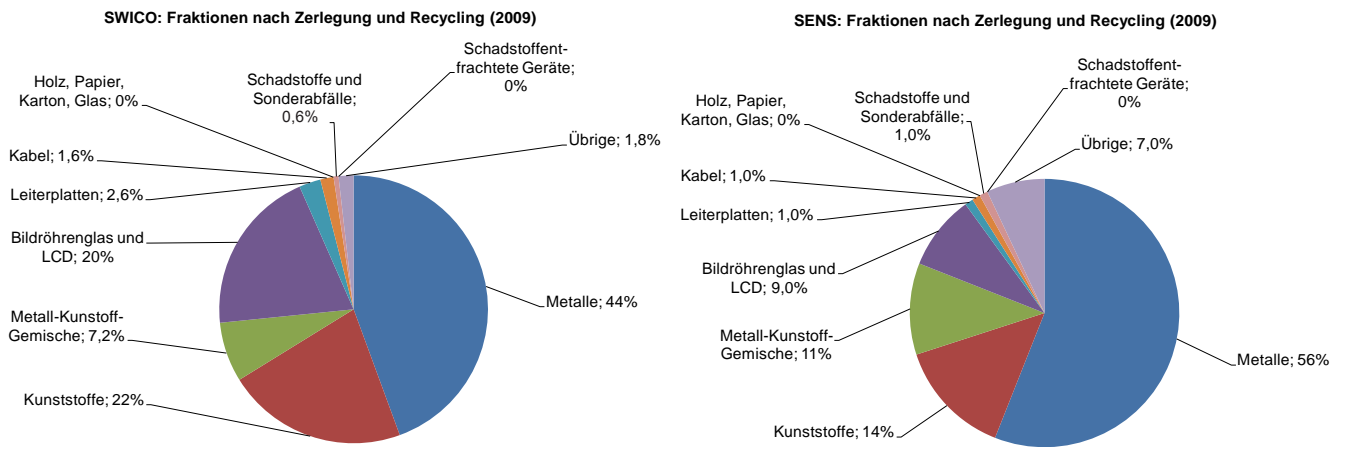
Tab. 10 > Gerätemix der EE-Kleingeräte in der Schweiz 2009

Haushaltsgeräte klein (SENS)	14 600 t	21 %	Haushaltsgeräte klein (SENS)
Haushaltsgeräte klein (SWICO)	2 731 t	4 %	Übrige Geräte (SWICO)
CRT Fernsehgeräte	9 904 t	14 %	Unterhaltungselektronik (SWICO)
LCD-TV (SWICO)	6 827 t	10 %	Übrige Geräte (SWICO)
UE gemischt, ohne TV-Geräte	4 816 t	7 %	Unterhaltungselektronik (SWICO)
Foto-, Filmapparte	3 337 t	5 %	Übrige Geräte (SWICO)
Kommunikationstechnik	1 624 t	2 %	Kommunikationstechnik (SWICO)
Telefonanlagen	455 t	1 %	Übrige Geräte (SWICO)
CRT-Monitore	5 310 t	8 %	EDV- und Büroelektronik (SWICO)
LCD-Monitore	1 987 t	3 %	EDV- und Büroelektronik (SWICO)
PC/Server	6 748 t	10 %	EDV- und Büroelektronik (SWICO)
Laptops	772 t	1 %	EDV- und Büroelektronik (SWICO)
Drucker	4 946 t	7 %	EDV- und Büroelektronik (SWICO)
Grosskopierer	2 970 t	4 %	EDV- und Büroelektronik (SWICO)
Kassen und Lesegeräte	1 214 t	2 %	Übrige Geräte (SWICO)
IT-Zubehör	607 t	1 %	Übrige Geräte (SWICO)
Summe EE-Kleingeräte	68 847 t	100 %	SENS + SWICO

*: Die Kategorie «Übrige Geräte» aus der SWICO-Statistik wurde auf die vier Hauptkategorien (siehe oben) aufgeteilt.

Die Fraktionen aus den SWICO- und SENS-Sammlungen nach Zerlegung und Recycling weisen die Verteilung gemäss Abb. 2 auf.

Abb. 2 > Fraktionsverteilung der SWICO- und SENS-Sammlung im Jahr 2009

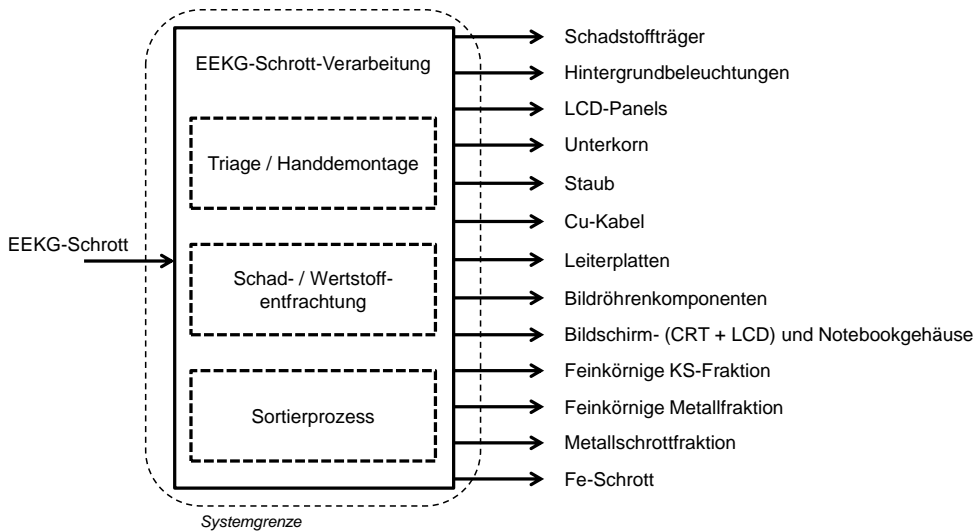


3.2 Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung gestaltete sich infolge der zahlreichen Bearbeitungsschritte und der zwei Betriebsstandorte (Regensdorf und Sirnach) komplex. In Abb. 3 ist die aggregierte Versuchsanordnung schematisch dargestellt. Die Systemgrenze umfasst sämtliche In- und Outputströme der beiden Verarbeitungsbetriebe. Der Beschrieb der einzelnen Fraktionen kann der Tab. 11 im Kapitel 4.3.3 entnommen werden.

Aggregierte Outputströme

Abb. 3 > Aggregiertes System



Sämtliche In- und Outputflüsse wurden gewogen. Die gereinigte Abluft und der anfallende Hallenstaub wurde nicht beprobt und gemessen.

4 > Methodisches Vorgehen

4.1 Projektablauf

Für die Stoffflussuntersuchungen im Rahmen dieses Projektes konnte wieder der EE-Schrott-Entsorgungsbetrieb der Firma Immark AG in Regensdorf gewonnen werden. Gemeinsam mit den Verantwortlichen des Entsorgungsbetriebes wurden in einem **ersten Schritt** schon vorhandene Daten gesichtet und ausgewertet. Dabei wurden auch Daten aus der ersten Untersuchung 2003 verwertet. Damit konnten die ersten beiden Fragestellungen nach den entgegengenommenen Materialmengen und den Outputfraktionen beantwortet werden.

Dreistufiges Vorgehen

In einem **zweiten Schritt** wurde die dritte bis fünfte Fragestellung beantwortet. Dazu wurde zusammen mit dem Anlagenbetreiber eine Messkampagne analog der ersten Untersuchung geplant und durchgeführt. Während der Messkampagne vom 20. bis 22.3.2011 wurden alle Input- und Outputmassenflüsse bestimmt. Im Inputstrom (EEKG) wurden die Anteile der Gerätetypen (PC-Monitore, etc.) entsprechend der mittleren jährlichen Verteilung zusammengestellt und mengenmässig erfasst. In den relevanten Outputflüssen wurden nach einem definierten Probenahmeplan Proben gezogen und auf die ausgewählten Elemente und Verbindungen hin analysiert. Ausgehend von den analytisch bestimmten Stoffkonzentrationen in den Outputgütern und den ermittelten Güterflüssen konnten anschliessend die Stoffflüsse inkl. deren Unsicherheiten berechnet werden. Die Input-Stoffflüsse in den Entsorgungsbetrieb wurden aus der Summe aller Outputflüsse berechnet. Davon ausgehend konnte die Verteilung vom Input in die verschiedenen Outputgüter (Transferkoeffizienten und deren Unsicherheit) bestimmt werden. Die Resultate werden im ersten Teil des Schlussberichtes zusammengefasst und dienen als Basis für die Beantwortung der letzten Fragestellung.

Im **dritten Schritt** des Projektes wurden alte und neue Resultate einander gegenüber gestellt, und so Trends in der Zusammensetzung des Elektronikschrotts aufgezeigt.

4.2 Angewandte Methodik

Die angewandte Methodik ist identisch mit der Methodik der Untersuchung von 2003 (BUWAL 2004). Für den genauen Methodenbeschrieb sei auf diese Studie verwiesen.

4.3 Versuchsplanung und Durchführung

Bei der Versuchsplanung wurde insbesondere darauf geachtet, dass einerseits möglichst repräsentativer EE-Schrott verwendet wird und andererseits eine möglichst gute Vergleichbarkeit mit der Studie von 2003 gewährleistet ist. Der Gerätemix für den Versuch wurde in enger Zusammenarbeit mit der EMPA St. Gallen bestimmt. Basis für die Bestimmung der Zusammensetzung waren die Tätigkeits- und Fachberichte der SWICO und der SENS. Zusammen mit der EMPA konnte insbesondere die Fraktion «Übrige Geräte» aus den SWICO-Tätigkeitsberichten den vier Hauptgruppen «Haus-haltgeräte klein», «Unterhaltungselektronik», «Kommunikationstechnik» und «EDV- und Büroelektronik» zugeordnet werden (vgl. Kapitel 3.1). Insgesamt wurde wieder eine Versuchsmenge von rund 230 t angestrebt und auch knapp erreicht. Gegenüber der Untersuchung von 2003 kamen neu die Fraktionen LCD-TV, LCD-PC und Notebooks hinzu, welche in einem separaten Zerlegetrieb (ESRA Sirnach) aufgearbeitet wurden. Diese Massenströme mussten in die Berechnungen mit einbezogen werden und sind in den rund 220 t inbegriffen. Der Massenstrom des Versuches stellt 0,3 % der schweizweit rund 70 000 t/a anfallendem EEKG-Schrott dar (vgl. Kapitel 3.1).

Guter Gerätemix ist wichtig
Versuchsmenge von 220 t

4.3.1 Systemdefinition

Zeitliche Systemgrenze

Die gesamte EE-Schrottmenge für den Versuch auf der Anlage in Regensdorf musste vorgängig durch den Betrieb entsprechend der berechneten Zusammensetzung gesammelt und auch gelagert werden. Dies erwies sich als eine grosse logistische Herausforderung neben dem laufenden Betrieb und erforderte den vollen Einsatz aller Beteiligten auf der Anlage.

Vorgängige Sammlung
der Versuchsmenge

Der Versuch auf der Anlage in Regensdorf wurde vom Montag, 21. März, bis am Dienstag, 22. März 2011, durchgeführt. Um Verfälschungen durch nicht zum Versuch gehörendes Material zu verhindern, wurde die Anlage am Samstag vor dem Versuch gereinigt. Der Betrieb arbeitet im 2-Schichtbetrieb von 05.00 Uhr bis 23.00 Uhr. Der Versuch begann am Montag, 21.3.2011 um 05.00 Uhr, wobei bei der ersten Output-Stelle erst nach ca. 1,5 h Probenmaterial anfiel. Die letzten Proben wurden am Dienstag, 22.3.2011, um 16.00 Uhr entnommen. Der gesamte Versuch dauerte also 29 h. Sämtliches zum Versuch gehörendes Output-Material wurde separat gewogen.

Versuchsdurchführung im
März 2011

Das Material aus dem separaten Zerlegetrieb in Sirnach wurde z. T. während des Versuchs in Regensdorf, aber teilweise auch später beprobt, je nach Anlieferzeitpunkt des Probenmaterials. Dabei handelte es sich um die Fraktionen aus der LCD-Bildschirm- und Notebook-Aufbereitung.

Separate Beprobung der LCD-
Bildschirme und Notebook

Örtliche Systemgrenze

Der Versuch umfasste zwei Standorte (Regensdorf und Sirnach). Ein Teil des in Sirnach aufbereiteten Materials gelangte als Inputmaterial nach Regensdorf, wo es im eigentlichen Versuch weiterverarbeitet wurde (vgl. aggregiertes System in Kapitel 3). Nicht alle Outputgüter stellen das Endprodukt der Sortierung dar (z. B. die Metalle). Für die

Zwei Aufbereitungsstandorte

Bilanzierung ist eine weitergehende Auftrennung aber nicht notwendig und ausserdem können so Betriebsgeheimnisse gewahrt bleiben.

4.3.2 Wahl der Prozesse

Die Aufbereitung der LCD-Bildschirme und Notebooks in Sirmach wird aus Gründen des Firmengeheimnisses als Blackbox dargestellt. Bei der Aufbereitung in Regensdorf werden die wichtigsten Prozesse einzeln bearbeitet.

4.3.3 Wahl der Güter, aggregiertes System

Die Wahl der Güter richtet sich grundsätzlich nach den erzeugten Outputgütern der Aufbereitung auf den beiden Anlagen. Die einzelnen Güter werden aus Gründen des Firmengeheimnisses nicht separat dargestellt.

Zur besseren Vergleichbarkeit mit der Untersuchung von 2003 und der einfacheren Darstellbarkeit werden verwandte Outputs aber in der Folge aggregiert dargestellt (vgl. Tab. 11 und Abb. 3 in Kapitel 3).

Aggregierte Darstellung
der Outputs

Tab. 11 > Definition und Beschreibung der einzelnen aggregierten Güter

Input/Output	Gut	Beschreibung
Input	EEKG-Schrott	Repräsentative Mischung des Schweizer Elektro- und Elektronik-Kleingeräte-Schrotts (inkl. LCD-TV, LCD-PC, Notebooks)
Output	Schadstoffträger	Aus Handdemonstration, Sortiertisch und Sortieranlage stammende Schadstoffträger (Batterien, Akkus, Kondensatoren, Ba-Getterpillen)
	LCD-Hintergrund-beleuchtungen	LCD- und Notebook-Hintergrundbeleuchtungen
	LCD-Panels	Bildschirmteil mit Flüssigkristallanzeige
	Unterkorn	Kunststofffraktion mit Metallanteil
	Cu-Kabel	Händisch aussortierte Cu-Kabel aus den beiden Zerlegebetrieben
	Staub	Abgeschiedener Staub aus der Vorzerkleinerung und der Prallmühle
	Leiterplatten	Händisch aussortierte ganze hoch- und minderwertige Leiterplatten sowie Bruch-Leiterplatten
	CRT-Bildröhren-komponenten	Komponenten von CRT-Bildröhren TV + PC (Schattenmasken, Strahlerkanonen, Ablenkspulen, Bildröhren)
	Bildschirm- und Notebookgehäuse	Händisch abgetrennte Kunststoffgehäuse von CRT- und LCD-TV- und -PC-Monitoren sowie Notebooks
	Feinkörnige KS-Fraktion	Mechanisch abgetrennte Kunststoffteile aus der Sortieranlage (KS <2 mm, KS 2–5, 5–10 mm, KS 20–25 mm)
	Feinkörnige Metallfraktion	Mechanisch abgetrennte NE-Metallteile aus der Sortieranlage (Metalle <2 mm + KS, Metalle <2 mm, Metalle 2–5 mm, Metalle 5–10 mm)
	Metallschrottfraktion	Summe aller grobkörnigen/-stückigen NE-Metallteile, welche im Sortierprozess anfallen (Schwertteile, CrNi, Trafo/Motoren, Aluminium, CrNi-Stahl und Alu von LCD-TV, -PC und Notebooks)
	Fe-Schrott	Summe aller grob- und feinkörnigen Fe-Metallteile, welche im Sortierprozess anfallen (Fe total separat ausgeschieden und Fe von LCD-TV, -PC und Notebooks)

Die gereinigte Abluft sowie die übrigen brennbaren Abfälle werden im Weiteren nicht ausgewiesen. Für die Berechnung der Zusammensetzung der Konzentration des EEKG-Schrotts werden die brennbaren Abfälle allerdings berücksichtigt, die gereinigte Abluft hingegen nicht. Die in der gereinigten Abluft vorhandenen Stoffflüsse sind so gering (selbst bei Ausschöpfung der in der LRV angegebenen Grenzwerte; die Grenzwerte werden jedoch deutlich unterschritten), dass sie auf die Zusammensetzung des Inputs keinen Einfluss haben. Im Anhang 9.5 werden die Konzentrationen der einzelnen Güter in nicht aggregierter Form angegeben.

Abluft wird nicht berücksichtigt

4.3.4 Wahl der Stoffe

Die Wahl der Stoffe richtete sich einerseits nach der Vergleichbarkeit mit der Untersuchung von 2003 und andererseits nach den potenziell neu bzw. als Ersatzstoffe eingesetzten Flammschutzmitteln. Bei diesen handelt es sich um DecaBB, TBP, DBE-DBCH, PBT, PBEB, HBB, Mirex, EH-TBB, BTBPE, BEH-TEBP, DDC-CO, DBDPE, TTBP-TAZ. Aus Kostengründen wurde auf die Untersuchung weiterer organischer Verbindungen wie z. B. weiterer Flammschutzmittel oder Dioxine/Furane verzichtet.

Eine Übersicht über die untersuchten Elemente sowie organischen Verbindungen findet sich im Kapitel 2 ab Seite 17.

4.3.5 Massenbestimmung der Güterflüsse

Die exakte Bestimmung der Massen ist bei der Stoffflussanalyse sehr wichtig. Deshalb wurde vor dem Versuch sichergestellt, dass sämtliche Güterflüsse (mit Ausnahme der Abluft) an den entsprechenden Abwurf oder Sammelstellen gewogen wurden. Die einzelnen Güter wurden dabei in Metallboxen, Big-Bags oder anderen Behältnissen gesammelt.

Festlegung der Messstellen zur Massenbestimmung

4.3.6 Festlegung der Orte der Probenahme zur Bestimmung der Stoffkonzentrationen

Die Probenahme erfolgte grundsätzlich dort, wo die jeweiligen Outputgüter anfielen (Abwurfstellen, Sortierkübel, etc.). Bei einigen Gütern musste aus Gründen der Zugänglichkeit mit der Probenahme bis zum Ende des Versuchs gewartet werden, und die Probe dann aus einem Sammelbehälter gewonnen werden. Andere Proben, wie z. B. die LCD-Panels kamen erst nach Versuchsende separat gesammelt in den Betrieb. In Tab. 12 werden die Entnahmeorte der betrachteten Güter beschrieben.

Festlegung der Probenahmestellen

Tab. 12 > Ort der Probenahme zur Konzentrationsbestimmung und Aggregation der einzelnen Outputs

Gütergruppe	Gut	Ort der Probenahme/Beschrieb
EEKG-Schrott		Keine Probenahme (wird berechnet)
Schadstoffträger	Batterien	Keine Probenahme (Literaturwerte)
	Notebook-Akkus	Keine Probenahme (Literaturwerte)
	Kondensatoren	Handsortierung während Versuch, Probenahme mittels Schaufel aus Container
	Ba-Getterpillen	Keine Probenahme (Literaturwerte)
Hintergrund-beleuchtungen	CCFL-Röhrchen der LCD-Bildschirme von TV und PC sowie Notebooks	Probenahme von Hand aus separat angelieferten Schachteln
LCD-Panels	Flüssigkristallanzeigen von TV und PC sowie Notebooks	Probenahme von Hand aus separat angelieferten Schachteln
Unterkorn		Periodische Probenahme mit Kübel direkt bei Abwurf
Cu-Kabel		Händische Abtrennung, Probenahme von Hand und Drahtschere aus Containerfach
Staub	Staub aus der Vorzerkleinerung	Probenahme mittels Kübel aus Abwurfcontainer
	Staub aus der Prallmühle	Probenahme kübelweise aus Big-Pack
Leiterplatten	Leiterplattenbruch	Kübelweise aus Container aus Handsortierung auf Sortiertisch
	Hoch- und minderwertige Leiterplatten,	Probenahme von Hand aus Containerfach
CRT-Bildröhren-komponenten	Schattenmasken	Keine Probenahme (Literaturwerte)
	Strahlerkanone	Keine Probenahme (Literaturwerte)
	Ablenkspulen	Keine Probenahme (Literaturwerte)
	Bildröhren	Keine Probenahme (Literaturwerte)
Bildschirm- und Notebook-gehäuse	LCD-TV- und -PC-Monitore sowie Notebooks	Kübelweise aus Containment aus Handsortierung aus dem separaten Zerlegebetrieb
	CRT-TV und -PC-Monitore	Kübelweise aus Containment
Feinkörnige KS-Fraktion	KS <2 mm	Periodische Probenahme mit Kübel direkt bei Abwurf
	KS 2–5, 5–10 mm	Kübelweise aus Container nach Ende des Versuchs
	KS 20–25 mm	Kübelweise aus Container nach Ende des Versuchs
Feinkörnige Metallfraktion	Metalle <2 mm + KS	Periodische Probenahme mit Kübel direkt bei Abwurf
	Metalle <2 mm	Periodische Probenahme mit Kübel direkt bei Abwurf
	Metalle 2–5 mm	Periodische Probenahme mit Kübel direkt bei Abwurf
	Metalle 5–10 mm	Periodische Probenahme mit Kübel direkt bei Abwurf
Metallschrott-fraktion	Schwererteile	Keine Probenahme (Literaturwerte)
	CrNi	Keine Probenahme (Literaturwerte)
	Trafo/Motoren	Keine Probenahme (Angaben Aufbereiter)
	Kupfer	Keine Probenahme (Literaturwerte)
	Aluminium	Keine Probenahme (Literaturwerte)
	Messing	Keine Probenahme (Literaturwerte)
	Verbund und Überlauf	Keine Probenahme (Literaturwerte)
	CrNi-Stahl von LCD-TV, -PC und Notebook	Keine Probenahme (Literaturwerte)
Alu von LCD-TV, -PC und Notebooks	Keine Probenahme (Literaturwerte)	
Fe-Schrott	Fe total separat ausgeschieden	Keine Probenahme (Angaben Aufbereiter)
	Fe von LCD-TV, -PC und Notebooks	Keine Probenahme (Angaben Aufbereiter)

4.3.7 **Probenahmekonzept**

Die Probenahme erfolgte einerseits in periodischen Abständen über die gesamten zwei Versuchstage, andererseits am Schluss des Versuchs, dort wo der Zugang unter laufendem Betrieb nicht möglich war oder die Fraktionen erst später angeliefert wurden (Material aus dem separaten Zerlegebetrieb in Sirnach). Mit Ausnahme der Hintergrundbeleuchtungen der LCD-Monitore und Notebooks wurden überall 120 Stichproben (SP) entnommen und daraus 6 Mischproben (MP) erstellt. Der genaue Probenahmeplan findet sich im Anhang 9.

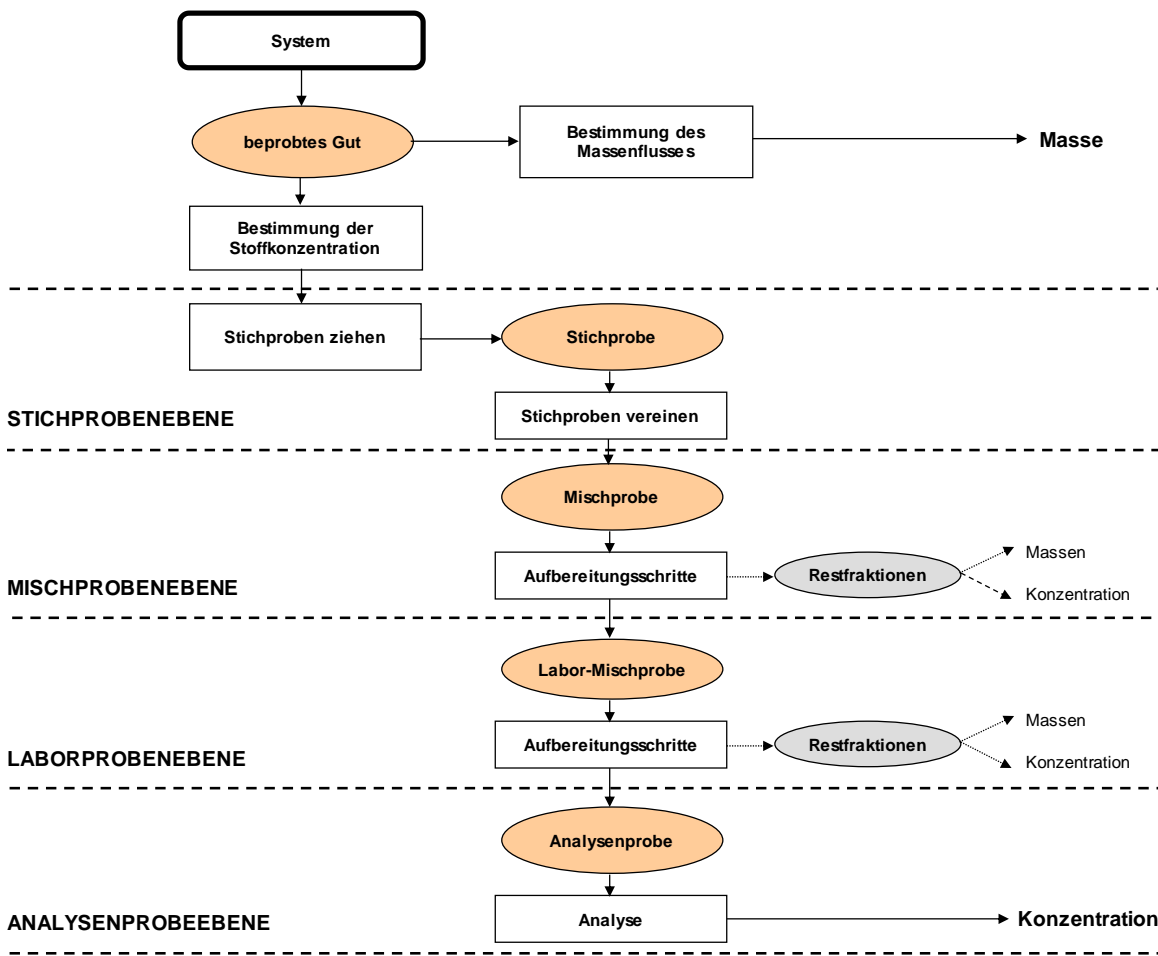
Probenahme erfolgt periodisch und am Schluss

4.3.8 **Probenaufbereitungskonzept**

Abb. 4 zeigt in allgemeiner Form den Ablauf der Probenaufbereitung 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 durchgeführt.

Mischprobenherstellung auf der Anlage

Abb. 4 > Allgemeines Schema für die Probenaufbereitung und Analyse im Projekt



4.4 Laboruntersuchungen

Die Aufbereitung und Analyse der Mischproben erfolgte durch dasselbe Labor wie bei der Untersuchung 2003. So konnte eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Resultate sichergestellt werden. Zur Qualitätskontrolle der Analytik wurde wiederum die EMPA Dübendorf verpflichtet. Details zur Analytik finden sich im Anhang 9.2. Die Resultate der Qualitätskontrolle finden sich im Anhang 9.3.

Analyse durch dasselbe Labor wie 2003

Da einzelne FS bei der ersten Analyse mit einer zu hohen Bestimmungsgrenze (BG) analysiert wurden, erfolgte eine Zweitanalyse aus den entsprechenden aufbereiteten (gemahlene) Proberückstellungen. Die Resultate dieser Untersuchung finden sich im Anhang 9.8.4.

Zweitanalyse für tiefere Bestimmungsgrenze

Für die Analytik der Hintergrundbeleuchtungen in LCD-Monitoren und Notebooks kam eine neu entwickelte Methodik der EMPA Dübendorf zum Einsatz (Figi et al. 2012). Damit konnte nebst dem gebundenen Anteil auch der flüchtige Anteil an Quecksilber in den Cold Cathode Fluorescent Lamps (CCFL-Leuchten) bestimmt werden (vgl. Anhang 9.7).

Neue Methodik für Bestimmung der Hg-Gehalte in CCFL

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. Dazu wurde eine eigens für diesen Versuch programmierte Excel-Routine verwendet. Das Vorgehen bei der Berechnung ist detailliert im Anhang 9.4 erläutert.

5 > Resultate

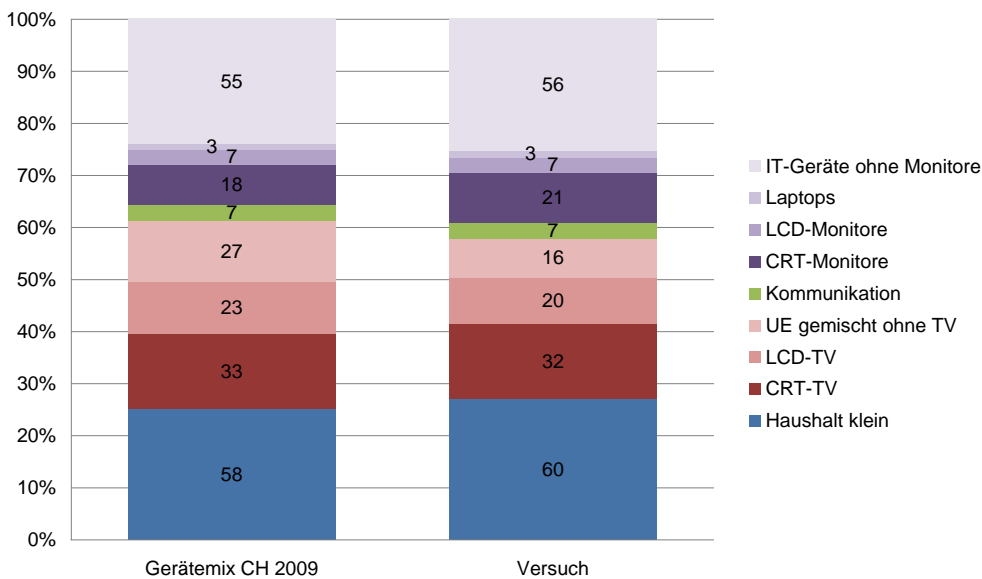
5.1 Materialflüsse

5.1.1 Input-Gerätetmix

Der beim Versuch realisierte Gerätetmix stimmt sehr gut mit dem bestimmten Gerätetmix in der Schweiz im Jahre 2009 überein. In Abb. 5 sind die Soll-Mengen den Ist-Mengen, bezogen auf die angestrebten 230 t für den Versuch, gegenübergestellt. Effektiv wurden beim Versuch in Regensdorf und in Sirnach zusammen 221 t verarbeitet.

Gute Übereinstimmung beim Gerätetmix

Abb. 5 > Gerätetmix EE-Kleingeräte in der Schweiz 2009 und beim Versuch 2011



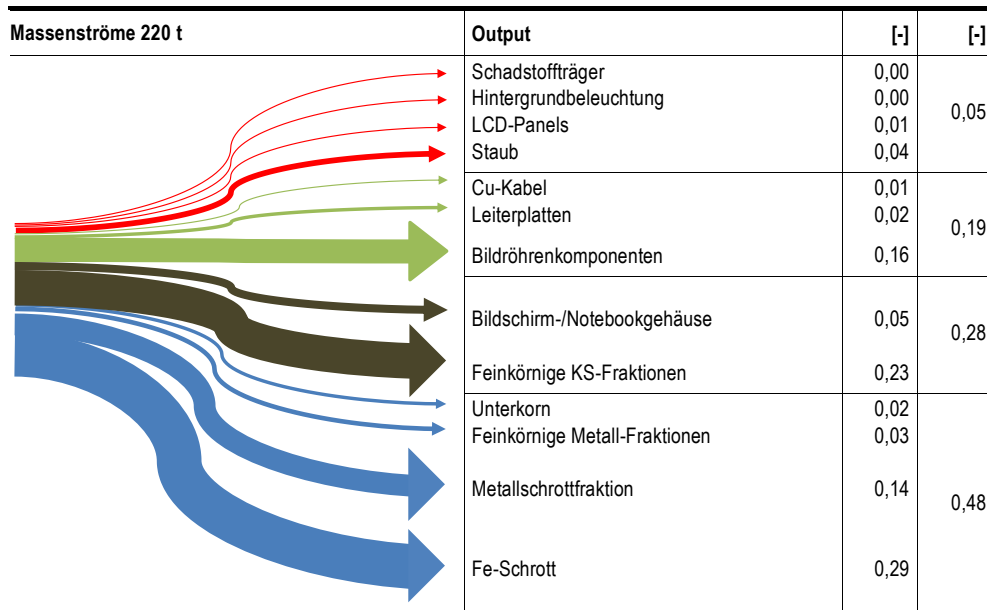
5.1.2 Outputmengen

Die aggregierten Outputflüsse sind in Abb. 6 als prozentuale Verteilung dargestellt. Die grösste Gruppe bilden die metallischen Outputs mit zusammen 48 %, gefolgt von den KS-Reststoffen mit 28 %. Die Fraktion Unterkorn (2 %), die zum metallischen Output gezählt wurde, könnte allerdings auch zu den KS gezählt werden. Die Bildröhrenkomponenten der alten CRT-Bildschirme machen immer noch 16 % der Masse aus. Leiterplatten kommen auf 2 % und die Kabel erreichen 1 %. Die Gruppe rund um die Schadstoffträger kommt auf rund 5 % der Masse, wobei hier der Staub mit 4 % den Hauptteil ausmacht.

Vier Grobfraktionen als Output

Grob kann man also zusammenfassen, dass rund 50 % des Inputs auf einer Metallentsorgungsschiene und rund 30 % auf einer KS-Schiene den Entsorgungsbetrieb wieder verlassen. Gut 20 % bedürfen einer speziellen Behandlung.

Abb. 6 > Massenverteilung des EEKG-Schrott Input in die aggregierten Outputgüter



In Tab. 13 sind die effektiven Massenströme des Versuchs ausgewiesen. Die brennbaren Abfälle, welche über die normale KVA entsorgt werden, machen rund 2 % der Massenströme aus und werden hier nicht weiter berücksichtigt. Dies auch in Anlehnung zum Versuch von 2003.

Tab. 13 > Massenflüsse der Outputprodukte im Versuch (mit angenommenem 5 % Fehlerbereich)

Outputgüter	Masse [t]	Fehler [t]
Brennbare Abfälle	4,7	0,23
Schadstoffträger	1,1	0,05
Hintergrundbeleuchtung	0,19	0,01
LCD-Panels	2,4	0,12
Staub	7,7	0,39
Cu-Kabel	1,4	0,07
Leiterplatten	4,0	0,20
Bildröhrenkomponenten	36	1,8
Bildschirm-/Notebookgehäuse	11	0,53
Feinkörnige KS-Fraktion	51	2,5
Unterkorn	5,3	0,27
Feinkörnige Metallfraktion	6,8	0,34
Metallschrottfraktion	27	1,3
Fe-Schrott	64	3,2
Total	221	11

5.2 Stoffliche Zusammensetzung der Outputprodukte

Wie in Tab. 12 im Kapitel 4.3.6 beschrieben, wurden nicht alle Outputprodukte aus den Sortierprozessen analysiert. Die Gehalte in den Batterien/Akkus, CRT-Bildschirmkomponenten und Metallschrotten wurden aus Gründen der Aufwandsreduktion der Literatur resp. Erfahrungswerten des Entsorgungsunternehmens entnommen. Einzelne Gehalte wie z. B. die Cl-Gehalte bei den Kupferkabeln wurden der Untersuchung von 2003 entnommen. Die Konzentrationen der nicht untersuchten Outputs können dem Anhang 9.5, Tab. 39 entnommen werden. Die Hg-Gehalte der LCD-Hintergrundbeleuchtungen wurden mit einem neuen Verfahren der EMPA bestimmt. Erstmals konnten damit auch die flüchtigen Hg-Mengen zuverlässig ermittelt werden. Die Rohdaten dazu finden sich im Anhang 9.7, Tab. 42 bis Tab. 44. In den folgenden Zusammenstellungen werden die Gehalte in den aggregierten Outputgütern aufgeführt. Die Gehalte in den einzelnen Outputs sind in den Anhängen 9.5 bis 9.9 zusammengestellt.

Einbezug von Literaturwerten in die Berechnungen

5.2.1 Schadstoffträger

Unter Schadstoffträger werden Batterien, Akkus, Kondensatoren und Getterpillen zusammengefasst. Diese Güter werden so gut wie möglich aussortiert. Knopfzellen werden allerdings nur aus demontierten Motherboards separiert. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass trotzdem einzelne dieser Schadstoffträger in den mechanischen Aufbereitungsprozess gelangen. Diese Frachten werden aber über die analysierten Outputströme erfasst. Die aggregierte Zusammensetzung kann der Tab. 14 entnommen werden.

Schadstoffträger gelangen grundsätzlich nicht in den Aufbereitungsprozess

Tab. 14 > Mittlere Stoffkonzentrationen der Schadstoffträger mit Angabe eines 95 %-Konfidenzintervalls*Angabe in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen gerundet.*

Schadstoffträger	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]	Schadstoffträger	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]
Al	34 000	5 500	BDE 28	n.b.	n.b.
Sb	0,47	0,10	BDE 47	n.b.	n.b.
Pb	340	72	BDE 99	n.b.	n.b.
Cd	930	190	BDE 100	n.b.	n.b.
Cr	840	170	BDE 153	n.b.	n.b.
Fe	130 000	23 000	BDE 154	n.b.	n.b.
Cu	41 000	6 900	BDE 183	n.b.	n.b.
Ni	20 000	4 200	BDE 197	n.b.	n.b.
Hg	65	14	BDE 206	n.b.	n.b.
Zn	32 000	6 700	BDE 207	n.b.	n.b.
Sn	14	2,8	BDE 208	n.b.	n.b.
Br	n.b.	n.b.	DecaBDE (BDE 209)	n.b.	n.b.
Cl	n.b.	n.b.	HBCDD	n.b.	n.b.
P	n.b.	n.b.	TBBPA	n.b.	n.b.
PCB 28	0,40	0,18	DecaBB	n.b.	n.b.
PCB 52	4,5	2,1	TBP	n.b.	n.b.
PCB 101	6,8	2,3	DBE-DBCH	n.b.	n.b.
PCB 118	6,0	2,5	PBT	n.b.	n.b.
PCB 138	8,7	2,8	PBEB	n.b.	n.b.
PCB 153	7,7	2,7	HBB	n.b.	n.b.
PCB 180	4,1	1,6	Mirex	n.b.	n.b.
Summe PCB nach AltIV	140	43	EH-TBB	n.b.	n.b.
			BTBPE	n.b.	n.b.
			BEH-TEBP	n.b.	n.b.
			DDC-CO	n.b.	n.b.
			DBDPE	n.b.	n.b.
			TTBP-TAZ	n.b.	n.b.

n.b. = nicht bestimmt; Fehler = «n.b.» → Konzentration kleiner als BG, dazugehörige Konzentration entspricht der ½ BG

Die Batteriezusammensetzung wurde in zwei unabhängigen Untersuchungen bestimmt. Einerseits ermittelte die Firma Batrec die Zusammensetzung des Batteriemix (Von Gunten 2011) und andererseits wurde der Mix anhand eines Kleinversuchs auf der Anlage in Regensdorf bestimmt. Da der Batteriemix in der Gerätesammlung deutlich von der separaten Batteriesammlung abweichen dürfte, wurden die Werte aus dem Kleinversuch auf der Anlage geringfügig angepasst und anschliessend verwendet. Die Konzentrationswerte für die einzelnen Batterietypen wurden von der Batrec übernommen. Die Gegenüberstellung der so berechneten Gehalte findet sich im Anhang 9.6.

Bei den Kondensatoren traten sehr grosse Konzentrationsunterschiede bei den einzelnen Mischproben (MP) auf (vgl. Anhang 9.8.2). Die Tatsache, dass bei einer MP sämtliche PCB-Werte unter der Bestimmungsgrenze lagen, lässt den Schluss zu, dass grundsätzlich die Kondensatoren frei von PCB sind und vereinzelt (noch) Kondensatoren mit sehr hohen PCB-Gehalten vorliegen.

**Kleinversuch zur Bestimmung
Batteriemix**

Kondensatoren häufig ohne PCB

5.2.2 Hintergrundbeleuchtungen

Wie oben erwähnt, konnten dank dem neu entwickelten Verfahren an der EMPA Dübendorf auch die flüchtigen Hg-Gehalte in den Hintergrundbeleuchtungen zuverlässig bestimmt werden. Details zur Methodik können dem EMPA-Projektbericht Nr. 208 116/1 entnommen werden (vgl. auch Figi et al. 2012). Die Gehalte in den Hintergrundbeleuchtungen setzen sich aus den Gehalten in LCD-TV-, LCD-PC- und Notebookmonitoren zusammen. Folgende Annahmen liegen den aggregierten Gehalten zugrunde:

- > Grundsätzlich wird von einer Unsicherheit bei der Hg-Bestimmung von 5 % ausgegangen.
- > LCD-TV: Es wird von durchschnittlich 8 CCFL-Leuchten pro Monitor ausgegangen.
- > LCD-PC: 30 % der PC-Monitore weisen oben und unten je 1 CCFL-Leuchte auf, 65 % je 2 Leuchten und 5 % je 3 Leuchten.
- > Notebooks: 90 % der Notebook weisen je 1 CCFL-Leuchte oben und unten auf und 10 % je 2 Leuchten.

Mit diesen Annahmen und den Analysewerten gemäss Anhang 9.7, Tab. 42 bis Tab. 44 kommt man auf die in Tab. 15 ausgewiesenen Hg-Gehalte pro Gerät:

Tab. 15 > Mittlere Hg-Gehalte von Monitoren von LCD-TV, LCD-PC und Notebooks inkl. 95 %-Konfidenzintervall

Angabe in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Gerät	MW [mg/Gerät]	Fehler [mg/Gerät]	MW [mg/Gerät]	Fehler [mg/Gerät]	MW [mg/kg Hintergrund- beleuchtung]	Fehler [mg/kg Hintergrund- beleuchtung]
LCD-TV	7,2	0,75	0,41	0,047	1030	130
LCD-PC	3,2	0,29	0,60	0,066	1300	150
Notebook	2,0	2,8	0,73	1,0	430	620

Wie Tab. 15 zeigt, enthalten die LCD-PC-Monitore pro kg Hintergrundbeleuchtung die höchsten Hg-Gehalte. Die tiefsten Gehalte weisen die Notebooks auf, allerdings ist bei ihnen der Fehlerbereich am grössten. Das erstaunt nicht, weil hier auch die grössten Unsicherheiten bezüglich der Anzahl CCFL-Röhrchen besteht. Pro Gerät weisen die TV-Geräte erwartungsgemäss die höchsten Gehalte auf, weil die Bildschirme am grössten sind.

Die Verteilung der festen und gasförmigen Anteile an Hg wird im Kapitel 6.3.1 behandelt.

Separate Bestimmung für PC,
TV und Notebook

5.2.3 LCD-Panels

Unter LCD-Panels wird hier die eigentliche Bildschirmoberfläche inkl. Flüssigkristall und Plexiglas ohne Rahmen und Hintergrundbeleuchtung verstanden. Die LCD-Panels stammen aus einer repräsentativen Mischung von TV-, PC- und Notebook-Geräten.

Tab. 16 > Gehalte in den LCD-Panels von TV-, PC- und Notebookgeräten inkl. 95 %-Konfidenzintervall

Angabe in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen gerundet.

LCD-Panels	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]	LCD-Panels	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]
Al	15 000	550	BDE 28	0,059	n.b.
Sb	16	11	BDE 47	0,11	n.b.
Pb	3,2	1,9	BDE 99	0,08	n.b.
Cd	0,0050	n.b.	BDE 100	0,060	n.b.
Cr	500	34	BDE 153	0,26	n.b.
Fe	2 500	160	BDE 154	0,20	n.b.
Cu	110	14	BDE 183	0,40	1,00
Ni	200	17	BDE 197	0,22	0,38
Hg	0,0050	n.b.	BDE 206	0,152	0,09
Zn	140	72	BDE 207	0,15	0,18
Sn	170	13	BDE 208	0,053	n.b.
Br	46	4	DecaBDE (BDE 209)	1,3	3,3
Cl	15	n.b.	HBCDD	1,3	0,50
P	55	n.b.	TBBPA	10	n.b.
PCB 28	0,050	n.b.	DecaBB	10	n.b.
PCB 52	0,050	n.b.	TBP	50	n.b.
PCB 101	0,050	n.b.	DBE-DBCH	50	n.b.
PCB 118	0,050	n.b.	PBT	10	n.b.
PCB 138	0,050	n.b.	PBEB	10	n.b.
PCB 153	0,050	n.b.	HBB	0,20	0,32
PCB 180	0,050	n.b.	Mirex	10	n.b.
Summe PCB nach AltIV	1,25	n.b.	EH-TBB	10	n.b.
			BTBPE	1,0	0,49
			BEH-TEBP	10	n.b.
			DDC-CO	4,8	n.b.
			DBDPE	4,7	n.b.
			TTBP-TAZ	5,6	n.b.

n.b. = nicht bestimmt; Fehler = «n.b.» → Konzentration kleiner als BG, dazugehörige Konzentration entspricht der ½ BG

Wie Tab. 16 zeigt, enthalten die LCD-Panels keine nachweisbaren Mengen an PCB. Auch die Flammschutzmittel liegen in einem sehr tiefen Bereich. Ebenso liegen die Hg- und Cd-Gehalte unter der Bestimmungsgrenze.

LCD-Panels sind unproblematisch

5.2.4 **Unterkorn**

Unterkorn ist eine neue, separat vermarktete Fraktion. Sie existierte in der Untersuchung von 2003 noch nicht.

Tab. 17 > Gehalte im Unterkorn inkl. 95%-Konfidenzintervall

Angabe in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Unterkorn	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]	Unterkorn	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]
Al	44 000	7 200	BDE 28	1,0	0,16
Sb	940	270	BDE 47	5,7	1,0
Pb	14 000	2 600	BDE 99	7,8	1,7
Cd	20	6,0	BDE 100	0,76	0,10
Cr	1 800	7,6	BDE 153	22	7,5
Fe	10 000	370	BDE 154	3,8	1,2
Cu	100 000	13 000	BDE 183	120	43
Ni	1 500	81	BDE 197	58	20
Hg	0,17	0,010	BDE 206	28	9,3
Zn	15 000	1 500	BDE 207	63	23
Sn	8 800	2 300	BDE 208	14	4,6
Br	7 400	1 500	DecaBDE (BDE 209)	760	270
Cl	4 700	1 400	HBCDD	15	3,0
P	260	210	TBBPA	1 100	320
PCB 28	0,050	n.b.	DecaBB	10	n.b.
PCB 52	0,050	n.b.	TBP	50	n.b.
PCB 101	0,050	n.b.	DBE-DBCH	50	n.b.
PCB 118	0,050	n.b.	PBT	10	n.b.
PCB 138	0,050	n.b.	PBEB	10	n.b.
PCB 153	0,050	n.b.	HBB	14	8,1
PCB 180	0,050	n.b.	Mirex	10	n.b.
Summe PCB nach AltIV	1,25	n.b.	EH-TBB	10	n.b.
			BTBPE	360	230
			BEH-TEBP	10	n.b.
			DDC-CO	61	8,9
			DBDPE	660	100
			TTBP-TAZ	21	3,1

n.b. = nicht bestimmt; Fehler = «n.b.» → Konzentration kleiner als BG, dazugehörige Konzentration entspricht der ½ BG

Wie Tab. 17 zeigt, wurden FS in der Grössenordnung der feinkörnigen KS-Fraktion Tab. 23 gefunden. Die höchsten Werte zeigen TBBPA und DecaBDE sowie DBDPE. Sämtliche untersuchten PCB lagen unter der Bestimmungsgrenze.

Hoher KS-Anteil ergibt hohe FS-Konzentrationen

5.2.5 Staub

Unter Staub werden die beiden Stauboutputs «Staub Zyklon vor Granulator» und «Staub Prallmühle und Separator» zusammengefasst.

Tab. 18 > Gehalte im Staub inkl. 95%-Konfidenzintervall

Angabe in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Staub	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]	Staub	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]
Al	18 000	8 000	BDE 28	3,3	1,0
Sb	980	370	BDE 47	26	4,1
Pb	17 000	5 800	BDE 99	32	12
Cd	30	3,8	BDE 100	3,7	2,6
Cr	480	250,0	BDE 153	10	1,8
Fe	54 000	11 000	BDE 154	2,5	0,60
Cu	20 000	2 400	BDE 183	22	18
Ni	2 200	200	BDE 197	11	6,8
Hg	4,5	1,2	BDE 206	12	5,8
Zn	11 000	1 800	BDE 207	15	13
Sn	3 900	850	BDE 208	5,6	4,8
Br	7 000	2 800	DecaBDE (BDE 209)	300	95
Cl	5 800	3 300	HBCDD	11	3,6
P	240	180	TBBPA	300	210
PCB 28	0,61	0,66	DecaBB	10	n.b.
PCB 52	0,66	0,76	TBP	43	30
PCB 101	0,52	0,84	DBE-DBCH	50	n.b.
PCB 118	0,37	0,32	PBT	10	n.b.
PCB 138	1,4	1,1	PBEB	10	n.b.
PCB 153	1,2	0,77	HBB	15	7,0
PCB 180	0,77	0,76	Mirex	10	n.b.
Summe PCB nach AltIV	22	3,6	EH-TBB	10	n.b.
			BTBPE	32	27
			BEH-TEBP	10	n.b.
			DDC-CO	79	63
			DBDPE	490	480
			TTBP-TAZ	8,8	8,0

n.b. = nicht bestimmt; Fehler = «n.b.» → Konzentration kleiner als BG, dazugehörige Konzentration entspricht der ½ BG

Der Staub weist hohe Gehalte an verschiedenen Metallen, PCB und auch nachweisbare Mengen an FS auf.

Hoher Schadstoffgehalt im Staub

5.2.6 Cu-Kabel

Unter Cu-Kabel werden sämtliche, vor der mechanischen Aufbereitung abgetrennten Kabel verstanden. Für die Berechnungen wurden die Metall- und Chlorwerte der Untersuchung 2003 übernommen. Neu analysiert wurden die FS und PCB.

Tab. 19 > Gehalte in Cu-Kabeln inkl. 95%-Konfidenzintervall

Angabe in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Cu-Kabel	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]	Cu-Kabel	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]
Al	n.b.	n.b.	BDE 28	0,012	0,0021
Sb	n.b.	n.b.	BDE 47	0,067	0,011
Pb	16	5,1	BDE 99	0,055	0,0045
Cd	2,7	1,3	BDE 100	0,0082	0,0011
Cr	n.b.	n.b.	BDE 153	0,27	0,094
Fe	n.b.	n.b.	BDE 154	0,035	0,0028
Cu	300 000	100 000	BDE 183	2,0	1,0
Ni	n.b.	n.b.	BDE 197	1,2	1,0
Hg	n.b.	n.b.	BDE 206	6,7	3,5
Zn	n.b.	n.b.	BDE 207	7,0	0,58
Sn	n.b.	n.b.	BDE 208	3,6	1,2
Br	n.b.	n.b.	DecaBDE (BDE 209)	220	40
Cl	400 000	85 000	HBCDD	0,086	0,094
P	n.b.	n.b.	TBBPA	23	50
PCB 28	0,05	n.b.	DecaBB	10	n.b.
PCB 52	0,08	0,10	TBP	50	n.b.
PCB 101	0,28	0,90	DBE-DBCH	50	n.b.
PCB 118	0,13	0,30	PBT	10	n.b.
PCB 138	0,73	2,7	PBEB	10	n.b.
PCB 153	0,73	2,7	HBB	0,42	0,060
PCB 180	0,58	2,1	Mirex	10	n.b.
Summe PCB nach AltIV	10	37	EH-TBB	10	n.b.
			BTBPE	1,8	1,4
			BEH-TEBP	10	n.b.
			DDC-CO	0,43	0,10
			DBDPE	64	11
			TTBP-TAZ	2,3	0,17

n.b. = nicht bestimmt; Fehler = «n.b.» → Konzentration kleiner als BG, dazugehörige Konzentration entspricht der ½ BG

Tab. 19 zeigt, dass von den FS einzig DecaBDE, DBDPE sowie TBBPA im mindestens zweistellig gemessenen mg/kg-Bereich auftreten. Die messbaren PCB-Gehalte traten ausnahmslos nur einer der beiden Mischprobe auf.

Tiefe Gehalte an FS, messbare PCB-Konzentrationen

5.2.7 Leiterplatten

Unter dem Begriff «Leiterplatten» sind die drei Fraktionen «hochwertige Leiterplatten», «minderwertige Leiterplatten» sowie «Leiterplattenbruch» zusammengefasst. Die Unterscheidung zwischen «hochwertigen» und «minderwertigen Leiterplatten» ist fließend und richtet sich nach den darauf verbauten elektronischen Komponenten.

Da aus den hoch- und minderwertigen Leiterplatten kein adäquates Probenmaterial gewonnen werden konnte (Schwierigkeiten bei der homogenen Probenherstellung), mussten die Qualitätsunterschiede abgeschätzt werden. Grundlage der Schätzungen waren die Gehalte im Leiterplattenbruch, von welchen Analysresultate vorliegen. Im Anhang 9.9 werden die Schätzwerte aufgeführt. Eine Sensitivitätsanalyse ergab, dass die Berechnung der Zusammensetzung des EE-Schrotts nicht sensitiv auf den Gehalt in Leiterplatten ist.

Analysresultate nur für
Leiterplattenbruch

Tab. 20 > Gehalte in Leiterplatten inkl. 95 %-Konfidenzintervall

Angabe in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Leiterplatten	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]	Leiterplatten	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]
Al	47 000	2 500	BDE 28	2,0	1,4
Sb	320	18	BDE 47	9,6	6,7
Pb	11 000	540	BDE 99	10	6,6
Cd	6,0	1,6	BDE 100	1,6	1,1
Cr	1 700	150	BDE 153	4,7	2,3
Fe	46 000	2 000	BDE 154	0,80	0,26
Cu	250 000	12 000	BDE 183	9,7	8,0
Ni	5 300	250	BDE 197	5,3	3,8
Hg	0,18	0,0080	BDE 206	5,1	1,8
Zn	11 000	630	BDE 207	6,3	1,9
Sn	30 000	1 400	BDE 208	2,3	1,14
Br	89 000	4 800	DecaBDE (BDE 209)	110	20
Cl	1 200	160	HBCDD	0,75	0,090
P	3 300	720	TBBPA	390	130
PCB 28	0,05	n.b.	DecaBB	10	n.b.
PCB 52	0,05	n.b.	TBP	50	n.b.
PCB 101	0,05	n.b.	DBE-DBCH	50	n.b.
PCB 118	0,05	n.b.	PBT	10	n.b.
PCB 138	0,05	n.b.	PBEB	10	n.b.
PCB 153	0,05	n.b.	HBB	12	4,9
PCB 180	0,05	n.b.	Mirex	10	n.b.
Summe PCB nach AltIV	1,25	n.b.	EH-TBB	10	n.b.
			BTBPE	6,5	4,2
			BEH-TEBP	10	n.b.
			DDC-CO	40	10
			DBDPE	75	4,7
			TTBP-TAZ	28	9,2

n.b. = nicht bestimmt; Fehler = «n.b.» → Konzentration kleiner als BG, dazugehörige Konzentration entspricht der ½ BG

Die Leiterplatten weisen wie erwartet sehr hohe Cu-Werte auf. Auffallend sind aber vor allem die sehr hohen Br-Werte. Dabei finden sie keine Entsprechung bei den untersuchten Flammschutzmitteln. Da in Leiterplatten oft TBBPA als reaktives Flammschutzmittel eingesetzt wird, ist diese Diskrepanz erklärbar. Den höchsten Wert

Erstaunlich hohe
Br-Konzentrationen

weist denn auch TBBPA mit 390 mg/kg auf, welcher vom nicht reagierten Anteil der eingesetzten TBBPA-Menge stammen könnte. Sämtliche PCB-Werte lagen unter der Bestimmungsgrenze.

5.2.8 Bildröhrenkomponenten

Unter dem Begriff «Bildröhrenkomponenten» sind die Schattenmasken, Strahlerkanonen, Ablenkspulen sowie Bildröhren subsumiert. Dabei machen die Bildröhren 95 % der Masse aus. Sämtliche Werte werden aus der Untersuchung 2003 übernommen. Dabei handelt es sich ausnahmslos um Literaturwerte.

Verwendung von Literaturwerten

Tab. 21 > Gehalte in Bildröhrenkomponenten inkl. 95 %-Konfidenzintervall

Angabe in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Bildröhrenkomponenten	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]	Bildröhrenkomponenten	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]
Al	15000	1800	BDE 28	n.b.	n.b.
Sb	3100	380	BDE 47	n.b.	n.b.
Pb	4500	530	BDE 99	n.b.	n.b.
Cd	n.b.	n.b.	BDE 100	n.b.	n.b.
Cr	n.b.	n.b.	BDE 153	n.b.	n.b.
Fe	37000	3600	BDE 154	n.b.	n.b.
Cu	5000	1000	BDE 183	n.b.	n.b.
Ni	250	52	BDE 197	n.b.	n.b.
Hg	n.b.	n.b.	BDE 206	n.b.	n.b.
Zn	n.b.	n.b.	BDE 207	n.b.	n.b.
Sn	n.b.	n.b.	BDE 208	n.b.	n.b.
Br	n.b.	n.b.	DecaBDE (BDE 209)	n.b.	n.b.
Cl	950	120	HBCDD	n.b.	n.b.
P	n.b.	n.b.	TBBPA	n.b.	n.b.
			DecaBB	n.b.	n.b.
PCB 28	n.b.	n.b.	TBP	n.b.	n.b.
PCB 52	n.b.	n.b.	DBE-DBCH	n.b.	n.b.
PCB 101	n.b.	n.b.	PBT	n.b.	n.b.
PCB 118	n.b.	n.b.	PBEB	n.b.	n.b.
PCB 138	n.b.	n.b.	HBB	n.b.	n.b.
PCB 153	n.b.	n.b.	Mirex	n.b.	n.b.
PCB 180	n.b.	n.b.	EH-TBB	n.b.	n.b.
Summe PCB nach AltIV	n.b.	n.b.	BTBPE	n.b.	n.b.
			BEH-TEBP	n.b.	n.b.
			DDC-CO	n.b.	n.b.
			DBDPE	n.b.	n.b.
			TTBP-TAZ	n.b.	n.b.

kursive Zahlen: Literaturwerte, eigene Schätzungen

n.b. = nicht bestimmt; Fehler = «n.b.» → Konzentration kleiner als BG, dazugehörige Konzentration entspricht der ½ BG

Die Bildröhren enthalten vergleichsweise hohe Sb-Konzentrationen, wobei Fe und Al absolut in den höchsten Konzentrationen vorliegen.

5.2.9 Bildschirm- und Notebookgehäuse

Die Fraktion «Bildschirm- und Notebookgehäuse» enthält die Gehäuse der LCD- und CRT-Geräte sowie die Gehäuse der Notebooks. Dabei entfallen rund 40 % auf die LCD-TV-Gehäuse und gut 25 % auf die CRT-TVs. Je 13 % machen die LCD- und CRT-PC-Gehäuse aus und 7 % fallen auf die Notebookgehäuse.

Tab. 22 > Gehalte in Bildschirm- und Notebookgehäusen inkl. 95 %-Konfidenzintervall

Angabe in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Bildschirm- und Notebookgehäuse	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]	Bildschirm- und Notebookgehäuse	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]
Al	3800	240	BDE 28	0,046	0,012
Sb	2600	140	BDE 47	0,61	0,15
Pb	350	57	BDE 99	0,92	0,20
Cd	5,0	0,27	BDE 100	0,16	0,045
Cr	270	19,0	BDE 153	35	3,5
Fe	3400	550	BDE 154	3,3	0,31
Cu	4400	260	BDE 183	240	26
Ni	270	20	BDE 197	120	12
Hg	0,15	0,021	BDE 206	120	11
Zn	1700	91	BDE 207	160	21
Sn	350	51	BDE 208	39	9,6
Br	12000	490	DecaBDE (BDE 209)	3300	170
Cl	3300	210	HBCDD	84	10
P	5600	390	TBBPA	4000	260
PCB 28	0,065	0,016	DecaBB	10	n.b.
PCB 52	0,084	0,016	TBP	50	n.b.
PCB 101	0,05	n.b.	DBE-DBCH	50	n.b.
PCB 118	0,05	n.b.	PBT	10	n.b.
PCB 138	0,05	n.b.	PBEB	10	n.b.
PCB 153	0,05	n.b.	HBB	3	0,7
PCB 180	0,05	n.b.	Mirex	10	n.b.
Summe PCB nach AltIV	1,25	n.b.	EH-TBB	10	n.b.
			BTBPE	1300	81
			BEH-TEBP	10	n.b.
			DDC-CO	270	53
			DBDPE	1400	170
			TTBP-TAZ	140	20

n.b. = nicht bestimmt; Fehler = «n.b.» → Konzentration kleiner als BG, dazugehörige Konzentration entspricht der ½ BG

Wie zu erwarten war, weist diese Fraktion relativ hohe Br- und P-Gehalte auf. Die Br-Werte korrespondieren hier mit der Summe aller bestimmten Flammschutzmittel im Vergleich mit den übrigen Fraktionen am besten. Bei den Flammschutzmitteln sind die «alten» Flammschutzmittel DecaBDE und TBBPA die wichtigsten Komponenten. Von den «neuen» FS stellen DBDPE und BTBPE die Hauptanteile dar. Die einzigen PCB-Konzentrationen über der Bestimmungsgrenze stammen von den CRT-Bildschirmen.

Gute Übereinstimmung der FS- mit der Br-Konzentration

5.2.10 Feinkörnige KS-Fraktion

Die «Feinkörnige KS-Fraktion» umfasst KS <2 mm, KS 2–5, 5–10 mm (Betriebsbezeichnung) sowie KS 20–25 mm. Dabei stellen die KS 20–25 mm mit 56 % die grösste Fraktion dar. Von den KS 2–5, 5–10 mm fallen 36 % und von den KS <2 mm 8 % an.

Tab. 23 > Gehalte in der feinkörnigen KS-Fraktion inkl. 95 %-Konfidenzintervall

Angabe in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Feinkörnige KS-Fraktion	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]	Feinkörnige KS-Fraktion	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]
Al	32 000	37 000	BDE 28	0,33	0,16
Sb	1 400	290	BDE 47	2,2	1,7
Pb	1 400	650	BDE 99	2,4	2,8
Cd	36	13	BDE 100	0,27	0,36
Cr	250	70,0	BDE 153	26	11
Fe	3 000	920	BDE 154	2,9	1,5
Cu	31 000	14 000	BDE 183	160	110
Ni	270	84	BDE 197	84	54
Hg	0,30	0,037	BDE 206	32	25
Zn	2 700	1 300	BDE 207	68	120
Sn	1 400	410	BDE 208	12	15
Br	8 100	2 000	DecaBDE (BDE 209)	860	170
Cl	8 400	6 200	HBCDD	40	18
P	820	2 200	TBBPA	1 700	340
PCB 28	0,050	n.b.	DecaBB	14	12
PCB 52	0,092	0,17	TBP	50	n.b.
PCB 101	0,064	0,057	DBE-DBCH	50	n.b.
PCB 118	0,092	0,17	PBT	10	n.b.
PCB 138	0,15	0,30	PBEB	10	n.b.
PCB 153	0,12	0,20	HBB	7,2	7,4
PCB 180	0,050	n.b.	Mirex	10	n.b.
Summe PCB nach AltIV	1,7	1,8	EH-TBB	10	n.b.
			BTBPE	360	45
			BEH-TEBP	10	n.b.
			DDC-CO	66	47
			DBDPE	1 100	870
			TTBP-TAZ	26	20

n.b. = nicht bestimmt; Fehler = «n.b.» → Konzentration kleiner als BG, dazugehörige Konzentration entspricht der ½ BG

Wie bei den Bildschirm- und Notebookgehäusen sind auch hier die «alten» FS TBBPA und DecaBDE wichtig. DBDPE weist allerdings die zweithöchste Konzentration auf. BTBPE liegt an vierter Stelle. Erwartungsgemäss sind auch die Br-Gehalte hoch. Die Cl-Werte in der gleichen Grössenordnung dürften grösstenteils auf den Einsatz von Polyvinylchlorid (PVC) beispielsweise in Kabelisolierungen zurückzuführen sein. Die PCB-Konzentrationen, welche über der Bestimmungsgrenze lagen, stammen aus der grössten KS-Fraktion.

Hoher Wert des «neuen»
FS DBDPE

5.2.11 Feinkörnige Metallfraktion

Die «Feinkörnige Metallfraktion» umfasst Metalle <2 mm + KS, Metalle <2 mm, Metalle 2–5 mm sowie Metall 5–10 mm. Gut $\frac{1}{3}$ entfällt dabei auf Metalle 2–5 mm und je knapp 30 % auf Metalle <2 mm und Metalle 5–10 mm. Weniger als 10 % stammen von den Metallen <2 mm + KS.

Tab. 24 > Gehalte in der feinkörnigen Metallfraktion inkl. 95%-Konfidenzintervall

Angabe in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Feinkörnige Metallfraktion	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]	Feinkörnige Metallfraktion	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]
Al	450000	24000	BDE 28	n.b.	n.b.
Sb	53	5,8	BDE 47	n.b.	n.b.
Pb	14000	2200	BDE 99	n.b.	n.b.
Cd	8,9	1,3	BDE 100	n.b.	n.b.
Cr	9800	920,0	BDE 153	n.b.	n.b.
Fe	50000	3900	BDE 154	n.b.	n.b.
Cu	340000	17000	BDE 183	n.b.	n.b.
Ni	7800	600	BDE 197	n.b.	n.b.
Hg	0,12	0,0085	BDE 206	n.b.	n.b.
Zn	89000	13000	BDE 207	n.b.	n.b.
Sn	25000	5000	BDE 208	n.b.	n.b.
Br	320	120	DecaBDE (BDE 209)	n.b.	n.b.
Cl	25	11	HBCDD	n.b.	n.b.
P	15	5,6	TBBPA	n.b.	n.b.
PCB 28	n.b.	n.b.	DecaBB	n.b.	n.b.
PCB 52	n.b.	n.b.	TBP	n.b.	n.b.
PCB 101	n.b.	n.b.	DBE-DBCH	n.b.	n.b.
PCB 118	n.b.	n.b.	PBT	n.b.	n.b.
PCB 138	n.b.	n.b.	PBEB	n.b.	n.b.
PCB 153	n.b.	n.b.	HBB	n.b.	n.b.
PCB 180	n.b.	n.b.	Mirex	n.b.	n.b.
Summe PCB nach AltIV	n.b.	n.b.	EH-TBB	n.b.	n.b.
			BTBPE	n.b.	n.b.
			BEH-TEBP	n.b.	n.b.
			DDC-CO	n.b.	n.b.
			DBDPE	n.b.	n.b.
			TTBP-TAZ	n.b.	n.b.

n.b. = nicht bestimmt; Fehler = «n.b.» → Konzentration kleiner als BG, dazugehörige Konzentration entspricht der $\frac{1}{2}$ BG

Tab. 24 zeigt deutlich die erwarteten hohen Al- und Cu-Gehalte. Knapp die Hälfte (45 %) entfällt auf das Al und rund ein Drittel auf Cu. Die Flammschutzmittel und PCB wurden nicht beprobt.

Hohe Al- und Cu-Konzentrationen

5.2.12 Metallschrottfraktion

Die «Metallschrottfraktion» umfasst eine ganze Reihe von Unterfraktionen. Es sind dies:

- > Schwerteile
- > CrNi-Stahl
- > Trafo/Motoren
- > Verbunde und Überlauf
- > Aluminium
- > Kupfer
- > Messing
- > CrNi-Stahl aus der LCD-TV-, -PC- und Notebook-Schiene (aus separatem Zerlegbetrieb)
- > Alu aus der LCD-TV-, -PC- und Notebook-Schiene (aus separatem Zerlegbetrieb)

Rund 45 % fallen dabei auf die Trafos und Motoren und je gut 20 % auf Aluminium und die Schwerteile, welche selber wiederum aus einem Gemisch bestehen.

Tab. 25 > Gehalte in der Metallschrottfraktion inkl. 95%-Konfidenzintervall

Angabe in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Metallschrottfraktion	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]	Metallschrottfraktion	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]
Al	370 000	32 000	BDE 28	n.b.	n.b.
Sb	n.b.	n.b.	BDE 47	n.b.	n.b.
Pb	2 300	270	BDE 99	n.b.	n.b.
Cd	n.b.	n.b.	BDE 100	n.b.	n.b.
Cr	38 000	3 100	BDE 153	n.b.	n.b.
Fe	400 000	31 000	BDE 154	n.b.	n.b.
Cu	95 000	7 200	BDE 183	n.b.	n.b.
Ni	22 000	1 700	BDE 197	n.b.	n.b.
Hg	n.b.	n.b.	BDE 206	n.b.	n.b.
Zn	19 000	1 600	BDE 207	n.b.	n.b.
Sn	78	8,9	BDE 208	n.b.	n.b.
Br	n.b.	n.b.	DecaBDE (BDE 209)	n.b.	n.b.
Cl	9 800	1 100	HBCDD	n.b.	n.b.
P	n.b.	n.b.	TBBPA	n.b.	n.b.
PCB 28	n.b.	n.b.	DecaBB	n.b.	n.b.
PCB 52	n.b.	n.b.	TBP	n.b.	n.b.
PCB 101	n.b.	n.b.	DBE-DBCH	n.b.	n.b.
PCB 118	n.b.	n.b.	PBT	n.b.	n.b.
PCB 138	n.b.	n.b.	PBEB	n.b.	n.b.
PCB 153	n.b.	n.b.	HBB	n.b.	n.b.
PCB 180	n.b.	n.b.	Mirex	n.b.	n.b.
Summe PCB nach AltIV	n.b.	n.b.	EH-TBB	n.b.	n.b.
			BTBPE	n.b.	n.b.
			BEH-TEBP	n.b.	n.b.
			DDC-CO	n.b.	n.b.
			DBDPE	n.b.	n.b.
			TTBP-TAZ	n.b.	n.b.

kursive Zahlen: Literaturwerte, eigene Schätzungen;

n.b. = nicht bestimmt; Fehler = «n.b.» → Konzentration kleiner als BG, dazugehörige Konzentration entspricht der ½ BG

Tab. 25 zeigt, dass die Metallschrottfraktion zu je rund 40 % aus Eisen und Aluminium besteht. Mit rund 10 % ist auch der Kupferanteil relativ hoch. Die einzelnen Gehalte wurden allerdings nicht gemessen, sondern der Literatur entnommen oder stammen vom Aufbereiter. Die FS und PCB wurden nicht bestimmt.

Hoher Al-Gehalt in der Metallschrottfraktion

5.2.13 Fe-Schrott

Der Fe-Schrott stammt aus der Entschrottung auf der Anlage in Regensdorf sowie der Fe-Fraktion aus der Aufbereitung der LCD-TV und -PC sowie der Notebooks im separaten Zerlegebetrieb. 80 % stammen dabei aus der Entschrottung auf der Anlage in Regensdorf und 20 % vom Zerlegebetrieb in Sirnach.

Tab. 26 > Gehalte im Fe-Schrott inkl. 95 %-Konfidenzintervall

Angabe in mg/kg und auf zwei signifikante Stellen gerundet.

Fe-Schrott	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]	Fe-Schrott	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]
Al	20 000	2 400	BDE 28	n.b.	n.b.
Sb	n.b.	n.b.	BDE 47	n.b.	n.b.
Pb	n.b.	n.b.	BDE 99	n.b.	n.b.
Cd	n.b.	n.b.	BDE 100	n.b.	n.b.
Cr	5 000	600	BDE 153	n.b.	n.b.
Fe	960 000	120 000	BDE 154	n.b.	n.b.
Cu	10 000	1 200	BDE 183	n.b.	n.b.
Ni	5 000	600	BDE 197	n.b.	n.b.
Hg	n.b.	n.b.	BDE 206	n.b.	n.b.
Zn	n.b.	n.b.	BDE 207	n.b.	n.b.
Sn	n.b.	n.b.	BDE 208	n.b.	n.b.
Br	n.b.	n.b.	DecaBDE (BDE 209)	n.b.	n.b.
Cl	n.b.	n.b.	HBCDD	n.b.	n.b.
P	n.b.	n.b.	TBBPA	n.b.	n.b.
PCB 28	n.b.	n.b.	DecaBB	n.b.	n.b.
PCB 52	n.b.	n.b.	TBP	n.b.	n.b.
PCB 101	n.b.	n.b.	DBE-DBCH	n.b.	n.b.
PCB 118	n.b.	n.b.	PBT	n.b.	n.b.
PCB 138	n.b.	n.b.	PBEB	n.b.	n.b.
PCB 153	n.b.	n.b.	HBB	n.b.	n.b.
PCB 180	n.b.	n.b.	Mirex	n.b.	n.b.
Summe PCB nach AltIV	n.b.	n.b.	EH-TBB	n.b.	n.b.
			BTBPE	n.b.	n.b.
			BEH-TEBP	n.b.	n.b.
			DDC-CO	n.b.	n.b.
			DBDPE	n.b.	n.b.
			TTBP-TAZ	n.b.	n.b.

kursive Zahlen: Literaturwerte, eigene Schätzungen;

n.b. = nicht bestimmt; Fehler = «n.b.» → Konzentration kleiner als BG, dazugehörige Konzentration entspricht der ½ BG

Mit 96 % Fe-Anteil ist die Fe-Schrott-Fraktion sehr rein. Der Al-Anteil beträgt 2 % und der Cu-Anteil 1 %. Die FS und PCB wurden nicht bestimmt. Die einzelnen Werte stammen aus der Literatur.

Hoher Reinheitsgrad der Fe-Schrott-Fraktion

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

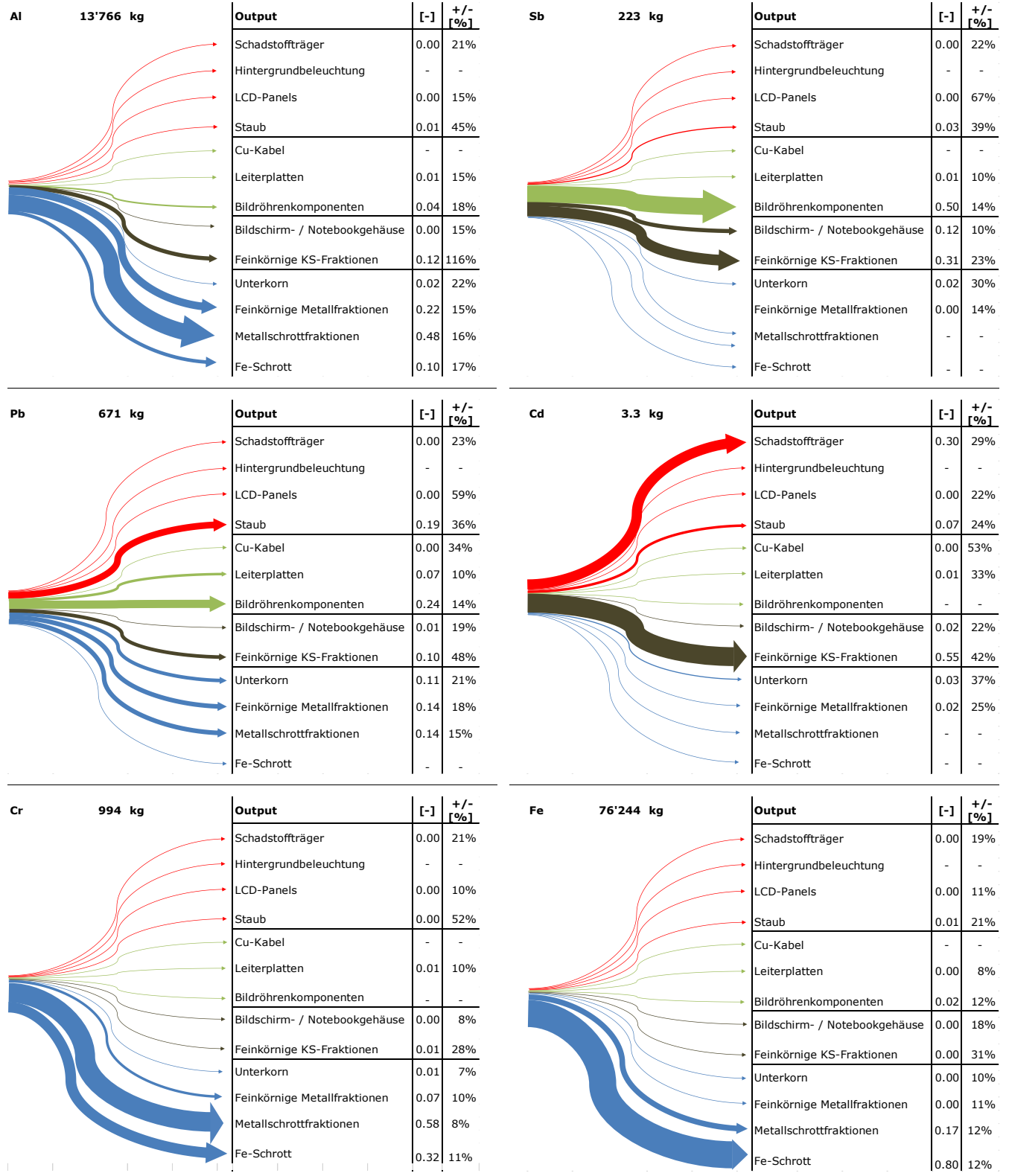
Die Verteilung der Stoffflüsse vom Input auf die Outputprodukte wird mittels Transferkoeffizienten beschrieben. Bei den Outputprodukten handelt es sich um aggregierte Fraktionen, so wie in Kapitel 4.3.3 aufgezeigt, analog den Massenströmen.

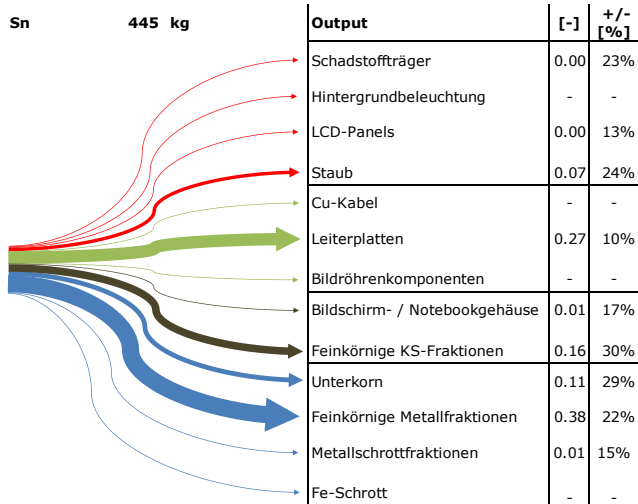
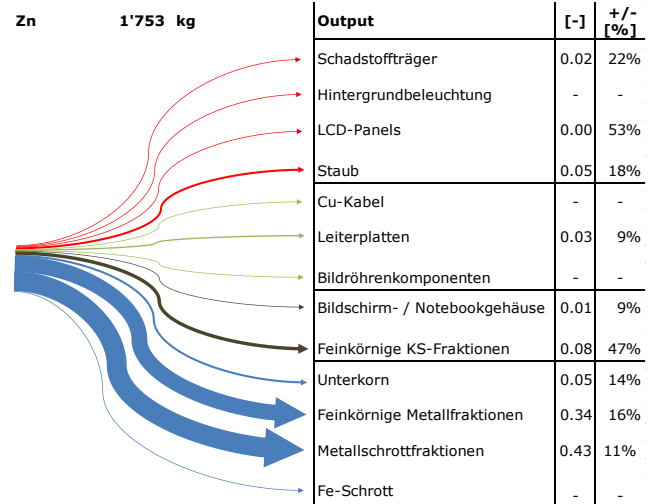
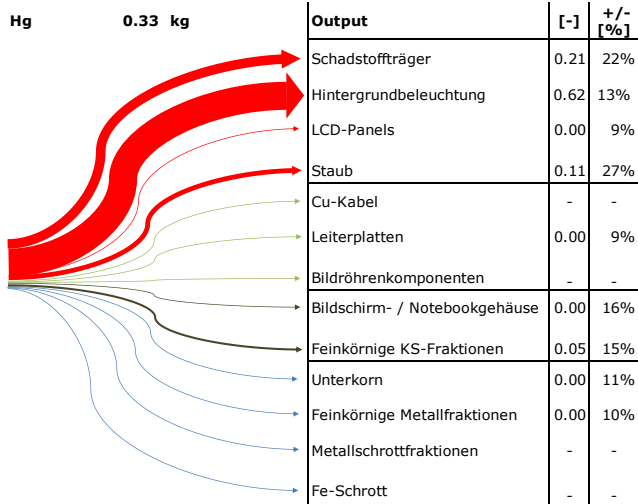
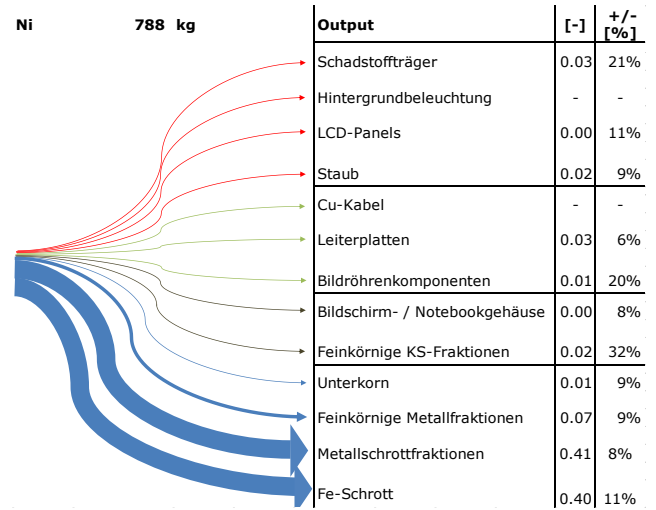
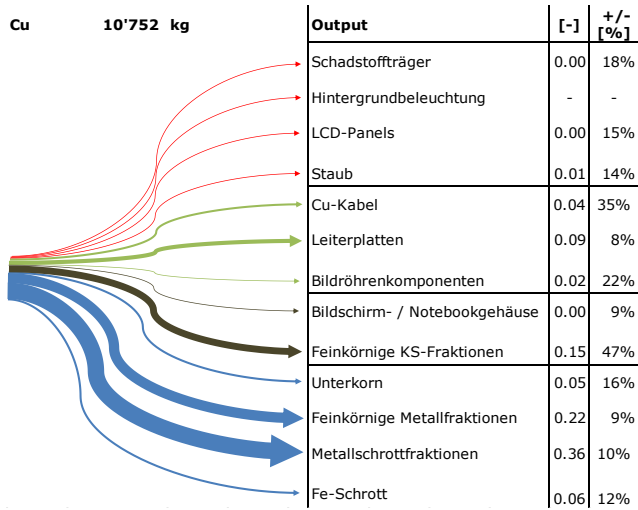
Die Massenangaben beziehen sich auf die im Versuch Ende März 2011 umgesetzten Stofffrachten (total 220 t).

5.3.1 Transferkoeffizienten der untersuchten Metalle

Bei den Metallen gibt es typische Verteilungsmuster. Cr und in geringerem Ausmass Al, Zn und Cu finden sich hauptsächlich in der Metallschrottfraction. Ni findet man ebenfalls in der Metallschrottfraction, aber auch im Fe-Schrott. Fe findet sich «natürlich» hauptsächlich im Fe-Schrott. Von Cd fällt 55 % in der feinkörnigen KS-Fraction an und 30 % in den Schadstoffträgern. Bei Hg fallen gut 60 % bei den Hintergrundbeleuchtungen, weitere gut 20 % bei den Schadstoffträgern und rund 10 % im Staub an. Sn, Zn, Cu und Al werden zu 20–40 % in die feinkörnige Metallfraction transferiert. Bei Pb gibt es keine dominierende Outputfraction. Sb landet zu 50 % in den Bildschirmkomponenten, aber auch zu gut 30 % in der feinkörnigen KS-Fraction.

Typische Verteilungsmuster
bei den Metallen

Abb. 7 > Stoffflüsse und mittlere Transferkoeffizienten der untersuchten Metalle und Antimon in aggregierten Outputfraktionen
Mit Angabe des 95 %-KI.




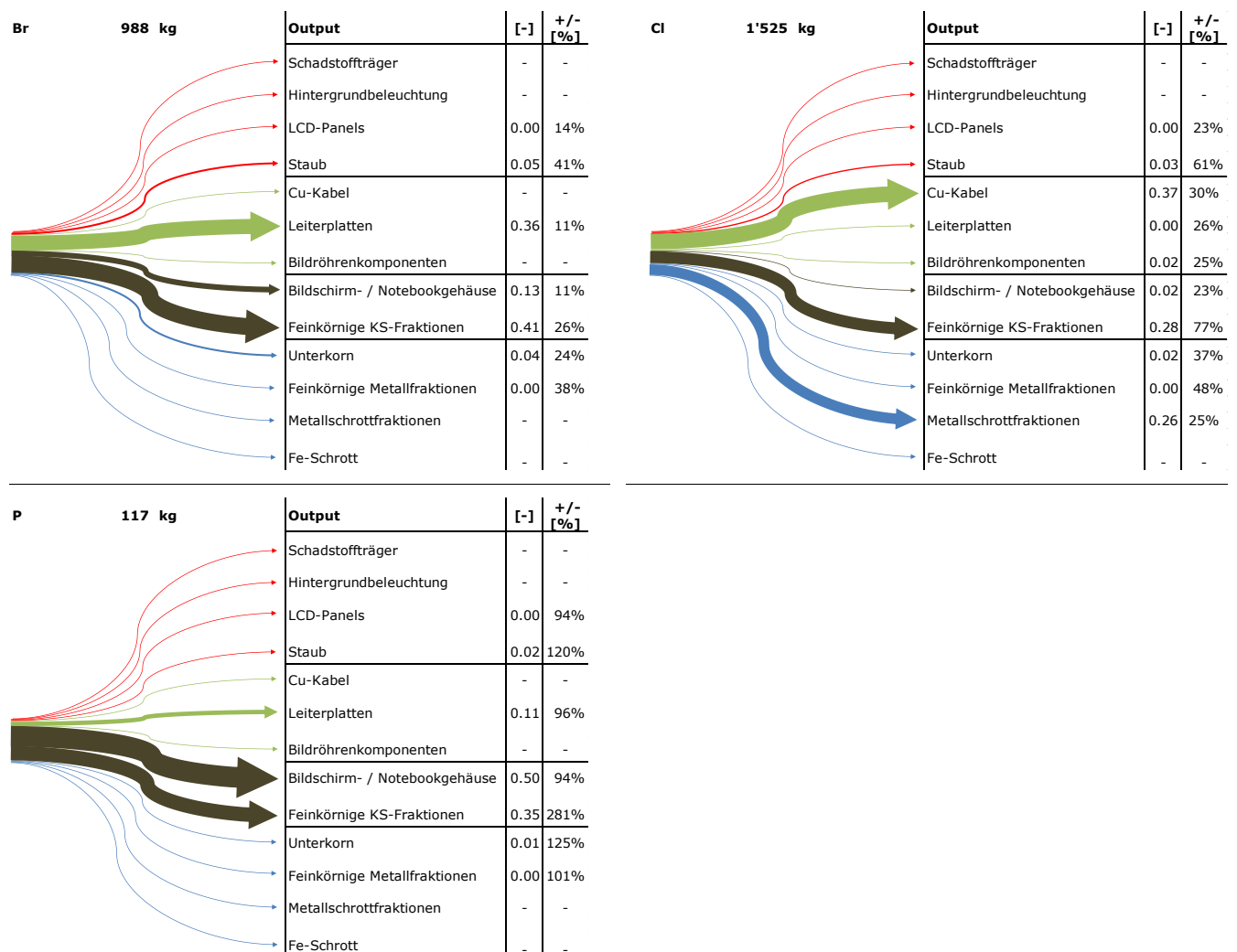
5.3.2 Transferkoeffizienten der untersuchten Nichtmetalle

Cl, Br und P finden sich erwartungsgemäss zu einem grossen Teil in der feinkörnigen KS-Fraktion. Bei P stellen aber die Bildschirm- und Notebookgehäuse den wichtigsten Outputpfad dar, während es für Cl die Cu-Kabel sind. Bei Br stellen auch die Leiterplatten eine wichtige Schiene dar.

Unterschiedliche Hauptpfade

Abb. 8 > Stoffflüsse und mittlere Transferkoeffizienten der untersuchten Nichtmetalle in aggregierten Outputfraktionen

Mit Angabe des 95 %-KI.



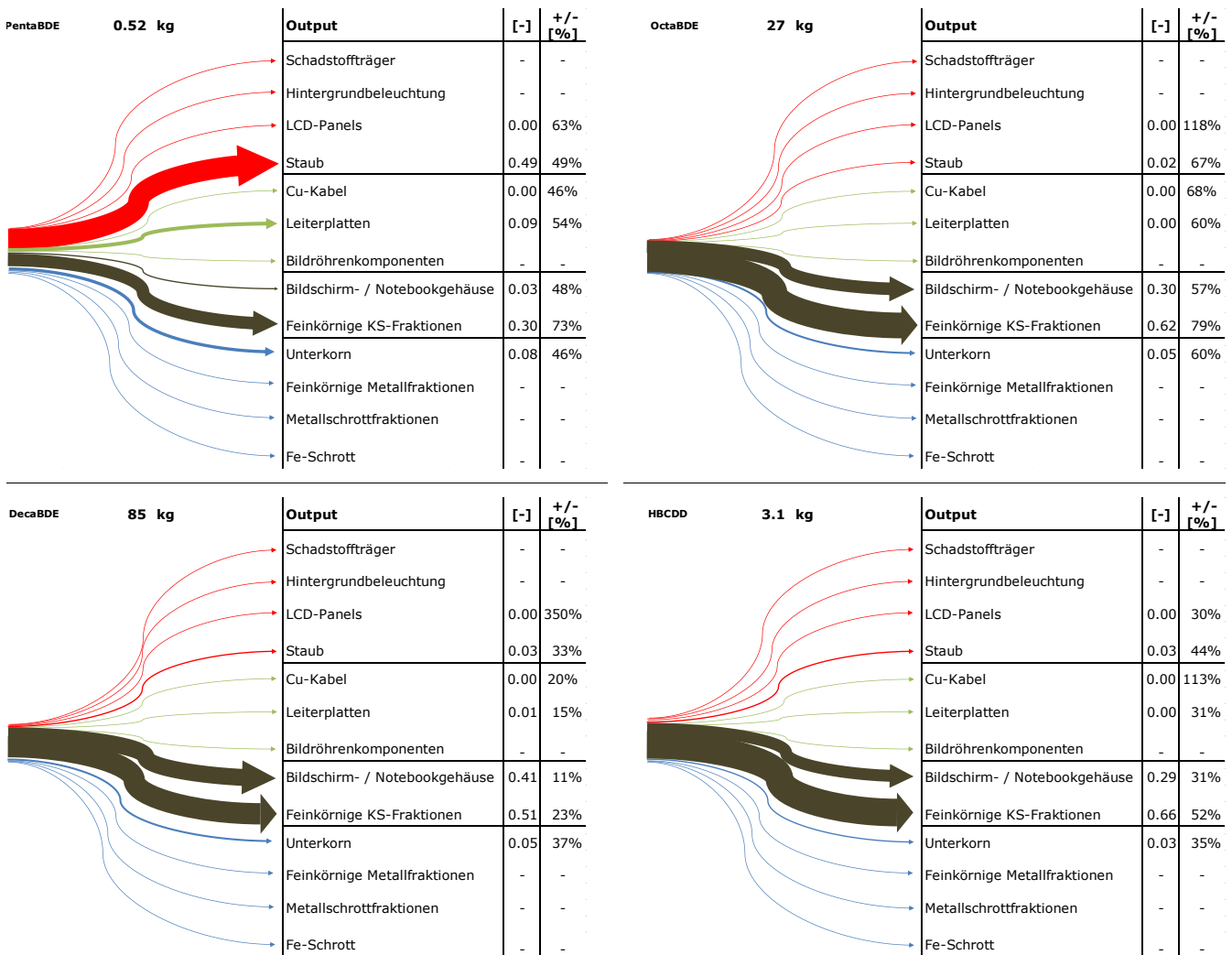
5.3.3 Transferkoeffizienten der untersuchten Flammschutzmittel

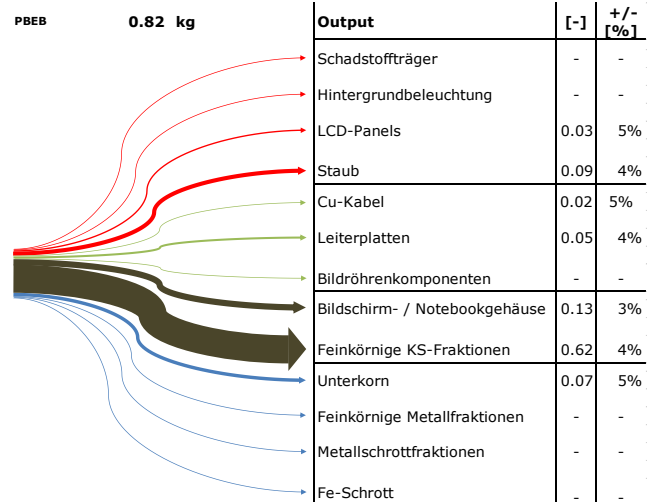
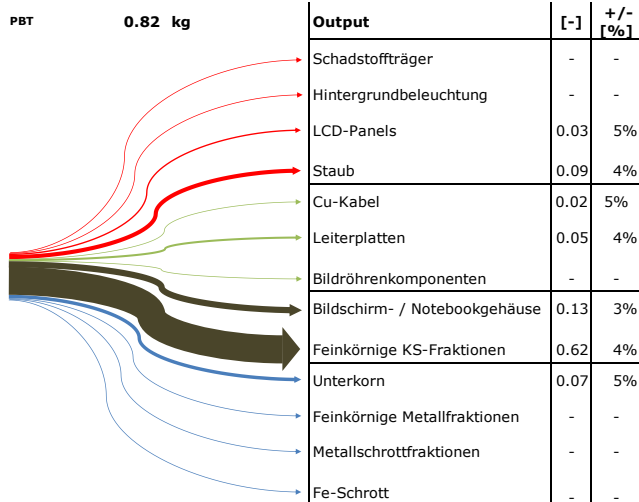
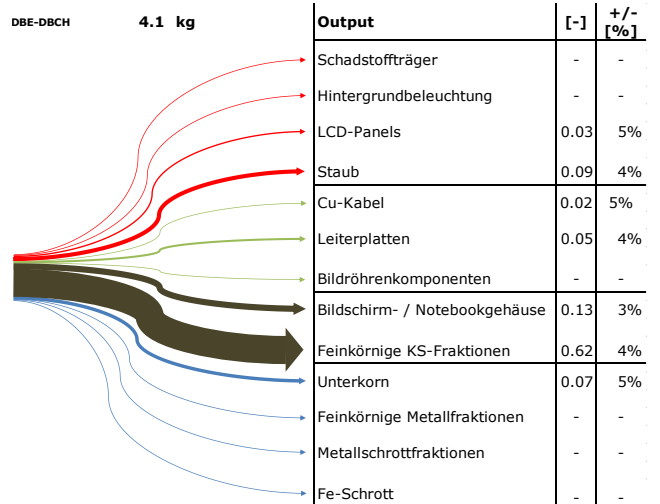
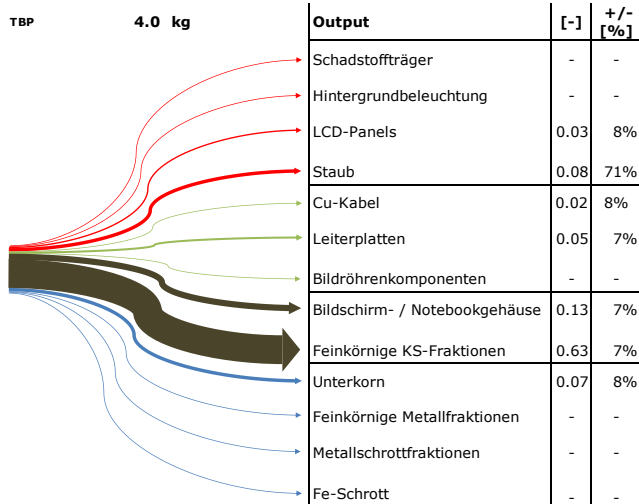
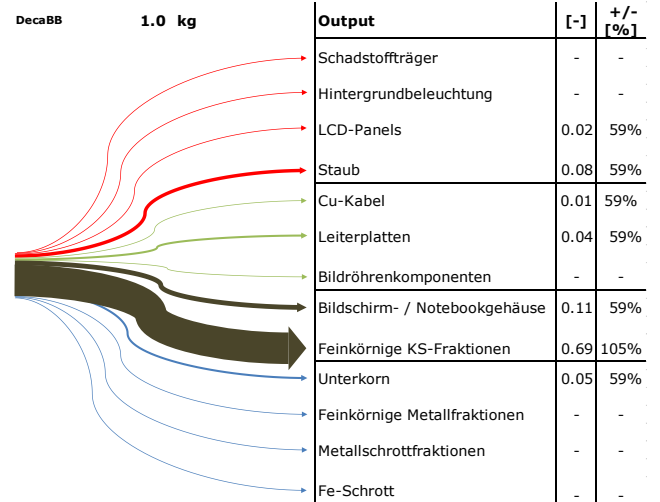
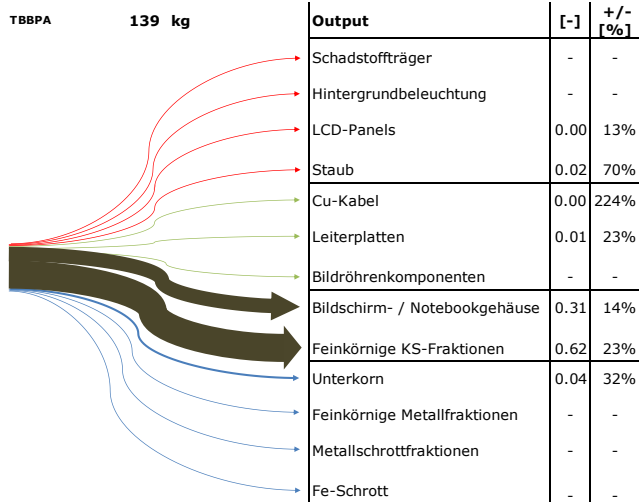
Bei den FS stellt wie erwartet die feinkörnige KS-Fraktion den wichtigsten Outputpfad dar, gefolgt von den Bildschirmgehäusen und Notebooks. Es gibt aber bemerkenswerte Unterschiede. So landen bei PentaBDE 49 % der Mengen im Staub. Bei HBB sind es 19 %, während bei den übrigen Substanzen weniger als 10 % in den Staub gelangt. Bei den neu untersuchten Stoffen BTBPE, DDC-CO und TTBP-TAZ beträgt der Anteil in den Bildschirm- und Notebookgehäusen je rund 40 %. Die Verteilung der neu untersuchten FS DecaBB, TBP, DBE-DBCH, PBT, PBEP, Mirex, EH-TBB und BEH-TEBP muss kritisch betrachtet werden, da hier die Berechnungen hauptsächlich mit der halben Bestimmungsgrenze erfolgten. Dass die feinkörnigen KS-Fractionen und die Gehäuse die Hauptoutputpfade darstellen, dürfte aber zutreffen.

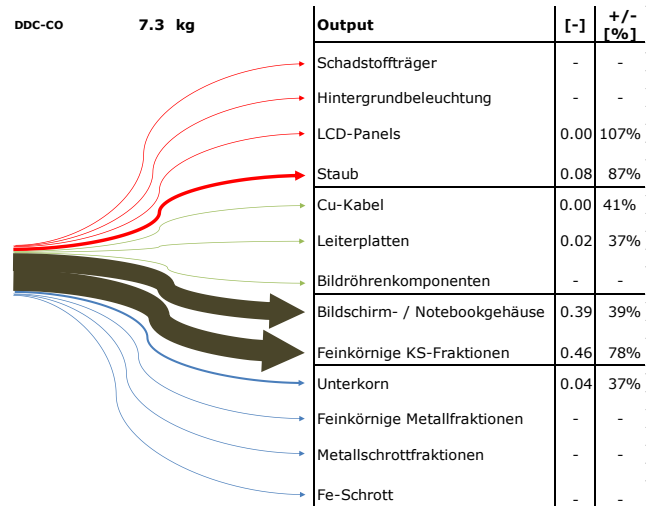
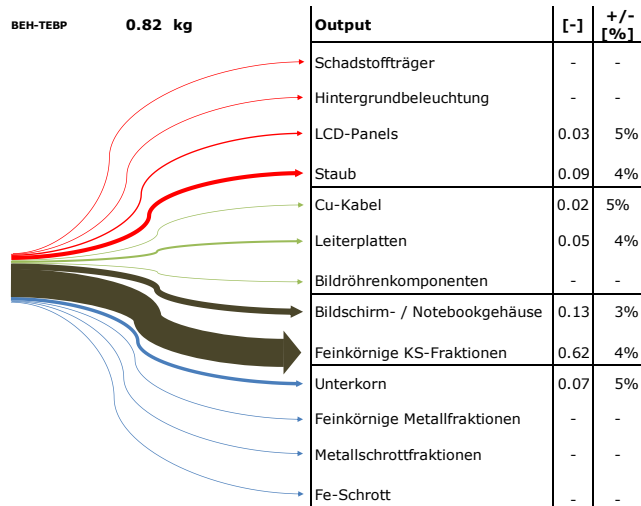
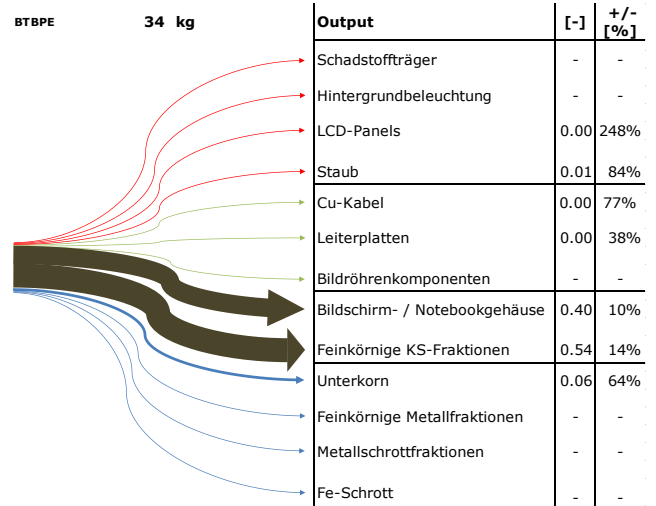
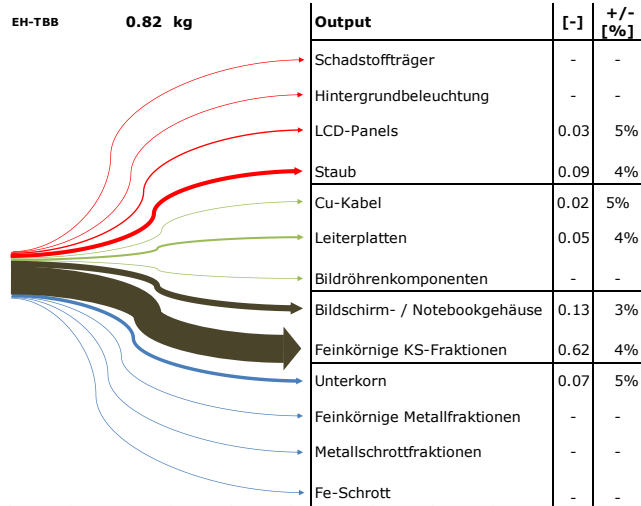
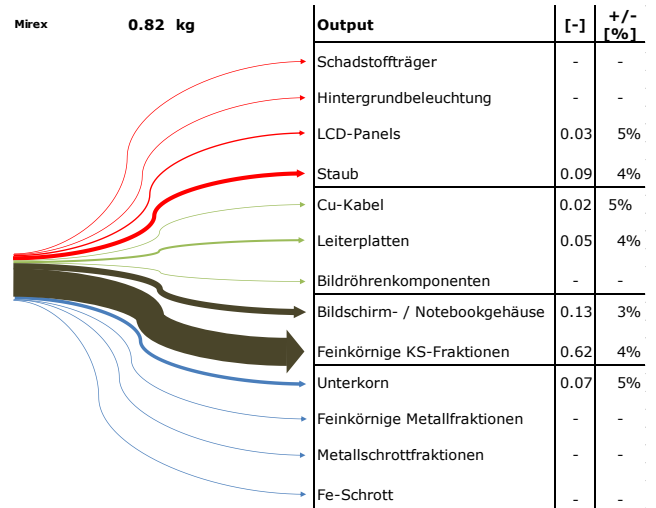
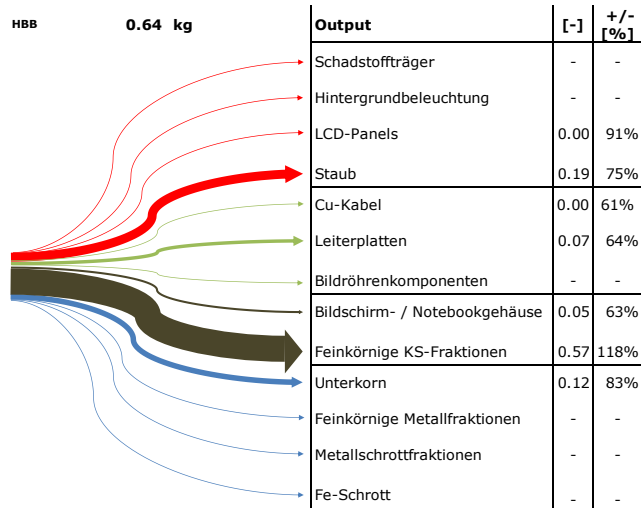
Wichtige KS-Fraktion

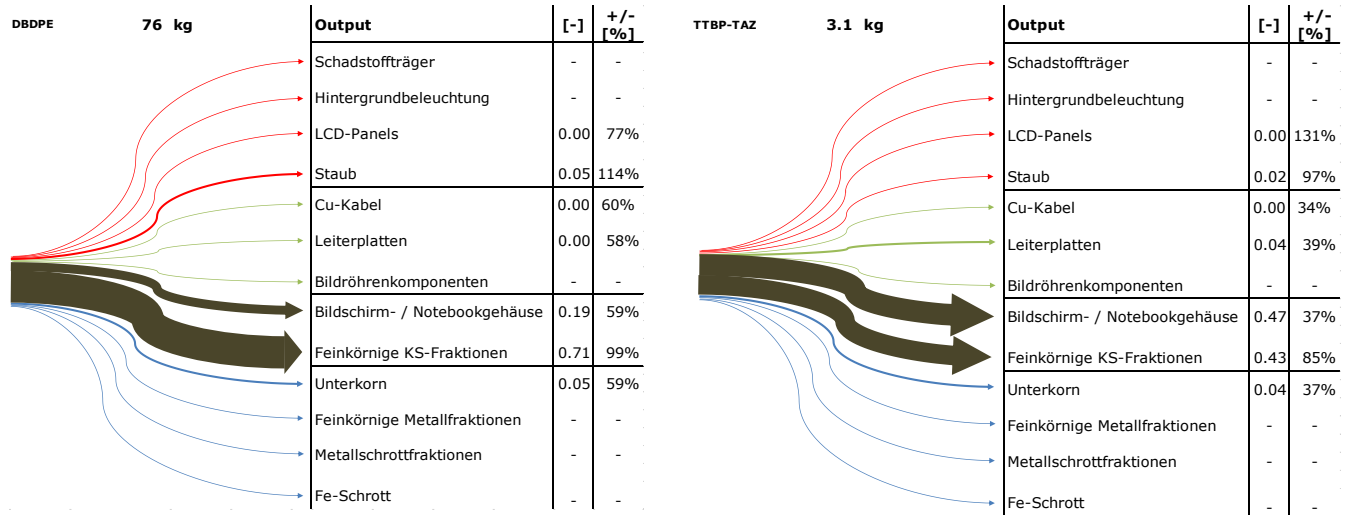
Abb. 9 > Stoffflüsse und mittlere Transferkoeffizienten der ausgewählten FS in aggregierten Outputfraktionen

Mit Angabe des 95 %-KI.









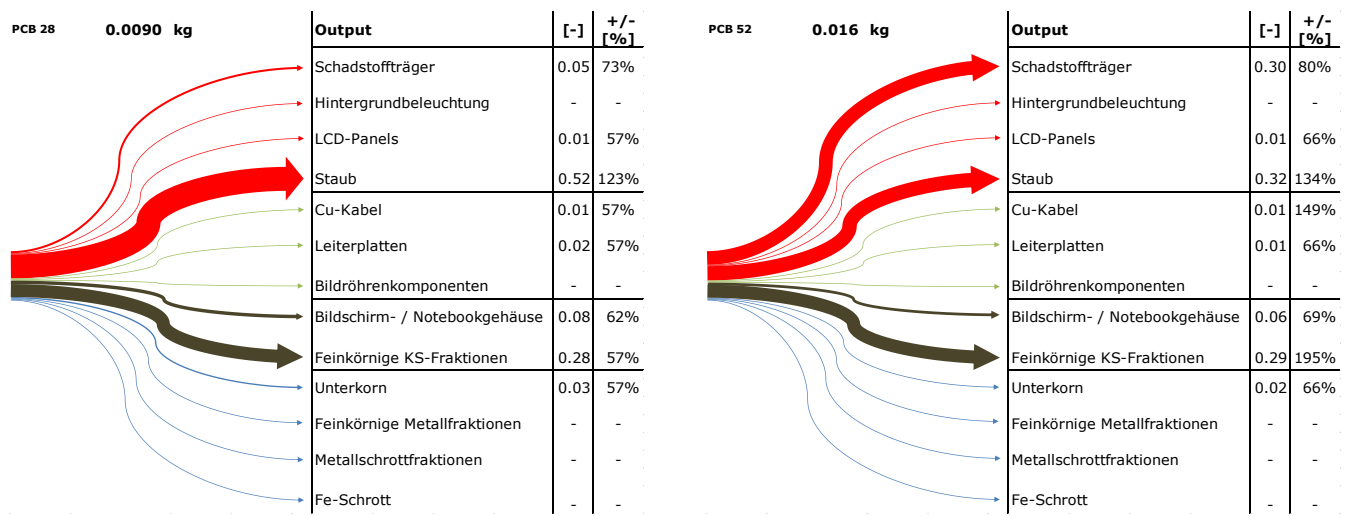
5.3.4 Transferkoeffizienten der PCB

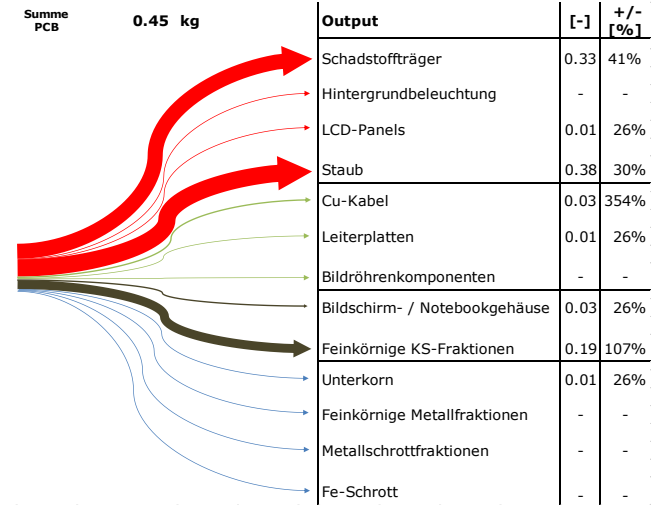
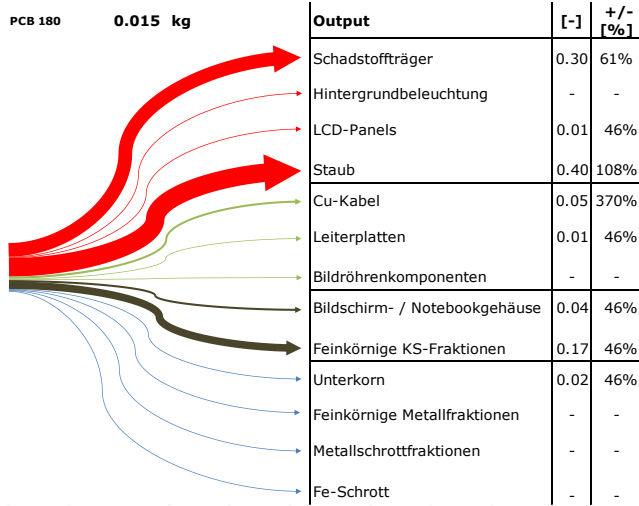
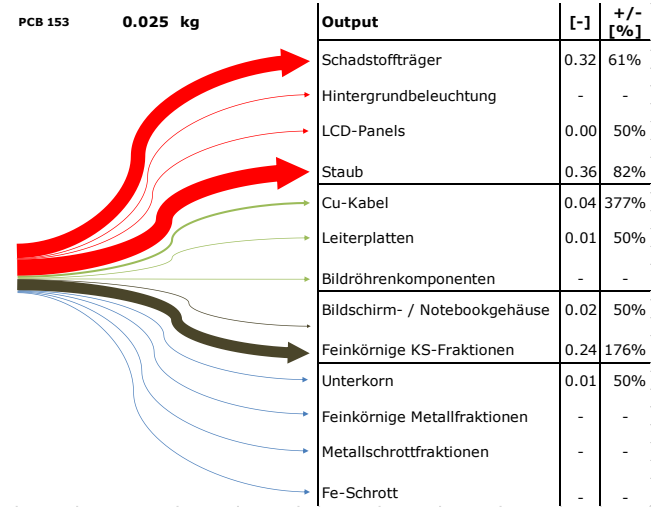
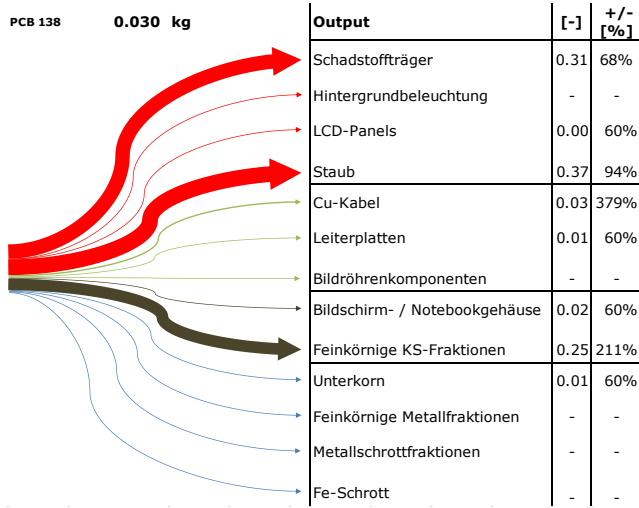
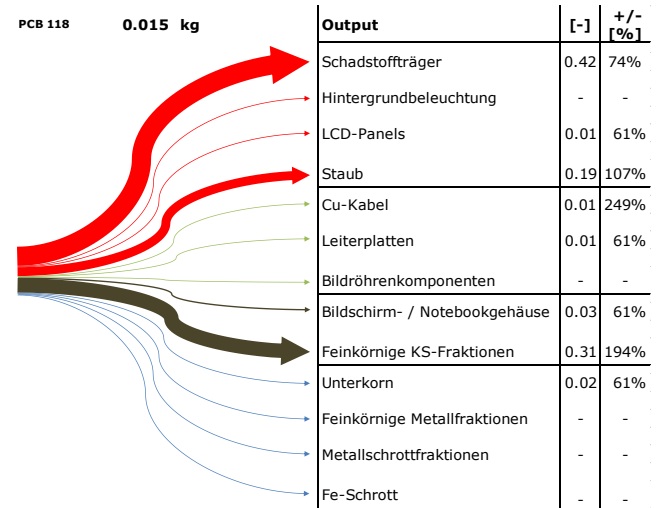
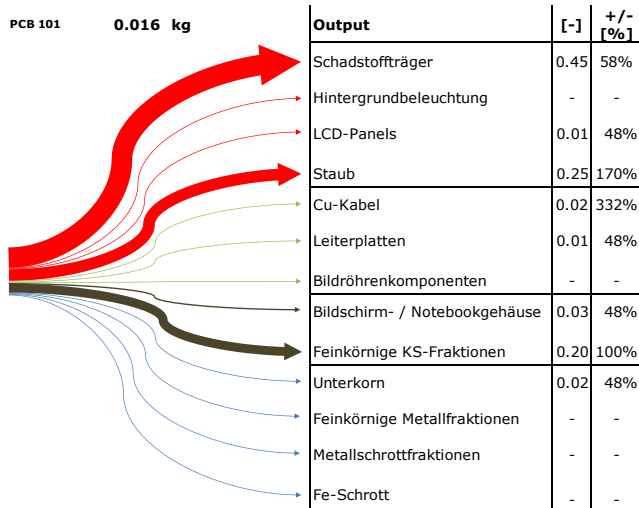
Die PCB gelangen zu je rund einem Drittel in den Staub und in die Schadstoffträger. Um die 20 % gelangen über die feinkörnige KS-Fraktion aus dem Aufbereitungsprozess. Einzig bei PCB 28 spielen die Schadstoffträger eine untergeordnete Rolle. Wie bei den neu untersuchten FS gilt auch bei den PCB, dass die Verteilung kritisch hinterfragt werden muss, da die Berechnungen hauptsächlich mit der halben BG durchgeführt wurden. Dies gilt hauptsächlich für die Kunststofffraktionen.

Wichtige Staub- und Schadstoffträger-Fraktion

Abb. 10 > Stoffflüsse und mittlere Transferkoeffizienten der PCB in aggregierten Outputfraktionen

Mit Angabe des 95 %-KI.





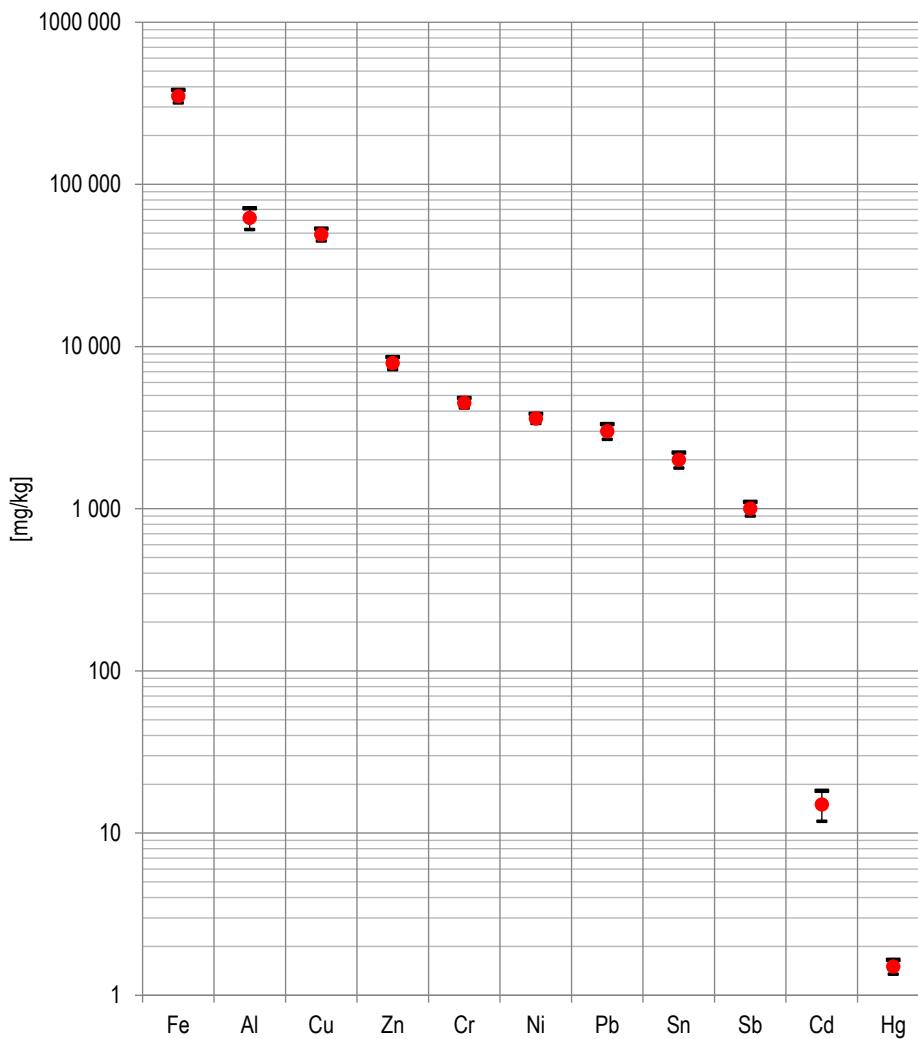
5.4 Konzentrationen im Input (EEKG-Schrott Schweiz 2011)

Aus den Konzentrationen in den Outputs sowie den Mengen der Output- und Inputgüter lassen sich die Konzentrationen im Input, sprich im Elektro- und Elektronikschrott der Schweiz berechnen (vgl. Kapitel 9.4). Eine ausführliche Tabelle mit den Werten sämtlicher untersuchter Elemente, FS und PCB findet sich im Anhang 9.12, Tab. 56.

5.4.1 Konzentration der Metalle und Antimon im Schweizer EEKG-Schrott

Die häufigsten drei Metalle im Schweizer EEKG-Schrott waren 2011 Fe (35 Gewichtsprozent), Al (gut 6 Gewichtsprozent) und Cu mit knapp 5 Gewichtsprozent. Sämtlich übrige Metalle liegen in einem Bereich von unter 1 % vor. Die Konzentration von Zn liegt bei 7900 mg/kg. Der Cr-Gehalt beträgt 4500 mg/kg, derjenige von Ni, Pb, Sn und Sb 3600, 3000, 2000 und 1000 mg/kg. Die Gehalte an den Schadstoffen Cd und Hg betragen 15, resp. 1,5 mg/kg. In Abb. 11 sind die Konzentrationen einander vergleichend gegenübergestellt (logarithmische Darstellung).

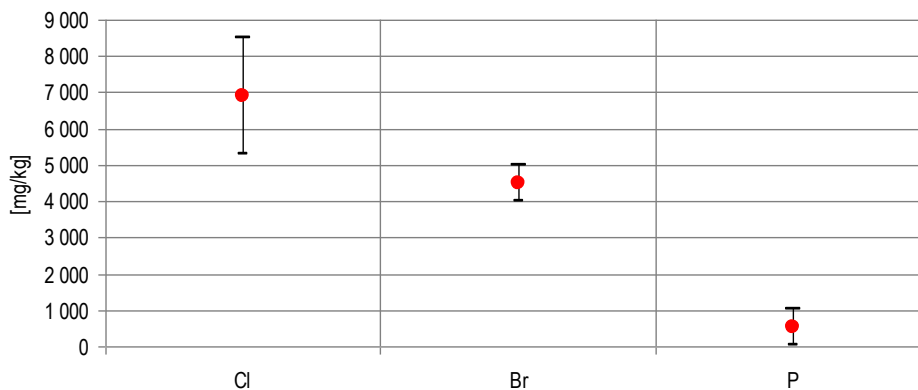
Fe, Al und Cu sind massenmässig die wichtigsten untersuchten Elemente

Abb. 11 > Konzentrationen der untersuchten Metalle und Antimon im EEGK-Schrott der Schweiz 2011*Mit Angabe des 95 %-KI. Logarithmische Darstellung.*

5.4.2 Konzentration der Nichtmetalle im Schweizer EEGK-Schrott

Der Unsicherheitsbereich bei P ist mit über 90 % hoch und liegt in der grossen Streuung der Messwerte begründet. Auch Cl weist mit einem Fehlerbereich von rund 25 % eine grosse Unsicherheit auf. Demgegenüber ist der Wert für Br relativ genau bezifferbar. Die Gehalte an den untersuchten Nichtmetalle liegen alle im Promillebereich des gesamten Inputs. In Abb. 12 sind die Werte in absteigender Form graphisch dargestellt.

Hohe Unsicherheit bei P und Cl

Abb. 12 > Konzentrationen der untersuchten Nichtmetalle im EEGK-Schrott der Schweiz 2011*Mit Angabe des 95 %-KI.*

5.4.3 Konzentration der FS im Schweizer EEGK-Schrott

Die am häufigsten vorgefundenen FS sind TBBPA, DecaBDE, DBDPE, BTBPE und OctaBDE. Diese fünf Stoffe sind in Gehalten >100 mg/kg vorhanden.

Fünf Stoffe mit Konzentrationen >100 mg/kg

Die Gehalte an PentaBDE und OctaBDE wurden aufgrund der Kongeneranteile gemäss La Guardia et al. (2006) berechnet (vgl. Anhang 9.13, Tab. 57). Da nicht alle Kongenere von OctaBDE bestimmt wurden und die Summe der einzelnen Kongenere nur 90 % beträgt, könnte die Konzentration um 10 % unterschätzt werden. Bei PentaBDE wird die Konzentration geringfügig überschätzt, weil die Summe der einzelnen Kongenere 107 % beträgt.

Zwecks besserer Übersichtlichkeit werden die einzelnen Kongenere von PentaBDE und OctaBDE nicht dargestellt.

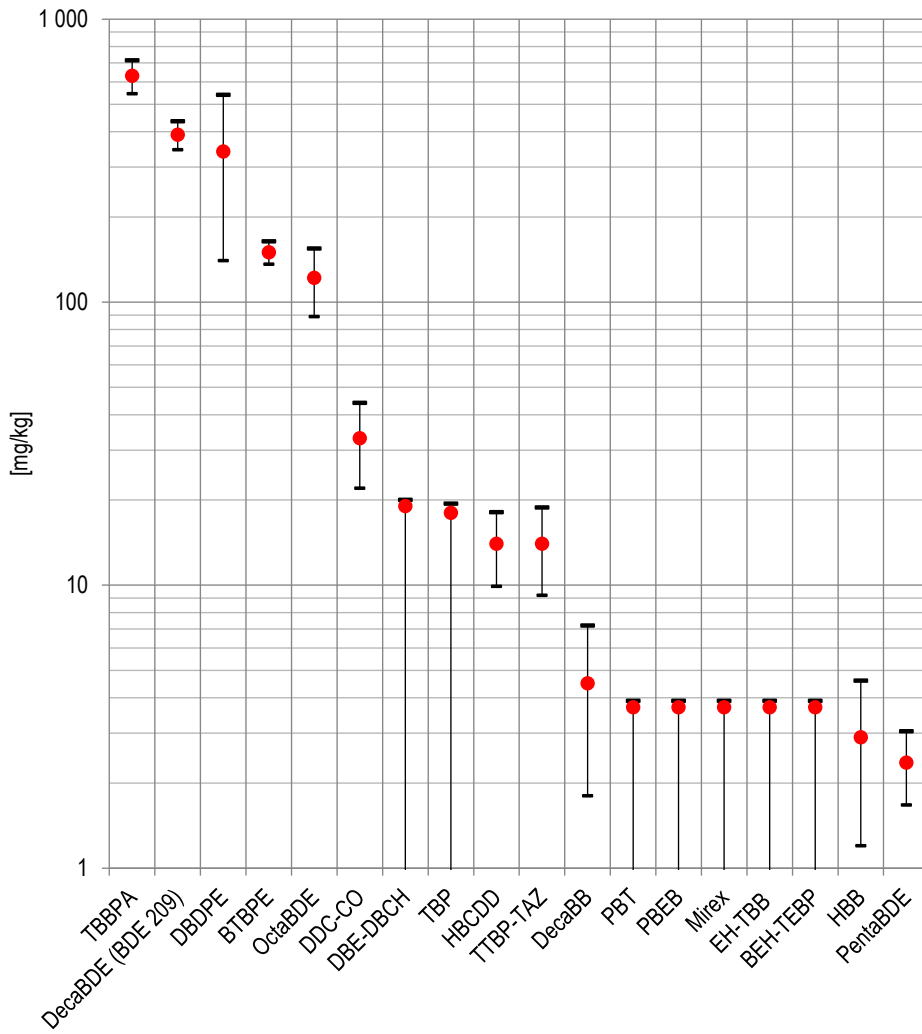
Einzelne Werte bei HBCDD, BDE 28 (TriBDE), DDC-CO und TTBP-TAZ lagen unter der NWG. Ausserdem praktisch alle untersuchten BDE-Kongenere bei den LCD-Modulen. In diesen Fällen wurde mit der halben BG $[(NWG/3 \times 10)/2]$ gerechnet. Die NWG dieser Stoffe finden sich im Anhang 9.8.4, Tab. 50.

Die Stoffe DBE-DBCH, TBP, PBT, PBEB, Mirex, EH-TBB und BEH-TEBP wurden mit einer deutlich höheren BG als bei den vorgenannten Substanzen bestimmt. Dabei lagen praktisch alle Analysenresultate darunter. Durch die Verrechnung mit der halben BG liegen die Konzentrationen nun vermutlich alle zu hoch. Die BG dieser Stoffe können der Tab. 48 im Anhang 9.8.3 entnommen werden.

Höhere Bestimmungsgrenze bei einigen «neuen» FS

Abb. 13 > Konzentrationen der untersuchten FS im EEGG-Schrott der Schweiz 2011

Mit Angabe des 95 %-KI. Logarithmische Darstellung.



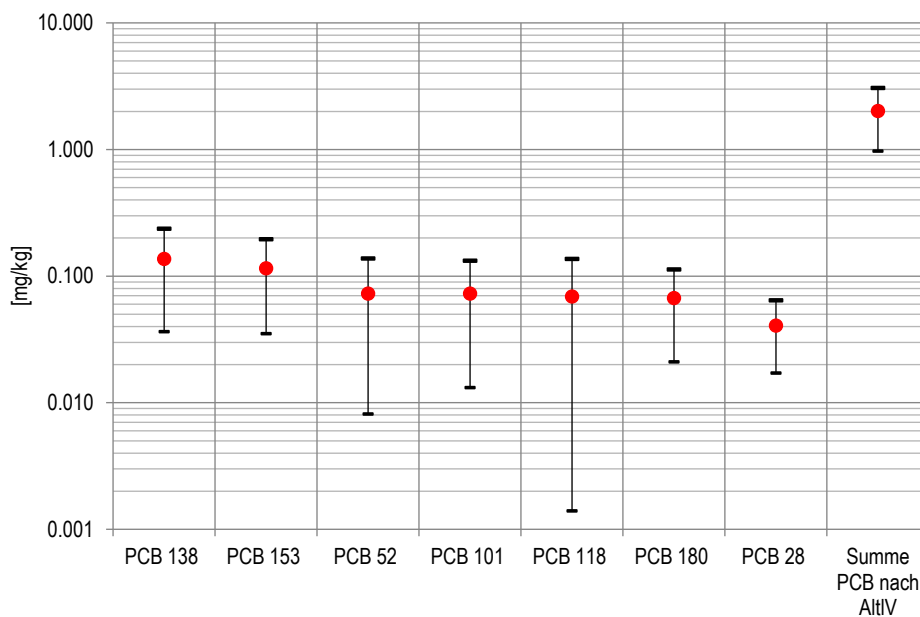
5.4.4 Konzentration der PCB im Schweizer EEKG-Schrott

Die Unsicherheiten bei den PCB-Konzentrationen sind allgemein sehr hoch. Das rührt daher, dass in einer Probe sämtliche untersuchten PCB unter der BG lagen und bei anderen Proben wiederum relativ hohe Werte festgestellt wurden (vgl. dazu Kapitel 5.2.1). Da bei Werten unter der BG mit der halben BG gerechnet wurde, weisen die Gehalte an Stoffen, die häufig um die BG schwanken, eine hohe Unsicherheit auf. Das ist mit Ausnahme des Staubes und der Schadstoffträger überall der Fall, wo PCB bestimmt wurden. In Abb. 14 sind die berechneten Konzentrationen in logarithmischer Form dargestellt. Die Summe PCB wird separat ausgewiesen.

Hohe Unsicherheiten bei den PCB

Abb. 14 > Konzentrationen der untersuchten PCB im EEKG-Schrott der Schweiz 2011

Mit Angabe des 95 %-KI. Logarithmische Darstellung.



5.5 Frachten im EEKG-Schrott der Schweiz 2011

Mit Hilfe der hier berechneten Konzentrationen für das Jahr 2011 und der Mengenangabe des jährlich anfallenden EEKG-Schrotts für das Jahr 2009 (vgl. Kapitel 3.1, Tab. 10) lässt sich eine grobe Abschätzung der jährlichen Stofffrachten der untersuchten Elemente angeben. Die Verteilung der Frachten spiegelt dabei die Verteilung der Konzentrationen wider. Für die Fehlerberechnung wurde von einem Fehler bei der Masse des EEKG-Schrotts von 20 % ausgegangen.

Frachtberechnung aus
Konzentration und Menge

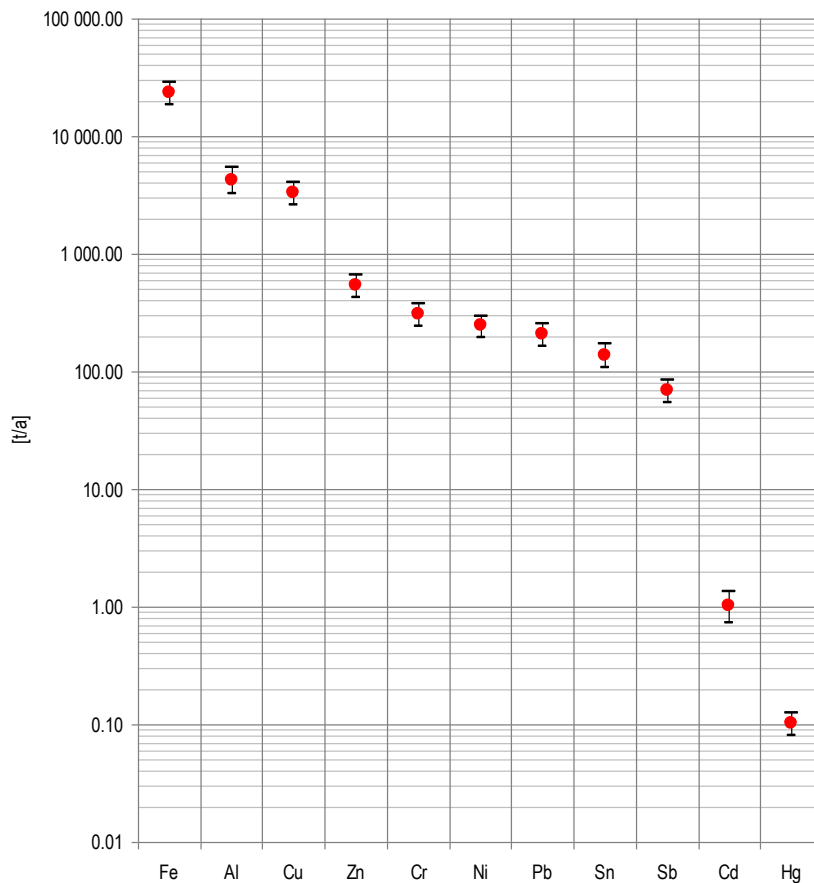
5.5.1 Stofffrachten der Metalle und Antimon aus dem Schweizer EEGK-Schrott

Die drei Elemente Fe, Al und Cu machen mit 24 000, 4300 und 3300 Jahrestonnen den mit Abstand grössten Stofffluss aus. Sie machen damit rund 45 % der Gesamtmasse von rund 70 000 t/a aus. Zn und Cr werden zu 300 bis 600 Tonnen pro Jahr umgesetzt. Auf über 200 Jahrestonnen belaufen sich auch die Stofffrachten von Ni und Pb. Von Sn werden 139 und von Sb 69 Tonnen pro Jahr umgesetzt, und die Frachten für Cd und Hg betragen 1,0 Jahrestonnen, resp. 100 kg pro Jahr.

Rund 45 % der Gesamtmasse aus Fe, Al und Cu

Abb. 15 > Stofffrachten der untersuchten Metalle und Antimon im EEGK-Schrott der Schweiz 2011

Mit Angabe des 95 %-KI. Logarithmische Darstellung.

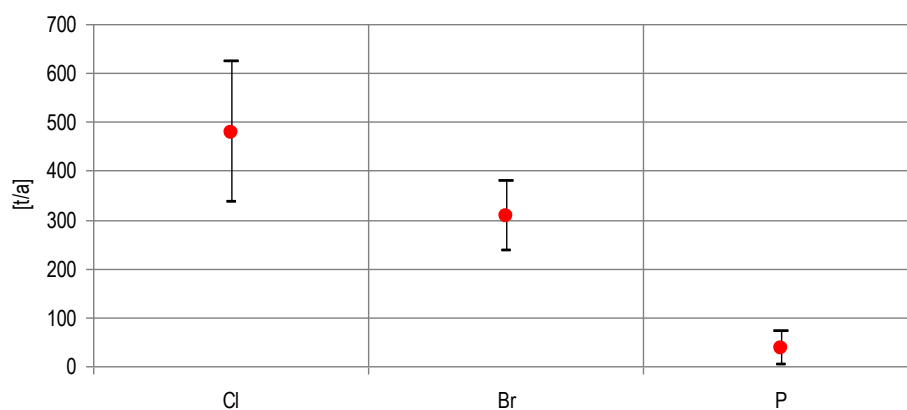


5.5.2 Stofffrachten der Nichtmetalle aus dem Schweizer EEKG-Schrott

Die Stofffrachten von Cl, Br und P zeigt die Abb. 16. Die mittleren Jahresmengen für Cl, Br und P betragen 480, 310 und 40 Jahrestonnen.

Abb. 16 > Stofffrachten der untersuchten Nichtmetalle im EEKG-Schrott der Schweiz 2011

Mit Angabe des 95 %-KI.



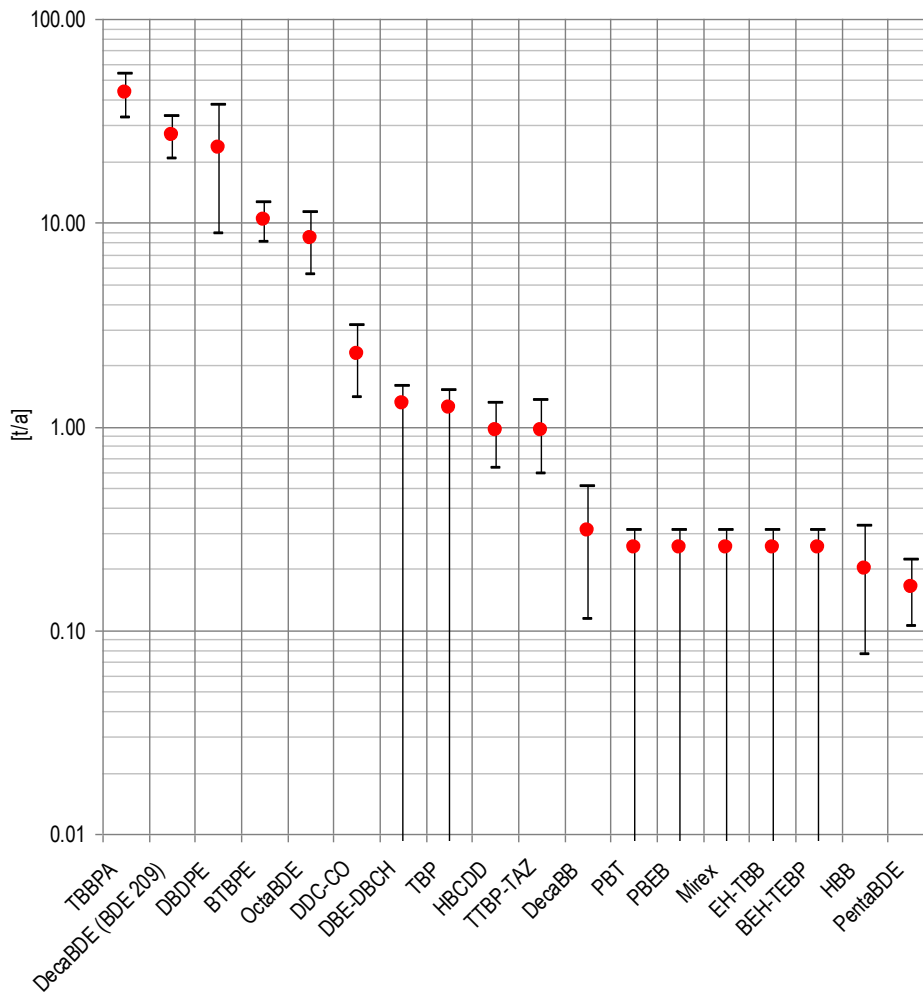
Die grossen Fehlerbereiche aus der Konzentrationsbestimmung spielen auch in die Frachtberechnung hinein.

5.5.3 Stofffrachten der FS aus dem Schweizer EEKG-Schrott

Zur besseren Übersichtlichkeit werden bei den Stofffrachten die Kongenere von PentaBDE und OctaBDE nicht einzeln aufgeführt.

Von den in den höchsten Konzentrationen vorliegenden FS TBBPA, DecaBDE und DBDPE werden 43, 27, resp. 24 Jahrestonnen umgesetzt. Von BTBPE und OctaBDE fallen immer noch je rund 10 Tonnen pro Jahr an. Von DDC-CO fallen gut 2 Tonnen, von HBCDD und TTBP-TAZ je 1 Tonne pro Jahr an. Die Werte von DBE-DBCH und TBP sind unsicher, da sie mit einer deutlich höheren Bestimmungsgrenze bestimmt wurden und alle Werte darunter lagen. Gerechnet wurde dann wieder mit der halben BG. Das gilt auch für PBT, PBEB, Mirex, EH-TBB und BEH-TEBP (vgl. auch Kapitel 5.4.3).

TBBPA, DecaBDE und DBDPE liefern die Hauptfracht der untersuchten FS

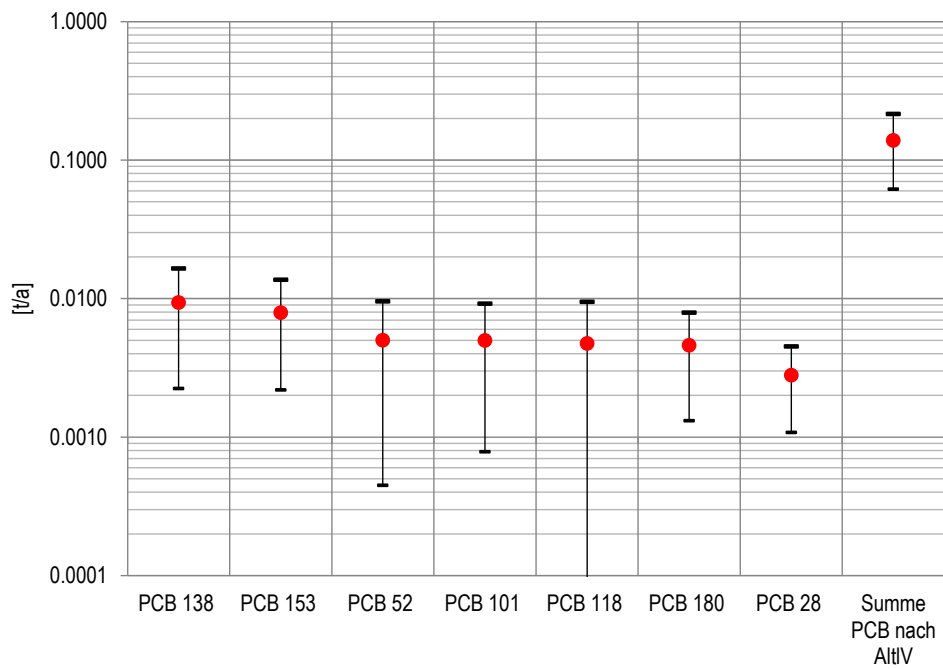
Abb. 17 > Stofffrachten der untersuchten FS im EEGK-Schrott der Schweiz 2011*Mit Angabe des 95 %-KI. Logarithmische Darstellung.***5.5.4 Stofffrachten der PCB im Schweizer EEGK-Schrott**

Die Problematik der sehr heterogenen Verteilung der PCB im Haupteintragspfad (Kondensatoren) und die Tatsache, dass etliche Konzentrationen unter der BG lagen, machen die Angaben zu den Stofffrachten sehr unsicher. Überschlagsmässig kann von einer Jahresmenge von gut 100 kg bei der Summe PCB ausgegangen werden. Von den einzelnen gemessenen PCB-Kongeneren dürften Jahresmengen zwischen 1 und 10 kg vorliegen.

Jahresmenge von rund 140 kg/a

Abb. 18 > Stofffrachten der untersuchten PCB im EEGK-Schrott der Schweiz 2011

Mit Angabe des 95 %-KI. Logarithmische Darstellung.



6 > Diskussion der Resultate

6.1 Einfluss einzelner Fraktionen

Für Frachten einzelner Elemente und Verbindungen sind gewisse Fraktionen überdurchschnittlich relevant. Das sind z. B. die Kondensatoren für PCB oder die Hintergrundbeleuchtungen in LCD-Bildschirmen für Hg. Die folgenden Unterkapitel gehen auf die Bedeutung einzelner Fraktionen ein. Um den Anteil einzelner Fraktionen an den einzelnen Stoffflüssen ausweisen zu können, wurden bei den Berechnungen die Massen der nicht betrachteten Fraktionen auf null gesetzt und so die Konzentration bestimmt. Dabei kann sowohl die Masse eines Inputs wie z. B. Batterien wie auch eines Outputs wie z. B. sämtliche Kunststoffe (KS) mit Null gleichgesetzt werden. Die Angabe «nur Batterien» z. B. gibt also die theoretischen Stoffflüsse des EEKG-Schrotts an, wenn darin nur die Batterien enthalten wären. Mit diesem Vorgehen kann der Einfluss einzelner Frachten bestimmt werden. Im Anhang 9.11 werden demgegenüber die fiktiven Konzentrationen des EEKG-Schrotts ausgewiesen, wenn die betrachteten Fraktionen nicht enthalten wären.

«Null-Setzen» einzelner Fraktionen

6.1.1 Metalle

Bei den untersuchten Metallen spielen die Elemente Hg und Cd eine spezielle Rolle. Sie lassen sich auf einige wenige Eintragspfade eingrenzen.

Cadmium

Abb. 19 zeigt die jährliche Schweizer Cd-Fracht im EE-Schrott. Es werden unterschiedliche Fälle dargestellt: falls alle untersuchten Fraktionen betrachtet werden («alle Fraktionen») und nur mit jeweils einer der untersuchten Fraktion (z. B. «nur Batterien»). Wie man sieht, stammt der grösste Teil des Cd aus den drei Kunststoff-Outputs, gefolgt von den Batterien. Dabei stammt das Cd aber offensichtlich nicht von den Gehäusen von TV- und PC-Monitoren und Notebooks («nur Gehäuse»), sondern aus anderen Gehäusen und Kunststoffteilen. Durch die manuelle Auslese der Batterien wird rund 30% des Cd-Gehaltes in den Outputprodukten vermieden.

KS ist Haupteintragspfad für Cd

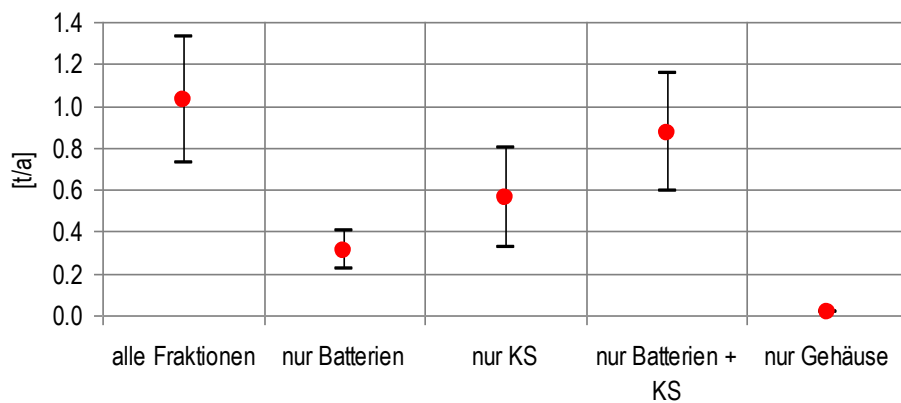
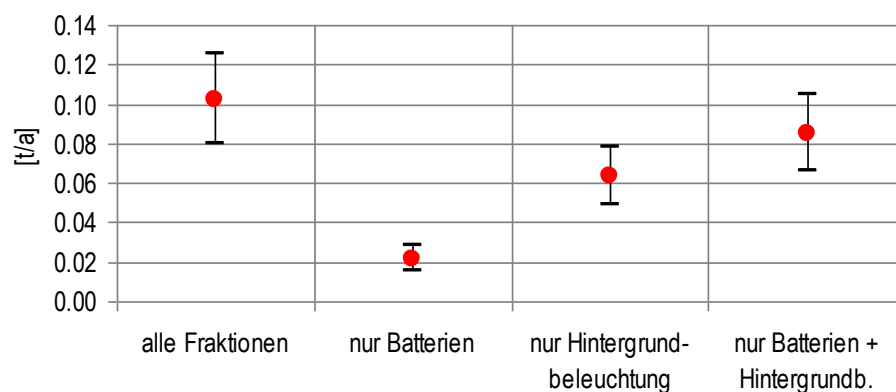
Abb. 19 > Fraktionseinflüsse beim Element Cd*Mit Angabe des 95 %-KI.***Quecksilber**

Abb. 20 zeigt, dass rund 20 % des Hg aus der Fraktion der Batterien und gut 60 % aus den Hintergrundbeleuchtungen von LCD-Bildschirmen und Notebooks stammen. Durch die manuelle Auslese dieser beiden Fraktionen können demnach über 80 % der Hg-Fracht von der mechanischen Aufbereitung ferngehalten werden. Diese Entfrachtung ist also hoch effektiv.

CCFL sind Haupteintragspfad für Hg

Bei den übrigen Metallen lässt sich keine so eindeutige Zuordnung feststellen. Einzig beim Halbmetall Sb weisen die Kunststoff-Outputs einen beachtlichen Anteil von gut 30 % des Sb auf.

Abb. 20 > Fraktionseinflüsse beim Element Hg*Mit Angabe des 95 %-KI.*

6.1.2 Flammenschutzmittel

Bei den Flammenschutzmitteln interessieren einerseits die fünf bisher untersuchten Stoffe DecaBDE, PentaBDE, OctaBDE, TBBPA und HBCDD. Andererseits wurden diesmal zusätzlich auch «neue» Flammenschutzmittel wie BTBPE, DDC-CO (Dechloran Plus) oder TTBP-TAZ untersucht. Verglichen werden die Beiträge der CRT- und LCD-Gehäuse inklusive der Notebooks. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die CRT-Geräte älter sind als die LCD-Geräte. Die Fehlerbereiche bei den Flammenschutzmitteln sind allgemein grösser als bei den Metallen. Damit sind die meisten festgestellten Unterschiede nicht signifikant.

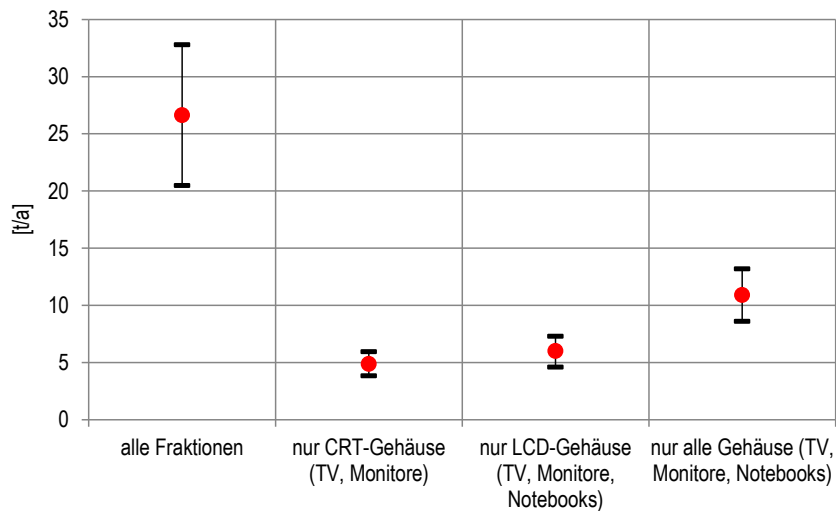
«Alte» Flammenschutzmittel

Die Analyse für DecaBDE in Abb. 21 zeigt, dass kein signifikanter Unterschied zwischen der Anwendung von DecaBDE bei älteren CRT- und neueren LCD-Geräten besteht. Je rund 20 % der DecaBDE-Einträge stammen aus den Gehäusen dieser Geräte. Der Beitrag aller Gehäuse (CRT, LCD und Notebooks) an die Frachten von DecaBDE im EEKG-Schrott liegt bei rund 40 %.

Hoher Beitrag der Gehäuse
an DecaBDE

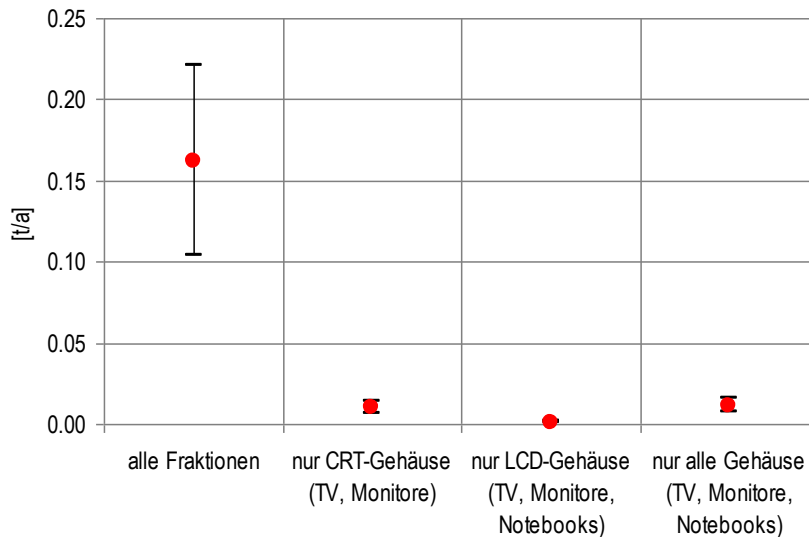
Abb. 21 > Fraktionseinflüsse bei DecaBDE

Mit Angabe des 95 %-KI.



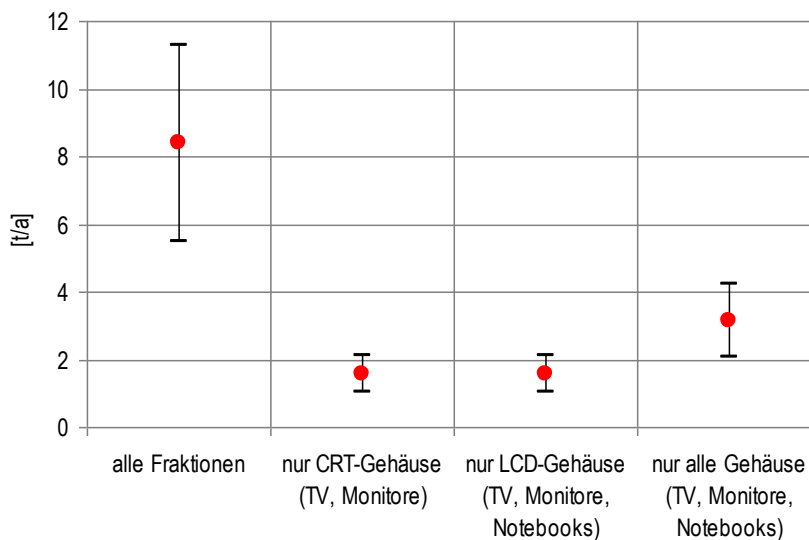
Wie Abb. 22 zeigt, gibt es auch bei PentaBDE keine signifikanten Unterschiede zwischen verschiedenen Bildschirmgenerationen. Tendenziell stammt das PentaBDE aber eher aus den älteren CRT-Geräten. Aufgrund der geringen Stoffflüsse aus den Gehäusen muss das PentaBDE aus den Kunststoffanteilen der übrigen Geräte stammen. Gemäss der UNIDO (2012) wurde PentaBDE neben seiner Hauptverwendung in Polyurethanschäumen unter anderem auch in Leiterplatten und Kabelummantelungen eingesetzt.

PentaBDE stammt kaum aus
Gehäusen

Abb. 22 > Fraktionseinflüsse bei PentaBDE*Mit Angabe des 95 %-KI.*

Bei OctaBDE zeigt sich ein anderes Bild: Ebenfalls bestehen keine Unterschiede zwischen der älteren und neueren Generation von Bildschirmgehäusen, insgesamt aber ein viel grösserer Anteil am Gesamteintrag, nämlich je rund 20%. Von den übrigen Kunststoffen stammt demnach rund 60% des OctaBDE. Gemäss Literatur war der Haupteinsatzbereich von OctaBDE ABS-Kunststoffe, welches insbesondere für Gehäuse von CRT-Bildschirmen und Bürogeräten verwendet wurden (UNIDO 2012).

Hoher Anteil der Gehäuse
bei OctaBDE

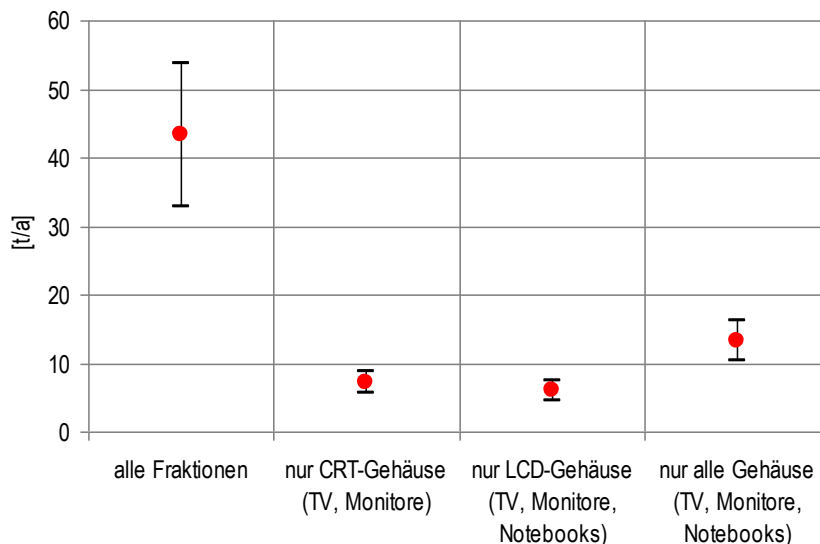
Abb. 23 > Fraktionseinflüsse bei OctaBDE*Mit Angabe des 95 %-KI.*

Auch bei TBBPA gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen älteren und neueren Gehäusetypen. Die älteren Geräte enthalten eher grössere Mengen TBBPA als die neueren. Der Gesamtanteil am Eintrag beträgt hier rund 30 %. Den grössten Anteil an der Verwendung von TBBPA macht die Verwendung als reaktives Intermediat für Kunstharze zur Herstellung von Leiterplatten aus, gefolgt vom Einsatz als additives Flammschutzmittel in ABS-Kunststoff (European Chemicals Bureau 2006). Aufgrund des Einsatzes als reaktives Flammschutzmittel in Leiterplatten, sind dort nur noch Spuren der Ausgangssubstanz vorhanden.

Deutlicher Beitrag der Gehäuse
bei TBBPA

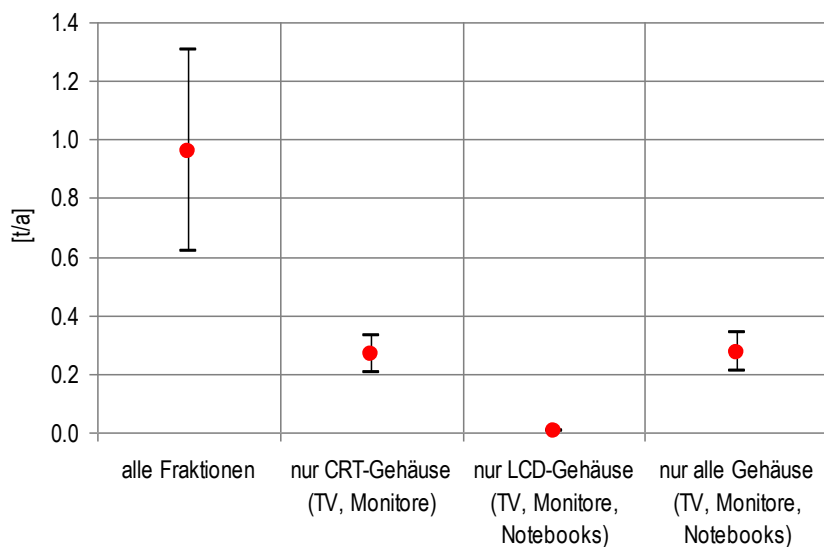
Abb. 24 > Fraktionseinflüsse bei TBBPA

Mit Angabe des 95 %-KI.



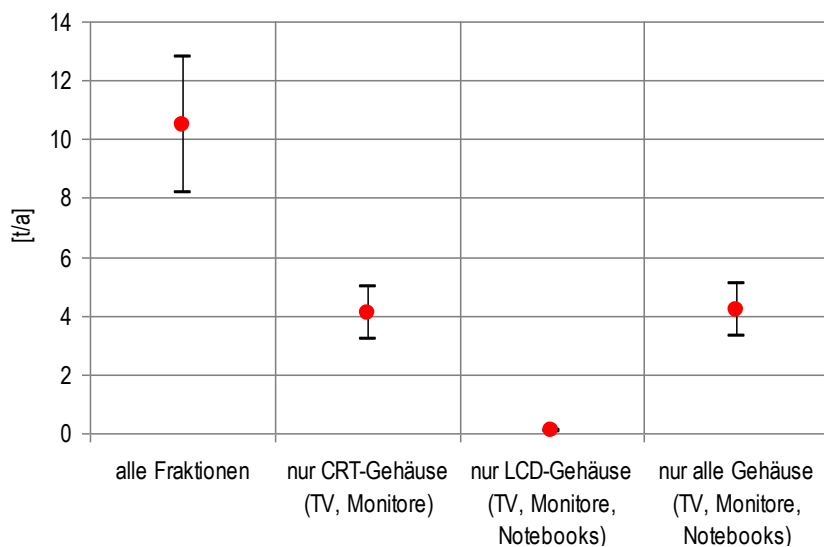
Bei HBCDD lässt sich ein deutlicher und signifikanter Unterschied bei den Frachten aus CRT- und LCD-Bildschirmen erkennen. Insgesamt stammen rund 30 % des HBCDD aus den untersuchten CRT-Gehäusen. Der Haupteintragspfad für HBCDD führt demnach aber über andere Kunststoffe.

Hoher Anteil der CRT-Gehäuse

Abb. 25 > Fraktionseinflüsse bei HBCDD*Mit Angabe des 95 %-KI.***«Neue» Flammschutzmittel**

Beim neu untersuchten Stoff BTBPE zeigen sich deutliche Unterschiede. Dieser Stoff wird in den neueren Geräten praktisch nicht mehr eingesetzt. Vom gesamten Aufkommen stammt rund 40 % aus den CRT-Gehäusen. Die Unterschiede sind hier signifikant.

Hoher Anteil der CRT-Gehäuse bei BTBPE

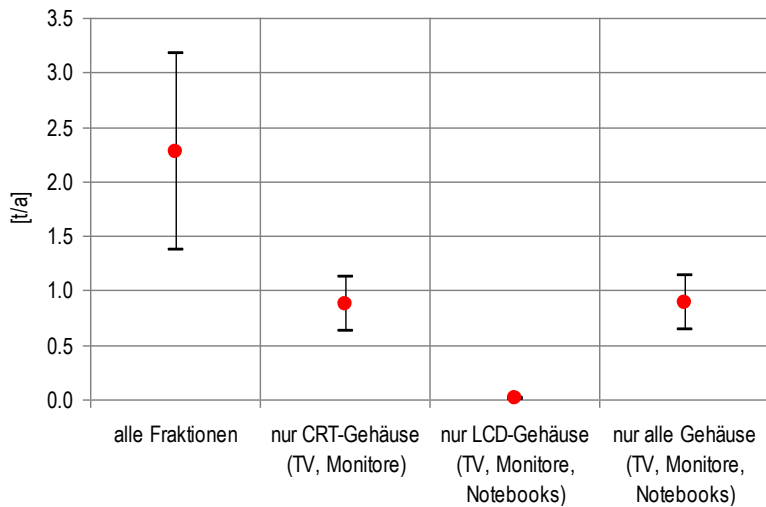
Abb. 26 > Fraktionseinflüsse bei BTBPE*Mit Angabe des 95 %-KI.*

Ein ähnliches Bild bietet sich bei DDC-CO (Dechloran Plus). Hier stammen ebenfalls rund 40 % der Fracht aus den CRT-Gehäusen, während von den LCD-Gehäusen nur 1 % kommen.

Hoher Anteil der CRT-Gehäuse bei DDC-CO

Abb. 27 > Fraktionseinflüsse bei DDC-CO

Mit Angabe des 95 %-KI.

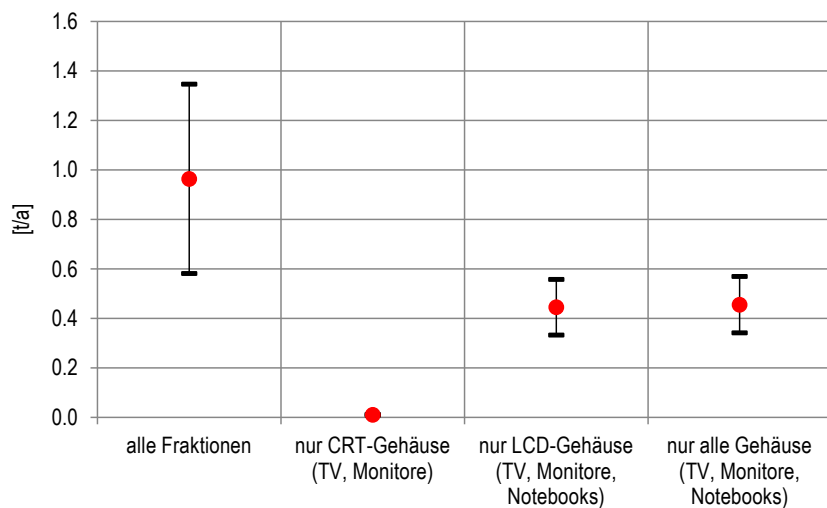


Bei TTBP-TAZ ist es genau umgekehrt. Hier stammt der überwiegende Anteil von den neueren LCD-Gehäusen, nämlich rund 45 %, gegenüber nur 1 % von den CRT-Gehäusen. TTBP-TAZ scheint ein Ersatzprodukt für nicht mehr eingesetzte FS zu sein.

Hoher Anteil der LCD-Gehäuse bei TTBP-TAZ

Abb. 28 > Fraktionseinflüsse bei TTBP-TAZ

Mit Angabe des 95 %-KI.



6.1.3 PCB

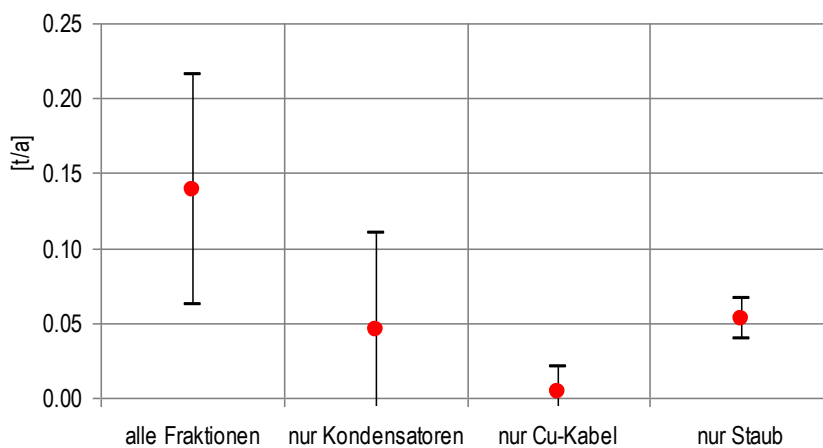
Bei den PCB wird stellvertretend die Summe PCB betrachtet. Wie Abb. 29 zeigt, sind die Kondensatoren der Haupteintragspfad der PCB. Der nächstwichtigste separate Eintragspfad sind die Cu-Kabel, die aber nur rund 3 % des Eintrags ausmachen. Durch die manuelle Entfernung der Kondensatoren werden ein Drittel der PCB vom mechanischen Aufbereitungsprozess ferngehalten. Wie Abb. 29 ebenfalls zeigt, finden sich bezogen auf den Input rund 40 % der PCB im Staub-Output der Anlage. Da die Kondensatoren aber manuell ausgeschieden werden, entspricht die PCB-Menge im Staub 93 % der restlichen PCB-Menge bezogen auf die Outputs.

Hoher Eintrag über die Kondensatoren

Da bei den Messungen bei Werten unter der Bestimmungsgrenze (BG) mit der halben NWG gerechnet wurde und die Werte sehr häufig unter der BG lagen, werden die tatsächlich vorhandenen PCB-Gehalte wohl überschätzt. Die Frachtanteile der Kondensatoren und des Staubs dürften demnach in Wirklichkeit noch höher ausfallen.

Abb. 29 > Fraktionseinflüsse bei den PCB

Mit Angabe des 95 %-KI.



6.2 Vergleich der Konzentrationen im EE-Schrott 2003 und 2011

Eine wichtige Fragestellung betrifft den Vergleich der Konzentrationen im EE-Schrott 2003 und 2011. Einerseits lässt sich so die Wirksamkeit von gesetzlichen Massnahmen überprüfen, andererseits werden Veränderungen in der Produktzusammensetzung aufgrund von technischen Veränderungen sichtbar. In den nachfolgenden Abb. 30 bis Abb. 36 werden die Mittelwerte samt 95 %-KI und den relativen Fehlern der Untersuchungen 2003 und 2011 gegenübergestellt. Eine tabellarische Gegenüberstellung der Resultate findet sich im Anhang 9.13, Tab. 57.

Wirkung von regulatorischen Massnahmen und technischer Entwicklung

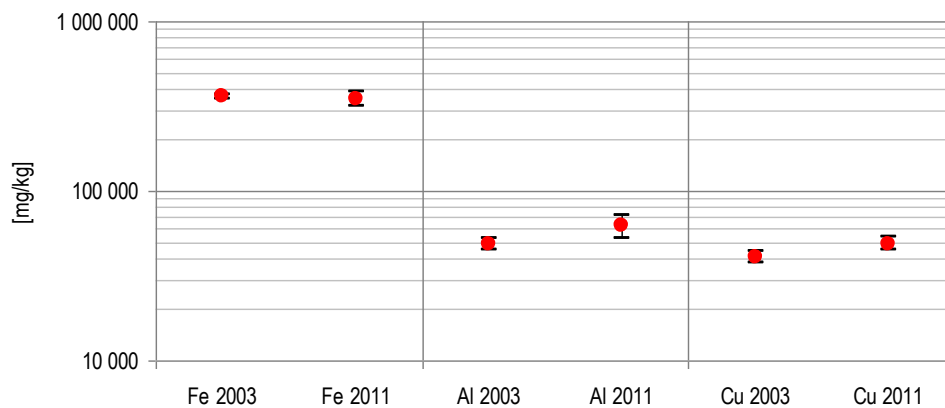
6.2.1 Entwicklung bei den Metallen und Antimon

Bei den Elementen mit den grössten Konzentrationen traten einzig bei Cu knapp signifikante Unterschiede auf. Während sich der Mittelwert des Al-Gehalts von 5 % auf 6 % erhöhte, blieb der Fe-Gehalt praktisch konstant und der Cu-Gehalt nahm um 20 % auf 5 Gewichtsprozent zu. Die Zunahme des Cu-Anteils kann so interpretiert werden, dass der Anteil an hochwertigen elektronischen Bauteilen ebenfalls zugenommen hat.

Zunahme der Cu-Konzentration

Abb. 30 > Vergleich der Gehalte an Cu, Al und Fe im EEG-Schrott 2003 und 2011

Mit Angabe des 95 %-KI. Logarithmische Darstellung.

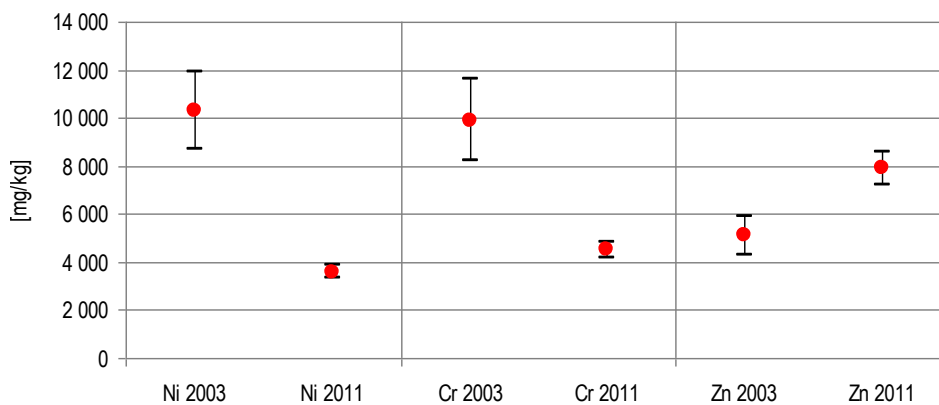


Bei Ni, Cr und Zn gibt es signifikante Unterschiede. Während die Ni-Konzentration um mehr als die Hälfte auf einen Gewichtsanteil von knapp 0,4 % zurückging, nahm der Zn-Gehalt um 55 % zu. Die Cr-Konzentration nahm um 55 % auf jetzt noch knapp 0,5 Gewichtsprozent ab. Sie liegt nun etwa auf demselben Niveau wie bei Zn. Die rückläufigen Konzentrationen von Ni und Cr dürften teilweise durch die Beschränkungen in der ChemRRV bzw. RoHS-Richtlinie zustande gekommen sein, wobei bei Ni die Cd-Beschränkungen auf NiCd-Akkumulatoren gewirkt haben. Die Zunahme von Zn könnte einerseits mit dem Einsatz in alternativen Akkumulatoren zusammenhängen. Andererseits haben wohl die Beschränkungen von Cr(VI) in der ChemRRV bzw. der RoHS-Richtlinie der Verzinkung gegenüber der Verchromung Auftrieb gegeben.

Grosse Veränderungen bei Ni, Cr und Zn

Abb. 31 > Vergleich der Gehalte an Ni, Zn und Cr im EEGK-Schrott 2003 und 2011

Mit Angabe des 95 %-KI.

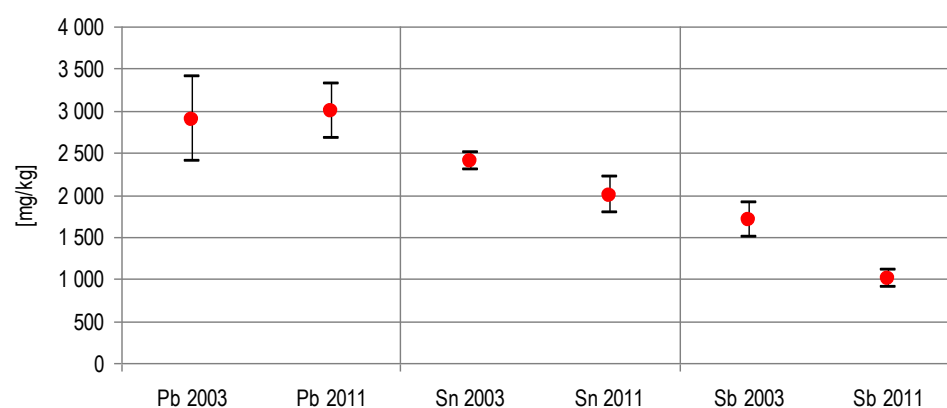


Deutliche und signifikante Konzentrationsabnahmen weisen die Elemente Sb und Sn auf. Demgegenüber blieben die Pb-Gehalte praktisch unverändert. Die Gehalte an Sb, Sn und Pb bewegen sich heute bei 0,1, 0,2 und 0,3 Gewichtsprozenten. Da Sb und Sn zusammen in Displays verwendet werden, kann ein Rückgang dieser Anwendung vermutet werden. Der Rückgang der Sb-Konzentration kann aber auch auf die Substitution von Antimon(V)-oxid bei der Anwendung als Synergist von Flammschutzmitteln hinweisen.

Rückgang der Konzentrationen von Sn und Sb

Abb. 32 > Vergleich der Gehalte an Sb, Sn und Pb im EEGK-Schrott 2003 und 2011

Mit Angabe des 95 %-KI.



Die grösste Veränderung bei den Metallen trat mit einer Veränderung von -92% bei Cd auf (vgl. Abb. 33). Der immense Rückgang der Konzentration ist überwiegend auf den Rückgang der NiCd-Akkumulatoren zurückzuführen. Während bei der Untersuchung 2003 noch von einem Cd-Gehalt von rund $38\,000\text{ mg/kg}$ ($\pm 50\%$) ausgegangen wurde, wurde in der aktuellen Untersuchung aufgrund von aktuellen Studien und eines eigenen Kleinversuchs auf der Anlage mit einem Gehalt von $2\,000\text{ mg/kg}$ ($\pm 20\%$) gerechnet.

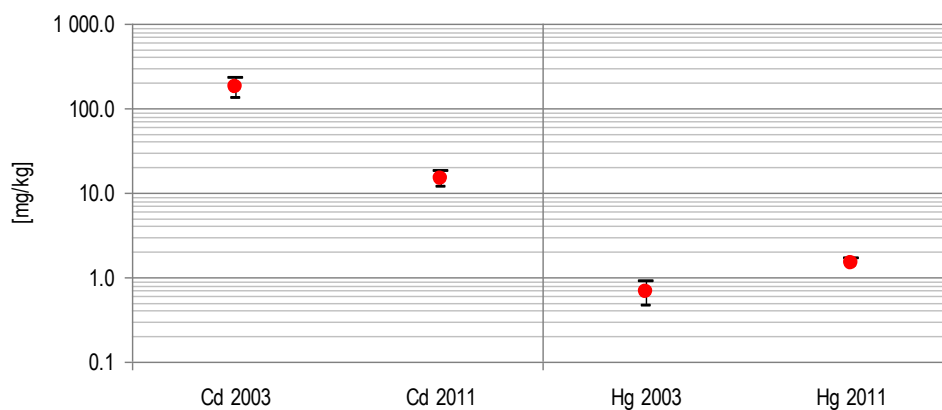
Sehr starker Rückgang der Cd-Konzentration

Die auf den ersten Blick dramatische Zunahme von Hg um 120 % auf 1,5 mg/kg ist durch die starke Zunahme der LCD-Bildschirme und Notebooks erklärbar. Da die Hintergrundbeleuchtungsröhren aber separat entsorgt werden, ist die Zunahme der Hg-Konzentration nicht mit einer entsprechenden Freisetzung verbunden.

Sehr starke Erhöhung der Hg-Konzentration

Abb. 33 > Vergleich der Gehalte an Hg und Cd im EEGK-Schrott 2003 und 2011

Mit Angabe des 95 %-KI. Logarithmische Darstellung.



6.2.2 Entwicklung bei den Nichtmetallen

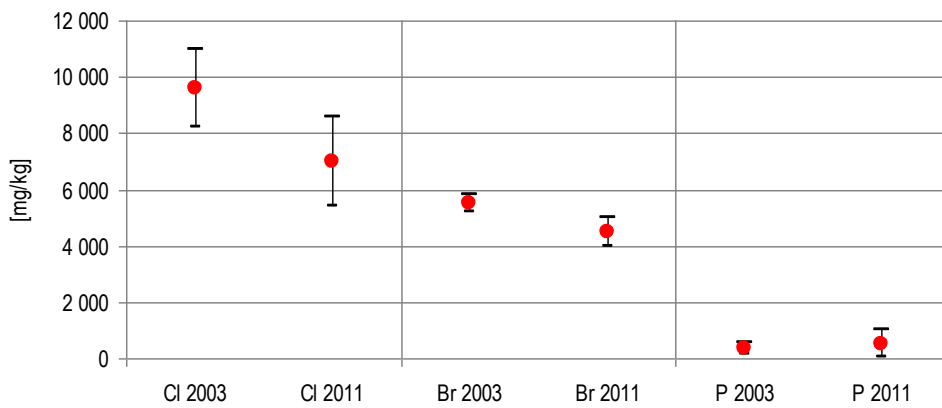
Sowohl Br wie auch Cl weisen deutliche Konzentrationsabnahmen auf. Bei Cl sind sie infolge der grossen Fehlerbereiche allerdings knapp nicht signifikant. Der Mittelwert der Gehalte an P nahm um 47 % zu. Die Unterschiede im P-Gehalt sind aber infolge der sehr grossen Unsicherheiten ebenfalls nicht signifikant.

Grosse Veränderungen bei Br, Cl und P

Der Rückgang der Br-Gehalte um knapp 20 % lässt auf einen Rückgang des Einsatzes von FS schliessen. Die Konzentrationsabnahmen bei den FS scheint diese Aussage zu stützen (vgl. Kapitel 6.2.3, Abb. 35). Allerdings können nur diejenigen FS verglichen werden, welche auch in der Studie von 2003 analysiert worden waren.

Abb. 34 > Vergleich der Gehalte an P, Br und Cl im EEKG-Schrott 2003 und 2011

Mit Angabe des 95 %-KI.



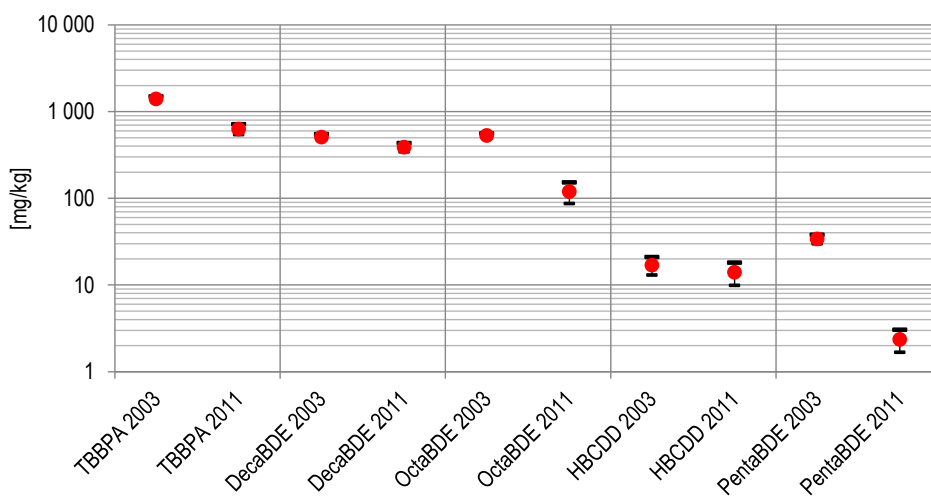
6.2.3 Entwicklung bei den Flammschutzmitteln

Sehr grosse Unterschiede treten bei den FS PentaBDE und OctaBDE auf, die 2011 gegenüber 2003 deutlich geringeren Konzentrationen zeigen. Dies zeigt, dass die ergriffenen regulatorischen Massnahmen wirken (PentaBDE: -93 %, OctaBDE: -85 %). Bei den zum Zeitpunkt der Untersuchung nicht geregelten Stoffen DecaBDE und TBBPA sind die Unterschiede deutlich geringer, aber immer noch signifikant (TBBPA: -55 %, DecaBDE: -24 %). Bei HBCDD ist kein signifikanter Unterschied feststellbar. Der Rückgang des Mittelwerts beträgt 18 %.

Sehr grosse
Konzentrationsabnahme bei
PentaBDE und OctaBDE

Abb. 35 > Vergleich der FS-Gehalte im EEKG-Schrott 2003 und 2011

Mit Angabe des 95 %-KI. Logarithmische Darstellung.



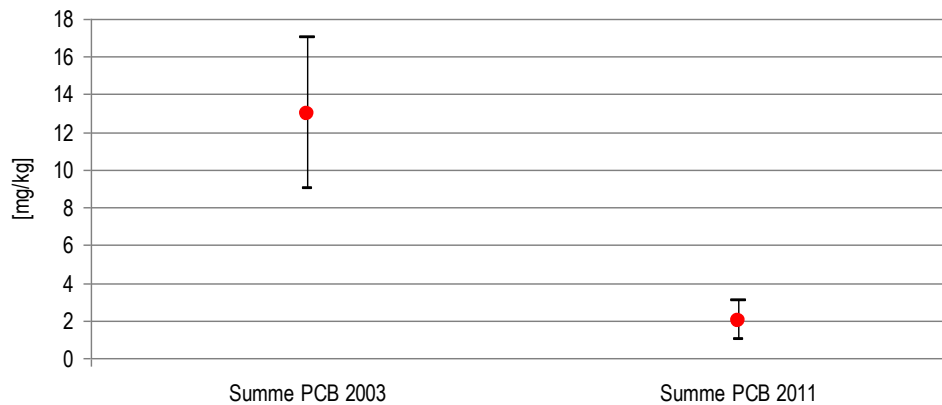
6.2.4 Entwicklung bei den PCB

Der Rückgang bei den Konzentrationen der PCB ist mit -85% ausserordentlich hoch. Wie Abb. 29 in Kapitel 6.1.3 zeigt, stammt der überwiegende Anteil der PCB von den Kondensatoren. Aufgrund der Wahrscheinlichkeit, dass die PCB-Gehalte überschätzt werden (vgl. Kapitel 6.1.3), und der Vermutung, dass nur noch wenige Kondensatoren PCB enthalten (vgl. Kapitel 5.2.1), könnten die Unterschiede gegenüber 2003 sogar noch grösser sein.

Sehr grosse Konzentrations-
abnahme bei den PCB

Abb. 36 > Vergleich der PCB-Gehalte im EEGK-Schrott 2003 und 2011

Mit Angabe des 95 %-KI.



6.3 Vergleich der Resultate mit anderen neueren Studien

Der Vergleich mit Resultaten anderer Studien wird für LCD-Hintergrundbeleuchtungen und Gehäuse von CRT-PC- und -TV- sowie LCD-TV-Geräten durchgeführt.

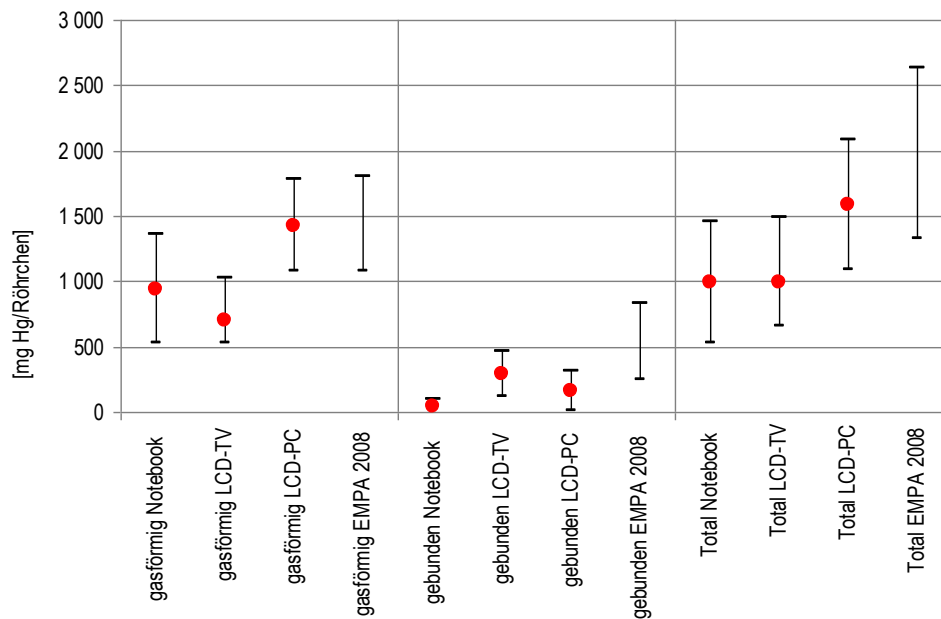
6.3.1 Vergleich der Resultate der Hg-Gehalte von Hintergrundbeleuchtungen

Die in dieser Studie verwendeten Werte der Hg-Gehalte von CCFL-Röhrchen unterscheiden sich nicht grundlegend von bisherigen Annahmen. Allerdings handelt es sich dabei um einen Kleinversuch, bei dem die Aufteilung der Beleuchtungstypen (1, 2 oder 3 CCFL-Röhrchen pro Beleuchtungseinheit) an 524 Leuchtstoffröhrchen statistisch untersucht wurde. Die Analyse der Hg-Gehalte erfolgte an 60, gemäss Beleuchtungstyp repräsentativ ausgewählten CCFL-Röhrchen. Die an der EMPA Dübendorf entwickelte Methode (EMPA 2011), mit der sich auch der flüchtige Anteil des Hg in den Röhrchen zuverlässig bestimmen lässt, bestätigt die Hg-Gehalte aus einer älteren EMPA-Studie (EMPA 2008), welche in Böni et al. (2011) publiziert sind. Insbesondere die Hg-Gehalte, welche in LCD-PC-Monitoren gefunden wurden, stimmen gut überein. Bei den Notebooks und LCD-TV-Geräten liegen die neueren Werte hingegen z. T. deutlich tiefer.

Bestätigung von früheren
Untersuchungen

Abb. 37 > Vergleich der Hg-Gehalte einzelner CCFL-Röhrchen mit einer EMPA-Studie von 2008

Mit Angabe des 95 %-KI.



Weiter liegt der Gasanteil gemäss der neuen Studie deutlich höher als bisher angenommen, nämlich bei 90 % und 95 % bei den LCD-PC und Notebook und bei 70 % bei den LCD-TV. Die ältere Studie ging von 50–70 % Gasanteil aus.

Höherer flüchtiger Anteil als bisher angenommen

Tab. 27 > Gasförmige Anteile von Hg in CCFL-Röhrchen

Gerät	flüchtiger Anteil		fester Anteil		Total	
	[µg/Leuchte]	[%]	[µg/Leuchte]	[%]	[µg/Leuchte]	[%]
LCD-TV	700	70 %	300	30 %	1000	100 %
LCD-PC	1400	88 %	200	13 %	1600	100 %
Notebook	940	59 %	50	5 %	990	100 %

6.3.2 Vergleich der Resultate der Gehalte in Gehäusen von CRT- und LCD-PC- und -TV-Geräten

Im Jahr 2010 wurde von der EMPA St. Gallen eine Studie zu RoHS-Substanzen in gemischten Kunststoffabfällen von Elektro- und Elektronikgeräten durchgeführt (Wäger et al 2010). Darin wurden vier Gerätekategorien unterschieden. Für den direkten Vergleich können CRT-TV- und -PC- sowie LCD-TV-Geräte verwendet werden. In den Vergleich dieser spezifischen Geräte werden auch die Resultate der ersten Immark-Studie von 2003 sowie die Resultate einer im Bericht von Wäger et al. zitierten Studie (Schlummer et al. 2007) einbezogen. Die Werte aus der Immark-Studie von 2003 beziehen sich allerdings auf ein Gemisch von CRT-PC-Monitoren und -TV-Geräten.

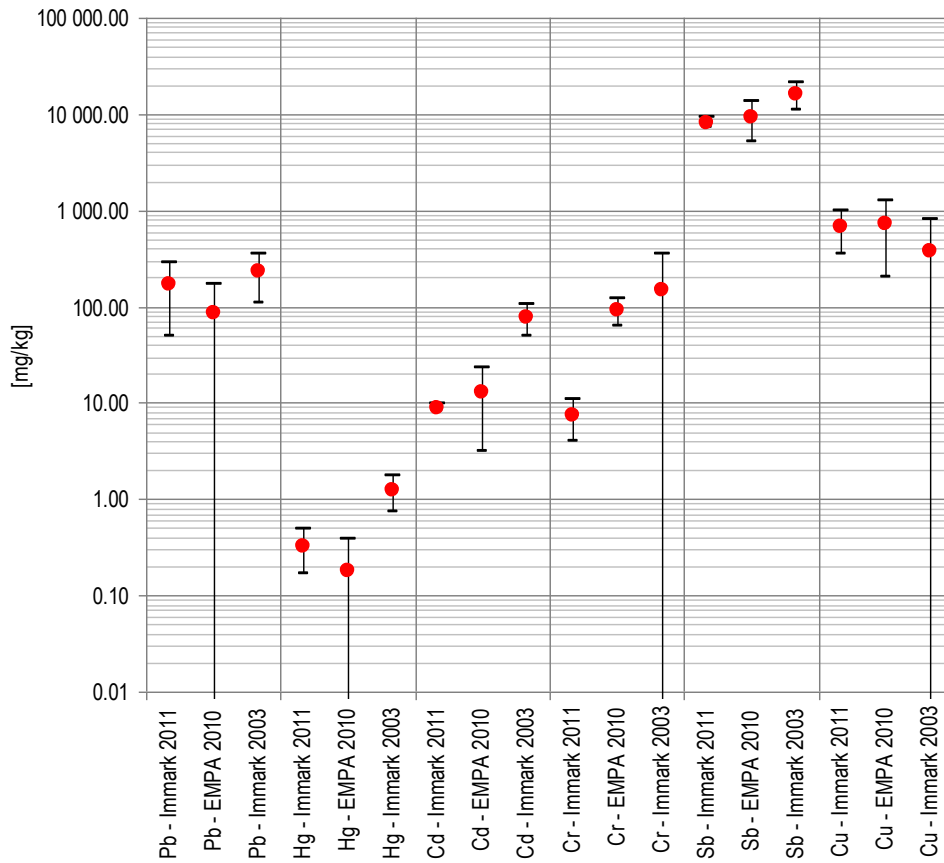
Vergleich ausgewählter Metalle und Antimon in Bildschirmgehäusen

Bei den CRT-PC-Monitoren differieren die Pb-, Sb- und Cu-Gehalte nicht sehr stark. Demgegenüber weisen die Hg-, Cd- und Cr-Gehalte grosse Unterschiede auf. Insbesondere beim Cr-Gehalt weisen die neusten Untersuchungen viel tiefere Werte als die früheren Studien auf.

Grosse Unterschiede bei Cr, Cd und Hg

Abb. 38 > Vergleich der Pb-, Hg-, Cd-, Cr-, Sb- und Cu-Gehalte in CRT-PC-Monitoren

Mit Angabe der Standardabweichung. Logarithmische Darstellung.

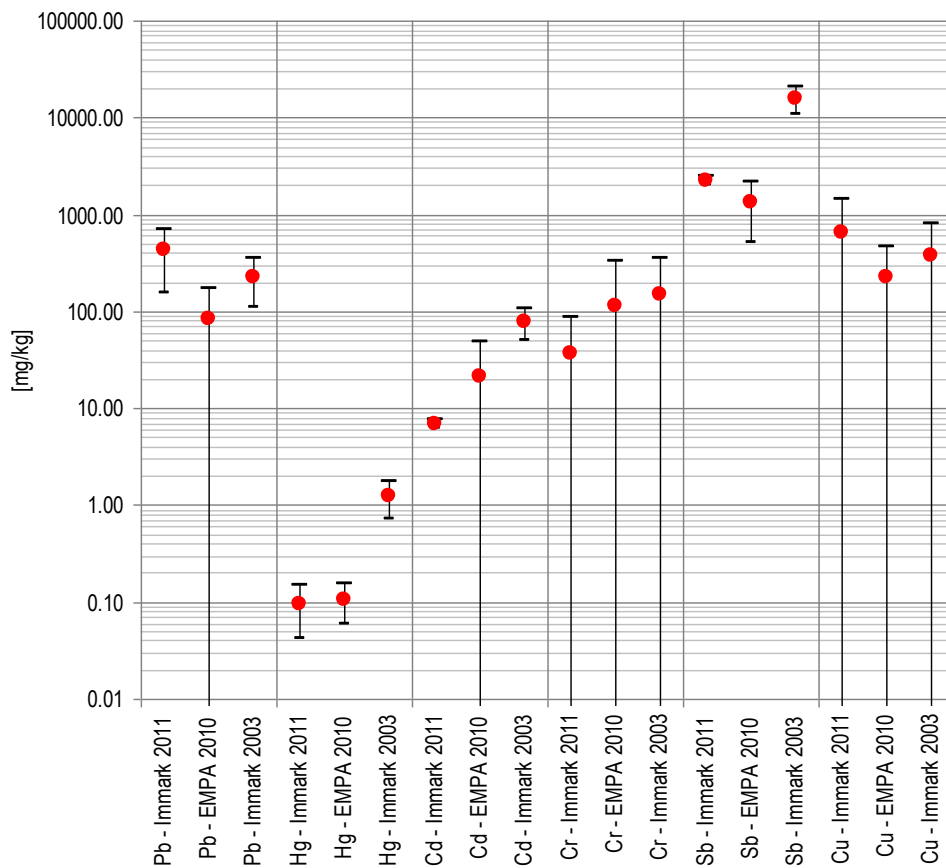


Die CRT-TV weisen innerhalb derselben Studien etwa dieselben Gehalte wie die CRT-PC-Monitore auf. Bei den CRT-TV streuen hingegen neben den Hg- und Cd-Gehalten auch die Sb-Gehalte stark. Die Unterschiede bei Cr sind dafür weniger ausgeprägt.

Grosse Unterschiede bei Cd, Sb und Hg

Abb. 39 > Vergleich der Pb-, Hg-, Cd-, Cr-, Sb- und Cu-Gehalte in CRT-TV

Mit Angabe der Standardabweichung. Logarithmische Darstellung.

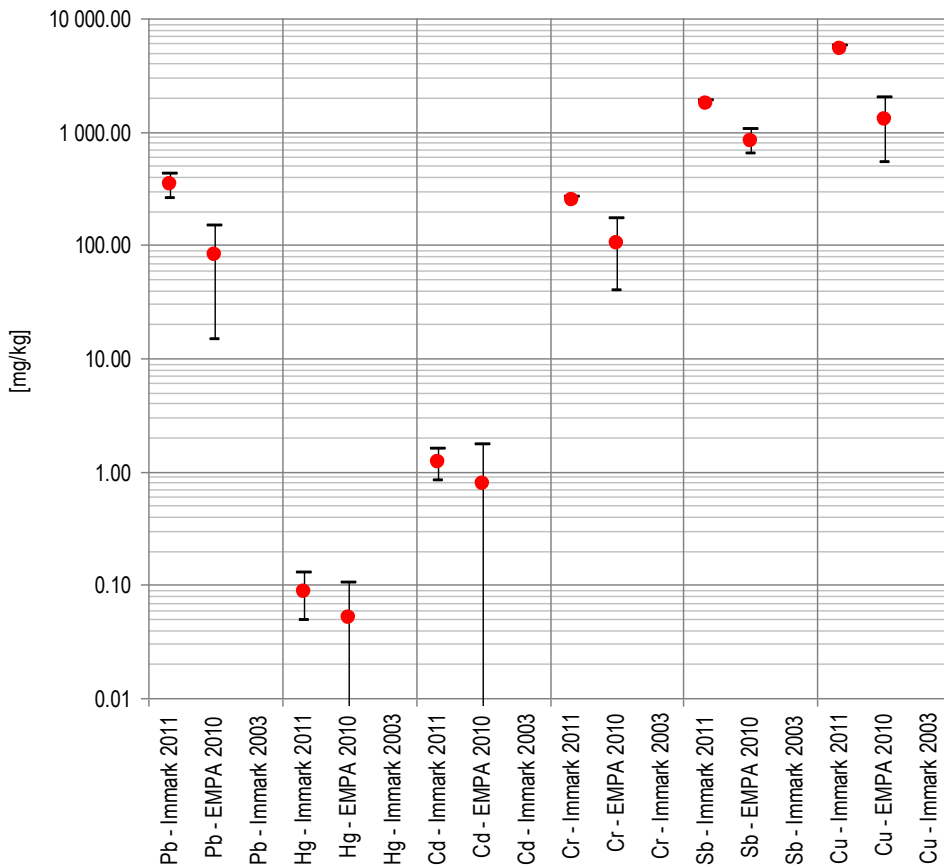


Die LCD-TV wurden in der Untersuchung 2003 noch nicht untersucht. Zwischen den beiden praktisch gleich alten Studien Immark 2011 und EMPA 2010 gibt es beträchtliche Unterschiede. Interessant ist, dass die neuere Studie durchwegs höhere Gehalte ausweist als die ältere. Die grössten Unterschiede treten bei Pb und Cu auf. Auffällig ist der grosse Unterschied bei den Cd-Gehalten zwischen den alten CRT- und den neuen LCD-Geräten. Die neuen Geräte haben um den Faktor 10 tiefere Gehalte.

Neue Studie liefert bei LCD-TV-Gehäusen durchwegs höhere Konzentrationen

Abb. 40 > Vergleich der Pb-, Hg-, Cd-, Cr-, Sb- und Cu-Gehalte in LCD-TV

Mit Angabe der Standardabweichung. Logarithmische Darstellung.



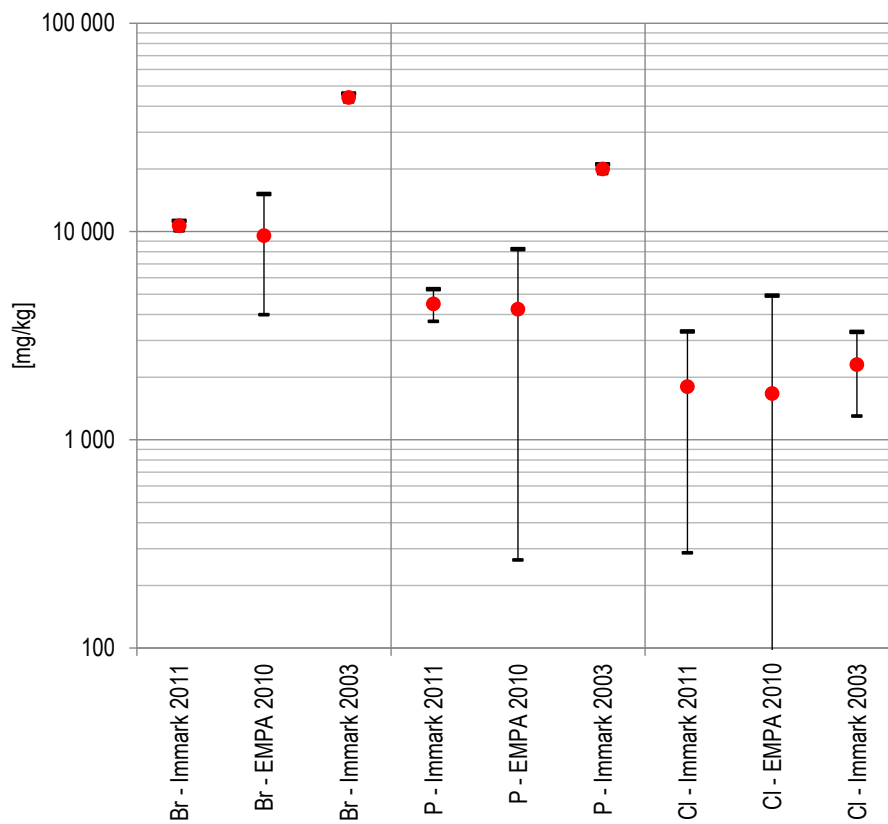
Vergleich Cl, Br und P in Bildschirmgehäusen

Die Gehalte unterscheiden sich vor allem bei Cl deutlich. Interessanterweise weist die älteste Probe die tiefsten Werte auf. Ein Grund dafür ist nicht bekannt. Bei Br ist es gerade umgekehrt und bei P weist die Studie der EMPA die tiefsten Werte auf.

Grösste Unterschiede bei Cl

Abb. 41 > Vergleich der Cl-, Br- und P-Gehalte in CRT-PC-Monitoren

Mit Angabe der Standardabweichung. Logarithmische Darstellung.

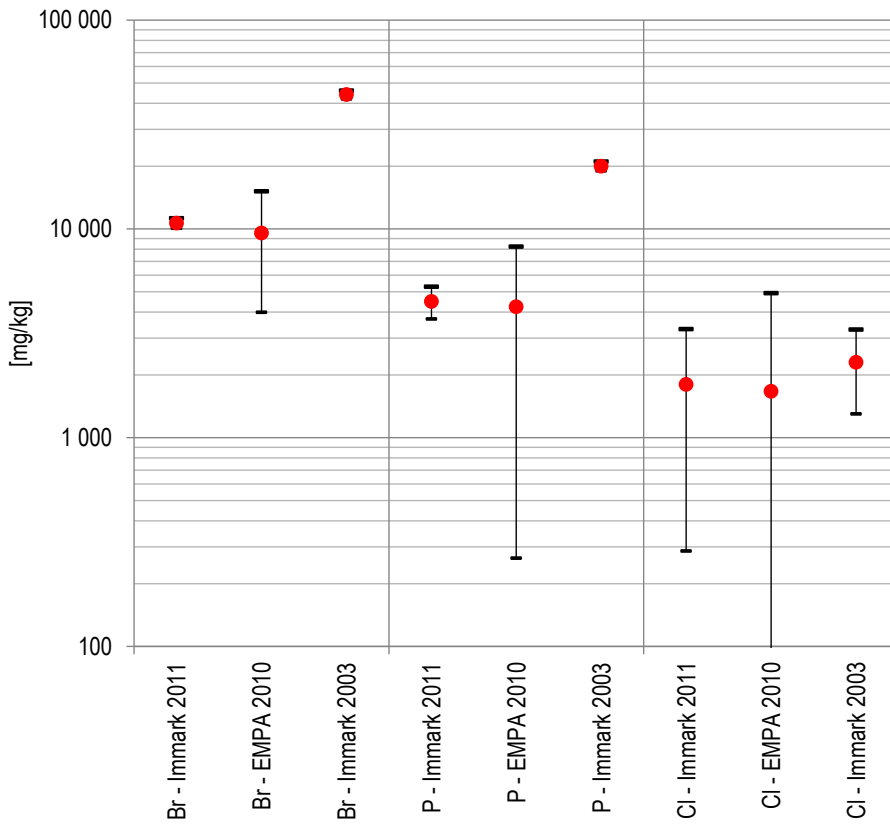


Die CRT-TV-Gehäuse weisen durchgehend tiefere Werte als die CRT-PC-Gehäuse auf. Die neue Immark-Studie stimmt hier sehr gut mit der EMPA-Studie überein. Die frühere Immark-Studie weist mit Ausnahme von Cl deutlich höhere Gehalte auf.

CRT-TV-Gehäuse haben tiefere Konzentrationen als CRT-PC-Gehäuse

Abb. 42 > Vergleich der Cl-, Br- und P-Gehalte in CRT-TV

Mit Angabe der Standardabweichung. Logarithmische Darstellung.

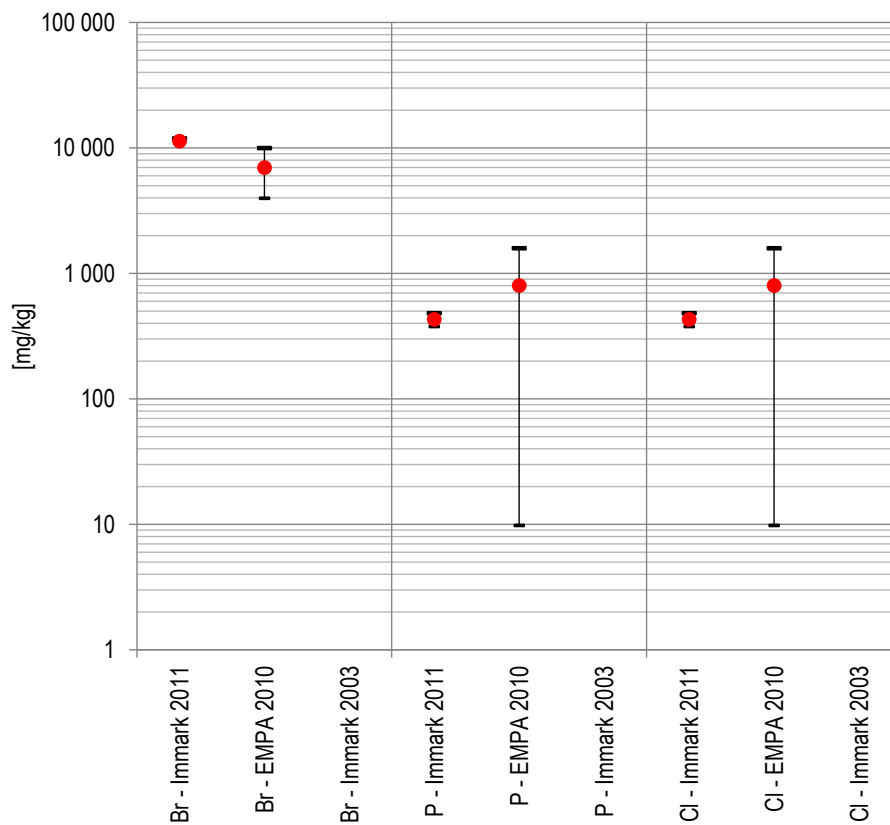


Ausser bei Br weist die neuere Immark-Studie deutlich tiefere Gehalte auf als die EMPA-Studie. Die Unterschiede sind infolge der grossen Fehlerbereiche allerdings nicht signifikant. LCD-TV wurden im Jahr 2003 noch nicht beprobt.

Keine oder nur knapp signifikante Unterschiede

Abb. 43 > Vergleich der Cl-, Br- und P-Gehalte in LCD-TV

Mit Angabe Standardabweichung. Logarithmische Darstellung.



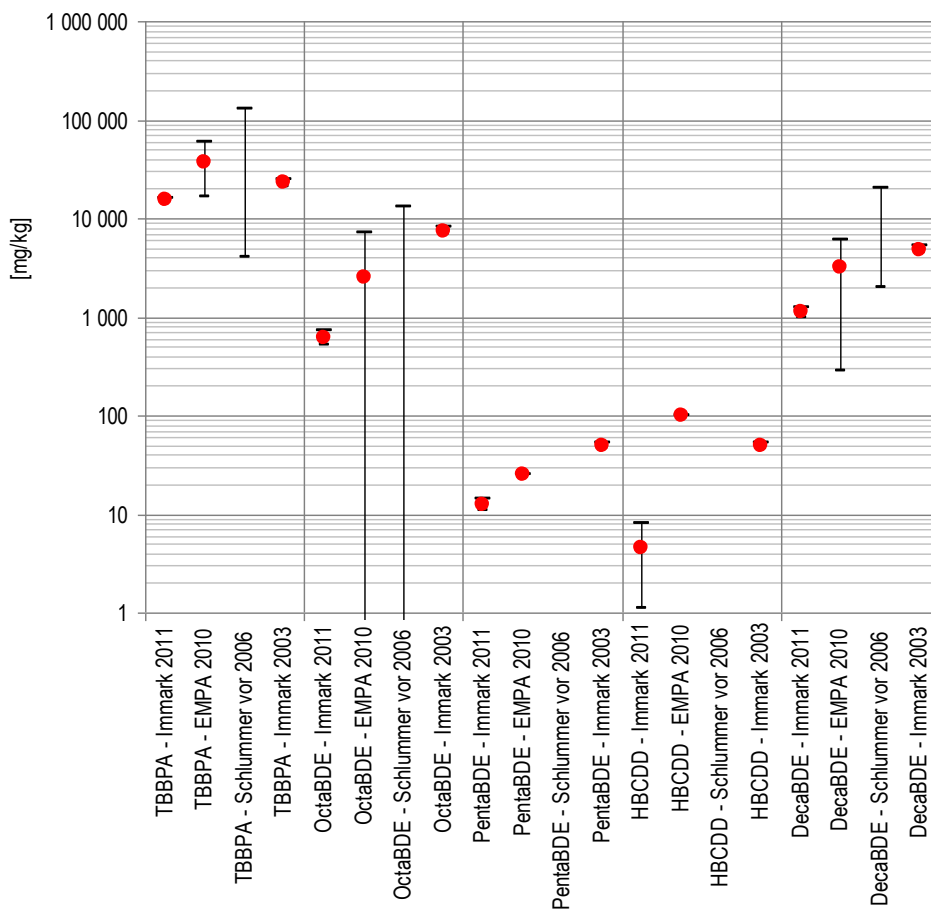
Vergleich ausgewählter FS in Bildschirmgehäusen

Bei den FS können nur die CRT-PC-Monitore miteinander verglichen werden. Hier zeigt sich, dass die neue Immark-Studie überall die tiefsten Gehalte ausweist. Besonders augenfällig sind die Unterschiede der Konzentrationen bei OctaBDE und HBCDD. Aber auch bei DecaBDE und PentaBDE sind die Unterschiede zwischen der 2003er-Studie und der neusten Untersuchung bemerkenswert.

Tiefste Konzentrationen bei der neusten Studie

Abb. 44 > Vergleich ausgewählter FS-Gehalte in CRT-PC-Monitoren

Mit Angabe Standardabweichung. Logarithmische Darstellung.



7 > Schlussfolgerungen

7.1 Ressourcenpotenzial

Die Stofffrachten des EEKG-Schrotts (Kapitel 5.5.1) zeigen das Potenzial an rückgewinnbaren Metallen auf. Insgesamt fallen in der Schweiz von den drei mengenmässig bedeutendsten Metallen jährlich rund 24 000 t Fe, 4300 t Al und 3300 t Cu aus dem EEKG-Schrott an. Bei Fe macht die aus EEKG-Schrott rezyklierte Menge gegenüber den jährlich insgesamt rund 1,2 Mio. Tonnen rezykliertem Schrott rund 2% aus (bvse 2011). Bei Al liegen keine Angaben über die total zur Entsorgung anfallende Menge vor. Eine grobe Abschätzung liefern die Exportzahlen für Al-Schrott. Der grösste Teil des für die Wiederverwertung gesammelten Aluminiums wird exportiert. Gemäss der schweizerischen Aussenhandelsstatistik (Swiss-Impex) betrug der Export von Aluminiumschrott 2011 rund 140 000 t (EZV 2012). Der Anteil von Al im EEKG-Schrott würde also rund 3% betragen. Anders sieht es bei Cu aus. Die Gesamtmenge an Cu, welche zur Entsorgung anfällt, wird auf rund 38 000 t/a geschätzt (BAFU 2006). Der Anteil im EEKG-Schrott würde demnach etwa 10% des gesamten Cu-Abfalls betragen.

Substanzieller Beitrag des Cu aus EEKG an das Cu-Recycling

Durch das Recycling dieser Metalle lässt sich eine erhebliche Menge an Energie einsparen. Die Verwendung von Recyclingmaterial anstelle von Erzen spart bei Al 95% (Igora 2012), bei Cu 90% (Kupferinstitut 2012) und im Falle von Stahl 70% (Stahlpromotion 2012) an Primärenergie ein.

Hohe Energieeinsparung durch Recycling

7.2 Schadstoffsituation

7.2.1 Mittlere Gehalte im EEKG-Schrott

Der Vergleich der aus den Analysendaten der Outputgüter berechneten mittleren Schadstoffkonzentrationen im EEKG-Schrott zeigt für praktisch alle Schadstoffe – mit Ausnahme von Hg – zwischen 2003 und 2011 einen Rückgang (vgl. Abb. 35 und Abb. 36 in Kapitel 6.2). Für einige Schadstoffe ist eine starke Abnahme der Konzentration festgestellt worden (Ni, Cr, Cd, Cl, PCB, OctaBDE, PentaBDE, TBBPA), für andere war die Abnahme weniger ausgeprägt (Sn, Sb, Br, DecaBDE, HBCDD). Eine Zunahme der Konzentrationen zwischen 2003 und 2011 wurde für Hg und P gemessen, während die Konzentration bei Pb praktisch unverändert geblieben ist. Das zeigt, dass Beschränkungen und Verbote von Stoffen in Elektro- und Elektronikgeräten (siehe Abschnitt 1.2 auf S. 15) und technische Entwicklungen innerhalb weniger Jahre wesentliche Änderungen der stofflichen Zusammensetzung des EEKG-Schrotts bewirken.

Deutlicher Rückgang der Konzentrationen bei den meisten Schadstoffen (ausser Hg)

Die deutliche Mengenzunahme von ca. 50 000 t EEKG-Schrott im Jahr 2003 auf ca. 70 000 t EEKG-Schrott im Jahr 2011 wirkt sich auf die Jahresfrachten aus. So hat beispielsweise die Fracht von HBCDD um rund 20% zugenommen (allerdings ist die

Mengenzunahme übersteuert Konzentrationsabnahme

Änderung nicht signifikant) und diejenige von DecaBDE ist praktisch konstant geblieben, obwohl die Konzentrationen von beiden Stoffen leicht zurückgegangen sind. Die Frachten aller anderen Schadstoffe haben um mindestens 40 % (TBBPA) bis 91 % (PentaBDE) abgenommen. Die Beispiele von HBCDD und DecaBDE zeigen, dass auch bei sinkenden Konzentrationen die Frachten zunehmen können.

Tab. 28 > Vergleich der Konzentrationen und Frachten des EEKG-Schrotts 2003 und 2011

Stoff	2003		2011		2003 → 2011	
	Konzentrationen MW [mg/kg]	Frachten MW [t]	Konzentrationen MW [mg/kg]	Frachten MW [t/a]	Konzentrationen MW [mg/kg]	Frachten MW [t/a]
PentaBDE	34	1,8	2,4	0,16	-93 %	-91 %
OctaBDE	530	28	120	8,4	-77 %	-70 %
DecaBDE	510	26	390	27	-24 %	+1 %
HBCDD	17	0,88	14	1,0	-18 %	+18 %
TBBPA	1 400	73	630	43	-55 %	-40 %
Summe PCB	13	0,67	2,0	0,14	-85 %	-80 %
Al	49 000	2 500	62 000	4 300	+27 %	+72 %
Sb	1 700	88	1 000	69	-41 %	-21 %
Pb	2 900	150	3 000	210	+3 %	+40 %
Cd	180	9,3	15	1,0	-92 %	-89 %
Cr	9 900	510	4 500	310	-55 %	-39 %
Fe	360 000	19 000	350 000	24 000	-3 %	+26 %
Cu	41 000	2 100	49 000	3 400	20 %	+62 %
Ni	10 300	530	3 600	250	-65 %	-53 %
Hg	0,68	0,035	1,5	0,10	+121 %	+190 %
Zn	5 100	260	7 900	550	+55 %	+112 %
Sn	2 400	120	2 000	140	-17 %	+17 %
Br	5 500	290	4 500	310	-18 %	+7 %
Cl	9 600	500	7 000	480	-27 %	-4 %
P	360	19	530	37	+47 %	+97 %

Die Zunahme der Hg-Konzentration ist wie im Kapitel 6.2.1 beschrieben auf die Zunahme der LCD-Bildschirme und Notebooks zurückzuführen. Neuere Geräte enthalten keine CCFL mehr, sondern LED oder OLED. Diese Leuchtmittel benötigen kein Hg. Die höchste Hg-Konzentration in diesen Geräten dürfte also schon bald überschritten sein. Allerdings wird es noch eine Weile dauern, bis die letzten Monitore mit CCFL entsorgt werden. Der Anteil an CRT-Monitoren, welche im Jahr 2011 entsorgt wurden, ist immer noch beträchtlich. Die in Zukunft vermehrt anfallenden Energiesparlampen, welche ebenfalls Hg-haltig sind, fallen nicht unter die Kategorie EEKG und wurden deshalb in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Zunahme von Hg dank manueller
Entfrachtung kein Umweltproblem

7.2.2 Output

Die im EEKG-Schrott vorhandenen Schadstoffe reichern sich bei der Aufbereitung in bestimmten Output-Fractionen an. Die Flammschutzmittel (FS) sind in den Fractionen mit Kunststoffanteil enthalten, also den feinkörnigen KS-Fractionen und den Bildschirmgehäusen. Die FS-Konzentrationen sind dabei zu hoch, um die Kunststoffe generell ohne weitere Behandlung für die stoffliche Verwertung recyceln zu können. Die thermische Verwertung stellt hier die rechtskonforme Entsorgungsschiene dar.

Anreicherung der Schadstoffe in
bestimmten Outputfractionen

Die PCB werden über die händische Aussortierung der Kondensatoren zu einem Drittel aus dem Aufbereitungsprozess entfernt. Die restlichen PCB gelangen im Aufbereitungsprozess zu über 90 % in den Staub. Generell werden die PCB-Gehalte in der vorliegenden Untersuchung tendenziell überschätzt (vgl. Kapitel 5.4.4 und 6.1.3). Gesicherte Gehalte finden sich in den oben erwähnten Schadstoffträgern (bestimmte Kondensatoren) und im Staub. In den KS-Fractionen liegen die PCB-Gehalte oft unter der Bestimmungsgrenze. Nachweisbare Gehalte waren aber in jeder KS-Fraktion vorhanden.

Grosser Effekt der händischen Entfrachtung

Dank der händischen Aussortierung der Hintergrundbeleuchtungen aus LCD-Bildschirmen und der Batterien lassen sich 60 %, resp. 20 %, insgesamt also 80 % der Hg-Mengen aus dem Aufbereitungsprozess ausschleusen und separat behandeln.

Die 2011 erstmals analysierten LCD-Module sind praktisch frei von FS und PCB. Auch die Gehalte an Hg und Cd liegen unter der Bestimmungsgrenze. Die LCD-Module stellen diesbezüglich also keine problematische Fraktion dar.

Unproblematische LCD-Module

7.3 Offene Fragen, Datenlücken

Für hoch- und minderwertige Leiterplatten konnte kein zufriedenstellendes Aufbereitungsverfahren gefunden werden. Die Gehalte mussten deshalb auf Basis der Resultate des Leiterplattenbruchs abgeschätzt werden (vgl. Anhang 9.9). Durch das Zerkleinerungsverfahren auf der Anlage werden die Bauteile auf den Leiterplatten abgetrennt. Gerade in diesen Bauteilen werden aber diverse wertvolle Metalle vermutet. Es wäre deshalb wünschenswert, eventuell in einem Grossversuch bei einem grossen Aufbereiter, die Gehalte von Wert- und Schadstoffen separat in hoch- und minderwertigen Leiterplatten zu bestimmen.

Unbefriedigende Leiterplattenaufbereitung

Die Analysenresultate der Kondensatoren lassen den Schluss zu, dass nur noch vereinzelt PCB-haltige Kondensatoren in EEKG in die Entsorgung gelangen. Um statistisch besser gesicherte mittlere Gehalte und damit kleinere Fehlerbereiche zu erhalten, reichen die sechs gezogenen Mischproben allerdings nicht aus. Eine deutlich höhere Probenanzahl hätte aber den finanziellen Rahmen dieses Projektes gesprengt.

(Noch) grössere Stichprobe für Kondensatorenuntersuchung

Bei den «neuen» FS, welche als Substitute für verbotene Stoffe eingesetzt werden, und auch bei den PCB lagen etliche Analysenresultate unter der Bestimmungsgrenze. Für die Berechnungen wurde jeweils die halbe BG verwendet, was wahrscheinlich in vielen Proben eine Überschätzung der Gehalte zur Folge hat (vgl. Kapitel 5.2). Im Hinblick auf mögliche künftige Beschränkungen der Gehalte in Elektro- und Elektronikgeräten wären Analysenmethoden mit tieferen Bestimmungsgrenzen auch für die «neuen» FS wünschenswert.

Tiefere Bestimmungsgrenzen für «neue» Flammschutzmittel

Die Zusammensetzung des Batterieoutputs wurde basierend auf einer Analyse von Batterien aus der Separatsammlung (Von Gunten 2011) sowie einer Gewichtung nach Batterietypen basierend auf einen Kleinversuch mit 14 kg aus EEKG-Schrott gewonnenen Batterien bestimmt (vgl. Anhang 9.6). Bei Cd und Hg entfällt mit 20–30 % ein grosser Anteil der Fracht in EEKG-Schrott auf den Batterieoutput. Zur besseren statis-

Grössere Stichprobe für Batterieuntersuchung

tischen Absicherung der Cd- und Hg-Frachten wäre es deshalb für eine nächste Untersuchung angezeigt, auch Analysen von repräsentativen Proben von Batterien durchzuführen.

Wie schon bei der ersten Untersuchung im Jahr 2003 übertrifft der aus den Br-Messungen mittel Röntgenfluoreszenzanalysen in den Output-Fractionen ermittelte mittlere Br-Gehalt des EEKG-Schrotts auch im Jahr 2011 den aufgrund der Konzentrationsbestimmungen der bromhaltigen FS in den Output-Fractionen ermittelten Bromgehalt deutlich, nämlich um den Faktor 2,4. Unter der Annahme, dass die bromierten FS zu 75 % aus Brom bestehen, beträgt dieser Faktor 3,2. Das heisst, dass nur knapp ein Drittel des Bromgehaltes in den EEKG auf die in dieser Studie quantitativ bestimmten additiven FS-Einzelstoffe entfällt.

Unbekannte Br-Quellen

8 > Literaturverzeichnis

Baccini P., Brunner P. H 1991: Metabolism of the anthroposphere. Springer-Verlag.

Baumann W., Muth A. 1997: Batterien Daten und Fakten zum Umweltschutz, Springer Verlag.

Bergman Å., Rydén A., Law R.J., de Boer J., Covaci A., Alae M., Birnbaum L., Petreas M., Rose M., Sakai S., Van den Eede N., van der Veen I. 2012: A novel abbreviation standard for organobromine, organochlorine and organophosphorus flame retardants and some characteristics of the chemicals. Environment International 49, 57–82.

Böni H., Widmer R. 2011: Entsorgung von Flachbildschirmen in der Schweiz. Schlussbericht, März 2011. EMPA und SWICO Recycling.

Böni H. 2010: Schriftliche Mitteilung, 22. Dezember 2010.

BUWAL 2004: Metallische und nichtmetallische Stoffe im Elektronikschrott. Stoffflussanalyse. Schriftenreihe Umwelt Nr. 374. Bern, 2004.

Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (bvse) 2012: Abfallaufkommen in der Schweiz wächst nach wie vor.

EMPA 2008: EMPA Prüfbericht Nr. 447 606 «Quantitative Bestimmung von Quecksilber in Leuchtstoffröhren aus Flachbildschirmen», 23. Januar 2008.

EMPA 2011: EMPA-Projektbericht Nr. 208 116/04 «Quantitative Bestimmung von flüchtigem und gebundenem Quecksilber in Leuchten», 15. September 2011.

European Chemicals Bureau 2006: European Union Risk Assessment Report: 2,2',6,6'-Tetrabromo-4,4'-isopropylidenediphenol (tetrabromobisphenol-A or TBBP-A), <https://echa.europa.eu/documents/10162/32b000fe-b4fe-4828-b3d3-93c24c1cdd51>.

EZV 2012: Swiss-Impex, <https://www.gate.ezv.admin.ch/swissimpex/>.

Figi R., Nagel O., Hagendorfer H. 2012: A straight forward wet-chemistry method for the determination of solid and gaseous mercury fractions in Backlight Cold Cathode Fluorescence Lamps. Talanta 1 002 012: 134–138.

Figi R., Nagel O., Tuchschnid M., Lienemann P., Gfeller U., Bukowiecki N. 2010: Quantitative analysis of heavy metals in automotive brake linings: A comparison between wet-chemistry based analysis and in-situ screening with a handheld X-ray fluorescence spectrometer. Analytica Chimica Acta 676, 46–52.

Igora 2012: Telefonische Auskunft D. Frischknecht, 17. September 2012.

Kupferinstitut 2012: Recycling von Kupfer und Kupferlegierungen, <https://www.kupferinstitut.de/de/werkstoffe/system/recycling-kupfer.html>.

La Guardia M.J., Hale R.C. Harvey E. 2006: Detailed polybrominated diphenyl ether (PBDE) congener composition of the widely used Penta-, Octa-, and Deca-PBDE technical flame-retardant mixtures. Environmental Science & Technology 40 (20), 6247–6254.

Morf L.S., Tremp J., Gloor R., Huber Y., Stengele M., Zennegg M. 2005: Brominated flame retardants in waste electrical and electronic equipment: Substance flows in a recycling plant. *Environmental Science & Technology* 39 (22), 8691–8699.

Morf L.S., Tremp J., Gloor R., Schuppisser F., Stengele M., Taverna R. 2007: Metals, non-metals and PCB in electrical and electronic waste – Actual levels in Switzerland. *Waste Management* 27 (10), 1306–1310.

Recknagel S., Richter A. 2007: Überprüfung der Schwermetallgehalte von Batterien – Analyse von repräsentativen Proben handelsüblicher Batterien und in Geräten verkaufter Batterien – Erstellung eines Probenahmeplans, Probenbeschaffung und Analytik (Hg, Pb, Cd). UBA-Bericht.

Schlummer M., Gruber L., Mäuer A., Wolz G., van Eldik R. 2007: Characterisation of polymer fractions from waste electrical and electronic equipment (WEEE) and implications for waste management. *Chemosphere* 67 (9), 1866–1876.

SENS 2010: Fachbericht 2009.

Stahlpromotion 2012: Öko-Stahl – die Kampagne, <http://www.stahlpromotion.ch/de/oekestahl.html>.

SWICO 2010: Tätigkeitsbericht 2009, <http://www.swicorecycling.ch/downloads/dokumente/taetigkeitsbericht-2009.pdf/1253>.

UNIDO 2012: Guidance for the inventory of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) listed under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants, http://www.unido.org/fileadmin/user_media/Services/Environmental_Management/Stockholm_Convention/Guidance_Docs/UNEP-POPS-GUID-NIP-2012-PBDEs-Inventory.En.pdf.

Von Gunten H. 2011: Massenbilanz Batrec, telefonische Auskunft, Dezember 2011.

Wäger P., Schlupe M., Müller E. 2010: RoHS substances in mixed plastics from Waste Electrical and Electronic Equipment. Final Report September 17th 2010, EMPA St. Gallen.

9 > Anhang

9.1

Probenahmeschema

Tab. 29 > Probenahmeschema Immark AG

Versuchsmenge: 151 t;
Leistung Anlage: 8 t pro 60 Min 8 t/h
Versuchsdauer: 19 Stunden 1,1 Tage à 2-Schichtbetrieb 05.00–23.00 Uhr
Nachlauf Versuch: Metalle und ev. auch Kunststoffe fallen erst ab 1,5–2 Stunden an Anzahl SP pro MP 20.

Probenbezeichnung			Probenahme					
Interne Bezeichnung	Kurzbezeichnung	Gut	Ort	Probenahmeintervall	Stichproben (SP)		Probenahme Werkzeug	Probenaufbereitung auf Anlage/Labor Methode
					Menge	Anzahl		
	0A	PC-Monitor (Gehäuse)	Regensdorf	Vorgängig od. Schluss	1 kg	120	Schaufel	Kegelteilung
	0B	TV- Monitor (Gehäuse)	Regensdorf	Vorgängig od. Schluss	1 kg	120	Schaufel	Kegelteilung
	0C	Notebooks (Gehäuse)	ESRA	Vorgängig od. Schluss	1 kg	120	Schaufel	Kegelteilung
	0D	LCD-TV (Gehäuse)	ESRA	Vorgängig od. Schluss	1 kg	120	Schaufel	Kegelteilung
	0E	LCD-PC (Gehäuse)	ESRA	Vorgängig od. Schluss	1 kg	120	Schaufel	Kegelteilung
	0F	LCD-Module (PC, TV, Noteb.)	ESRA	Vorgängig od. Schluss	1 kg	120	von Hand	Shredder
	0G	Hintergrundbeleuchtung (PC, TV, Noteb.)	ESRA	Vorgängig od. Schluss		60	von Hand	EMPA Spezial
	0H	Leiterplatten (PC, TV, Noteb.)	ESRA	Vorgängig od. Schluss	1 kg	120	von Hand	von Hand
RE0106	3, 10b	Leiterplatten	Regensdorf	Alle sammeln bis Schluss	1 kg	120	Schaufel	Kegelteilung
SA0103	10d	Kondensatoren	Regensdorf	Alle sammeln bis Schluss	1 kg	120	Schaufel	Schaufel
CU0041		Cu-Kabel	Regensdorf	Alle sammeln bis Schluss	1 kg	120	von Hand	von Hand
KS0200	13	Staub Zyklon vor Granulator	Regensdorf	alle 9 Min. eine Probe	0,5 kg	120	Schaufel	Kegelteilung
RE0161	20	Staub Prallm.+Feinsep.	Regensdorf	alle 9 Min. eine Probe	0,5 kg	120	Schaufel	Kegelteilung
Kastenbeschicker*		KG <20 mm	Regensdorf	alle 9 Min. eine Probe	1 kg	120	Schaufel	Riffelteiler
KS0240	21 aus Container	Kunststoffe 2–5, 5–10 mm	Regensdorf	Am Schluss aus Container	1 kg	120	Kübel	Riffelteiler
KS0270	21 aus Silo	Kunststoffe 20–25 mm	Regensdorf	Am Schluss aus LKW	1 kg	120	Kübel	Riffelteiler
KS0200	24	Kunststoffe <2 mm	Regensdorf	alle 9 Min. eine Probe	1 kg	120	Karton	Kegelteilung
RE0172	19	Metalle 5–10 mm	Regensdorf	alle 9 Min. eine Probe	1 kg	120	Kübel	Riffelteiler
RE0171	18	Metalle 2–5 mm	Regensdorf	alle 9 Min. eine Probe	1 kg	120	Kübel	Riffelteiler
RE0170	17	Metalle <2 mm	Regensdorf	alle 9 Min. eine Probe	1 kg	120	Kübel	Riffelteiler
RE0173	22	Metalle <2 mm mit Kunst.	Regensdorf	alle 9 Min. eine Probe	1 kg	120	Karton	Riffelteiler
RE0179	12b	Sieb Unterkorn	Regensdorf	alle 9 Min. eine Probe	1 kg	120	Kübel	Riffelteiler
Überkorn	16	Überkorn	Regensdorf	alle 9 Min. eine Probe	1 kg	120	Kübel	Riffelteiler
* Wird nur zur Kontrolle entnommen und nur bei Bedarf analysiert						2700		

Stichprobenmenge: Nach ÖNORM S 2123-3 errechnet sich die Probenmenge mit der Formel (Probenmenge der Stichprobe in kg = $0,06 \times \text{Grösstkorn als 95 \% Perzentil in mm}$);
Bei einem Grösstkorn von 10 mm wären das also 0,6 kg;

Mischprobenmenge: Gemäss Dienstleistungsverzeichnis, S. 45 der Bachema AG müssen folgende Mischprobenmengen mindestens vorhanden sein:

Maximale Korngrösse	Minimale Probenmenge	
10 cm	100 kg	Probe- nahme
5 cm	30 kg	
2 cm	5 kg	
1 cm	1.5 kg	
2.5 mm	100 g	Laborauf- bereitung
1.5 mm	20 g	
1 mm	5 g	
< 0.1 mm	1 g	

9.2 Analytik

9.2.1 Methodenbeschreibung Bachema

Aus den Labor-Mischproben sind mittels Handsortierung, mechanischer Zerkleinerung und repräsentativer Probenteilung Analysenproben gewonnen worden.

Probenaufbereitung

Für jede Outputfraktion musste eine angepasste Aufbereitungstechnik eingesetzt werden, die wo nötig mit entsprechenden Vorversuchen getestet wurde. Im Prinzip wurden die beiden Hauptkomponenten Metalle und Kunststoffe soweit erforderlich vorgängig durch Handsortierung getrennt. Die so getrennten Fraktionen mit überwiegendem Anteil an Kunststoffen und anderen organischen Materialien wie Holz und Gummi wurden jeweils separat bis zu den für die Extraktion/den Aufschluss erforderlichen Korngrössen (Analysenproben, <0,5 mm bzw. <0,1 mm) mittels Schneidmühlen und Kryomühle zerkleinert. Die abgetrennten Fraktionen mit überwiegendem Metallanteil wurden mit verschiedenen anderen Mahlverfahren zerkleinert. Dabei wurde auch eine Rotormühle der Firma Jäckering (Hamm BRD) eingesetzt. Diese Mühle eignet sich aber nur für grosse Probenmengen. Die vorzerkleinerten Metallfraktionen wurden jeweils anschliessend über Siebe aufgetrennt und die Siebfraktionen einzeln untersucht. Die so aufbereiteten homogenisierten Analysenproben wurden 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). Eine schematische Übersicht der einzelnen Aufbereitungsschritte findet sich in Kapitel 9.2.2.

Bestimmung der Metalle mittels ICP:

Analytik Metalle

Mikrowellendruckaufschluss von Proben ohne elementare Metallpartikel:

Die Erfahrung der letzten Jahre hat gezeigt, dass Proben mit grossem Kunststoffanteil mit einem angepassten Aufschlussverfahren in vielen Fällen optimaler angeschlossen werden als im Königswasseraufschluss. Der Königswasseraufschluss ergibt aber für einzelne Metalle trotzdem verlässlichere Werte. Da die eigentliche Matrix (Art der

Kunststoffzusammensetzung) bei den einzelnen Proben nicht bekannt war, konnte das optimale Aufschlussverfahren jeweils nicht im Voraus ermittelt werden. Es wurden daher für alle Proben mit vorwiegend Kunststoff als Matrix zwei Aufschlussverfahren gewählt und jeweils diejenigen Resultate verwendet, welche die höheren Werte ergaben.

Königswasseraufschluss: 6 ml HCl und 2 ml HNO₃, Kunststoffaufschluss: 5 ml HNO₃ und 2 ml H₂O₂

Die Probenmenge des analysenfeinen (<0,1 mm) Probengutes betrug jeweils 0,50 g respektive 0,15 g.

Tab. 30 > Im Königswasser bestimmte Elemente

Element:	Symbol:	Messsystem:
Antimon	Sb	ICP-MS
Zinn	Sn	ICP-OES
Chrom	Cr	ICP-OES

Tab. 31 > Im Kunststoffaufschluss bestimmtes Element

Element	Symbol:	Messsystem:
Cadmium	Cd	ICP-MS

Tab. 32 > Sowohl im Königswasser wie auch im Kunststoffaufschluss bestimmte Elemente

Element:	Symbol:	Messsystem:
Aluminium	Al	ICP-OES
Blei	Pb	ICP-OES
Eisen	Fe	ICP-OES
Kupfer	Cu	ICP-OES
Nickel	Ni	ICP-OES
Zink	Zn	ICP-OES
Phosphor	P	ICP-OES

Offener Königswasseraufschluss für Metallfraktionen mit elementaren Metallpartikeln:

Da Metallpartikel sich durch Mikrowellenstrahlung stark erhitzen und somit die Teflongefässe zerstören würden, wurden die Proben, bei welchen elementare Metallpartikel vermutet wurden, in einem Aufschlussblock der Firma Behr mit einem Säuregemisch aus Salzsäure und Salpetersäure (3:1; Königswasser) am Rückfluss während zwei Stunden aufgeschlossen.

Es wurden jeweils ca. 3 g pro Ansatz aufgeschlossen.

Tab. 33 > Im offenen Königswasseraufschluss bestimmte Elemente

Element	Symbol	Messsystem
Aluminium	Al	ICP-OES
Blei	Pb	ICP-OES
Eisen	Fe	ICP-OES
Kupfer	Cu	ICP-OES
Nickel	Ni	ICP-OES
Zink	Zn	ICP-OES
Phosphor	P	ICP-OES
Cadmium	Cd	ICP-MS
Antimon	Sb	ICP-MS
Zinn	Sn	ICP-OES
Chrom	Cr	ICP-OES

Bestimmung von Chlor und Brom mittels halbquantitativer XRF-Analytik:

Analytik Nichtmetalle

Die Gehalte an Chlor und Brom wurden mittels einer halbquantitativen Übersichtsanalyse mittels Röntgenfluoreszenz bestimmt.

Dazu wurden die analysenfeinen Proben in Kunststoffküvetten (D: 32 mm) eingefüllt und mit einer Mylarfolie abgedeckt. Diese wurden ohne Vakuum am X-Lab2000 mit der Turboquant-Methode gemessen. X-Lab2000 ist ein nachweisstarkes energie-dispersives Röntgenfluoreszenz Analysengerät der Firma Spectro (BRD).

Bestimmung des Phosphorgehaltes mittels XRF:

Die Proben wurden 1:10 mit einem Gemisch aus Silikat und Calciumcarbonat verdünnt. Diese Mischung wurde zu einer Presstablette verarbeitet und am X-Lab2000 mit einer Geo-Kalibration gemessen. Aus diesen Messungen wurde der Phosphorgehalt ermittelt.

PCB in Kondensatoren mittels GC-ECD:

Analytik Organika

Die mittels Shredder zerkleinerten Proben (25–50g) wurden mit Cyclohexan/Aceton mittels Schüttelmethode extrahiert. Der Extrakt wurde mittels SPE (SCX/SAX) aufgereinigt, aufkonzentriert, gaschromatographisch aufgetrennt und mit ECD detektiert:

- > *Injektion:* 2 µl splitlos,
- > *Säule:* NWGB-5 30 m × 0,15 mm × 0,15 µm,
- > *Ofen:* 120 °C, Hold 3 min., Rate 20 °C/min., 200 °C, Rate 3 °C/min., 220 °C, Rate 10 °C/min., 280 °C, Rate 20 °C/min., 320 °C, Hold 3 min., Cool,
- > *Identifikation:* Retentionszeit,
- > *Quantifizierung:* über die Peakfläche via interne Standard-Kalibration

- > *Geräte:* Thermo Trace GC Ultra, ECD Ni-63 Thermo Electron 370 MBq (10 mCi), Schüttelmaschine (Edmund Bühler GmbH), Eindampfstation
- > *Qualitätssicherung:* Surrogates, Blindwertkontrollen, Positivkontrollen, 3-facher Ansatz,
- > *Resultat:* mg/kg
- > *Bestimmungsgrenze:* PCB 28, 52, 101, 118, 153, 180: 0,1 mg/kg,
- > *Summe PCB:* 2,5 mg/kg

Flammschutzmittel in Kunststoff und aufbereitetem Elektroschrott mittels GC-MS

Die gemahlten Proben wurden mit Cyclohexan/Aceton mittels Soxtherm extrahiert. Der Extrakt wurde verdünnt, mit DBOFB derivatisiert, gaschromatographisch aufgetrennt und mit MS im SIM-Mode detektiert:

- > *Injektion:* 2 µl splitlos, Kaltaufgabe 40 °C,
- > *Säule:* CP-Sil 8 CB 12,5 m × 0,25 mm × 0,12 µm,
- > *Ofen:* 100 °C, Hold 3 min., Rate 20 °C/min., 330 °C, Hold 5,5 min., Cool,
- > *Identifikation:* Retentionszeit und Massenspur,
- > *Quantifizierung:* über die Peakfläche via interne Standard-Kalibration.

- > *Geräte:* Agilent GC 6890N mit Gerstel KAS-4 Injektor, Agilent MS 5973N, Soxtherm, Trockenschrank, Eindampfstation
- > *Qualitätssicherung:* Surrogates, Blindwertkontrollen, Positivkontrollen, Kontrolle des Derivatisierungsmittels
- > *Resultat:* g/kg

Bestimmungsgrenze	BDE 28, 47, 99, 100, 153, 154, 183, 197, TBBPA	0,02 g/kg
	BDE 209, DecaBB	0,2 g/kg
	HBCDD	0,5 g/kg
	BTBPE, Mirex, DDC-CO, HBB, PBEB, PBT	0,02 g/kg
	TBP, BEH-TEBP, EH-TBB	0,02 g/kg
	DBE-DBCH	0,05 g/kg
	DBDPE	0,2 g/kg
	TTBP-TAZ	0,5 g/kg

Flammschutzmittel in Kunststoff und aufbereitetem Elektroschrott mittels GC-ECD

Die gemahlene Proben wurden mit Cyclohexan/Aceton mittels Soxtherm extrahiert. Der Extrakt wurde verdünnt, mit DBOFB derivatisiert, gaschromatographisch aufgetrennt und mit ECD detektiert:

- > *Injektion:* 2 µl splitlos,
- > *Säule:* NWGB-1 10m × 0,25mm × 0,1 µm,
- > *Ofen:* 100 °C, Hold 3 min., Rate 20 °C/min., 320 °C. Hold 3 min., Cool,
- > *Identifikation:* Retentionszeit,
- > *Quantifizierung:* über die Peakfläche via interne Standard-Kalibration.

- > *Geräte:* Thermo Trace GC Ultra, ECD Ni-63 Thermo Electron 370 MBq (10 mCi), Soxtherm, Trockenschrank, Eindampfstation,
- > *Qualitätssicherung:* Surrogates, Blindwertkontrollen, Positivkontrollen, Kontrolle des Derivatisierungsmittels, Bestätigungsmessungen mittels GC/MS,
- > *Resultat:* g/kg

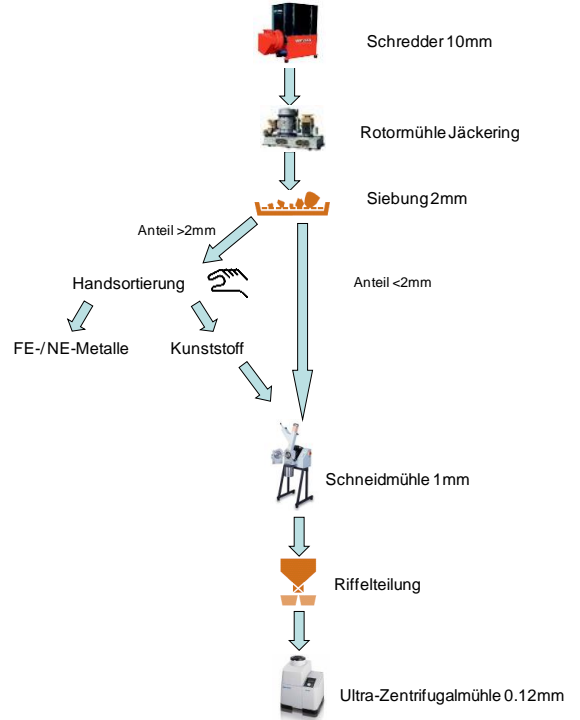
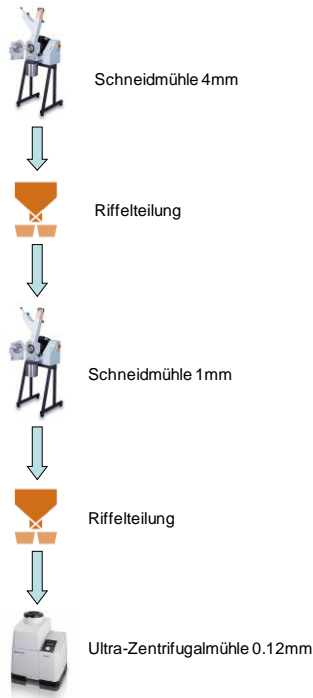
Bestimmungsgrenze	BDE 47, 99, 100, 153, 154, 183, 197	0,02 g/kg
	DecaBB/TBBPA	0,02 g/kg
	BDE 28/BDE 209	0,1 g/kg
	HBCDD	0,2 g/kg
	DBDPE / TBP / TTBP-TAZ / DBE-DBCH	0,1 g/kg
	BTBPE / BEH-TEBP / EH-TBB / PBT / PBEB	0,02 g/kg
	HBB / Mirex / DDC-CO	0,02 g/kg

9.2.2 Übersicht der Aufbereitungsmethoden der Bachema

Abb. 45 > Übersicht der Aufbereitungsmethoden der Bachema

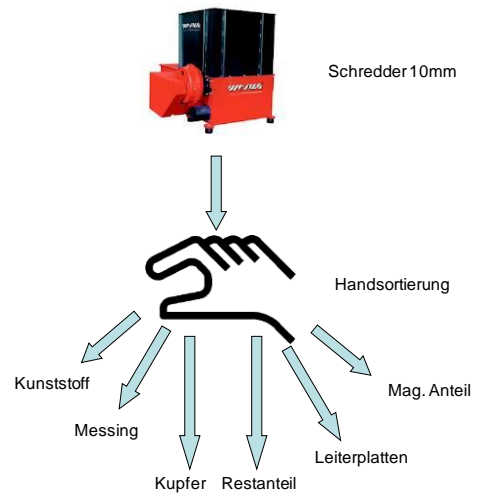
CRT-PC Gehäuse / PC-LCD Gehäuse / CRT-TV Gehäuse.

Leiterplatten Bruch.

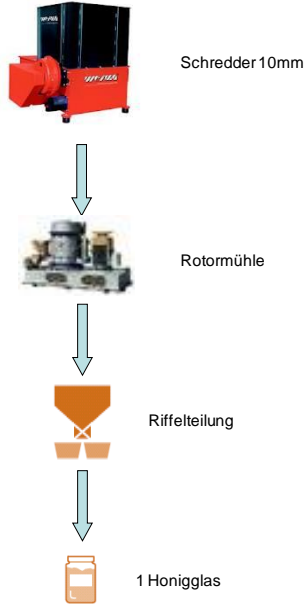


Kondensatoren.

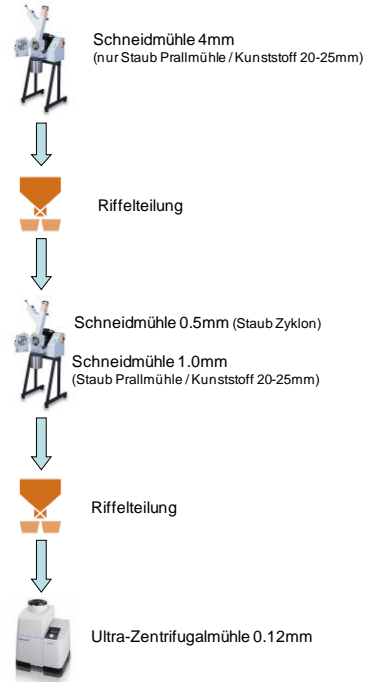
Metalle 5–10 mm.



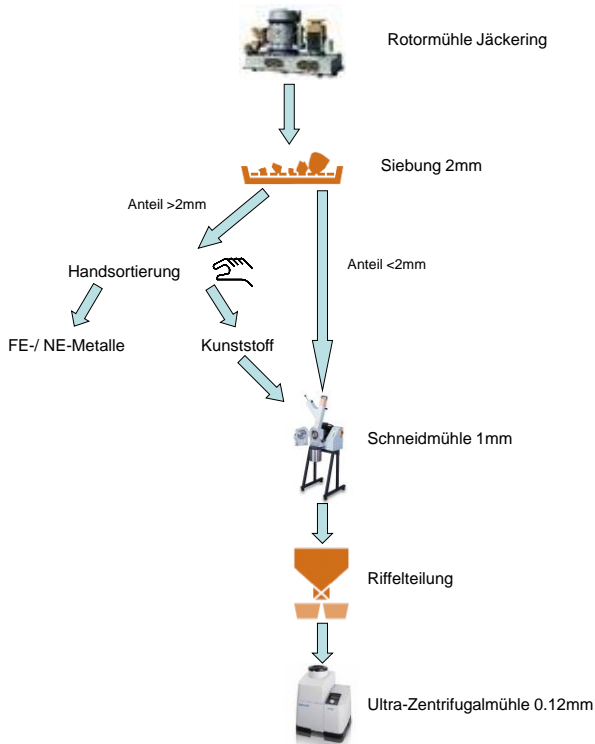
Cu-Kabel.



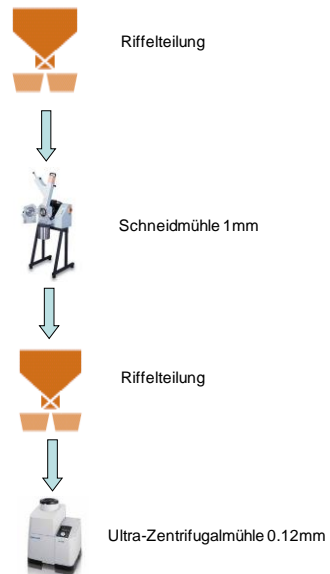
Staub Zylon / Staub Prallmühle / Kunststoff 20–25 mm.



Kunststoff 2–5 mm / 5–10 mm / Unterkorn.

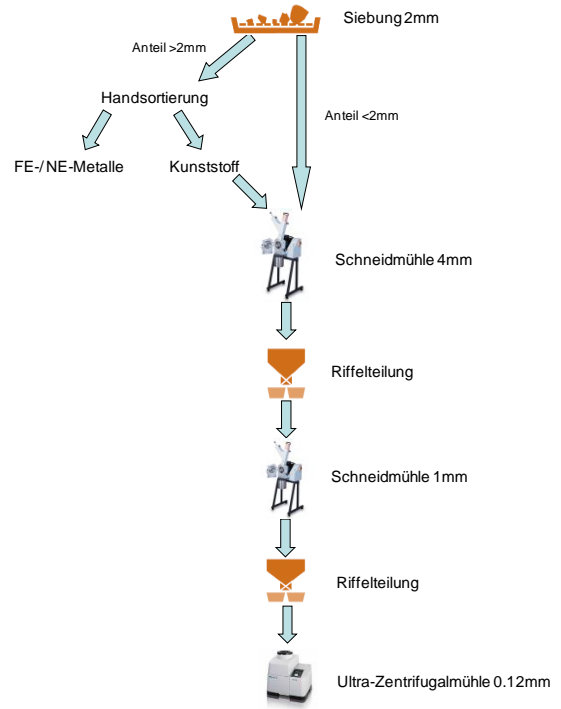
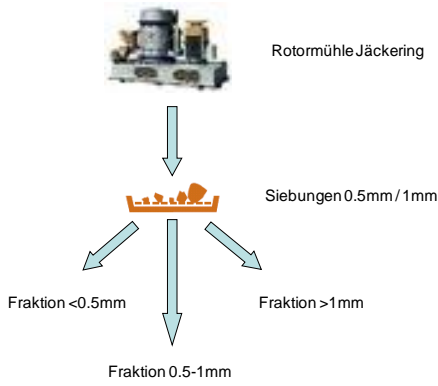


Kunststoffe > 2 mm.

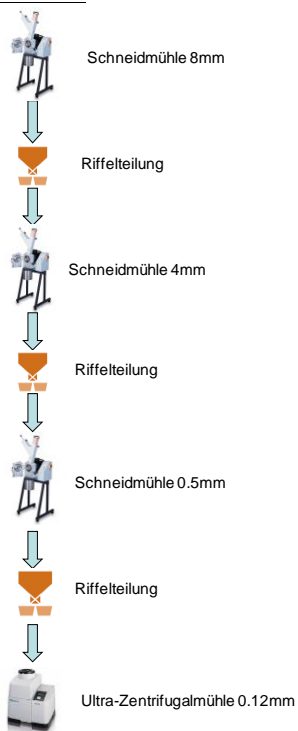


Metalle 2-5 mm / Metalle <2 mm / Metalle >2 mm mit Kunststoff.

LCD-TV Gehäuse / Notebook Gehäuse.



LCD-Modul.



9.2.3 Methodenbeschreibung EMPA

Für die Bestimmung der Metalle und des Phosphors wurden die Proben in fünffacher Ausführung im Hochdruckverascher (HPA-S) bei 320 °C und 135 bar Druck mittels einer Mischung bestehend aus Salpetersäure (HNO₃), Perchlorsäure (HClO₄) und Salzsäure (HCl) extrahiert. Die Massengehalte an den gewünschten chemischen Elementen in den Proben (ausgenommen Quecksilber) wurden mittels Plasmaspektrometrie (ICP-OES) und Flammen-Atomabsorptionsspektrometrie (F-AAS) quantitativ bestimmt. Für die quantitative Bestimmung von Quecksilber wurde nach der sauren Extraktion ein Aliquot mittels Kaliumpermanganat-Lösung stabilisiert. Die Quantifizierung erfolgte mittels der Kaltdampftechnik (FIMS).

Analytik Metalle und Phosphor

Als Qualitätssicherung wurden zertifizierte Standardreferenzmaterialien eingesetzt.

Für die Bestimmung von Chlor und Brom wurden die Proben in dreifacher Ausführung in einer mit Natronlauge als Absorptionslösung versehenen Sauerstoff-Druckbombe bei 30 bar verbrannt. Die dabei interessierenden Halogene Chlor und Brom wurden als ihre Salze in der Natronlauge neutralisiert und absorbiert.

Analytik Chlor und Brom

Die Bestimmung der Massenkonzentration von Chlor erfolgte mittels Ionenchromatographie (IC) als Chlorid.

Die Bestimmung der Massenkonzentration von Brom erfolgte mittels ionenselektiver Elektrode (ISE), unter Zuhilfenahme der Mehrfach-Standardadditionstechnik, als Bromid.

Als Qualitätssicherung wurden zertifizierte Standardreferenzmaterialien eingesetzt.

Tab. 34 > Prüfobjekte

Proben-Nr.	Probenmaterial	Aussehen
FÜ 13 003	LCD-TV-Gehäuse MP1	Feines, graues Pulver
FÜ 9298	Kunststoffe <2mm MP4	Feines, graues Pulver
9291	Staub Prallmühle MP4	Feines, graues Pulver
9302	CRT-TV-Gehäuse MP3	Feines, graues Pulver
FÜ 9295	Kunststoffe 20–25 mm	Feines, graues Pulver
13 003 Extrakt	Extrakt Bachema	Farbloser Extrakt
9298 Extrakt	Extrakt Bachema	Farbloser Extrakt
9291 Extrakt	Extrakt Bachema	Farbloser Extrakt
9302 Extrakt	Extrakt Bachema	Farbloser Extrakt
9297 Extrakt	Extrakt Bachema	Farbloser Extrakt
14 836	Zerkleinerte Kondensatoren	Flockiges Material, Geruch nach PCB

Analytik FS und PCB
(Qualitätskontrolle)

Prüfung 1: Quantitative Bestimmung der FS und PCB

Ca. 500 mg jeder Feststoffprobe wurden mit Toluol für 24 Stunden heiss extrahiert (Soxhlet-Extraktion). Die Extrakte wurden in einem Messkolben auf ein Endvolumen von 100 mL mit Toluol ergänzt. Ein Aliquot von je 10 µl der Probenextrakte wurde für die GC/HRMS Analyse verwendet. Die isopenmarkierten internen Standards wurden zum Probenaliquot zudosiert und 3 µl dieser Mischung zur Analyse in den Gaschromatographen injiziert. Mit den Probenextrakten der Firma Bachema wurde wie oben beschrieben verfahren, da die angelieferte Probenmenge ebenfalls 500 mg Feststoffprobe/100 mL Lösungsmittel entsprach.

Im Falle der Kondensatorenprobe wurden ca. 50 g des lockeren Materials zur Extraktion der PCB mit Toluol eingesetzt. Der Extrakt wurde nach 24-stündiger Soxhlet-Extraktion auf 500 mL mit Toluol ergänzt und ein Aliquot von 10 µl mit den isopenmarkierten PCB-Standards versetzt. Danach wurde mit *n*-Hexan auf 2 mL verdünnt und die Lösung mit konzentrierter Schwefelsäure ausgeschüttelt. Die *n*-Hexanphase wurde abgetrennt und an einer Mini-Kieselgelsäule gereinigt. Die Elution der PCB erfolgte mit 10 mL *n*-Hexan. Nach dem Einengen des Eluates am Rotationsverdampfer auf ca. 0,5 mL wurde der Rückstand quantitativ in ein GC-Vial transferiert und das Volumen unter N₂-Begasung bis auf ca. 30 µl reduziert. Nach Zugabe des Recoverystandards (¹³C₁₂-PCB-70) erfolgte die Bestimmung mittels GC/HRMS.

Gaschromatographie/Massenspektrographie

Nach der vorgängig beschriebenen Probenvorbereitung wurden die polybromierten Diphenylether (PBDE), Tetrabrombisphenol A (TBBPA), Hexabromcyclododecan (HBCDD), Decabrombiphenyl (DecaBB), Hexabrombenzol (HBB), 1,2-Bis(2,4,6-tribromphenoxy)ethan (BTBPE), Dechloran Plus (DDC-CO), Decabromdiphenylethan (DBDPE) und 2,4,6-Tris(2,4,6-tribromphenoxy)-1,3,5-triazin (TTBP-TAZ) mittels Gaschromatographie und hochauflösender Massenspektrometrie (GC/HRMS) quantita-

tiv bestimmt. Die Quantifizierung erfolgte durch Vergleich mit den isotoopenmarkierten Standards (Isotoopenverdünnungsanalyse) über die Signalhöhen. Wo keine isotoopenmarkierten internen Standards zur Verfügung standen (DDC-CO und TTBP-TAZ), wurde die Quantifizierung über Responsefaktoren zu ähnlichen, isotoopenmarkierten Substanzen durchgeführt.

Referenzmaterialien

> *Kalibrationsstandards:*

- Mischung von nicht markierten und $^{13}\text{C}_{12}$ -isotoopenmarkierten polybromierten Diphenylethern (EO-5099, Cambridge Isotope Laboratories)
- Tetrabrombisphenol A, (ULM-4694, Cambridge Isotope Laboratories)
- Hexabrombenzol (FRS-012S, AccuStandard)
- Firemaster 2100, Decabromdiphenylethan (FRS-036S, AccuStandard)
- Firemaster 680, 1,2-Bis(2,4,6-tribromphenoxy)ethan (FRS-037S, accuStandard)
- 2,4,6-Tris(2,4,6-tribromphenoxy)-1,3,5-triazin (FRS-049S, AccuStandard)
- Dechloran Plus, technisches Product (ULM-7777-S, Cambridge Isotope Laboratories)
- Hexabromcyclododecan, γ -Isomer, nicht markiert (ULM-4836-1.2, Cambridge Isotope Laboratories)
- Decabrombiphenyl (B-209S, AccuStandard)
- Mischung der PCB-IUPAC-Nr. 77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169 und 189 (C-WHO-01, Accu Standard Inc.)
- Mischung der PCB-IUPAC-Nr. 28, 52, 101, 138, 153 und 180 (AE-00059 PCB Congener Content Evaluation Mix 1, Accu Standard Inc.)

> *Interne Standards:*

- Mischung (Empa) von neun $^{13}\text{C}_{12}$ -isotoopenmarkierten polybromierten Diphenylethern und Decabrombiphenyl (BDE-28, 47, 99, 100, 153, 183, 197, 206, 209 und BB-209 alle Einzelstandards von Cambridge Isotope Laboratories oder Wellington Laboratories)
- Ring- $^{13}\text{C}_{12}$ -isotoopenmarkiertes Tetrabrombisphenol A, (CLM-4694, Cambridge Isotope Laboratories)
- $^{13}\text{C}_{12}$ -isotoopenmarkiertes Hexabrombenzol (mHBB, Wellington Laboratories)
- $^{13}\text{C}_{12}$ -isotoopenmarkiertes Hexabromcyclododecan, γ -Isomer (m γ HBCDD, Wellington Laboratories)
- $^{13}\text{C}_{14}$ -isotoopenmarkiertes Decabromdiphenylethan (mDBDPE, Wellington Laboratories)
- $^{13}\text{C}_{12}$ -isotoopenmarkiertes 1,2-Bis(2,4,6-tribromphenoxy)ethan (mBTBPE, Wellington Laboratories)
- Mischung der $^{13}\text{C}_{12}$ -isotoopenmarkierten PCB-IUPAC-Nr. 77, 81, 105, 114, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 169, 189 (EC-4937, Cambridge Isotope Laboratories)
- Mischung der $^{13}\text{C}_{12}$ -isotoopenmarkierten PCB-IUPAC-Nr. 28, 52, 101, 138, 153 und 180 (EC-4058, Cambridge Isotope Laboratories)

Prüfmittel

- > *Gaschromatograph:* Varian 3400 mit Autosampler CTC A200S

> *Kapillarsäulen:*

- 30 m × 0,25 mm, RTX-5-Sil MS, Filmdicke 0,10 µm
- 15 m × 0,25 mm, RTX-5 MS, Filmdicke 0,10 µm
- 60 m × 0,25 mm, DB-DXN, 0,15 µm

> *Massenspektrometer:* doppelfokussierendes Massenspektrometer Finnigan MAT 95, ausgerüstet mit Systemsteuerungssoftware ICL 10.0 und Applikationssoftware ICIS 8.03

Prüfbedingungen

- > *Trägergas:* Helium 67 kPa (15 m), 100 kPa (30 m), 200 kPa (60 m)
- > *Injektion:* 3 µL splitlos bei 280 °C FS und bei 260 °C für TBBPA, HBCDD und PCB
- > *GC-Programm PBDE:* 100 °C (1 min), 20 °C min⁻¹ bis 220 °C, 6 °C min⁻¹ bis 300 °C, 10 °C min⁻¹ bis 320 °C (10 min)
- > *GC-Programm HBCDD und TBBPA:* 100 °C (1 min), 10 °C min⁻¹ bis 260 °C (10 min)
- > *GC-Programm FS:* 100 °C (1 min), 20 °C min⁻¹ bis 220 °C, 10 °C min⁻¹ bis 320 °C (10 min)
- > *GC-Programm PCB:* 100 °C (1 min), 10 °C min⁻¹ bis 260 °C (10 min)
- > *Quellentemperatur:* 220 °C
- > *Ionisierung:* Elektronenstoss (EI), Detektion der positiven Ionen
- > *Elektronenenergie:* 70 eV
- > *Massenauflösung:* $m/\Delta m = 8000$ (10 % Tal)
- > *Einzelionendetektion:* Es wurden jeweils die m/z-Werte der beiden häufigsten Isotopenkombinationen der nativen und der ¹³C₁₂-markierten Verbindungen im Molekülionencluster oder eines Fragmentions registriert.

Prüfung 2: Qualitatives Screening einiger Probenextrakte mittels Fullscan-GC/MS

Probenaufbereitung

Die Probenextrakte wurden ohne Probenaufarbeitung direkt in den Gaschromatographen injiziert. Ein Mikroliter je Probenextrakt wurde für die qualitative Analyse mittels GC/MS verwendet.

Prüfmittel

- > *Gas-Chromatograph:* Varian 3400 mit Autosampler CTC A200S
- > *Kapillarsäule:* 15 m × 0,25 mm RTX-5MS, Filmdicke 0,10 µm
- > *Massenspektrometer:* doppelfokussierendes Massenspektrometer Finnigan MAT 95

Prüfbedingungen

- > *Trägergas:* Helium, 67 kPa
- > *Injektion:* 1 µL splittless
- > *Temperaturprogramm:* 100 °C (1 min), 20 °C min⁻¹ bis 220 °C, 10 °C min⁻¹ bis 320 °C (10 min)

- > *Quellentemperatur:* 220 °C
- > *Ionisierung:* Elektronenstoss-Ionisation (EI), Detektion der positiven Ionen
- > *Elektronenenergie:* 70 eV
- > *Massenauflösung:* $m/\Delta m = 1000$ (10 % Tal)
- > *Massendetektion:* Es wurden die m/z -Werte von 45–1000 erfasst (ab 2 min)
- > *Scanmodus:* magnetisch
- > *Scanrate:* 1 s pro Scan

Auswertung

Die mit GC/MS gefundenen organischen Komponenten wurden durch Vergleich der Massenspektren mit Referenzspektren der «NIST/EPA/NIH Mass Spectral Library» (NIST05 mit ca. 190 000 Spektren) charakterisiert. Übereinstimmende oder ähnliche Spektren sind jedoch keine ausreichenden Kriterien für die Identität einer Verbindung; sie liefern lediglich Hinweise auf bestimmte strukturelle Merkmale. Die Absicherung der Identität bedarf in jedem Fall den Beizug weiterer analytischer oder spektroskopischer Verfahren.

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 PBDE (Tri- bis Heptabrom), TBBPA, HBCDD und PCB ca. 10–20 %. Für Decabromdiphenylether liegt die Messunsicherheit wahrscheinlich etwas höher bei 25–50 %. Für die – im Vergleich zum Decabromdiphenylether – nicht sehr konzentriert vorhandenen Octa- und Nonabromdiphenylether dürfte die Messunsicherheit ebenfalls im Bereich um 50 % liegen. Diese höhere Messunsicherheit rührt u. a. daher, dass diese Kongenere unter Umständen im Labor unter lichtinduziertem Abbau oder im GC-Injektor aus DecaBDE gebildet werden. Im Vergleich zu DecaBDE handelt es sich bei den OctaBDE und v. a. den NonaBDE auch meist nur um Spurenkomponenten. Die Messunsicherheit für die hochbromierten und hochsiedenden «neuen» FS wie z. B. Decabromdiphenylethan (DBDPE) und v. a. 2,4,6-Tris(2,4,6-tribromphenoxy)-1,3,5-triazin (TTBP-TAZ) dürfte möglicherweise bis zu einem Faktor 2 betragen.

Tab. 35 > Prüfobjekte

Proben-Nr.	Probenmaterial	Aussehen
30 339	PC-LCD-Gehäuse MP1	Feines, graues Pulver
30 340	PC-LCD-Gehäuse MP3	Feines, graues Pulver
30 341	PC-LCD-Gehäuse MP5	Feines, graues Pulver
30 347	Staub Zyklon MP2	Feines, graues Pulver
30 348	Staub Zyklon MP4	Feines, graues Pulver
30 345	Staub Prallmühle MP2	Feines, graues Pulver
30 300	CRT-TV-Gehäuse MP1	Feines, graues Pulver
30 302	CRT-TV-Gehäuse MP5	Feines, graues Pulver
30 342	Sieb Unterkorn MP1 ohne Metalle	Feines, graues Pulver
30 343	Sieb Unterkorn MP3 ohne Metalle	Feines, graues Pulver
30 344	Sieb Unterkorn MP5 ohne Metalle	Feines, graues Pulver
30 307	Kunststoffe 2–5 und 5–10 mm MP2	Feines, graues Pulver
30 308	Kunststoffe 2–5 und 5–10 mm MP4	Feines, graues Pulver
30 316	Leiterplattenbruch MP2 ohne Metalle	Feines, graues Pulver
30 319	Leiterplattenbruch MP5 ohne Metalle	Feines, graues Pulver
30 320	Leiterplattenbruch MP6 ohne Metalle	Feines, graues Pulver
30 297	CRT-PC-Gehäuse MP1	Feines, graues Pulver
30 298	CRT-PC-Gehäuse MP3	Feines, graues Pulver
30 299	CRT-PC-Gehäuse MP5	Feines, graues Pulver
30 306	Kunststoffe 20–25 mm MP4	Feines, graues Pulver
9299	Cu-Kabel MP4	Kabel und Kunststoffschnippel
9300	Cu-Kabel MP4	Kabel und Kunststoffschnippel
30 313	LCD-TV-Gehäuse MP3 ohne Metalle	Feines, graues Pulver
30 314	LCD-TV-Gehäuse MP6 ohne Metalle	Feines, graues Pulver

Analytik FS
(Nachmessungen zwecks
Erreichung tieferer
Bestimmungsgrenzen)

Proben-Nr.	Probenmaterial	Aussehen
30 336	Notebook-Gehäuse MP1 ohne Metalle	Feines, graues Pulver
30 337	Notebook-Gehäuse MP2 ohne Metalle	Feines, graues Pulver
30 338	Notebook-Gehäuse MP3 ohne Metalle	Feines, graues Pulver
30 310	LCD-Module MP3 (A+B)	Feines, graues Pulver
30 311	LCD-Module MP6 (A+B)	Feines, graues Pulver

Prüfung 1: Quantitative Bestimmung der FS

Prüfverfahren FS

Ca. 500 mg jeder Feststoffprobe wurden mit Toluol für 24 Stunden heiss extrahiert (Soxhlet-Extraktion). Die Extrakte wurden in einem Messkolben auf ein Endvolumen von 100 mL mit Toluol ergänzt. Ein Aliquot von je 25 µl der Probenextrakte wurde für die GC/HRMS-Analyse verwendet. Die isotopenmarkierten internen Standards wurden zum Probenaliquot zudosiert und 3 µl dieser Mischung zur Analyse in den Gaschromatographen injiziert.

Gaschromatographie/Massenspektrometrie

Nach der vorgängig beschriebenen Probenvorbereitung wurden die polybromierten Diphenylether (PBDE), die Hexabromcyclododecane (HBCDD), Decabrombiphenyl (DecaBB), Hexabrombenzol (HBB), 1,2-Bis(2,4,6-tribromphenoxy)ethan (BTBPE), Dechloran Plus (DDC-CO), Decabromdiphenylethan (DBDPE) und 2,4,6-Tris(2,4,6-tribromphenoxy)-1,3,5-triazin (TTBP-TAZ) mittels Gaschromatographie und hochauflösender Massenspektrometrie (GC/HRMS) quantitativ bestimmt. Die Quantifizierung erfolgte durch Vergleich mit den isotopenmarkierten Standards (Isotopenverdünnungsanalyse) über die Signalhöhen. Wo keine isotopenmarkierten internen Standards zur Verfügung standen (DDC-CO und TTBP-TAZ), wurde die Quantifizierung über Responsefaktoren zu ähnlichen, isotopenmarkierten Substanzen durchgeführt.

Referenzmaterialien

> Kalibrationsstandards:

- Mischung von nicht markierten und $^{13}\text{C}_{12}$ -isotopenmarkierten polybromierten Diphenylethern (EO-5099, Cambridge Isotope Laboratories)
- Hexabrombenzol (FRS-012S, AccuStandard)
- Firemaster 2100, Decabromdiphenylethan (FRS-036S, AccuStandard)
- Firemaster 680, 1,2-Bis(2,4,6-tribromphenoxy)ethan (FRS-037S, accuStandard)
- 2,4,6-Tris(2,4,6-tribromphenoxy)-1,3,5-triazin (FRS-049S, AccuStandard)
- Dechloran Plus, technisches Produkt (ULM-7777-S, Cambridge Isotope Laboratories)
- Hexabromcyclododecan, γ -Isomer, nicht markiert (ULM-4836-1.2, Cambridge Isotope Laboratories)
- Decabrombiphenyl (B-209S, AccuStandard)

> *Interne Standards:*

- Mischung (Empa) von neun $^{13}\text{C}_{12}$ -isotopenmarkierten polybromierten Diphenylethern und Decabrombiphenyl (BDE-28, 47, 99, 100, 153, 183, 197, 206, 209 und BB-209 alle Einzelstandards von Cambridge Isotope Laboratories oder Wellington Laboratories)
- $^{13}\text{C}_{12}$ -isotopenmarkiertes Hexabrombenzol (mHBB, Wellington Laboratories)
- $^{13}\text{C}_{12}$ -isotopenmarkiertes Hexabromcyclododecan, γ -Isomer (m γ HBCDD, Wellington Laboratories)
- $^{13}\text{C}_{14}$ -isotopenmarkiertes Decabromdiphenylethan (mDBDPE, Wellington Laboratories)
- $^{13}\text{C}_{12}$ -isotopenmarkiertes 1,2-Bis(2,4,6-tribromphenoxy)ethan (mBTBPE, Wellington Laboratories)

Prüfmittel

- > *Gaschromatograph:* Varian 3400 mit Autosampler CTC A200S
- > *Kapillarsäulen:*
 - 30 m \times 0,25 mm, RTX-5-Sil MS, Filmdicke 0,10 μm
 - 15 m \times 0,25 mm, RTX-5 MS, Filmdicke 0,10 μm
- > *Massenspektrometer:* doppelfokussierendes Massenspektrometer Finnigan MAT 95, ausgerüstet mit Systemsteuerungssoftware ICL 10.0 und Applikationssoftware ICIS 8.03

Prüfbedingungen

- > *Trägergas:* Helium 67 kPa (15m), 100 kPa (30m)
- > *Injektion:* 3 μL splitlos bei 280 $^{\circ}\text{C}$ für FS und bei 260 $^{\circ}\text{C}$ für TBBPA, HBCDD
- > *GC-Programm PBDE:* 100 $^{\circ}\text{C}$ (1 min), 20 $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ bis 220 $^{\circ}\text{C}$, 6 $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ bis 300 $^{\circ}\text{C}$, 10 $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ bis 320 $^{\circ}\text{C}$ (10 min)
- > *GC-Programm HBCDD:* 100 $^{\circ}\text{C}$ (1 min), 10 $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ bis 260 $^{\circ}\text{C}$ (10 min)
- > *GC-Programm FS:* 100 $^{\circ}\text{C}$ (1 min), 20 $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ bis 220 $^{\circ}\text{C}$, 10 $^{\circ}\text{C min}^{-1}$ bis 320 $^{\circ}\text{C}$ (10 min)
- > *Quellentemperatur:* 220 $^{\circ}\text{C}$ bis maximal 260 $^{\circ}\text{C}$
- > *Ionisierung:* Elektronenstoss (EI), Detektion der positiven Ionen
- > *Elektronenenergie:* 70 eV
- > *Massenauflösung:* $m/\Delta m = 8000$ (10 % Tal)
- > *Einzelionendetektion:* Es wurden jeweils die m/z-Werte der beiden häufigsten Isotopenkombinationen der nativen und der $^{13}\text{C}_{12}$ -markierten Verbindungen im Moleküllionencluster oder eines Fragmentions registriert.

Die Analysen wurden gemäss dem EMPA-Projektbericht Nr. 208 116/01 durchgeführt. Als Qualitätssicherung wurden zertifizierte Standardreferenzmaterialien eingesetzt. Für die Bestimmung von gasförmigem Quecksilber stehen keine zertifizierten Standardreferenzmaterialien zur Verfügung. Hier wurde mit flüssigen Quecksilber-Standardreferenzmaterialien gearbeitet.

Analytik
Hintergrundbeleuchtungen

9.3 Qualitätskontrolle der Analytik

Um möglichen systematischen Fehlern aber auch zufälligen Fehlern auf die Spur zu kommen wurden ausgewählte Proben von einem Zweitlabor analysiert. Die Wahl fiel wie bei der Untersuchung 2003 auf die EMPA Dübendorf. Einerseits wurde fertig aufbereitetes Extrakt, andererseits aber auch einige nur mechanisch aufbereitete Proben getestet.

9.3.1 Untersuchung auf Organika

> Untersuchte Stoffe:

- *Sämtliche «alten» Analyten:* BDE 28, 47, 99, 100, 153, 183, 196, 197, 206, 207, 208, 209, DecaBB, HBCDD, TBBPA
- *Plus die fünf «neuen» Analyten:* HBB, BTBPE, DDC-CO, DBDPE, TTBP-TAZ (auf die Analyse der übrigen von der Bachema analysierten Stoffe wurde aus Kostengründen verzichtet)
- *PCB (nur bei den Kondensatoren):* PCB 28, 52, 101, 118, 123, 126, 156, 157, 167, 189
- Screening auf andere FS aus den vier gelieferten Extrakten

> Extrakte:

- 9291, Staub Prallmühle MP4
- 9298, Kunststoff <2mm MP4
- 9302, CRT-TV-Gehäuse MP3
- 13 003, LCD-TV-Gehäuse MP1

> Analyse aus den gelieferten aufbereiteten Proben (zerkleinert, homogenisiert):

- (zur Validierung der Herstellung der Extrakte seitens Bachema)
- 9291, Staub Prallmühle MP4 (Probe wurde direkt an M. Zennegg übergeben)
 - 9298, Kunststoff <2mm MP4
 - 14 836, Kondensatoren (nur Analyse auf PCB)

In der nachfolgenden Tab. 36 sind jeweils die Analysenresultate der EMPA und der Bachema einander gegenüber gestellt. Zusätzlich werden auch noch die Resultate aus der Analyse der mechanisch aufbereiteten Proben und aus dem Extrakt verglichen (ausser bei den Proben 9295 und 9297, wo kein nur mechanisch aufbereitetes Material vorlag).

Gelb kursiv ist dabei der Wert der Bestimmungsgrenze (BG) angegeben, Ocker sind Summenwerte angegeben, falls mindestens ein Wert davon unterhalb der NWG lag.

Tab. 36 > Vergleich der FS EMPA/Bachema

Probenbezeichnung:	FÜ 13003	13003	13003	13003	13002	13003
	LCD-TV-Gehäuse MP1	Extrakt Bachema MP1	Abweichung Extrakt EMPA zu Bachema Extrakt	LCD-TV-Gehäuse MP1	Abweichung Extrakt EMPA zu Analyse Bachema	Abweichung Extrakt Bachema zu Analyse Bachema
	EMPA [mg/kg]	EMPA [mg/kg]	[%]	Bachema [mg/kg]	[%]	[%]
28-TriBDE	0.10	0.082	21%	5.0		
47-TeBDE	0.71	0.83	17%	5.0		
99-PeBDE	0.78	0.90	15%	5.0		
100-PeBDE	0.19	0.16	20%	5.0		
153-HxBDE	3.6	3.4	6%	5.0		
154-HxBDE	0.24	0.21	18%	5.0		
183-HpBDE	16	16	5%	16	2%	3%
197-OcBDE	8.3	7.1	16%	5.0		
206-NoBDE	140	98	43%			
207-NoBDE	53	26	101%			
208-NoBDE	24	11	122%			
209-DecaBDE	4408	4047	9%	3495	26%	16%
209-BB	0.61	1.0	63%			
Summe aller BDE:	4656	4211	11%	3546	31%	19%
Summe Tri-PeBDE	1.8	2.0	11%	20		
Summe Hx-OcBDE	28	26	8%	31	9%	18%
Summe No+DeBDE	4625	4182	11%	3495	32%	20%
TBBPA	3993	4560	14%	3960	1%	15%
HBCDD	3.6	4.9	38%	200		
HBB	2.7	2.7	1%	20		
BTBPE	28	35	25%	30	8%	16%
DDC-CO	3.6	3.6	0%	20		
DBDPE	2082	1934	8%	2015	3%	4%
TBPT	396	388	2%	790	100%	104%
			24%		24%	24%
DecaBB				20		
TBP				100		
DBE-DBCH				100		
PBT				20		
PBEB				20		
Mirex				20		
EH-TBB				20		
BEH-TEBP				20		

HBB = Hexabrombenzol
 BTBPE = Bistribromphenoxyethan
 DDC-CO = Dechloran Plus
 DBDPE = Decabromdiphenylethan
 TTBD-TAZ = Tristribromphenoxytriazin

Anteil der Summe = BG

Kursiv = NWG

Fett = Fehler > 50%

Vergleich der FS EMPA/Bachema

	KS < 2mm MP4		Abweichung Extrakt EMPA zu Bachema Extrakt [%]	KS < 2mm MP4		Abweichung Extrakt EMPA zu Analyse Bachema [%]	Abweichung Extrakt Bachema zu Analyse Bachema [%]
	EMPA [mg/kg]	Extrakt Bachema MP4 EMPA [mg/kg]		Bachema [mg/kg]	Abweichung Extrakt EMPA zu Analyse Bachema [%]		
28-TriBDE	0.54	0.70	30%	5.0			
47-TeBDE	3.8	4.4	15%	5.0			
99-PeBDE	4.5	5.0	13%	5.0			
100-PeBDE	0.67	0.74	10%	5.0			
153-HxBDE	16	21	28%	13	27%	62%	
154-HxBDE	2.6	3.3	27%	5.0			
183-HpBDE	84	115	36%	80	5%	43%	
197-OcBDE	47	63	33%	50	6%	25%	
206-NoBDE	49	39	27%				
207-NoBDE	38	37	3%				
208-NoBDE	13	7.4	71%				
209-DecaBDE	938	1332	42%	1170	25%	14%	
209-BB	18	24	37%				
Summe aller BDE:	1198	1627	36%	1338	12%	22%	
Summe Tri-PeBDE	9.5	11	15%	20			
Summe Hx-OcBDE	150	202	34%	148	1%	36%	
Summe No+DeBDE	1038	1415	36%	1170	13%	21%	
TBBPA	993	1370	38%	1130	14%	21%	
HBCDD	34	38	10%	200			
HBB	23	33	46%	30	33%	10%	
BTBPE	157	170	9%	150	4%	13%	
DDC-CO	65	82	25%	93	42%	13%	
DBDPE	744	1087	46%	800	7%	36%	
TBPT	30	43	44%	103	245%	140%	
			30%		33%	35%	
DecaBB				20			
TBP				100			
DBE-DBCH				100			
PBT				20			
PBEB				20			
Mirex				20			
EH-TBB				20			
BEH-TEBP				20			

HBB = Hexabrombenzol

BTBPE = Bistribromphenoxyethan

DDC-CO = Dechloran Plus

DBDPE = Decabromdiphenylethan

TTBD-TAZ = Tristribromphenoxytriazin

Anteil der Summe = BG

Kursiv = NWG

Fett = Fehler > 50%

Vergleich der FS EMPA/Bachema

Probenbezeichnung:	9291			9291		
	Staub Prallmühle MP4 EMPA [mg/kg]	Extrakt Bachema MP4 EMPA [mg/kg]	Abweichung Extrakt EMPA zu Bachema Extrakt [%]	Staub Prallmühle MP4 Bachema [mg/kg]	Abweichung Extrakt EMPA zu Analyse Bachema [%]	Abweichung Extrakt Bachema zu Analyse Bachema [%]
28-TriBDE		4.5	4.0	12%	5.0	
47-TeBDE		33	28	16%	30	8%
99-PeBDE		41	36	13%	35	16%
100-PeBDE		4.3	3.8	13%	5.0	
153-HxBDE		10	8.7	15%	10	0%
154-HxBDE		2.7	2.3	15%	5.0	14%
183-HpBDE		19	15	25%	25	35%
197-OcBDE		10	8.0	24%	5.0	
206-NoBDE		14	8.9	59%		
207-NoBDE		7.5	5.6	32%		
208-NoBDE		2.8	1.4	96%		
209-DecaBDE		307	292	5%	370	20%
209-BB		7.1	6.3	12%		27%
Summe aller BDE:		455	414	10%	490	8%
Summe Tri-PeBDE		82	72	14%	75	9%
Summe Hx-OcBDE		41	34	21%	45	9%
Summe No+DeBDE		332	308	8%	370	12%
TBBPA		258	236	9%	220	17%
HBCDD		8.7	9.2	6%	200	
HBB		14	17	28%	20	47%
BTBPE		31	30	0%	33	7%
DDC-CO		53	45	18%	65	22%
DBDPE		248	278	12%	255	3%
TBPT		9.4	7.9	19%	100	
				20%		15%
DecaBB					20	
TBP					100	
DBE-DBCH					100	
PBT					20	
PBEB					20	
Mirex					20	
EH-TBB					20	
BEH-TEBP					20	

HBB = Hexabrombenzol
 BTBPE = Bistribromphenoxyethan
 DDC-CO = Dechloran Plus
 DBDPE = Decabromdiphenylethan
 TTBD-TAZ = Tristribromphenoxytriazin

Anteil der Summe = BG

Kursiv = NWG

Fett = Fehler > 50%

Vergleich der FS EMPA/Bachema

Probenbezeichnung:	9302	9302	9302	9302	9302	9302	9302	
	CRT-TV Gehäuse MP3	Extrakt Bachema MP 3	Abweichung Extrakt EMPA zu Bachema Extrakt	CRT-TV Gehäuse MP3	Abweichung Extrakt EMPA zu Analyse Bachema	Abweichung Extrakt Bachema zu Analyse Bachema	Bachema [mg/kg]	[%]
	EMPA [mg/kg]	EMPA [mg/kg]	[%]	Bachema [mg/kg]	[%]	[%]		
28-TriBDE	0.028	0.017	68%	5.0				
47-TeBDE	0.24	0.14	71%	5.0				
99-PeBDE	0.43	0.30	47%	5.0				
100-PeBDE	0.048	0.037	30%	5.0				
153-HxBDE	66	53	24%	60	10%	13%		
154-HxBDE	5.3	4.1	28%	5.0				
183-HpBDE	419	332	26%	435	4%	31%		
197-OcBDE	230	185	24%	165	39%	12%		
206-NoBDE	197	132	50%					
207-NoBDE	200	136	47%					
208-NoBDE	28	11	168%					
209-DecaBDE	5145	4139	24%	4960	4%	20%		
209-BB	15	12	25%					
Summe aller BDE:	6291	4992	26%	5645	11%	13%		
Summe Tri-PeBDE	0.75	0.49	53%	20				
Summe Hx-OcBDE	720	575	25%	665	8%	16%		
Summe No+DeBDE	5570	4417	26%	4960	12%	12%		
TBBPA	917	938	2%	1000	9%	7%		
HBCDD	362	389	7%	225				
HBB	11	11	4%	25	137%	128%		
BTBPE	1962	1477	33%	1290	52%	15%		
DDC-CO	1234	892	38%	1170	5%	31%		
DBDPE	651	689	6%	875	34%	27%		
TBPT	11	20	79%	100				
			39%		27%	27%		
DecaBB				20				
TBP				100				
DBE-DBCH				100				
PBT				20				
PBEB				20				
Mirex				20				
EH-TBB				20				
BEH-TEBP				20				

HBB = Hexabrombenzol
 BTBPE = Bistribromphenoxyethan
 DDC-CO = Dechloran Plus
 DBDPE = Decabromdiphenylethan
 TTBD-TAZ = Tristribromphenoxytriazin

Anteil der Summe = BG

Kursiv = NWG

Fett = Fehler > 50%

Vergleich der FS EMPA/Bachema

Probenbezeichnung:	FÜ 9295			9297		
	KS 20-25 mm MP2 EMPA [mg/kg]	KS 20-25 mm MP2 Bachema [mg/kg]	Abweichung Extrakt EMPA zu Analyse Bachema [%]	KS<2 mm MP2 EMPA [mg/kg]	KS<2 mm MP2 Bachema [mg/kg]	Abweichung Extrakt EMPA zu Analyse Bachema [%]
28-TriBDE	0.34	5.0		0.52	5.0	
47-TeBDE	1.8	5.0		3.3	5.0	
99-PeBDE	1.5	5.0		3.9	5.0	
100-PeBDE	0.13	5.0		0.37	5.0	
153-HxBDE	30	22	36%	15	12	24%
154-HxBDE	3.0	5.0		1.9	5.0	
183-HpBDE	170	190	12%	79	85	8%
197-OcBDE	92	90	2%	43	50	15%
206-NoBDE	25			27		
207-NoBDE	34			26		
208-NoBDE	4			7.7		
209-DecaBDE	914	1200	31%	747	955	28%
209-BB	18			20		
Summe aller BDE:	1275	1527	20%	955	1127	18%
Summe Tri-PeBDE	3.8	20		8.1	20	
Summe Hx-OcBDE	294	307	4%	139	152	9%
Summe No+DeBDE	977	1200	23%	808	955	18%
TBBPA	2113	2060	3%	845	905	7%
HBCDD	50	200		28	200	
HBB	10	20		25	35	42%
BTBPE	438	500	14%	142	165	16%
DDC-CO	44	65	47%	55	85	53%
DBDPE	822	915	11%	526	615	17%
TBPT	12	100		24	120	394%
			19%			50%
DecaBB		20			30	
TBP		100			100	
DBE-DBCH		100			100	
PBT		20			20	
PBEB		20			20	
Mirex		20			20	
EH-TBB		20			20	
BEH-TEBP		20			20	

HBB = Hexabrombenzol
 BTBPE = Bistribromphenoxyethan
 DDC-CO = Dechloran Plus
 DBDPE = Decabromdiphenylethan
 TTBD-TAZ = Tristibromphenoxytriazin

Anteil der Summe = BG

Kursiv = NWG

Fett = Fehler > 50%

Tab. 37 > Vergleich der PCB EMPA/Bachema

Probenbezeichnung:	14836	14836	14836	9297
	Kondensatoren	Kondensatoren	Kondensatoren	Abweichung eigenes Extrakt zu Analyse Bachema
		mg/kg	Analyse Bachema [mg/kg]	[%]
PCB IUPAC-Nr.:				
28		12	4.1	181%
52		82	46	78%
101		87	53	65%
138		78	43	83%
153		54	32	70%
180		18	11	69%
Summe 28,52,101,138,153,180		330	188	76%
Gesamt PCB (Summe x 5)		1651	807	105%
PCB IUPAC-Nr.:	WHO-TEQ1998 mg/kg	mg/kg		
77	0.0001	1		
81	0.00002	0.2		
105	0.0047	47		
114	0.0013	2.7		
118	0.011	106	56.9	86%
123	0.00130	13.0		
126	0.008	0.08		
156	0.0046	9		
157	0.0010	2.0		
167	0.000032	3.2		
169	0.00004	0.00		
189	0.000045	0.45		
Σ WHO-TEQ	0.032			90%

Kursiv = NWG

Fett = Fehler > 50%

Beurteilung der Ergebnisse

Bei den FS stimmen die Resultate der EMPA und der Bachema – abgesehen von wenigen Proben – recht gut überein, beispielsweise bei DBDPE. Bei HBB unterscheiden sich die Werte bei der Probe 9291 relativ stark, bei BTBPE bei Probe 9302. Letzteres kann am ehesten auf die unterschiedlichen Extraktionsmethoden zurückgeführt werden. Die Unterschiede bei TTBP-TAZ kommen durch den hohen Siedepunkt bzw. die hohe molare Masse von über 1000 g/mol zustande. TTBP-TAZ reagiert sehr empfindlich auf Matrix sowie kleinste Veränderungen im GC-System. Da solche Probleme in der Regel zu Minderbefunden führen, werden die höheren Werte in diesem Fall als plausibler betrachtet. Bei den Proben 9297 und 9298 (siehe Tab. 48 und Tab. 54) liegt der Befund der Bachema zudem knapp oberhalb der Bestimmungsgrenze, was die hohen Abweichungen erklärt. Die Probe 13003 durch die Bachema wurde mehrmals untersucht: Die ECD-Messungen von drei verschiedenen Extraktionen ergaben Werte von 700 mg/kg, 900 mg/kg und 900 mg/kg. Eine Bestätigungsmessung mittels MS

ergab einen Wert von 600 mg/kg. Da zudem eine Nachextraktion keinen Befund zeigte, wird der ursprüngliche Befund als zuverlässig betrachtet.

Da bei den PBDE die grössten Unterschiede bei Kongeneren mit geringen Konzentrationen auftraten, machen diese für die Berechnung der PentaBDE-, OctaBDE- und DecaBDE-Konzentrationen wenig aus. Die bei den Kondensatoren in Probe 14836 festgestellten grossen Unterschiede lassen sich auf das heterogene, schwierig aufzubereitende Probenmaterial zurückführen. Ein Schreddern auf eine Korngrösse von deutlich unter 5 mm war nicht möglich.

Die Unterschiede bei den Bestimmungsgrenzen kamen dadurch zustande, dass bei der EMPA die Analysen mittels hochempfindlichen Sektorfeld-Gerät durchgeführt wurden, während bei der Bachema ein relativ einfaches Quatrupol-MS zum Einsatz kam.

9.3.2 Untersuchung auf Anorganika

Die folgenden Elemente wurden von der EMPA untersucht:
Al, Sb, Pb, Cd, Cr, Fe, Cu, Ni, Hg, Zn, Sn, Cl, Br, P

Untersuchte Stoffe

Die folgenden sieben verschiedenen Proben wurden analysiert:

Proben

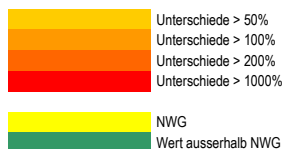
- > 9291 Staub Prallmühle MP4 (<0,12 mm)
- > 9296 Kunststoff 20–25 mm MP4 (<0,12 mm)
- > 13003 LCD-TV-Gehäuse MP1 (<0,12 mm)
- > 9302 CRT-TV-Gehäuse MP3 (<0,12 mm)
- > 12952 Leiterplattenbruch MP5 (<0,1 mm)
- > 18379 Metalle 2–5 mm MP3 (<0,5 mm)
- > 18391 Metalle <2 mm mit KS MP5 (<0,5 mm)

In der folgenden Tab. 38 sind die Mittelwerte der beiden Analysen gegenübergestellt:

Tab. 38 > Vergleich der Anorganika EMPA/Bachema

Probennummer	9291 Staub Prallmühle MP4				9296 Kunststoffe 20-25mm MP4				9302 CRT-TV- Gehäuse MP3				12952 Leiter- plattenbruch MP 5			
	Bachema	EMPA	abs.	rel.	Bachema	EMPA	abs.	rel.	Bachema	EMPA	abs.	rel.	Bachema	EMPA	abs.	rel.
Aluminium (Al) MW	23 600	22 200	-1 400	6%	4 480	3 340	-1 140	34%	187	380	193	103%	34 600	26 000	-8 600	33%
Antimon (Sb) MW	1 030	1 380	350	34%	1 580	2 700	1 120	71%	2 380	3 600	1 220	51%	378	860	482	128%
Blei (Pb) MW	14 400	11 800	-2 600	22%	1 880	980	-900	92%	523	620	97	19%	9 300	9 500	200	2%
Cadmium (Cd) MW	39	46	7.2	19%	35	36	1.1	3%	7.7	8.0	0.28	4%	1.3	2.0	1	56%
Chrom total(Cr) MW	742	850	108	15%	91	125	34	37%	12	125	113	942%	2 720	3 000	280	10%
Eisen (Fe) MW	78 700	77 300	-1 400	2%	1 050	920	-130	14%	1 250	850	-400	47%	17 300	16 500	-800	5%
Kupfer (Cu) MW	9 050	8 700	-350	4%	20 400	19 100	-1 300	7%	274	470	196	72%	187 000	243 200	56 200	30%
Nickel (Ni) MW	3 220	3 000	-220	7%	128	120	-8.0	7%	14	25	11	81%	3 970	4 000	30	1%
Quecksilber (Hg) MW	3.9	4.0	0.2	4%	0.37	0.10	-0.27	270%	0.16	0.40	0.24	150%	0.18	0.20	0.02	11%
Zink (Zn) MW	14 900	15 600	700.0	5%	1 790	1 470	-320	22%	325.00	400.0	75.0	23%	9 430	10 600	1 170	12%
Zinn (Sn) MW	5 250	4 230	-1 020	24%	603	410	-193	47%	37	45	7.9	21%	25 500	24 900	-600	2%
Brom (Br) MW	9 300	7 000	-2 300	33%	8 300	7 100	-1 200	17%	10 000	9 100	-900.0	10%	110 000	27 700	-82 300	297%
Chlor (Cl) MW	3 000	2 400	-600	25%	6 300	6 400	100	2%	4 800	12 100	7 300	152%	1 600	1 600	-	0%
Phosphor (P) MW	576	630	54	9%	1 387	1 200	-187	16%	1 273	1 300	27	2%	2 874	2 100	-774	37%

Probennummer	13003 LCD-TV- Gehäuse MP1				18379 Metalle 2-5mm MP3 (< 0.5mm)				18391 Metalle, < 2mm mit Kunststoff MP5			
	Bachema	EMPA	abs.	rel.	Bachema	EMPA	abs.	rel.	Bachema	EMPA	abs.	rel.
Aluminium (Al) MW	2 150	2 200	50	2%	460 000	381 800	-78 200	20%	386 000	349 000	-37 000	11%
Antimon (Sb) MW	1 790	3 200	1 410	79%	78	140	62	80%	150	260	110	73%
Blei (Pb) MW	274	260	-14	5%	6 680	7 200	520	8%	15 500	16 100	600	4%
Cadmium (Cd) MW	1.6	3.0	1	88%	14	14	0	2%	15	19	4.2	28%
Chrom total(Cr) MW	91	125	34	37%	9 130	9 900	770	8%	1 080	960	-120	13%
Eisen (Fe) MW	1 720	1 100	-620	56%	45 800	44 400	-1 400	3%	9 080	7 700	-1 380	18%
Kupfer (Cu) MW	3 360	3 400	40	1%	247 000	308 300	61 300	25%	388 000	460 650	72 650	19%
Nickel (Ni) MW	168	150	-18	12%	8 300	8 000	-300	4%	2 250	2 000	-250	13%
Quecksilber (Hg) MW	0.04	0.10	0.06	150%	0.080	0.10	0.020	25%	0.69	0.70	0.010	1%
Zink (Zn) MW	522	520	-2.0	0%	114 000	144 000	30 000	26%	68 000	68 400	400	1%
Zinn (Sn) MW	500	480	-20	4%	14 200	14 000	-200	1%	22 400	21 800	-600	3%
Brom (Br) MW	12 000	11 900	-100	1%	-	2 500	-	-	-	2 600	-	-
Chlor (Cl) MW	490	1 100	610	124%	-	590	-	-	-	390	-	-
Phosphor (P) MW	3 571	3 700	129	4%	-	660	-	-	-	240	-	-



Beurteilung der Ergebnisse

Für die Elemente Sb und Sn wurde eine halbquantitative XRF-Kontrollanalyse sowie eine Wiederholung der nasschemischen Analytik in dreifacher Ausführung durchgeführt. Die XRF-Analytik zeigte bei allen Proben mit hohen Sb- und Sn-Gehalten die Problematik von Minderbefunden durch Ausfällung als Oxide in Folge längerer Standzeiten der Lösungen von der Extraktion bis zur Messung. In der Wiederholung wurden die Proben unmittelbar (innert wenigen Stunden) nach der Extraktion im Hochdruckverascher mittels ICP-OES vermessen. In den noch vorhandenen unlöslichen Rückständen nach der Extraktion konnten mittels XRF keine Linienintensitäten von Sb und Sn (<10 ppm) mehr festgestellt werden. Die tieferen von der der Bachema ermittelten Sb-Werte könnten auf eine partielle Ausfällung von Sb als Oxid zurückzuführen sein.

Bei der Gesamtchrombestimmung ist bei der Probe 9302 (CRT-TV-Gehäuse MP3) ist ein erheblicher Minderbefund bei den Bachema-Resultaten festzustellen. Weniger deutlich ist dies auch bei den Proben 9296 und 13003 zu sehen. Diese Minderbefunde

sind auf die Entstehung von Chromcarbid bei einigen organischen Matrices während des Aufschlusses mit weniger oxidativen Säuren wie z. B. Königswasser und zu tiefen Temperaturen (<300 °C, Mikrowellenaufschlussgeräten) während des Aufschlusses zurückzuführen (Figi et al. 2010).

In der Probe 9302 zeigen Kupfer und Nickel erhebliche Abweichungen. Da diese Probe einen sehr hohen Kohlenstoffgehalt und eine hohe Verdichtung aufweist, können die Abweichungen auf die fehlende Oxidationskraft des Aufschlussmittels Königswasser oder auch auf eine zu tiefe Extraktionstemperatur (<300 °C) des Bachema-Verfahrens zurückzuführen sein. Bei Hg treten die grössten Fehler dort auf, wo die Werte der EMPA unterhalb der NWG liegen.

Bei den Proben 9302, 12952 und 13003 sind teilweise erhebliche Differenzen bei den Halogenen Br oder Cl ersichtlich. Letztere wurden der hohen NWG der EMPA-Methode zugeschrieben. Die Messwerte der anderen Elemente stimmen im Rahmen der analytischen Genauigkeit der angewandten Verfahren gut überein.

9.4 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.

9.4.1 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:

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

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

σ_P^2 Varianz infolge Probenahme und Probeaufbereitung

σ_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 σ_A^2 :

a) für die Metallbestimmung mittels RFA:

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

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

σ_{PH}^2 Varianz infolge Pillenherstellung

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

b) für die Bestimmung der Flammschutzmittel mittels GC-ECD/MS:

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

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

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

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

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

$\sigma_{\text{Anal.}}^2$ 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)

Δ_A : rel. Fehler $\frac{\sigma_A}{\bar{c}_A}$ von Bachema angegeben

- für Metalle (RFA) und Cl, Br, P: 5,5 %

- für die Flammschutzmittel, PCB: 7,5 %

Für den Probenfehler/gilt:

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

σ_{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

σ_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 σ_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.

9.4.2 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, so 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.

9.4.3 Berechnung der Konzentrationen im Input und deren Unsicherheit

Die mittleren Stoffkonzentrationen **der untersuchten 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.

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

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 Versuchs** wird aus der Summe der mittleren Stoffströme über alle Outputs berechnet. Die Schätzung der Unsicherheit erfolgt durch die Gauss'schen Fehlerfortpflanzung.

9.4.4 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.

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

9.4.5 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).

9.4.6 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.

Nicht oder nur teilweise analysierte Fraktionen

Tab. 39 > Nicht oder nur teilweise analysierte Fraktionen (Literaturwerte)

Nicht oder nur teilweise analysierte Fraktionen	Al			Sb			Pb			Cd			Cr			Fe			Cu				
	u.G.	MW	o.G.	u.G.	MW	o.G.	u.G.	MW	o.G.	u.G.	MW	o.G.	u.G.	MW	o.G.	u.G.	MW	o.G.	u.G.	MW	o.G.		
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	
FE-Shredder	18 000	20 000	22 000										4 500	5 000	5 500	864 000	960 000	1 056 000	9 000	10 000	11 000		
Aluminium	873 000	970 000	1 000 000																4 500	5 000	5 500		
Trafo Motoren																738 000	820 000	902 000	162 000	180 000	198 000		
Kupfer													4 500	5 000	5 500	18 000	20 000	22 000	873 000	970 000	1 000 000		
Messing																			585 000	650 000	715 000		
Batterien	42 400	53 000	63 600	1	1	1	592	740	888	1 600	2 000	2 400	1 440	1 800	2 160	184 000	230 000	276 000	54 400	68 000	81 600		
Kupferkabel							11	16	21	1.4	2.7	4.0							200 000	300 000	400 000		
Chromstahl / Nickel													162 000	180 000	198 000	648 000	720 000	792 000					
Verbunde und Überlauf																							
Schwerteile vor Granulator	90 771	100 856	110 942	21	23	25	14 328	15 920	17 511	0.57	0.64	0.70	35 075	38 972	42 869	206 639	229 598	252 558	169 835	188 706	207 576		
CRT-PC																							
Schattenmaske																			950 000	1 000 000	1 000 000		
Strahlerkanone							64 000	80 000	96 000										440 000	490 000	540 000		
Ablenkspule																			540 000	600 000	660 000	240 000	300 000
Bildröhren: [] mit / [] ohne Hals	14 400	16 000	17 600	2 970	3 300	3 630	4 140	4 600	5 060														
Getterpillen: [] mit / [] ohne Kathodenstrahlereinheit																							
Fehlmenge/Abfall	10 200	11 000	11 800	45	51	57	344	400	456	6.9	7.6	8.3	130	130	130	21 300	23 000	24 700	720	880	1 040		
CRT-TV																							
Schattenmaske																			950 000	1 000 000	1 000 000		
Strahlerkanone							64 000	80 000	96 000										440 000	490 000	540 000		
Ablenkspule																			540 000	600 000	660 000	240 000	300 000
Bildröhren: [] mit / [] ohne Hals	14 400	16 000	17 600	2 970	3 300	3 630	4 140	4 600	5 060														
Getterpillen: [] mit / [] ohne Kathodenstrahlereinheit																							
Fehlmenge/Abfall	10 200	11 000	11 800	45	51	57	344	400	456	6.9	7.6	8.3	130	130	130	21 300	23 000	24 700	720	880	1 040		
LCD-PC																							
Fehlmenge/Abfall	10 200	11 000	11 800	45	51	57	344	400	456	6.9	7.6	8.3	130	130	130	21 300	23 000	24 700	720	880	1 040		
Plexiglas																							
CrNi-Stahl													162 000	180 000	198 000	648 000	720 000	792 000					
Eisen	27 000	30 000	33 000										4 500	5 000	5 500	855 000	950 000	1 045 000	9 000	10 000	11 000		
Alu	882 000	980 000	1 078 000										4 500	5 000	5 500	9 000	10 000	11 000					
LCD-TV																							
Fehlmenge/Abfall	10 200	11 000	11 800	45	51	57	344	400	456	6.9	7.6	8.3	130	130	130	21 300	23 000	24 700	720	880	1 040		
Plexiglas																							
CrNi-Stahl													162 000	180 000	198 000	648 000	720 000	792 000					
Eisen	27 000	30 000	33 000										4 500	5 000	5 500	855 000	950 000	1 045 000	9 000	10 000	11 000		
Alu	882 000	980 000	1 078 000										4 500	5 000	5 500	9 000	10 000	11 000					
Notebooks																							
Akkus/Batt.																			360 000	400 000	440 000		
QZ Material (gelangt auf Anlage in Regensdorf)																							
Fehlmenge/Abfall	10 200	11 000	11 800	45	51	57	344	400	456	6.9	7.6	8.3	130	130	130	21 300	23 000	24 700	720	880	1 040		
Plexiglas																							
CrNi-Stahl													162 000	180 000	198 000	648 000	720 000	792 000					
Eisen	27 000	30 000	33 000										4 500	5 000	5 500	855 000	950 000	1 045 000	9 000	10 000	11 000		
Alu	882 000	980 000	1 078 000										4 500	5 000	5 500	9 000	10 000	11 000					

Nicht oder nur teilweise analysierte Fraktionen (Literaturwerte)

Nicht oder nur teilweise analysierte Fraktionen	Ni			Hg			Zn			Sn			Cl			Br			P		
	u.G.	MW	o.G.	u.G.	MW	o.G.	u.G.	MW	o.G.	u.G.	MW	o.G.	u.G.	MW	o.G.	u.G.	MW	o.G.	u.G.	MW	o.G.
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
FE-Shredder	4 500	5 000	5 500																		
Aluminium										4500	5000	5500									
Trafo Motoren																					
Kupfer	4 500	5 000	5 500																		
Messing							315 000	350 000	385 000												
Batterien	34 400	43 000	51 600	112,0	140,0	168,0	55 200	69 000	82 800	23,2	29	34,8									
Kupferkabel													320 000	400 000	480 000						
Chromstahl / Nickel	90 000	100 000	110 000																		
Verbunde und Überlauf																					
Schwerteile vor Granulator	19 545	21 717	23 888	0,10	0,11	0,12	78 814	87 571	96 328	585	650	716	59 004	65 560	72 116	292	324	357	11	12	14
CRT-PC																					
Schattenmaske																					
Strahlerkanone	170 000	210 000	250 000																		
Ablenkspule																					
Bildröhren: [] mit / [] ohne Hals													900	1 000	1 100						
Getterpillen: [] mit / [] ohne Kathodenstrahlleinheit																					
Fehlmenge/Abfall	39	50	61	0,58	0,64	0,70	1 000	1 100	1 200	63	94	125	6 140	6 600	7 060	119	130	141	633	720	807
CRT-TV																					
Schattenmaske																					
Strahlerkanone	170 000	210 000	250 000																		
Ablenkspule																					
Bildröhren: [] mit / [] ohne Hals													900	1 000	1 100						
Getterpillen: [] mit / [] ohne Kathodenstrahlleinheit																					
Fehlmenge/Abfall	39	50	61	0,58	0,64	0,70	1 000	1 100	1 200	63	94	125	6 140	6 600	7 060	119	130	141	633	720	807
LCD-PC																					
Fehlmenge/Abfall	39	50	61	0,58	0,64	0,70	1 000	1 100	1 200	63	94	125	6 140	6 600	7 060	119	130	141	633	720	807
Plexiglas																					
CrNi-Stahl	90 000	100 000	110 000																		
Eisen	4 500	5 000	5 500																		
Alu	4 500	5 000	5 500																		
LCD-TV																					
Fehlmenge/Abfall	39	50	61	0,58	0,64	0,70	1 000	1 100	1 200	63	94	125	6 140	6 600	7 060	119	130	141	633	720	807
Plexiglas																					
CrNi-Stahl	90 000	100 000	110 000																		
Eisen	4 500	5 000	5 500																		
Alu	4 500	5 000	5 500																		
Notebooks																					
Akkus/Batt.																					
QZ Material (gelangt auf Anlage in Regensburg)																					
Fehlmenge/Abfall	39	50	61	0,58	0,64	0,70	1 000	1 100	1 200	63	94	125	6 140	6 600	7 060	119	130	141	633	720	807
Plexiglas																					
CrNi-Stahl	90 000	100 000	110 000																		
Eisen	4 500	5 000	5 500																		
Alu	4 500	5 000	5 500																		

9.6 Zusammensetzung des Batterieoutputs

9.6.1 Kleinversuch Batteriemix Immark

Der Kleinversuch wurde zu einem späteren Zeitpunkt als die übrigen Probenahmen durchgeführt (Dezember 2011).

Tab. 40 > Kleinversuch Batteriemix Immark

	[g]	Gewichtsanteil Versuch [%]	Gewichtsanteil verwendet [%]
Li-Ion-Akku	2720	19 %	44 %
LiMn-Batterie	60	0,43 %	0,6 %
vermutlich Li-Ion	3775	27 %	
Ni-MH	1282	9,2 %	10 %
Alkali	5265	38 %	38 %
Zn-Kohle	202	1,4 %	1,5 %
Knopfzellen*	48	0,34 %	0,4 %
NiCd-Akkus			1,0 %
Störstoffe**	658	4,7 %	4,5 %
Total	14010	100 %	100 %

* Knopfzellegehalt = Mittelwert aller Knopfzellen

** Störstoffgehalt = Gehalt Schwermetalle

9.6.2 Batteriegehalte und Gewichtsanteile gemäss Batrec und Versuch Immark

Tab. 41 > Batteriezusammensetzung und Gewichtsanteil des Batteriemix

Batterien														
Batterieart	Gewichtsanteil		Al	Sb	Pb	Cd	Cr	Fe	Cu	Ni	Hg	Zn	Sn	Mn
	Batrec [%]	Immark [%]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]
Kohle-Zink-Batterien	6.1	1.5			1 000	50		175 000			2	225 000		260 000
Alkali-Mangan-Batterien	64	38			15	1		200 000	28 000	6 000	2	160 000		350 000
Knopfzellen*	1.1	0.4			130	3		440 000	36 000	16 000	36 000	180 000		65 000
Zink-Luft	0.6				200	1		450 000	40 000	20 000	10 000	260 000		3 000
Alkali-Mangan	0.2				50	1		430 000	30 000	7 000	4 000	99 000		270 000
Quecksilberoxid	0.1							410 000	25 000	12 500	320 500	104 500		12 500
Silber	0.2				50	13		430 000	35 000	12 500	3 000	72 500		72 500
Lithium-Manganoxid-Batterien	1.3	0.6			3	1		570 000			1			292 000
Nickel-Cadmium-Akkus	0.7	1.0				200 000		450 000		200 000				
Nickel-Metallhydrid-Akkus	6.4	10						230 000		380 000				
Zink-Luft-Batterien	3.4				200	1		450 000	40 000	20 000	10 000	260 000		3 000
Geräte-Batterien	17													
Lithium-Akkus	11	44	110 000					240 000	110 000					
Nickel-Metallhydrid-Akkus	1.4							230 000		380 000				
Alkali-Mangan-Batterien	3.0				15	1		200 000	28 000	6 000	2	160 000		350 000
Blei-Batterien	2.0			18 000	510 000			132 000	4 000					
Störstoffe		4.5	100 000	23	16 000	1	39 000	230 000	190 000	22 000	0	88 000	650	
Batteriegemisch Batrec*	100	100	12 000	360	10 000	1 400		220 000	33 000	36 000	740	130 000		250 000
Batteriegemisch Immark*			53 000	1	740	2 000	1 800	230 000	68 000	43 000	140	69 000	29	140 000

* auf 2 relevante Stellen gerundet

	Schätzung Batrec Industrie AG
	UBA-Bericht von S. Recknagel und A. Richter (2007): Überprüfung der Schwermetallgehalte von Batterien – Analyse von repräsentativen Proben handelsüblicher Batterien und in Geräten verkaufter Batterien – Erstellung eines Probenahmeplans, Probenbeschaffung und Analytik (Hg, Pb, Cd)
	Massenbilanz Batrec, Hansjoerg von Gunten
	W. Baumann, A. Muth Batterien Daten und Fakten zum Umweltschutz 1997 Springer Verlag
	Eigene Abklärungen zu Schwerteilen im Elektronikmüll

9.7

Konzentration von CCFL-Röhren aus Hintergrundbeleuchtungen**Tab. 42 > Hg-Konzentration in CCFL-Röhren aus LCD-TV-Geräten**

Probenbezeichnung (CCFL-Leuchten Typ)	Probengewicht (Gramm)	Hg in µg/Leuchten (gasförmig)	Hg in µg/Leuchten (gebunden)	Hg in µg/Leuchten (Total)
67	6.25	240	30	270
73/1	9.41	600	40	640
* 73/2	9.36	830	30	860
* 85	14.38	650	250	900
86	13.5	310	<30	310
90/1	10.42	990	320	1'300
90/2	10.26	840	710	1'600
90/3	10.18	830	890	1'700
90/4	10.37	280	1'300	1'600
91/1	8.49	2000	250	2'300
91/2	8.38	800	80	880
95/1	13.02	2'100	<30	2'100
95/2	13.05	1'100	<30	1'100
97	12.92	130	30	160
105	11.31	300	50	350
110/1	10.9	70	80	150
110/2	11.15	140	50	190
123	13.67	370	30	400
149/1	20.24	330	<30	330
149/2	19.72	80	<30	80

* Diese Leuchte war vermutlich gebrochen. Der gasförmig vorhandene Massenanteil an Quecksilber ist daher eher zu tief.

< kleiner als die Nachweisgrenze (nach DIN 32645) des Verfahrens

Tab. 43 > Hg-Konzentration in CCFL-Röhren aus LCD-PC-Monitoren

Probenbezeichnung (CCFL-Leuchten Typ)	Probengewicht (Gramm)	Hg in µg/Leuchte (gasförmig)	Hg in µg/Leuchte (gebunden)	Hg in µg/Leuchte (Total)
1er 1	1.62	20	<30	20
1er 2	1.56	2000	<30	2000
1er 3	1.03	770	<30	770
1er 4	1.62	90	<30	90
1er 5	1.67	100	60	160
2er 1	3.38	880	40	920
2er 2	3.34	1910	<30	1910
2er 3	3.85	2210	450	2660
2er 4	3.22	2210	70	2280
2er 5	1.85	1080	80	1160
2er 6	3.27	1270	40	1310
2er 7	2.00	1770	130	1900
2er 8	3.35	1840	40	1880
2er 9	1.94	2100	100	2200
2er 10	3.62	2320	50	2370
2er 11	3.12	1440	440	1880
2er 12	3.77	2370	70	2440
2er 13	2.95	2040	330	2370
3er 1	4.48	1310	730	2040
3er 2	4.43	1250	1600	2850
LCD-PC 1er 1	2.14	460	<30	460
LCD-PC 1er 2	1.60	120	30	150
LCD-PC 1er 3	3.20	40	<30	40
* LCD-PC 2er 1	3.20	1360	80	1440
* LCD-PC 2er 2	3.51	460	<30	460
LCD-PC 3er 1	5.28	2320	270	2590
LCD-PC 3er 2	5.32	3220	60	3280
LCD-PC 3er 3	7.35	2410	1130	3540

* Je eine der beiden Leuchten war gebrochen. Der gasförmig vorhandene Massenanteil an Quecksilber ist daher zu tief.

< kleiner als die Nachweisgrenze (nach DIN 32645) des Verfahrens

Tab. 44 > Hg-Konzentration in CCFL-Röhren aus Notebook-Geräten

Probenbezeichnung (CCFL-Leuchten Typ)	Probengewicht (Gramm)	Hg in µg/Leuchten (gasförmig)	Hg in µg/Leuchten (gebunden)	Hg in µg/Leuchten (Total)
1er 1	0.79	690	230	920
1er 2	0.83	130	10	140
1er 3	0.97	30	7	40
1er 4	0.65	720	9	730
1er 5	0.66	270	20	290
1er 6	0.68	190	7	200
1er 7	0.78	1400	10	1400
1er 8	0.56	210	5	220
1er 9	0.94	170	10	180
1er 10	0.84	2400	10	2400
1er 11	0.68	1000	10	1000
1er 12	0.67	220	10	230
1er 13	0.72	230	5	230
1er 14	0.78	1800	20	1800
1er 15	0.53	820	10	830
1er 16	0.87	50	20	70
* 1er 17	0.98	140	20	160
1er 18	0.63	2800	8	2800

Probenbezeichnung (CCFL-Leuchten Typ)	Probengewicht (Gramm)	Hg in µg/Leuchten (gasförmig)	Hg in µg/Leuchten (gebunden)	Hg in µg/Leuchten (Total)
2er 1	2.30	3600	510	4100
2er 2	2.31	1700	80	1800

* Diese Leuchte war vermutlich gebrochen. Der gasförmig vorhandene Massenanteil an Quecksilber ist daher eher zu tief.

< kleiner als die Nachweisgrenze (nach DIN 32645) des Verfahrens

9.8 Konzentrationen der einzelnen Outputgüter (Resultate Bachema)

9.8.1 Metalle

Tab. 45 > Metall- und Antimonkonzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)

	Proben-Nr. Bezeichnung	9292	9293	9294	9301	9302	9303	9297	9298	9295	9296	11046	11045	22543	22542	22544	13003	13004	13005
		CRT-PC Gehäuse MP1	CRT-PC Gehäuse MP3	CRT-PC Gehäuse MP5	CRT-TV Gehäuse MP1	CRT-TV Gehäuse MP3	CRT-TV Gehäuse MP5	Kunststoffe <2mm MP2	Kunststoffe <2mm MP4	Kunststoffe 20-25mm MP2	Kunststoffe 20-25mm MP4	Kunststoffe 2-5 mm, 5- 10 mm MP4	Kunststoffe 2-5 mm, 5- 10 mm MP2	LCD Module MP1 (A+B)	LCD Module MP3 (A+B)	LCD Module MP6 (A+B)	LCD-TV Gehäuse MP1	LCD-TV Gehäuse MP3	LCD-TV Gehäuse MP6
Aluminium (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	524	465	604	209	187	864	116000	175000	3630	4480	15600	43000	15800	14500	16000	2150	1610	2390
	Messwert 1	557	483	582	197	205	826	118000	171000	3320	4400	16400	42500	15600	14900	15700	2230	1600	2230
	Messwert 2	501	433	611	218	178	954	119000	188000	3460	4210	16300	46200	15900	14000	16700	2110	1660	2430
	Messwert 3	516	479	618	213	178	812	120000	172000	3440	3780	15900	45700	15900	14500	15500	2280	1580	2510
	Messwert 4							114000	177000	3730	4350	13700	41800				2120	1700	2430
	Messwert 5							118000	169000	3950	5110	15200	39800				2120	1610	2350
	Messwert 6							110000	174000	3880	5010	16100	42000				2030	1520	2400
Antimon (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	7490	7890	9270	1950	2380	2380	2690	1610	1580	1580	1040	736	16.9	32.1	<0.1	1790	1740	1950
	Messwert 1	7690	8030	10100	1970	2240	2460	2830	1700	1510	1460	749	834	15.3	29.7	0.1	1820	1770	1970
	Messwert 2	7100	7350	9470	1880	2280	2510	3010	1430	1860	1850	1140	617	16.7	31.1	<0.1	1930	1890	1820
	Messwert 3	7690	8290	8280	2000	2610	2180	2220	1690	1390	1620	1250	757	18.8	35.5	<0.1	1600	1570	2070
Blei (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	135	70.1	303	118	523	641	2720	1740	1380	1880	937	568	1.8	1.5	6.4	274	217	392
	Messwert 1	138	73.5	294	128	647	617	2890	1670	1340	1600	932	558	1.2	1.1	4.4	259	204	331
	Messwert 2	134	67.9	305	141	515	633	2630	1870	1360	1760	919	587	1	1	5.9	245	204	389
	Messwert 3	135	68.8	311	140	537	637	3050	1670	1370	1920	961	558	1.1	0.6	5.2	260	210	370
	Messwert 4				97.3	441	655	2690	1760	1270	1950			2.4	2.1	7.5	319	225	420
	Messwert 5				99.1	446	669	2620	1700	1460	2090			2.5	2	7.4	284	238	418
	Messwert 6				101	550	635	2460	1760	1460	1950			2.6	2.4	7.8	279	219	425
Cadmium (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	9.12	9.72	8.12	7.00	7.72	6.16	23.20	22.80	41.20	34.90	28.00	44.10	<0.01	<0.01	<0.01	1.60	0.82	1.01
	Messwert 1	9.97	9.48	7.96	7.62	8.01	5.90	21.6	22.4	40.6	32.8	28.2	43.7	<0.01	<0.01	<0.01	1.94	0.8	0.81
	Messwert 2	8.75	9.25	8.56	6.51	7.56	6.58	24.7	23.5	41.6	37.1	28.4	45	<0.01	<0.01	<0.01	1.78	0.81	1.03
	Messwert 3	8.63	10.4	7.85	6.87	7.61	6.00	23.3	22.4	41.4	34.8	27.4	43.5	<0.01	<0.01	<0.01	1.07	0.85	1.18
Chrom (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	8.6	3.6	10	6.7	12.0	93.6	206	232	39.1	91.4	229	395	494	447	546	91	12	28.8
	Messwert 1	9.2	3.6	13	6	11.8	90.1	214	228	46.5	98.3	194	354	489	439	548	97.0	12.2	27.7
	Messwert 2	7.4	3.3	7.7	7.3	11.6	93.9	215	222	37.3	86.2	266	411	497	454	534	84.3	12.1	30.6
	Messwert 3	9.1	4.0	9.2	6.8	12.4	96.7	189	246	33.4	89.7	225	421	495	448	557	91.9	11.6	28.1
Eisen (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	399	773	1230	917	1250	5980	2270	2460	763	1050	1850	2020	2520	2230	2700	1720	247	888
	Messwert 1	430	778	1240	845	1150	5890	2360	2520	748	1030	1880	1880	2480	2200	2720	1770	237	855
	Messwert 2	377	754	1240	901	1170	6170	2410	2320	836	1070	1830	1960	2540	2270	2620	1720	280	888
	Messwert 3	390	788	1210	1010	1430	5870	2040	2530	704	1040		2220	2540	2230	2740	1680	224	921
Kupfer (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	304	891	821	168	274	1550	141000	80600	15300	20400	40000	27500	92.2	133	115	3360	3160	3780
	Messwert 1	304	931	797	190	300	1370	155000	77000	15500	16300	44700	26300	92.2	130	112	3410	2900	3470
	Messwert 2	277	815	826	189	271	1700	146000	86900	15700	19200	42900	30300	80.8	124	119	3540	3230	3940
	Messwert 3	299	940	814	158	288	1600	135000	78800	15400	14100	41300	28900	81.3	137	96.7	3290	3070	3940
	Messwert 4	326	892	847	134	269	1430	142000	80600	14600	25200	34200	26500	95.4	131	128	3280	3400	3610
	Messwert 5	318	818	829	171	245	1620	150000	79600	16400	26400	37700	26500	101	143	125	3290	3210	3800
	Messwert 6	302	952	812			1560	126000	80800	14200	21000	39100	26500	103	135	112	3360	3120	3940
Nickel (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	66.4	87.6	125	7.5	13.8	98.1	478	522	57.6	128	281	366	208	167	211	168	51.1	66.5
	Messwert 1	66.3	91.1	114	5.3	14.4	71.4	442	434	53.7	145	280	283	156	98	112	164	56.5	64.6
	Messwert 2	63.4	83.6	137	7.6	12.4	111	482	505	51.2	116	276	419	140	94.1	167	145	48.2	68.7
	Messwert 3	61.8	80.9	114	7.6	10.3	97.7	454	447	56.4	125	246	287	177	102	145	173	56.0	66.7
	Messwert 4	72.9	89.0	140	5.9	15.5	105	487	541	62.3	135	244	363	257	231	283	178	54.8	67
	Messwert 5	64	89.2	127	9.0	15.8	98.4	515	591	67.3	126	363	426	260	239	273	161	44.2	65.5
	Messwert 6	69.7	91.8	121	9.4	14.4	105	490	611	54.9	124	276	417	258	235	285	188	47.1	66.6
Quecksilber (direkt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	0.46	0.37	0.15	0.07	0.16	0.06	0.26	0.30	0.35	0.37	0.22	0.19	<0.01	<0.01	<0.01	0.04	0.02	0.10
	Ergebnis - Wert	0.46	0.37	0.15	0.06	0.07	0.16	0.26	0.30	0.35	0.37	0.22	0.19	<0.01	<0.01	<0.01	0.04	0.02	0.10
	EW 1	0.48	0.36	0.16	0.06	0.06	0.16	0.25	0.50	0.33	0.34	0.21	0.20	<0.01	<0.01	<0.01	0.04	0.02	0.10
	EW 2	0.45	0.37	0.15	0.07	0.06	0.16	0.26	0.22	0.38	0.40	0.24	0.17	<0.01	<0.01	<0.01	0.04	0.03	0.09
	EW 3		0.38	0.15	0.06	0.08	0.15		0.20		0.39	0.22	0.19				0.04	0.02	0.10
	EW 4																		
Zink (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	119	205	202	310	325	719	6620	6140	819	1790	3760	4710	169	222	18.7	522	340	361
	Messwert 1	124	204	207	313	337	588	6800	5930	812	1960	3850	4450	169	232	19.3	543	309	346
	Messwert 2	121	196	199	300	318	728	6640	6490	856	1790	3640	5000	169	215	19.3	490	343	375
	Messwert 3	112	216	201	317	320	842	6430	5990	866	1750	3800	4660	168	220	16.2	568	361	383
	Messwert 4									762	1850						503	364	351
	Messwert 5									832	1760						516	341	358
	Messwert 6									783	1630						515	323	353
Zinn (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	421	276	315	16.3	37.1	331	4730	2660	393	603	791	585	177	146	180	500	398	667
	Messwert 1	454	291	312	16.3	34.9	306	4640	2660	378	521	743	556	173	149	176	527	396	683
	Messwert 2	393	276	307	15.8	38.1	349	4740	2640	420	672	860	582	177	142	189	484	400	657
	Messwert 3	415	263	327	16.8	38.2	337	4810	2670	380	616	771	618	181	146	174	490	399	660

Metall- und Antimonkonzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)

Bezeichnung	Proben-Nr.	12948	12949	12950	12951	12952	12953	13844	13845	13843	9285	9286	9287	11042	11043	11044	9290	9291	9288	9289
	Leiterplattenbruch MP 1	Leiterplattenbruch MP 2	Leiterplattenbruch MP 3	Leiterplattenbruch MP 4	Leiterplattenbruch MP 5	Leiterplattenbruch MP 6	Notebook Gehäuse MP1	Notebook Gehäuse MP2	Notebook Gehäuse MP4	PC-LCD Gehäuse MP1	PC-LCD Gehäuse MP3	PC-LCD Gehäuse MP5	Sieb Unterkorn MP1	Sieb Unterkorn MP3	Sieb Unterkorn MP5	Staub Prallmühle MP2	Staub Prallmühle MP4	Staub Zyktron MP2	Staub Zyktron MP4	
Aluminium (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	43700	60100	38500	40400	34600	35400	5320	9350	3720	2200	4740	2830	45900	27900	42700	17400	23600	14000	15700
	Messwert 1	41200	55800	35400	40600	32200	32300	5590	8590	3440	2170	4350	3600	45900	26800	40700	16900	23900	17800	16100
	Messwert 2	43200	60000	34600	36100	32900	33600	4980	9070	3570	2360	4940	2410	44900	26400	42600	16500	24000	14700	16600
	Messwert 3	40000	65900	41900	39100	30600	31900	5420	8830	3290	2130	4460	2710	45200	26500	41300	16900	21600	11700	15900
	Messwert 4	45400	59800	40900	41200	38300	37800	5360	9760	4380	2060	4810	2510	45500	29100	44200	18200	24500	13100	15500
	Messwert 5	46500	59500	37900	42100	37900	39200	5190	9820	3940	2300	5100	2510	46800	29600	43700	17800	24000	13900	15100
	Messwert 6	46300	59500	40000	43200	35500	37800	5400	10100		2200	4780	3220	47400	29000	43900	18200	23600	13000	15100
Antimon (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	344	191	239	262	378	345	996	1300	1210	1120	943	987	1390	868	605	999	1030	1170	681
	Messwert 1	339	159	231	248	10.8	<1.0	1060	1300	1330	1140	1030	975	1420	814	608	1050	1070	1150	705
	Messwert 2	354	205	242	281	3.2	<1.0	946	1260	1090	1140	843	963	1350	881	663	959	1030	1200	677
	Messwert 3	338	208	242	257	<1.0	<1.0	982	1350		1080	955	1020	1400	907	545	986	1000	1170	661
Blei (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	7900	12100	10800	11400	9300	8780	271	304	139	175	199	278	19000	12900	11700	15000	14400	16200	23800
	Messwert 1	7850	11500	10700	10900	9130	7090	285	259	134	170	225	266	16600	11200	10300	12100	14400	15200	22800
	Messwert 2	7860	12100	10400	11700	9160	7440	256	294	129	188	191	285	17300	10200	10600	13100	13700	14300	23900
	Messwert 3	7970	13500	11800	11700	7860	8380	279	282	123	159	203	289	17400	11400	11300	14200	12900	14200	20400
	Messwert 4	7980	12000	10400	11500	9880	9870	271	323	166	174	197	271	19500	14400	12200	19000	15900	17700	24900
	Messwert 5	7890	11600	10600	11300	10000	10000	259	323	144	193	190	265	21200	17800	12700	14700	14800	18900	25200
	Messwert 6	7880	11800	10800	11500	9780	9860	275	342		165	191	289	21800	12600	13000	16900	15000	17200	25400
Cadmium (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	0.95	26.50	5.14	1.27	1.28	0.81	8.73	8.12	9.44	6.85	7.57	6.94	28.30	10.60	19.30	38.60	38.80	13.30	17.80
	Messwert 1	0.92	24.3	4.14	1.48	1.24	0.67	8.77	7.87	9.58	6.81	8.07	7.05	27.6	11.1	19.9	38.2	37.1	14.1	17.5
	Messwert 2	0.96	26.6	4.76	1.07	1.39	0.88	8.75	8.33	9.76	7.17	7.14	7.06	27.5	10.3	18.7	39.6	40.4	12.8	18.1
	Messwert 3	0.98	28.5	6.53	1.22	0.87		8.68	8.14	8.97	6.58	7.50	6.72	29.9	10.4	19.4	38.0		13.0	
Chrom (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	582	1290	1330	832	2720	2100	36.4	86.1	20.5	38.3	163	44.2	1310	1460	1410	547	742	173	207
	Messwert 1	599	1260	1310	700	2770	2130	36.2	85	21.8	34.5	125	44.7	1300	1480	1400	565	748	168	211
	Messwert 2	583	1330	1230	768	2840	2120	36.5	91.4	19.2	42.9	236	44.5	1320	1500	1420	529	749	177	211
	Messwert 3	565	1290	1460	1030	2550	2050	36.6	82		37.6	130	43.5	1310	1400	1410	546	730	174	200
Eisen (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	7320	45200	45800	11800	17300	14400	1130	2180	725	1430	2570	2490	7470	7580	8090	70500	78700	18600	19800
	Messwert 1	7370	45800	45200	10800	17500	14500	1250	2250	754	1300	2520	2560	7360	7620	8040	71500	78900	18300	19800
	Messwert 2	7320	44600	45100	11500	17500	14500	1030	2010	696	1470	2740	2550	7520	7840	8180	69800	80000	19000	19700
	Messwert 3	7260	45300	47300	13000	16800	14400	1120	2290		1510	2440	2350	7540	7280	8040	70200	77100	18400	19900
Kupfer (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	204000	231000	256000	273000	187000	227000	4640	6130	3310	1550	2350	2220	123000	86900	91100	8200	9050	38100	40600
	Messwert 1	217000	228000	259000	307000	176000	205000	4690	6000	3680	1290	2300	2380	119000	83900	87500	7400	9280	38400	40500
	Messwert 2	206000	236000	256000	301000	189000	239000	4960	5860	3440	1860	3030	1130	122000	83000	87500	8020	8820	40900	44400
	Messwert 3	206000	255000	301000	265000	202000	224000	4940	6050	3220	1570	1990	2190	123000	81300	87500	8480	8610	41700	40300
	Messwert 4	194000	221000	249000	258000	169000	219000	4440	6280	3230	1190	2990	2380	124000	93500	93300	8380	9180	36000	40400
	Messwert 5	203000	222000	237000	248000	184000	228000	4330	6500	2990	1600	1790	2380	125000	89600	94900	8440	9370	37600	40000
	Messwert 6	198000	226000	235000	259000	202000	248000	4480	6080		1780	2010	2880	124000	90300	95600	8510	9050	34200	38300
Nickel (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	2630	5120	5540	4380	3970	4020	742	1030	754	127	164	94.1	1440	1340	1280	3100	3220	678	667
	Messwert 1	2670	4860	4920	4540	3740	3150	815	1010	765	138	111	121	1410	1350	1280	3200	3250	714	624
	Messwert 2	2410	5090	4880	4180	3980	3310	754	1070	837	125	150	66.7	1420	1350	1270	2960	3200	729	623
	Messwert 3	3550	5350	6230	4620	3310	3820	775	1020	687	174	145	85.7	1480	1300	1290	3130	3200	719	645
	Messwert 4	2360	5070	5850	3960	4260	4430	710	1050	762	108	158	86.1						622	742
	Messwert 5	2410	5220	5640	4270	4290	4460	686	1030	718	121	228	85.7						646	711
	Messwert 6	2420	5130	5740	4720	4240	4950	713	1010		98.2	190	120						638	658
Quecksilber (direkt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	0.17	0.18	0.21	0.18	0.18	0.20	0.12	0.30	0.17	0.03	0.07	0.05	0.18	0.16	0.19	4.40	3.85	4.51	5.76
	Ergebnis - Wert	0.17	0.18	0.21	0.18	0.18	0.20	0.12	0.30	0.17	0.03	0.07	0.05	0.18	0.16	0.19	4.40	3.85	4.51	5.76
	EW 1	0.17	0.19	0.22	0.18	0.19	0.20	0.18	0.31	0.16	0.04	0.06	0.04	0.18	0.19	0.21	4.45	4.08	4.64	5.87
	EW 2	0.17	0.18	0.20	0.18	0.17	0.20	0.13	0.29	0.18	0.02	0.08	0.07	0.18	0.15	0.19	4.36	3.61	4.39	5.66
	EW 3	0.17	0.17	0.20	0.17	0.19	0.21	0.09							0.14	0.18				
	EW 4																			
EW 5																				
Zink (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	7330	15500	11000	13300	9430	8790	1220	1780	480	703	1000	710	15600	11600	14100	13700	14900	4170	5180
	Messwert 1	7480	15000	10200	12100	9050	7110	1160	1660	501	684	846	807	15100	11000	13400	11200	14600	4450	5320

Metall- und Antimonkonzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)

	Proben-Nr.	21098	21099	18338	18341	18344	18337	18340	18343	18336	18339	18342	18378	18381	18384	18377	18380	18383	18376	18379	18382
	Bezeichnung	Leiter-platten MP1 aussortierte Metalle RM > 2mm / SKM > 0.5mm	Leiter-platten MP1 aussortierte Metalle RM > 2mm / SKM < 0.5mm	Metalle < 2mm MP1 (> 1mm)	Metalle < 2mm MP3 (> 1mm)	Metalle < 2mm MP5 (> 1mm)	Metalle < 2mm MP1 (0.5-1mm)	Metalle < 2mm MP3 (0.5-1mm)	Metalle < 2mm MP5 (0.5-1mm)	Metalle < 2mm MP1 (< 0.5mm)	Metalle < 2mm MP3 (< 0.5mm)	Metalle < 2mm MP5 (< 0.5mm)	Metalle 2-5mm MP1 (> 1mm)	Metalle 2-5mm MP3 (> 1mm)	Metalle 2-5mm MP5 (> 1mm)	Metalle 2-5mm MP1 (0.5-1mm)	Metalle 2-5mm MP3 (0.5-1mm)	Metalle 2-5mm MP5 (0.5-1mm)	Metalle 2-5mm MP1 (< 0.5mm)	Metalle 2-5mm MP3 (< 0.5mm)	Metalle 2-5mm MP5 (< 0.5mm)
Aluminium (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	2610	52800	190000	167000	33200	136000	137000	47700	23100	42900	14600	358000	413000	381000	400000	605000	446000	431000	460000	357000
	Offen K&W a 1	1680	55000	156000	113000	59900	120000	159000	34700	22900	43900	14900	428000	341000	370000	385000	649000	519000	407000	465000	347000
	Offen K&W a 2	2690	50500	172000	230000	29400	155000	119000	55100	21500	43200	14600	313000	481000	423000	443000	660000	408000	409000	466000	349000
Antimon (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	5.7	219	50.6	36.5	32.9	60.5	21.9	19.4	46.4	51.5	38.9	24.3	34.6	10.9	37.5	52.7	13.6	61.2	77.8	36.5
	Offen K&W a 1	4.2	239	47.9	21.7	31	47.8	24.3	15.6	46.8	48.4	40.2	27.7	32.8	9.2	34.8	56	13	55.9	81.4	35.1
	Offen K&W a 2	7.4	207	51.6	50.3	42.9	87.3	17.4	18.3	46.1	50.2	38.1	21.9	48.4	6.8	45.5	56.7	15.9	57.3	74.6	37
Blei (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	403	16400	2400	1950	1550	4590	3130	3010	53000	31900	36200	913	933	1050	1210	858	1040	7970	6680	5530
	Offen K&W a 1	427	16000	1960	2200	1170	4780	3020	3570	51900	32100	36000	1060	429	469	1260	838	1000	8130	6490	5710
	Offen K&W a 2	330	16600	2630	2000	1530	4500	2570	2490	53200	31900	35600	536	1500	529	1120	795	1000	8950	6630	5530
Cadmium (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	0.18	1.39	2.98	4.54	1.85	9.45	12.2	15.2	8.01	15.2	15.2	4.23	4.1	12.1	5.5	7.18	9.64	10.4	13.7	19.2
	Offen K&W a 1	0.31	1.38	2.13	4.38	2.14	19.1	3.93	3.82	7.52	14	18.3	3.63	3.39	17.7	6.09	6.58	10.8	8.72	11	17.7
	Offen K&W a 2	0.1	1.39	3.55	5.35	1.54	4.63	3.87	24.2	9.2	16.5	12.8	3.41	4.76	9.66	5.24	8.46	9.59	10.5	9.68	20.2
Chrom (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	12500	2390	51500	67800	78700	35800	37300	59800	4570	7420	8490	40200	30300	31600	9730	8320	9860	11300	9130	12300
	Offen K&W a 1	14400	2200	63000	71300	83400	36400	38600	55900	4580	7610	8630	28500	44900	28000	9350	8870	9980	11400	9250	12100
	Offen K&W a 2	10900	2440	48000	66100	80900	36100	37500	60300	4530	7240	8500	57300	16100	39600	10000	7800	9800	11800	8890	12800
Eisen (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	1020000	612000	544000	404000	708000	319000	219000	396000	45100	47800	62000	169000	128000	140000	43300	40000	50200	54400	45800	60200
	Offen K&W a 1	1010000	590000	619000	405000	659000	319000	198000	391000	45300	47900	61000	122000	188000	123000	40800	41200	46100	54300	46500	61800
	Offen K&W a 2	1020000	630000	514000	393000	732000	318000	232000	383000	44400	45000	62600	233000	70300	172000	45100	38000	53100	57100	44800	59600
Kupfer (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	18000	75400	184000	275000	153000	472000	512000	432000	718000	726000	738000	325000	315000	250000	408000	278000	332000	290000	247000	276000
	Offen K&W a 1	18700	72300	141000	327000	169000	491000	500000	464000	720000	734000	742000	327000	325000	280000	429000	269000	276000	300000	246000	279000
	Offen K&W a 2	12400	80500	216000	236000	161000	454000	523000	409000	712000	729000	740000	318000	310000	168000	357000	237000	369000	304000	244000	282000
Nickel (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	19600	18500	25000	42200	34000	28500	39300	48100	7340	11200	9590	27400	19600	15900	9640	10200	8590	8280	8300	8740
	Offen K&W a 1	22300	17100	30900	44400	35200	28400	40400	42800	7640	11300	9710	24600	26100	13800	8180	10400	8240	8140	8190	9180
	Offen K&W a 2	16700	19500	23200	42000	32200	28300	39800	50600	7230	11000	9580	35100	15200	22000	11800	10500	8550	9280	8040	8270
Quecksilber (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	<0.02	0.1	0.02	<0.02	0.13	0.04	0.02	<0.02	0.23	0.16	0.16	<0.02	<0.02	0.07	<0.02	<0.02	<0.02	0.05	0.08	0.06
	Offen K&W a 1	<0.02	0.08	0.01	<0.02	0.13	0.04	0.01	<0.02	0.24	0.16	0.18	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.07	0.07	0.08
	Offen K&W a 2	<0.02	0.11	0.02	<0.02	<0.02	0.04	0.01	<0.02	0.21	0.16	0.15	<0.02	<0.02	0.11	<0.02	<0.02	<0.02	0.05	0.09	0.05
Zink (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	3500	21900	37100	60800	46200	44400	80400	59200	86300	125000	125000	118000	93300	164000	120000	87100	133000	178000	114000	253000
	Offen K&W a 1	4400	22200	21500	73100	40100	45400	83200	60500	85600	125000	125000	117000	86600	145000	125000	83100	120000	178000	112000	257000
	Offen K&W a 2	3040	21700	44000	43300	48700	44800	75600	60200	85900	125000	124000	80300	94500	170000	108000	75300	142000	188000	113000	258000
Zinn (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	1520	38000	6030	5430	3620	13500	9170	8050	104000	53200	68500	4080	2310	1580	4140	2680	2920	14800	14200	10200
	Offen K&W a 1	1360	37500	5060	5520	3430	13600	9240	8130	103000	53700	68800	4270	2640	1360	5140	2470	2630	15200	14000	10700
	Offen K&W a 2	1850	38900	7150	4890	4520	13000	9160	7880	104000	52200	67600	3380	2120	424	3540	2150	3400	16500	14000	10200
	Offen K&W a 3	1350	37600	5900	5880	2910	13800	9110	8140	105000	53900	69300	4590	2160	2970	3740	3430	2730	12800	14500	9690

Metall- und Antimonkonzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)

Proben-Nr.	18387			18390			18393			18386			18389			18392			18385			18388			18391			21101			21100			21102			21100			21105			21108			21109			21110			21103			21104		
	Bezeichnung	Metalle, < 2mm mit Kunststoff MP1 (> 1mm)	Metalle, < 2mm mit Kunststoff MP3 (> 1mm)	Metalle, < 2mm mit Kunststoff MP5 (> 1mm)	Metalle, < 2mm mit Kunststoff MP1 (0.5-1mm)	Metalle, < 2mm mit Kunststoff MP3 (0.5-1mm)	Metalle, < 2mm mit Kunststoff MP5 (0.5-1mm)	Metalle, < 2mm mit Kunststoff MP1 (< 0.5mm)	Metalle, < 2mm mit Kunststoff MP3 (< 0.5mm)	Metalle, < 2mm mit Kunststoff MP5 (< 0.5mm)	Notebook Gehäuse MP1 aussortierte Metalle > 2mm / SKM < 0.5mm Anteil Ges. 11.25%	Notebook Gehäuse MP1 aussortierte Metalle > 2mm / SKM > 0.5mm Anteil Ges. 1.95%	Sieb Unterkorn MP1 aussortierte Metalle > 2mm / SKM < 0.5mm Anteil Ges. 1.59%	Notebook Gehäuse MP1 aussortierte Metalle > 2mm / SKM > 0.5mm Anteil Ges.	Metalle 5-10 mm MP1 (nach Sortierung) Anteil Ges. 92.68%	Metalle 5-10 mm MP1 "Kupferfraktion" Anteil Ges. 1.82%	Metalle 5-10 mm MP1 "Messingfraktion" Anteil Ges. 1.05%	Metalle 5-10 mm MP1 "Mag. Metallfraktion" Anteil Ges. 2.88%	Kunststoffe 2-5/5-10 MP2 aussortierte Metalle > 2mm / SKM < 5mm Anteil Ges. 4.59%	Kunststoffe 2-5/5-10 MP4 aussortierte Metalle > 2mm / SKM < 5mm Anteil Ges. 2.12%																																					
Aluminium (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	167000	321000	294000	493000	616000	555000	275000	307000	386000	120000	126000	465000	126000	965000	<150	1550	43300	755000	543000																																					
	Offen K&Wa 1	170000	320000	306000	534000	550000	509000	270000	314000	398000	124000	124000	486000	99400	980000	<150	<150	<1390	767000	450000																																					
	Offen K&Wa 2	168000	318000	324000	515000	615000	626000	268000	287000	389000	115000	99400	486000	124000	946000	<150	2900	9110	693000	492000																																					
	Offen K&Wa 3	165000	323000	254000	430000	682000	529000	286000	319000	371000	119000	153000	423000	153000	969000	<150	207	77400	805000	689000																																					
Antimon (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	606	474	315	952	662	594	245	205	150	97.8	15.5	55.3	15.5	5.3	<0.2	5.6	11.6	19.5	13.2																																					
	Offen K&Wa 1	594	438	365	902	789	684	248	214	153	98.3	21.3	53.4	21.3	14.6	37.6	7.3	9.4	13.2	16.9																																					
	Offen K&Wa 2	590	554	316	979	604	441	230	194	154	92.4	9.9	63.3	9.9	0	0.4	7.8	10.2	20.6	12																																					
	Offen K&Wa 3	633	430	262	974	593	656	256	206	142	103	15.3	49.3	15.3	1.3	0.1	1.8	15.1	24.6	10.5																																					
Blei (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	2040	2030	1940	2290	2530	2430	19200	17800	15500	3400	3670	1610	3670	248	2280	214	142	806	1850																																					
	Offen K&Wa 1	2020	1940	2000	2210	2630	2610	19100	17800	15600	3210	3660	1480	3660	433	£59	158	212	1060	2580																																					
	Offen K&Wa 2	2170	2180	1770	2380	2390	2200	18400	17300	15800	3730	3480	1610	3480	120	2120	378	18	597	2010																																					
	Offen K&Wa 3	1940	1990	2040	2270	2580	2490	20000	18400	15200	3280	3880	1750	3880	192	2430	107	195	762	954																																					
Cadmium (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	9.46	5.39	9.92	6.64	7.45	10.1	9.73	12.1	14.8	5.99	4.55	42.3	4.55	2.16	0.38	4.43	0.54	6.48	4.89																																					
	Offen K&Wa 1	6.14	5.78	8.26	6.37	7.11	9.09	9.32	13.6	14.4	5.73	4.25	35.9	4.25	4.82	0.7	5.4	0.73	6.47	314																																					
	Offen K&Wa 2	16.1	5.06	7.65	7.03	8.19	12.2	9.67	10.9	15.4	6.54	5.41	41.2	5.41	0.61	0.42	5.48	0.45	6.57	4.81																																					
	Offen K&Wa 3	6.12	5.33	13.9	6.51	7.05	9.08	10.2	11.8	14.6	5.71	4	49.8	4	1.05	0.01	2.42	0.43	6.4	4.97																																					
Chrom (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	74.2	1120	225	318	452	476	638	1050	1080	9800	39800	30200	39800	228	<1.0	95.3	179000	4200	14000																																					
	Offen K&Wa 1	73.6	140	435	338	430	460	656	1050	1040	9100	39700	29600	39700	110	<1.0	46	202000	1080	12100																																					
	Offen K&Wa 2	82.3	325	122	281	398	382	627	1030	1040	10600	43700	28900	43700	181	<1.0	ausreisser	177000	1400	17600																																					
	Offen K&Wa 3	66.9	2890	116	335	528	586	631	1060	1160	9710	35800	32100	35800	393	<1.0	145	158000	10100	12400																																					
Eisen (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	1610	6740	3180	4260	5680	5720	6160	8540	9080	68400	126000	196000	362000	5190	1010000	657000	6430	84400	243000																																					
	Offen K&Wa 1	1600	2560	4220	4420	5410	5790	6080	8540	9110	64000	157000	192000	401000	11300	1010000	638000	2910	47800	340000																																					
	Offen K&Wa 2	1780	3530	2840	4360	5440	5910	6030	8220	9100	74900	123000	178000	382000	1100	1010000	655000	9830	181000	255000																																					
	Offen K&Wa 3	1450	14100	2490	4000	6180	5450	6370	8880	9030	66400	98200	220000	302000	3200	1010000	679000	6560	24600	135000																																					
Kupfer (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	16400	17800	15800	27700	28300	24400	473000	415000	388000	141000	362000	145000	126000	5090	<1000	594	799000	40200	67100																																					
	Offen K&Wa 1	17300	15500	16200	27900	26800	23900	466000	423000	366000	138000	401000	134000	157000	5770	<1000	583	801000	66400	60100																																					
	Offen K&Wa 2	16700	19700	15400	29600	28800	24700	491000	406000	376000	142000	382000	147000	123000	4870	<1000	663	846000	14100	81100																																					
	Offen K&Wa 3	15400	18300	15700	25800	29300	24700	462000	415000	421000	144000	302000	155000	98200	4620	<1000	537	749000	40200	60100																																					
Nickel (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	217	941	423	1140	1100	1040	1900	2280	2250	6530	22100	16900	22100	202	1540	4360	64200	3490	9500																																					
	Offen K&Wa 1	218	456	567	1190	1040	657	1860	2400	2210	6150	24100	17600	24100	487	70	2610	83200	1070	10900																																					
	Offen K&Wa 2	179	508	375	1070	1070	917	1980	2160	2170	6700	22900	15700	22900	70.8	251	482	50900	2350	12400																																					
	Offen K&Wa 3	254	1860	325	1150	1190	1550	1860	2280	2380	6740	19300	17200	19300	99.6	4310	6120	58500	7050	5230																																					
Quecksilber (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	0.29	0.09	0.19	0.12	0.11	0.14	0.69	0.66	0.69	2.75	0.29	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	<0.02	<0.02	0.03																																					
	Offen K&Wa 1	0.52	0.08	0.19	0.08	0.12	0.14	0.65	0.66	0.69	2.6	0.06	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03																																					
	Offen K&Wa 2	0.18	0.1	0.14	0.18	0.09	0.15	0.69	0.64	0.68	2.86	0.01	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02																																					
	Offen K&Wa 3	0.17	0.09	0.23	0.09	0.11	0.12	0.72	0.67	0.7	2.8	0.8	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02																																					
Zink (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	2200	4850	5350	4440	6520	8050	32400	43800	68000	69200	101000	111000	101000	1600	4180	384000	391	494	1140																																					
	Offen K&Wa 1	2180	3750	5590	4650	6320	8160	32000	44100	66200	65800	121000	105000	121000	2260	4160	394000	437	272	1600																																					
	Offen K&Wa 2	2330	3970	5240	4760	6300	8000	32000	43100	67900	73500	111000	108000	111000	958	4310	390000	330	944	884																																					
	Offen K&Wa 3	2080	6820	5220	3930	6940	8000	33200	44200	69800	68400	69500	121000	69500	1590	4070	369000	405	267	943																																					
Zinn (gesamt) [mg/kg TS]	Ergebnis - Wert	2730	2460	2410	2880	2920	2920	30300	25000	22400	1640	2750	2040	2750	92	7110	1390	227	38200	78500																																					
	Offen K&Wa 1	2690	2420	2460	2730	3120	3160	29800	25200	22300	1430	2760	1760	2760	150	421	403	154	43100	76800																																					
	Offen K&Wa 2	2850	2550	2210	2990	2740	2540	29300	24200	22900	1900	2500	1810	2500	49.6	10200	1020	110	53100	120000																																					
	Offen K&Wa 3	2640	2410	2560	2910	2900	3060	31600	25600	22000	1600	3000	2570	3000	76.2	3980	2760	416	18400	38300																																					

Proben Metalle 5–10 mm**Tab. 46 > Liste der aussortierten Fraktionen**

Bezeichnung	Leiterplatten	Messing	Kupfer	Kunststoff	Mag. Metalle	Summe	Rest	Total
Probe MP1	1,18	1,05	1,82	0,38	2,88	7,31	92,68	99,99
Probe MP3	1,83	0,88	1,79	1,33	2,44	8,27	91,73	100
Probe MP5	0,55	0,72	1,11	0,52	4,55	7,45	92,54	99,99

Leiterplatten und Kunststoffe wurden nicht untersucht (Werte können aus anderen Fraktionen übernommen werden). MP3 und MP5 wurden sortiert, nicht aber untersucht.

Tab. 47 > Brom-, Chlor- Phosphor- und PCB-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)

Messparameter			9292 CRT-PC Gehäuse MP1 21.03.2011	9293 CRT-PC Gehäuse MP3 21.03.2011	9294 CRT-PC Gehäuse MP5 21.03.2011	9301 CRT-TV Gehäuse MP1 21.03.2011	9302 CRT-TV Gehäuse MP3 21.03.2011	9303 CRT-TV Gehäuse MP5 21.03.2011	9299 Cu-Kabel MP2 21.03.2011	9300 Cu-Kabel MP4 21.03.2011	14834 Konden- satoren MP1 21.03.2011	44034 Konden- satoren MP2 21.03.2012	14835 Konden- satoren MP3 21.03.2011	44035 Konden- satoren MP3 21.03.2012	14836 Konden- satoren MP5 21.03.2011	44036 Konden- satoren MP6 21.03.2012
Parameter	Bedingung	Einheit	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat
Brom	(semiquant.)*	mq/kg TS	>28000	>28000	>27000	>11000	>10000	>11000								
Chlor	(semiquant.)*	mq/kg TS	>15000	>14000	>14000	>5100	>4800	>3600								
P2O5	(semiquant.)*	% v. TS	1.5	1.7	1.6	0.13	0.060	0.35								
PCB 28	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<1.3	<0.05	0.29	<0.29	4.1	0.20
PCB 52	(TS)	mq/kg TS	0.2	0.2	0.2	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	0.1	3.0	<0.05	0.72	6.55	45.8	3.62
PCB 101	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.5	21.0	<0.05	1.97	9.95	52.7	5.67
PCB 118	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	8.6	<0.05	1.16	9.00	56.9	4.76
PCB 138	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.4	55.8	<0.05	1.68	10.8	42.7	5.46
PCB 153	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.4	57.1	<0.05	1.58	8.18	31.6	3.85
PCB 180	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	1.1	36.6	<0.05	1.67	4.43	10.9	1.31
PCB Summe n. AHR; AHV		mq/kg TS	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	19.5	746	<1.25	34.0	172	807	86.5

Messparameter			9297 Kunststoffe <2mm MP2 21.03.2011	9298 Kunststoffe <2mm MP4 21.03.2011	9295 Kunststoffe 20-25mm MP2 21.03.2011	9296 Kunststoffe 20-25mm MP4 21.03.2011	11045 Kunststoffe 2-5 mm, 5- 10 mm MP2 ohne Metalle 95.41% 21.03.2011	11046 Kunststoffe 2-5 mm, 5- 10 mm MP4 ohne Metalle 97.88% 21.03.2011	22543 LCD Module MP1 (A+B)	22542 LCD Module MP3 (A+B)	22544 LCD Module MP6 (A+B)	13003 LCD-TV Gehäuse MP1 ohne Metalle 98.79%	13004 LCD-TV Gehäuse MP3 ohne Metalle 98.25%	13005 LCD-TV Gehäuse MP6 ohne Metalle 98.55%
Parameter	Bedingung	Einheit	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat
Brom	(semiquant.)*	mq/kg TS	>11000	>9100	>8300	>8300	>6100	>8700	51	47	40	>12000	>11000	>11000
Chlor	(semiquant.)*	mq/kg TS	>3200	>4600	>11000	>6300	>6700	>11000	<30	<30	<30	490	400	400
P2O5	(semiquant.)*	% v. TS	0.041	0.10	0.18	<0.011	<0.011	0.13	<0.011	<0.011	<0.011	0.68	0.37	0.42
PCB 28	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PCB 52	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PCB 101	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PCB 118	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PCB 138	(TS)	mq/kg TS	<0.1	0.1	<0.1	0.3	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PCB 153	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	0.2	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PCB 180	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PCB Summe n. AHR; AHV		mq/kg TS	<2.5	<2.5	<2.5	2.8	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5

Bei den Messresultaten ist der Wert nach dem Zeichen < (kleiner als) die Bestimmungsgrenze der entsprechenden Methode.
Das Zeichen > bedeutet, dass der Wert über dem Messbereich liegt. Die dahinter angegebene Zahl entspricht jedoch einer guten Schätzung der entsprechenden Konzentration.

Brom-, Chlor- Phosphor- und PCB-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)

Messparameter			12948 Leiterplatten bruch MP 1 ohne Metalle 94.45%	12949 Leiterplatten bruch MP 2 ohne Metalle 99.94%	12950 Leiterplatten bruch MP 3 ohne Metalle 99.52%	12951 Leiterplatten bruch MP 4 ohne Metalle 95.42%	12952 Leiterplatten bruch MP 5 ohne Metalle 94.24%	12953 Leiterplatten bruch MP 6 ohne Metalle 95.53%	13844 Notebook Gehäuse MP2 ohne Metalle 88.12%	13845 Notebook Gehäuse MP3 ohne Metalle 89.05%	13843 Notebook Gehäuse MP1 ohne Metalle 86.81%	9285 PC-LCD Gehäuse MP1 21.03.2011	9286 PC-LCD Gehäuse MP3 21.03.2011	9287 PC-LCD Gehäuse MP5 21.03.2011
Parameter	Bedingung	Einheit	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat
Brom	(semiquant.) *	mq/kg TS	>85000	>60000	>76000	>110000	>110000	>95000	>6100	>6600	>6300	>4600	>4800	>5300
Chlor	(semiquant.) *	mq/kg TS	>3000	>1000	88	640	>1600	720	520	790	530	520	650	590
P2O5	(semiquant.) *	% v. TS	2.6	<0.0017	<0.0018	0.39	1.2	0.40	2.2	2.3	1.8	1.3	1.1	1.2
PCB 28	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1
PCB 52	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1	<0.1	<0.1
PCB 101	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PCB 118	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PCB 138	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PCB 153	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PCB 180	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PCB Summe n. AHR ; AltIV		mq/kg TS	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5	<2.5

Bei den Messresultaten ist der Wert nach dem Zeichen < (kleiner als) die Bestimmungsgrenze der entsprechenden Methode.
 Das Zeichen > bedeutet, dass der Wert über dem Messbereich liegt. Die dahinter angegebene Zahl entspricht jedoch einer guten Schätzung der entsprechenden Konzentration.

Messparameter			11042 Unterkorn MP1 ohne Metalle 98.41%	11043 Unterkorn MP3 ohne Metalle 99.00%	11044 Unterkorn MP5 ohne Metalle 98.80%	9290 Staub Prallmühle MP2 21.03.2011	9291 Staub Prallmühle MP4 21.03.2011	9288 Staub Zyklon MP2 21.03.2011	9289 Staub Zyklon MP4 21.03.2011
Parameter	Bedingung	Einheit	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat	Resultat
Brom	(semiquant.) *	mq/kg TS	>10000	>6300	>5900	>8300	>9300	>5500	>2200
Chlor	(semiquant.) *	mq/kg TS	>7000	>3700	>3400	>2500	>3000	>13000	>8700
P2O5	(semiquant.) *	% v. TS	0.060	0.016	<0.0014	0.044	0.030	<0.0015	<0.0017
PCB 28	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	0.7	0.5	1.1
PCB 52	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	0.9	0.8	0.7
PCB 101	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	0.2	0.8	0.8	0.3
PCB 118	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	0.3	0.4	0.6	0.2
PCB 138	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	2.4	1.6	0.7	0.3
PCB 153	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	2.0	1.4	0.4	0.2
PCB 180	(TS)	mq/kg TS	<0.1	<0.1	<0.1	1.5	0.9	<0.1	<0.1
PCB Summe n. AHR ; AltIV		mq/kg TS	<2.5	<2.5	<2.5	28.7	26.7	13.7	10.7

Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)

Analyt g/kg TS	Kunststoffe 20-25mm MP2			Kunststoffe 20-25mm MP4			Kunststoffe <2mm MP2			Kunststoffe <2mm MP4			Cu-Kabel MP2		Cu-Kabel MP4		LCD-TV-Gehäuse MP1				LCD-TV-Gehäuse MP3			LCD-TV-Gehäuse MP6		Notebook-Gehäuse MP4		Notebook-Gehäuse MP1		Notebook-Gehäuse MP2														
	9295	9295	9295	9296	9296	9296	9297	9297	9297	9298	9298	9298	9298	9299	9299	9299	9300	9300	9300	13003	13003	13003	13003	13003	13004	13004	13004	13005	13005	13843	13843	13843	13844	13844	13844	13845	13845	13845						
BDE 28	<0.1	<0.005	<0.005	<0.1	<0.005	<0.005	<0.1	<0.005	<0.005	<0.1			<0.005	<0.005	<0.1	<0.005	<0.005	<0.005	<0.1				<0.005	<0.005	<0.1	<0.005	<0.005	<0.1	<0.005	<0.005	<0.1	<0.005	<0.005	<0.1	<0.005	<0.005	<0.1	<0.005	<0.005					
BDE 47	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02			<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.005	<0.02				<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005					
BDE 99	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02			<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.005	<0.02				<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005					
BDE 100	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02			<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.005	<0.02				<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005					
BDE 153	0.03	0.014	0.022	0.04	0.04	0.040	0.02	0.012	0.012	0.02			0.013	0.013	<0.02	<0.005	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02			<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	0.007	0.007	0.02	<0.005	<0.005	<0.02	0.008	0.008						
BDE 154	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02			<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.005	<0.02				<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005					
BDE 183	0.18	0.2	0.190	0.25	0.28	0.285	0.09	0.08	0.085	0.08			0.08	0.080	<0.02	<0.005	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02			0.016	0.016	<0.02	0.013	0.02	0.015	0.015	0.04	0.04	0.040	0.03	0.04	0.035	0.06	0.05	0.055				
BDE 197	0.08	0.1	0.090	0.11	0.16	0.135	0.04	0.06	0.050	0.04			0.06	0.050	<0.02	<0.005	<0.005	<0.005	<0.02				<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	0.02	0.015	0.015	0.015	0.02	<0.005	<0.005	0.03	0.02	0.025			
DecaBDE	1.2	1.2	1.200	1.3	1.6	1.430	1.1	0.8	0.955	1.3			1.0	1.170	0.3	0.5	0.390	<0.1	<0.2	<0.1	3.7			3.3	3.495	3.7	3.9	3.780	3.4	2.8	3.075	0.1	<0.2	0.1	0.1	<0.2	0.1	0.2	0.2	0.220				
HBCD	<0.2	<0.5	<0.2	<0.2	<0.5	<0.2	<0.2	<0.5	<0.2	<0.2			<0.5	<0.2	<0.2	<0.5	<0.2	<0.5	<0.2	<0.2	<0.5	<0.2			<0.5	<0.2	<0.2	<0.5	<0.2	<0.2	<0.5	<0.2	<0.2	<0.5	<0.2	<0.2	<0.5	<0.2	<0.2					
TBBPA	2	2.12	2.060	1.91	1.94	1.925	0.93	0.88	0.905	1.16			1.1	1.130	0.03	0.04	0.035	<0.02	<0.02	<0.02	3.98			3.94	3.960	3.88	4.38	4.130	2.93	2.93	2.930	1.29	1.08	1.185	1.21	1.42	1.315	1.1	1.09	1.095				
DeBB	0.02	<0.02	0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	0.03	0.03	0.03			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02				
TBP	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1				
TBECH	<0.02	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1			<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1				
PBT	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02				
PBEB	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02				
HBB	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.03	0.04	0.035	0.03	0.03	0.04	0.02	0.030	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02				
Mirex	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02				
TBB	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02				
BTBPE	0.46	0.54	0.500	0.43	0.46	0.445	0.17	0.16	0.165	0.16	0.14	0.16	0.153	0.153	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			0.03	0.04	0.03	0.02	0.030	0.03	0.04	0.035	<0.02	<0.02	<0.02	0.26	0.28	0.270	0.1	0.13	0.15	0.08	0.1	0.090
TBPH	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02				
Dechloran Plus	0.07	0.06	0.065	0.07	0.06	0.065	0.09	0.08	0.085	0.09	0.1	0.1	0.08	0.093	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02			nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb	nb		
DBDPE	0.9	0.9	0.915	1.1	1.1	1.080	0.6	0.6	0.615	0.8	0.8	0.9	0.7	0.800	<0.1	<0.2	<0.1	<0.1	<0.2	<0.1	<0.1	<0.2			1.9	2.1	2.4	1.7	2.015	2.2	1.7	1.905	2.0	1.7	1.825	<0.1	<0.2	<0.1	<0.1	<0.2	<0.1	<0.1	<0.2	<0.1
TBPT	<0.1	<0.5	<0.1	0.1	0.5	0.1	0.1	0.5	0.1	0.1	0.1	0.1	0.5	0.103	<0.1	<0.5	<0.1	<0.1	<0.5	<0.1	<0.1	<0.5			0.7	0.9	0.9	0.6	0.790	0.7	0.7	0.715	0.7	0.6	0.650	<0.1	<0.5	<0.1	<0.1	<0.5	<0.1	<0.1	<0.5	<0.1

ECD MS
nb nicht bestimmbar, Überlagerung mit Fremdpeak im ECD

Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)

Analyt g/kg TS	LCD Module MP3 (A+B)			LCD Module MP1 (A+B)			LCD Module MP6 (A+B)		
	22542	22542	22542	22543	22543	22543	22544	22544	22544
BDE 28	<0.1	<0.005	<0.005	<0.1	<0.005	<0.005	<0.1	<0.005	<0.005
BDE 47	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005
BDE 99	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005
BDE 100	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005
BDE 153	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005
BDE 154	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005
BDE 183	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005
BDE 197	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005	<0.02	<0.005	<0.005
DecaBDE	<0.1	< 0.2	<0.1	<0.1	< 0.2	<0.1	<0.1	< 0.2	<0.1
HBCD	<0.2	<0.5	<0.2	<0.2	<0.5	<0.2	<0.2	<0.5	<0.2
TBBPA	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
DeBB	<0.02	<0.2	<0.02	<0.02	<0.2	<0.02	<0.02	<0.2	<0.02
TBP	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
TBECH	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
PBT	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
PBEB	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
HBB	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Mirex	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
TBB	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
BTBPE	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
TBPH	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
Dechloran Plus	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02
DBDPE	<0.1	< 0.2	<0.1	<0.1	< 0.2	<0.1	<0.1	< 0.2	<0.1
TBPT	<0.1	<0.5	<0.1	<0.1	<0.5	<0.1	<0.1	<0.5	<0.1

ECD MS

nb nicht bestimmbar, Überlagerung mit Fremdpeak im ECD

9.8.4 Flammenschutzmittel EMPA

Tab. 49 > Flammenschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate EMPA)

Probenbezeichnung:	30 339 (alt 9285) PC-LCD- Gehäuse MP1	30 340 (alt 9286) PC-LCD- Gehäuse MP3	30 341 (alt 9287) PC-LCD- Gehäuse MP5	30 347 (alt 9288) Staubzyklon MP2	30 348 (alt 9298) Staub Zyklon MP4	30 345 (alt 9290) Staub Prallmühle MP2	30 300 (alt 9301) CRT-TV- Gehäuse MP1	30 302 (alt 9303) CRT-TV- Gehäuse MP5
Empa. Nr.:	26 912	27 012	27 112	27 212	27 312	27 412	27 512	27 612
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
28-TriBDE	<u>0,013</u>	<u>0,026</u>	<u>0,016</u>	2,1	0,83	4,2	0,019	0,070
47-TeBDE	0,14	0,10	0,16	17	17	29	0,16	0,69
99-PeBDE	0,14	0,092	0,28	24	28	32	0,41	0,91
100-PeBDE	0,028	0,025	0,063	2,9	5,1	2,7	0,041	0,08
153-HxBDE	0,67	0,59	0,81	10	11	9,0	74	62
154-HxBDE	0,14	0,11	0,14	2,2	2,7	2,3	6,4	5,3
183-HpBDE	4,0	3,5	4,9	40	16	18,7	570	482
197-OcBDE	2,5	1,8	2,5	17	8,0	9,3	283	228
206-NoBDE	7,9	1,9	5,0	15	11	10	207	202
207-NoBDE	11	2,1	4,7	27	15	15	326	265
208-NoBDE	5,7	0,79	2,0	9	5,9	6,0	54	46
209-DecaBDE	136	33	57	387	303	252	5345	4763
209-BB	<u>0,93</u>	<u>0,33</u>	<u>0,17</u>	3,9	4,7	5,9	10	7,2
Summe aller BDE:	168	45	78	553	424	391	6866	6054
Summe Tri-PeBDE	0,32	0,24	0,52	46,53	50,39	68,06	0,63	1,7
Summe Hx-OcBDE	7,2	6,1	8,3	68,8	38,3	39,3	934	777
Summe No+DeBDE	161	38	69	438	335	284	5931	5275
HBCDD	<u>1,8</u>	<u>0,8</u>	4,8	17	13	8,2	275	283
HBB	1,3	0,58	4,6	18	12	18	7,5	4,3
BTBPE	68	14	77	52	16	31	1428	1834
DDC-CO	26	<u>1,6</u>	<u>2,8</u>	88	170	45	1001	672
DBDPE	330	131	500	1063	472	389	953	969
TTBP-TAZ	5,6	16	3,9	14	3,4	8,3	11	11

HBB = Hexabrombenzol; BTBPE = Bistribromphenoxyethan; DDC-CO = Dechloran Plus; DBDPE = Decabromdiphenylethan; TTBP-TAZ = Tristribromphenoxytriazin

Unterstrichene Werte = Nachweisgrenze

Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate EMPA)

Probenbezeichnung:	11 042 (alt 11 042) Unterkorn MP1 ohne Me	30 343 (alt 11 043) Unterkorn MP3 ohne Me	30 344 (alt 11 044) Unterkorn MP5 ohne Me	30 307 (alt 11 045) Kunststoffe 2-5 und 5-10 mm MP2	30 308 (alt 11 046) Kunststoffe 2-5 und 5-10 mm MP4
Empa. Nr.:	27712	27812	27912	28012	28112
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
28-TriBDE	1,19	0,96	0,78	0,18	0,17
47-TeBDE	7,1	5,54	4,6	1,0	1,4
99-PeBDE	10,5	7,2	5,9	1,0	2,0
100-PeBDE	0,89	0,7	0,67	0,13	0,25
153-HxBDE	34	17	14	14	13
154-HxBDE	5,8	2,8	2,9	1,8	1,9
183-HpBDE	190	94	74	94	89
197-OcBDE	92	45	38	44	43
206-NoBDE	43	20	20	19	39
207-NoBDE	101	43	45	45	53
208-NoBDE	22	10	12	10	22
209-DecaBDE	1216	524	553	611	756
209-BB	2,4	7,7	8,9	5,3	17
Summe aller BDE:	1723	769	771	841	1021
Summe Tri-PeBDE	20	14	12	2,4	3,7
Summe Hx-OcBDE	321	158	129	154	147
Summe No+DeBDE	1382	596	630	685	869
HBCDD	15	19	11	38	40
HBB	28	9,4	5,3	2,5	5,2
BTBPE	751	217	120	251	307
DDC-CO	70	65	48	66	130
DBDPE	546	633	806	905	990
TTBP-TAZ	17	22	25	31	39

HBB = Hexabrombenzol; BTBPE = Bistribromphenoxyethan; DDC-CO = Dechloran Plus; DBDPE = Decabromdiphenylethan; TTBP-TAZ = Trisbromphenoxytriazin

Unterstrichene Werte = Nachweisgrenze

Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate EMPA)

Probenbezeichnung:	30 316 (alt 12 949) Leiterplattenbruch MP2 ohne Me	30 319 (alt 12 952) Leiterplattenbruch MP5 ohne Me	30 320 (alt 12 953) Leiterplattenbruch MP6 ohne Me	30 297 (alt 9292) CRT-PC-Gehäuse MP1	30 298 (alt 9293) CRT-PC-Gehäuse MP3	30 299 (alt 9294) CRT-PC-Gehäuse MP5
Empa. Nr.:	28 212	28 312	28 412	28 512	28 612	28 712
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
28-TriBDE	0,72	4,4	0,83	0,039	0,015	0,025
47-TeBDE	3,6	21	4,2	3,7	1,2	2,5
99-PeBDE	4,4	22	5,1	6,1	2,1	4,3
100-PeBDE	3,4	1,2	0,30	1,2	0,34	0,71
153-HxBDE	1,3	4,8	8,0	115	159	91
154-HxBDE	0,36	1,0	1,0	12	15	10
183-HpBDE	3,1	2,8	23	802	1056	600
197-OcBDE	2,3	1,8	12	371	506	288
206-NoBDE	4,0	8,0	3,1	58	69	73
207-NoBDE	4,1	9,5	5,3	341	432	247
208-NoBDE	1,8	4,2	1,0	15	15	21
209-DecaBDE	48	146	50	997	1016	1362
209-BB	3,4	4,5	0,96	0,36	<u>0,72</u>	<u>0,45</u>
Summe aller BDE:	77	227	114	2721	3270	2700
Summe Tri-PeBDE	12	48	10	11	3,7	7,6
Summe Hx-OcBDE	7,0	10	44	1300	1735	989
Summe No+DeBDE	58	168	60	1411	1532	1704
HBCDD	<u>0,66</u>	<u>0,50</u>	<u>0,38</u>	10	2,3	1,0
HBB	0,76	19	2,7	0,51	0,35	1,5
BTBPE	13	5,8	0,84	6484	6128	5824
DDC-CO	14	68	51	78	67	78
DBDPE	68	80	79	120	19	51
TTBP-TAZ	43	25	17	<u>0,79</u>	<u>1,7</u>	<u>0,8</u>

HBB = Hexabrombenzol; BTBPE = Bistribromphenoxyethan; DDC-CO = Dechloran Plus; DBDPE = Decabromdiphenylethan; TTBP-TAZ = Trisribromphenoxytriazin

Unterstrichene Werte = Nachweisgrenze

Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate EMPA)

Probenbezeichnung:	30 306 (alt 9296) Kunststoffe 20–25 mm MP4	9299 Cu-Kabel MP2	9300 Cu-Kabel MP4	30 313 (alt 13 004) LCD TV-Gehäuse MP3 ohne Me	30 314 (alt 13 005) LCD TV-Gehäuse MP6 ohne Me
Empa. Nr.:	28 812	28 912	29 012	29 112	29 212
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
28-TriBDE	0,47	0,012	0,011	0,070	<u>0,014</u>
47-TeBDE	3,3	0,064	0,069	0,29	0,16
99-PeBDE	3,9	0,054	0,055	0,37	0,23
100-PeBDE	0,43	0,008	0,008	0,046	0,03
153-HxBDE	39	0,29	0,25	2,24	3,4
154-HxBDE	4,3	0,034	0,035	0,12	0,31
183-HpBDE	265	2,2	1,71	12	19
197-OcBDE	139	1,4	0,91	5,9	10
206-NoBDE	43	7,6	5,9	118	185
207-NoBDE	136	7,1	6,9	135	154
208-NoBDE	15	3,9	3,3	73	87
209-DecaBDE	1 029	231	213	4714	4217
209-BB	13	1,1	0,48	<u>0,73</u>	<u>0,54</u>
Summe aller BDE:	1 679	254	232	5062	4676
Summe Tri–PeBDE	8,1	0,14	0,14	0,77	0,43
Summe Hx–OcBDE	448	4,0	2,9	20	33
Summe No+DeBDE	1 223	250	229	5040	4643
HBCDD	34	0,11	0,063	3,9	2,7
HBB	4,0	0,43	0,41	0,89	1,4
BTBPE	434	2,16	1,5	35	15,7
DDC-CO	50	0,45	0,40	<u>1,5</u>	<u>3,5</u>
DBDPE	1 584	67	61	3138	2 918
TTBP-TAZ	29	2,3	2,3	263	325

HBB = Hexabrombenzol; BTBPE = Bistribromphenoxyethan; DDC-CO = Dechloran Plus; DBDPE = Decabromdiphenylethan; TTBP-TAZ = Trisbromphenoxytriazin

Unterstrichene Werte = Nachweisgrenze

Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate EMPA)

Probenbezeichnung:	30 336 (13 843) Notebook-Gehäuse MP1 ohne Me	30 337 (13 844) Notebook-Gehäuse MP2 ohne Me	30 338 (13 845) Notebook-Gehäuse MP3 ohne Me	30 310 (alt 22 542) LCD-Module MP3 (A+B) 30 310	30 311 (alt 22 544) LCD-Module MP6 (A+B)
Empa. Nr.:	29 312	29 412	29 512	29 612	29 712
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
28-TriBDE	<u>0,020</u>	<u>0,02</u>	<u>0,017</u>	<u>0,029</u>	<u>0,041</u>
47-TeBDE	0,27	0,31	0,36	<u>0,078</u>	<u>0,055</u>
99-PeBDE	0,32	0,40	0,45	<u>0,049</u>	<u>0,046</u>
100-PeBDE	0,07	0,07	0,11	<u>0,037</u>	<u>0,035</u>
153-HxBDE	6,1	5,1	13	<u>0,15</u>	<u>0,16</u>
154-HxBDE	0,85	0,70	2,0	<u>0,12</u>	<u>0,12</u>
183-HpBDE	36	31,0	73	0,65	<u>0,093</u>
197-OcBDE	17	14,0	36	0,31	<u>0,075</u>
206-NoBDE	10	5,8	13	0,13	<u>0,10</u>
207-NoBDE	11	8,5	19	0,19	<u>0,062</u>
208-NoBDE	2,2	1,5	3,2	<u>0,019</u>	<u>0,044</u>
209-DecaBDE	117	116	226	2,14	<u>0,30</u>
209-BB	<u>0,20</u>	<u>0,58</u>	2,3	<u>0,87</u>	<u>0,72</u>
Summe aller BDE:	201	183	387	3,9	1,1
Summe Tri-PeBDE	0,68	0,79	0,94	0,19	0,18
Summe Hx-OcBDE	60	51	124	1,2	0,44
Summe No+DeBDE	140	132	261	2,5	0,51
HBCDD	<u>0,86</u>	<u>0,79</u>	<u>0,81</u>	<u>0,63</u>	<u>0,64</u>
HBB	2,2	1,4	5,8	0,12	0,17
BTBPE	310	135	100	1,1	<u>0,54</u>
DDC-CO	<u>2,4</u>	<u>3,0</u>	<u>2,4</u>	<u>3,6</u>	<u>2,1</u>
DBDPE	80	58	52	<u>3,2</u>	<u>2,5</u>
TTBP-TAZ	6,0	17	15	<u>4,4</u>	<u>2,3</u>

HBB = Hexabrombenzol; BTBPE = Bistribromphenoxyethan; DDC-CO = Dechloran Plus; DBDPE = Decabromdiphenylethan; TTBP-TAZ = Trisribromphenoxytriazin

Unterstrichene Werte = Nachweisgrenze

Tab. 50 > Nachweisgrenze Flammschutzmittel (EMPA)

Stoff	Nachweisgrenze (LOD=Limit of Detection)
28-TriBDE	0,05 mg/kg
47-TeBDE	0,10 mg/kg
99-PeBDE	0,05 mg/kg
100-PeBDE	0,05 mg/kg
153-HxBDE	0,15 mg/kg
154-HxBDE	0,15 mg/kg
183-HpBDE	0,10 mg/kg
197-OcBDE	0,10 mg/kg
206-NoBDE	0,10 mg/kg
207-NoBDE	0,10 mg/kg
208-NoBDE	0,05 mg/kg
209-DecaBDE	0,05 mg/kg
209-BB	1 mg/kg
HBCDD	1 mg/kg
HBB	<0,15 mg/kg
BTBPE	<1 mg/kg
DDC-CO	5 mg/kg
DBDPE	5 mg/kg
TTBP-TAZ	5 mg/kg

9.9 **Schätzung der Gehalte in hoch- und minderwertigen Leiterplatten**

Tab. 51 > Schätzung der Gehalte in hoch- und minderwertigen Leiterplatten

	Leiterplatten			Faktor	Bruch	Hochwertig	Minderwertig
	Bruch Analyse	Hochwertig Schätzung	Minderwertig Schätzung				
	[mg/kg]	[mg/kg]	[mg/kg]				
Al	42 440	50 929	46 684	Al	1	1,2	1,1
Sb	288	346	317	Sb	1	1,2	1,1
Pb	10 239	12 287	11 263	Pb	1	1,2	1,1
Cd	6,0	6,0	6,0	Cd	1	1	1
Cr	1 538	1 846	1 692	Cr	1	1,2	1,1
Fe	45 865	45 865	45 865	Fe	1	1	1
Cu	224 445	269 334	246 889	Cu	1	1,2	1,1
Ni	4 794	5 753	5 273	Ni	1	1,2	1,1
Hg	0,18	0,18	0,18	Hg	1	1	1
Zn	11 256	11 256	11 256	Zn	1	1	1
Sn	27 074	32 489	29 781	Sn	1	1,2	1,1
Br	89 333	89 333	89 333	Br	1	1	1
Cl	1 175	1 175	1 175	Cl	1	1	1
P	3 320	3 320	3 320	P	1	1	1

9.10 **Analysenresultate EMPA zur Qualitätssicherung**9.10.1 **Elemente**

Tab. 52 > Metalle, Antimon und Phosphor (Resultate EMPA)

Probenbezeichnung	Cadmium (Cd)	Chrom total (Cr)	Kupfer (Cu)	Eisen (Fe)	Nickel (Ni)	Phosphor (P)
Massenanteile in µg/g (ppm)						
9291	46±3	850±20	8700±190	77 300±1 500	3000±40	630±10
9296	*36±2	<125	19 100±4500	920±50	120±10	1 200±60
9302	*8±0,1	<125	470±100	850±160	<50	1 300±110
12 952	*2±0,1	3000±125	243 200±15 000	16 500±550	4000±130	2 100±180
13 003	*3±1	<125	3400±190	1 100±30	150±10	3700±100
18 379	*14±4	9900±1 600	308 300±20 500	44 400±4900	8000±1 300	660±150
18 391	*19±4	960±70	460 650±19 500	7700±400	2 000±140	240±20
NWG nach DIN 32 645	40	125	115	85	50	38

<: kleiner als die Nachweisgrenze (NWG) des Verfahrens nach DIN 32 645 indirekte Methode

±: absolute Standardabweichung aus 3–5 unabhängigen Analysen

*: Die Angaben des ausserhalb der NWG liegenden Werte erfolgte auf Wunsch des Auftraggebers.

Metalle, Antimon und Phosphor (Resultate EMPA)

Probenbezeichnung	Blei (Pb)	Aluminium (Al)	Antimon (Sb)	Zinn (Sn)	Zink (Zn)	Quecksilber (Hg)
Massenanteile in µg/g (ppm)						
9291	11 800±200	22 200±800	1 380±110	4 230±60	15 600±240	4,0±0,1
9296	980±30	3340±250	2 700±60	410±20	1 470±180	*0,1±0,04
9302	620±20	380±50	3600±100	*45±<1	400±10	*0,4±0,05
12 952	9500±360	26 000±780	860±130	24 900±500	10 600±450	*0,2±0,01
13 003	260±7	2 200±170	3200±30	480±20	520±10	*0,1±<0,01
18 379	7200±1 200	381 800±12 500	140±4	14 000±1 100	144 000±7900	*0,1±0,02
18 391	16 100±1 200	349 000±27 500	260±30	21 800±1 100	68 400±3400	*0,7±0,16
NWG nach DIN 32 645	55	23	90	70	50	1

<: kleiner als die Nachweisgrenze (NWG) des Verfahrens nach DIN 32 645 indirekte Methode

±: absolute Standardabweichung aus 5 unabhängigen Analysen

*: Die Angaben des ausserhalb der NWG liegenden Werte erfolgte auf Wunsch des Auftraggebers.

Tab. 53 > Chlor und Brom (Resultate EMPA)

Probenbezeichnung	Chlor (Cl)	Brom (Br)
Massenanteile in µg/g (ppm)		
9291	2 400±180	7 000±80
9296	6 400±300	7 100±400
9302	12 100±500	9 100±400
12 952	1 600±200	27 700±1 000
13 003	1 100±250	11 900±1 400
18 379	590±110	2 500±300
18 391	390±180	2 600±360
NWG nach DIN 32 645	65	65

<: kleiner als die Nachweisgrenze (NWG) des Verfahrens

±: absolute Standardabweichung aus 3 unabhängigen Analysen

9.10.2 Organische Verbindungen

Tab. 54 > Flammschutzmittel (Resultate EMPA)

Probenbezeichnung:	FÜ 13003	13003	FÜ 9298	9298	9291	9291
	LCD-TV-Gehäuse MP1	Extrakt Bachema	KS < 2mm MP4	Extrakt Bachema	Staub Prallmühle MP4	Extrakt Bachema
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
28-TriBDE	0.10	0.082	0.54	0.70	4.5	4.0
47-TeBDE	0.71	0.83	3.8	4.4	33	28
99-PeBDE	0.78	0.90	4.5	5.0	41	36
100-PeBDE	0.19	0.16	0.67	0.74	4.3	3.8
153-HxBDE	3.6	3.4	16	21	10	8.7
154-HxBDE	0.24	0.21	2.6	3.3	2.7	2.3
183-HpBDE	16	16	84	115	19	15
197-OcBDE	8.3	7.1	47	63	10	8.0
206-NoBDE	140	98	49	39	14	8.9
207-NoBDE	53	26	38	37	7.5	5.6
208-NoBDE	24	11	13	7.4	2.8	1.4
209-DecaBDE	4408	4047	938	1332	307	292
209-BB	0.61	1.0	18	24	7.1	6.3
Summe aller BDE:	4656	4211	1198	1627	454.8	414
Summe Tri-PeBDE	1.8	2.0	9.5	11	82	72
Summe Hx-OcBDE	28	26	150	202	41	34
Summe No+DeBDE	4625	4182	1038	1415	332	308
TBBPA	3993	4560	993	1370	258	236
HBCDD	3.6	4.9	34	38	8.7	9.2
HBB	2.7	2.7	23	33	14	17
BTBPE	28	35	157	170	31	30
DDC-CO	3.6	3.6	65	82	53	45
DBDPE	2082	1934	744	1087	248	278
TTBP-TAZ	396	388	30	43	9.4	7.9

HBB = Hexabrombenzol

BTBPE = Bistribromphenoxyethan

DDC-CO = Dechloran Plus

DBDPE = Decabromdiphenylethan

TTBP-TAZ = Tristribromphenoxytriazin

Flammschutzmittel (Resultate EMPA)

Probenbezeichnung:	9302	9302	FÜ 9295	9297
	CRT-TV-Gehäuse MP3	Extrakt Bachema	ststoffe 20-25 r	Extrakt Bachema
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
28-TriBDE	0.028	0.017	0.34	0.52
47-TeBDE	0.24	0.14	1.8	3.27
99-PeBDE	0.43	0.30	1.5	3.94
100-PeBDE	0.048	0.037	0.13	0.37
153-HxBDE	66	53	30	15
154-HxBDE	5.3	4.1	3.0	1.9
183-HpBDE	419	332	170	79
197-OcBDE	230	185	92	43
206-NoBDE	197	132	25	27
207-NoBDE	200	136	34	26
208-NoBDE	28	11	3.9	7.7
209-DecaBDE	5145	4139	914	747
209-BB	15	12	18	20
Summe aller BDE:	6291	4992	1275	955
Summe Tri-PeBDE	0.75	0.49	3.8	8.1
Summe Hx-OcBDE	720	575	294	139
Summe No+DeBDE	5570	4417	977	808
TBBPA	917	938	2113	845
HBCDD	362	389	50	28
HBB	11	11	10	25
BTBPE	1962	1477	438	142
DDC-CO	1234	892	44	55
DBDPE	651	689	822	526
TTBP-TAZ	11	20	12	24

HBB = Hexabrombenzol
 BTBPE = Bistribromphenoxyethan
 DDC-CO = Dechloran Plus
 DBDPE = Decabromdiphenylethan
 TTBP-TAZ = Tristribromphenoxytriazin

Tab. 55 > PCB (Resultate EMPA)

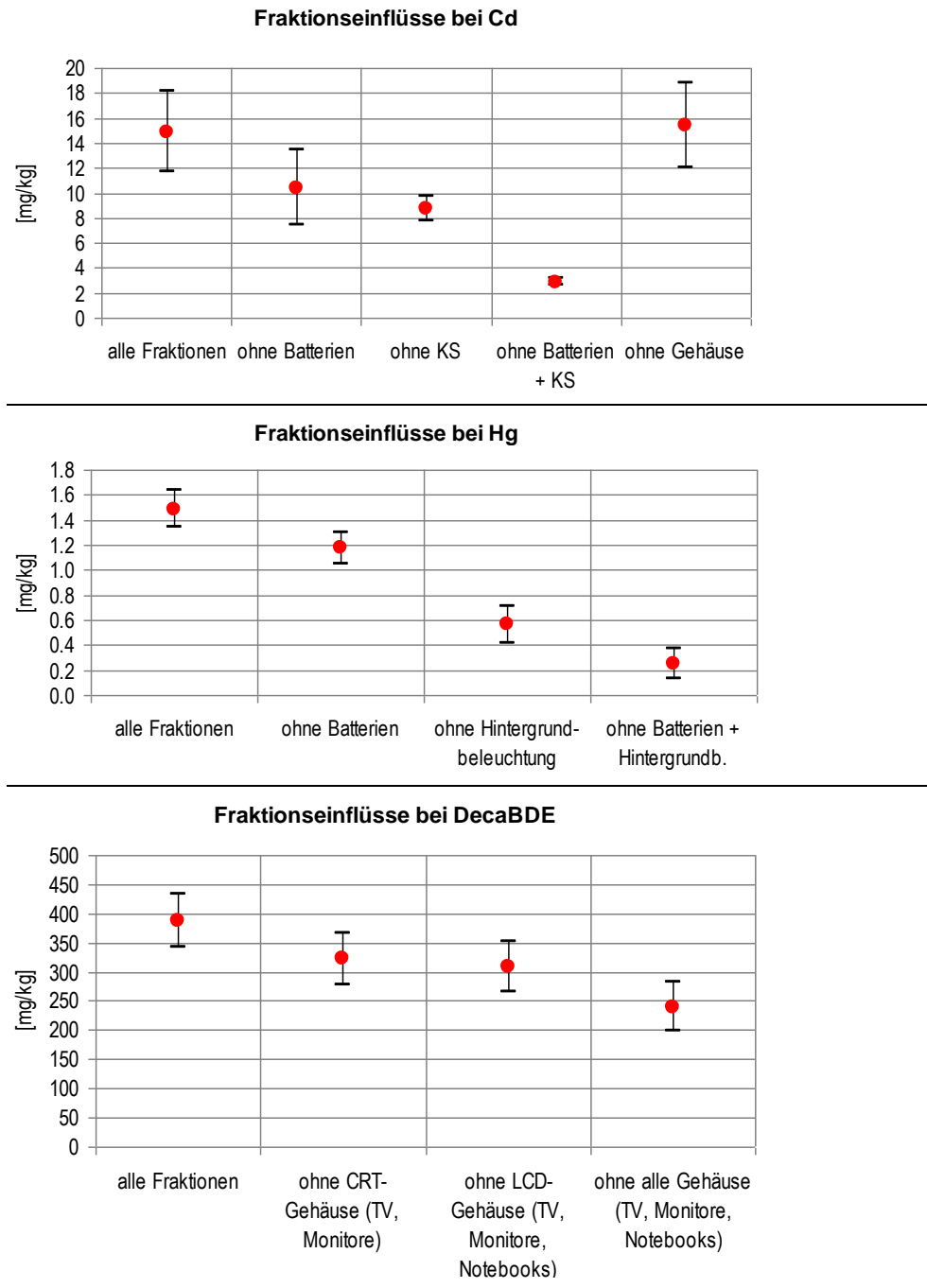
Probenbezeichnung:	14836	14836
Mittelwert aus 4 Bestimmungen	Kondensatoren	Kondensatoren
	mg/kg	
PCB IUPAC-Nr.:		
28	12	
52	82	
101	87	
138	78	
153	54	
180	18	
Summe 28,52,101,138,153,180	330	
PCB gesamt (Summe x 5)	1651	
PCB IUPAC-Nr.:	mg/kg	WHO-TEQ ₁₉₉₈ mg/kg
77	1.4	0.00014
81	0.19	0.000019
105	47	0.0047
114	2.7	0.0013
118	106	0.011
123	13	0.0013
126	0.083	0.0083
156	9.1	0.0046
157	2.0	0.0010
167	3.2	0.000032
169	0.0038	0.000038
189	0.45	0.000045
Σ WHO-TEQ		0.032

9.11

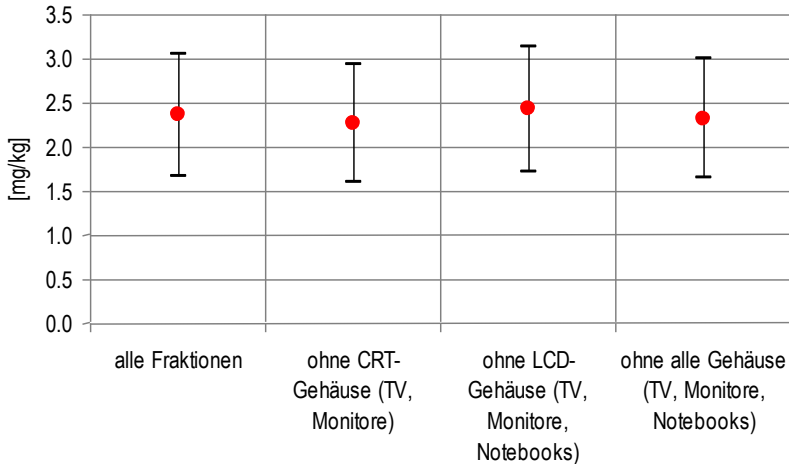
Konzentrationen im EEGG-Schrott bei Abwesenheit einzelner Fraktionen

Abb. 46 > Konzentrationen des EEGG-Schrotts bei Weglassen einzelner Fraktionen

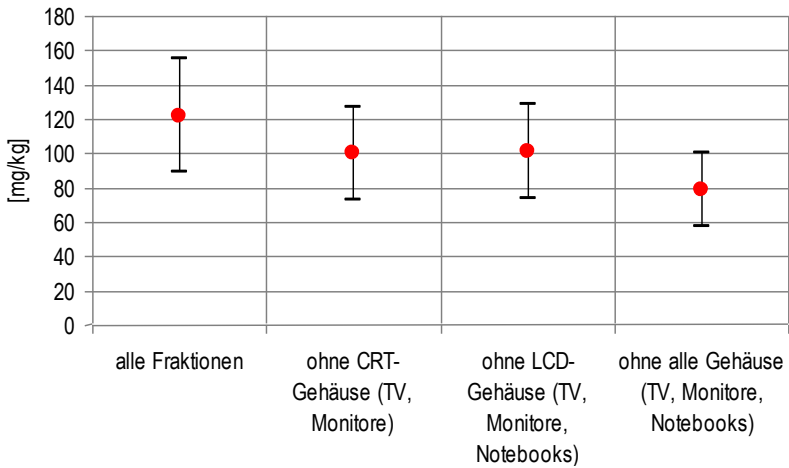
Mit Angabe des 95 %-KI.



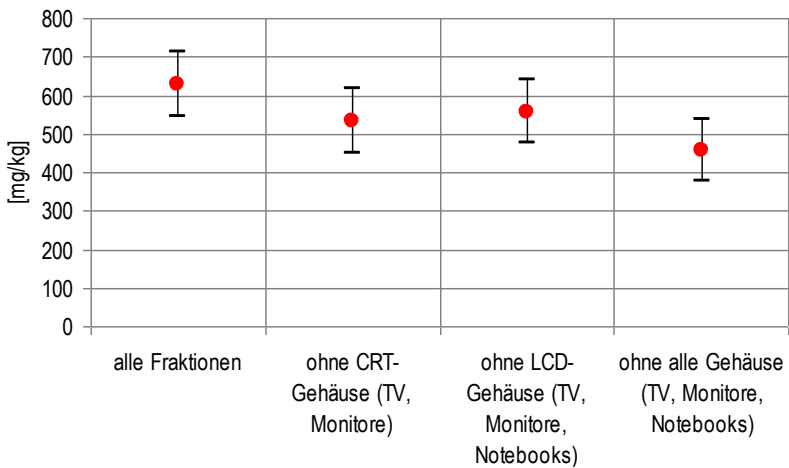
Fraktionseinflüsse bei PentaBDE



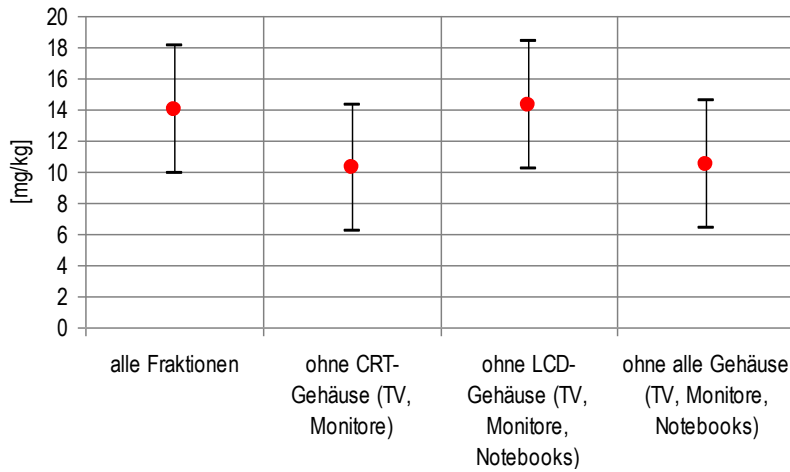
Fraktionseinflüsse bei OctaBDE



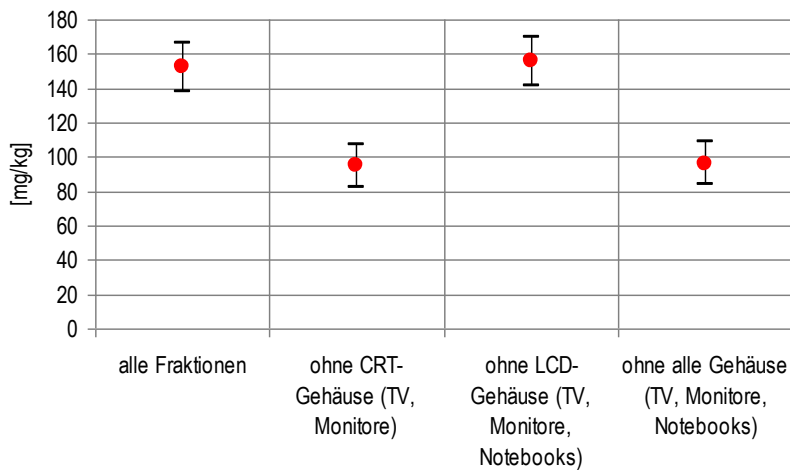
Fraktionseinflüsse bei TBBPA



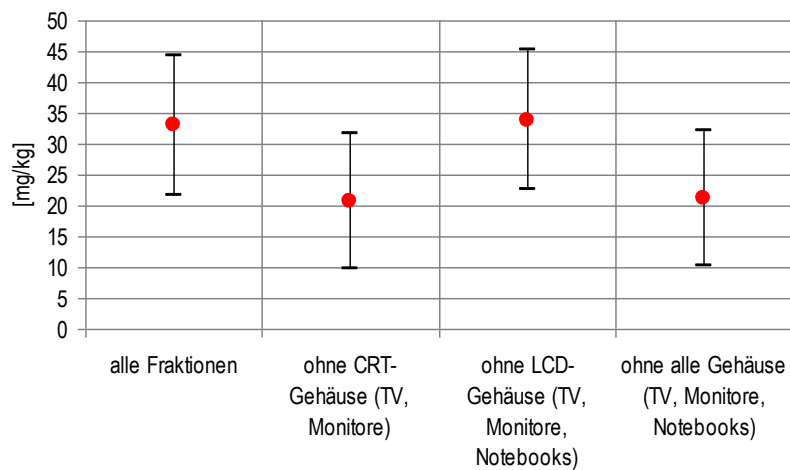
Fraktionseinflüsse bei HBCDD



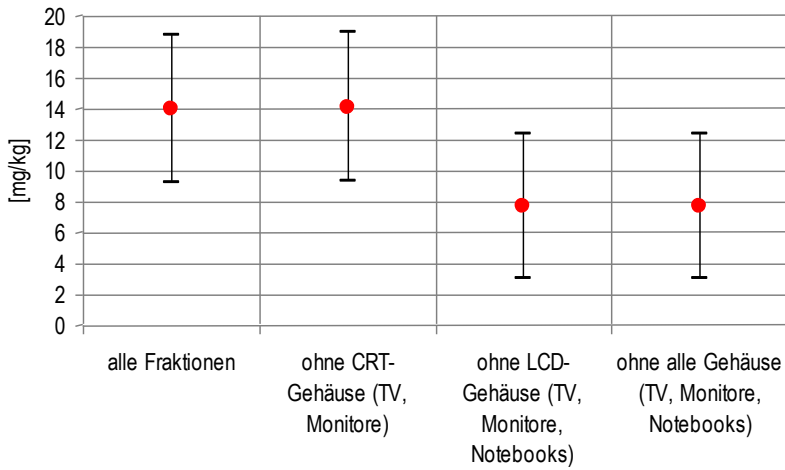
Fraktionseinflüsse bei BTBPE



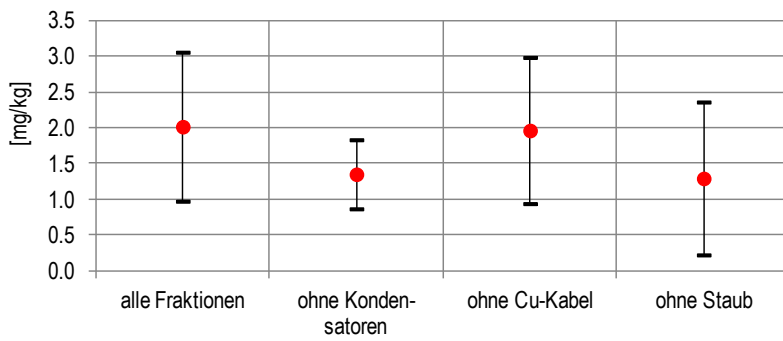
Fraktionseinflüsse bei DDC-CO



Fraktionseinflüsse bei TTBP-TAZ



Fraktionseinflüsse bei Summe PCB



9.12

Konzentrationen im EEGG-Schrott

Tab. 56 > Konzentrationen im EEGG-Schrott der Schweiz 2011

Mit Angabe des 95 %-KI.

EE-Schrott CH	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]	EE-Schrott CH	Konzentration [mg/kg]	Fehler [mg/kg]
Al	62 000	9 300	BDE 28	0,25	0,054
Sb	1 000	100	BDE 47	1,7	0,42
Pb	3 000	320	BDE 99	2,1	0,76
Cd	15	3,2	BDE 100	0,25	0,12
Cr	4 500	320	BDE 153	8,5	2,5
Fe	350 000	32 000	BDE 154	1,0	0,34
Cu	49 000	4 300	BDE 183	52	25
Ni	3 600	250	BDE 197	27	12
Hg	1,5	0,15	BDE 206	15	5,7
Zn	7 900	700	BDE 207	25	27
Sn	2 000	220	BDE 208	5,2	3,5
Br	4 500	510	DecaBDE (BDE 209)	390	45
Cl	6 900	1 600	HBCDD	14	4,1
P	530	500	TBBPA	630	85
PCB 28	0,041	0,024	DecaBB	4,5	2,7
PCB 52	0,073	0,065	TBP	18	n.b.
PCB 101	0,073	0,059	DBE-DBCH	19	n.b.
PCB 118	0,069	0,068	PBT	3,7	n.b.
PCB 138	0,14	0,10	PBEB	3,7	n.b.
PCB 153	0,12	0,080	HBB	2,9	1,7
PCB 180	0,067	0,046	Mirex	3,7	n.b.
Summe PCB nach AltIV	2,0	1,0	EH-TBB	3,7	n.b.
			BTBPE	150	14
			BEH-TEBP	3,7	n.b.
			DDC-CO	33	11
			DBDPE	340	200
			TTBP-TAZ	14	4,8

n.b. = nicht bestimmt; Fehler = «n.b.» → Konzentration kleiner als BG, dazugehörige Konzentration entspricht der ½ BG

9.13 Gegenüberstellung der Resultate der Untersuchung 2003 und 2011

Tab. 57 > Gegenüberstellung der Konzentrationen im Schweizer EE-Schrott 2003 und 2011

Mit Angabe des 95 %-KI.

Stoff	Konzentrationen								Anteil an Octa 1)	Anteil Octa 1) DE-71	Anteil Octa 1) Bromkal	MW OctaBDE	Fehler OctaBDE	Anteil an Penta 1)	verw. Anteil Penta 1) DE-71	verw. Anteil Penta 1) Bromkal	MW Penta
	2011			2003			Diff. 2003-2011										
	MW [mg/kg]	+/- [mg/kg]	Fehler %	MW [mg/kg]	+/- [mg/kg]	Fehler %	MW [mg/kg]	%									
PentaBDE	2.4	0.69	29%	34	4.0	12%	-32	-93%						1.10	1.04	1.07	
OctaBDE	120	33	27%	530	30	6%	-410	-77%		0.88	0.92	0.90					
BDE 28	0.25	0.054	22%											0.0025	0.00	0.0018	
BDE 47	1.7	0.42	25%										39-42%	0.382	0.43	0.41	
BDE 99	2.1	0.76	36%										45-49%	0.486	0.45	0.47	
BDE 100	0.25	0.120	48%										7.8-13%	0.131	0.078	0.10	
BDE 153	8.5	2.5	29%						0.15-8.7%	0.087	0.0015	0.044	0.043	5.3-5.4%	0.0544	0.053	0.054
BDE 154	1.0	0.34	34%						0.04-1.1%	0.011	0.00040	0.0056	0.0052	2.7-4.5%	0.0454	0.027	0.036
BDE 183	52	25	48%						13-42%	0.42	0.13	0.27	0.15	0.0010	0.0033	0.0022	
BDE 197	27	12	44%						11-22%	0.22	0.11	0.16	0.059	0.0010	0.0033	0.0022	
BDE 206	15	5.7	38%						1.4-7.7%	0.014	0.077	0.045	-0.031				
BDE 207	25	27	108%						11-12%	0.12	0.11	0.11	0.0015				
BDE 208	5.2	3.5	67%														
DecaBDE (BDE 209)	390	45	12%	510	40	8%	-120	-24%	1.3-50%	0.013	0.50	0.25	0.24				
HBCCD	14	4.1	29%	17	4.0	24%	-3.0	-18%									
TBBPA	630	85	13%	1 400	100	7%	-770	-55%									
DecaBB	4.5	2.7	60%														
TBP	18	1.4	8%														
DBE-DBCH	19	1.0	5%														
PBT	3.7	0.20	5%														
PBEB	3.7	0.20	5%														
HBB	2.9	1.70	59%														
Mirex	3.7	0.20	5%														
EH-TBB	3.7	0.20	5%														
BTBPE	150	14	9%														
BEH-TEBP	3.7	0.20	5%														
DDC-CO	33	11	33%														
DBDPE	340	200	59%														
TTBP-TAZ	14	4.8	34%														
Summe PCB	2.0	1.0	52%	13	4	31%	-11	-85%									
Al	62 000	9 300	15%	49 000	4 000	8%	13 000	27%									
Sb	1 000	100	10%	1 700	200	12%	-700	-41%									
Pb	3 000	320	11%	2 900	500	17%	100	3%									
Cd	15	3.2	21%	180	50	28%	-165	-92%									
Cr	4 500	320	7%	9 900	1 700	17%	-5 400	-55%									
Fe	350 000	32 000	9%	360 000	10 000	3%	-10 000	-3%									
Cu	49 000	4 300	9%	41 000	3 000	7%	8 000	20%									
Ni	3 600	250	7%	10 300	1 600	16%	-6 700	-65%									
Hg	1.5	0.15	10%	0.68	0.22	32%	0.82	121%									
Zn	7 900	700	9%	5 100	800	16%	2 800	55%									
Sn	2 000	220	11%	2 400	100	4%	-400	-17%									
Br	4 500	510	11%	5 500	300	5%	-1 000	-18%									
Cl	7 000	1 600	23%	9 600	1 400	15%	-2 600	-27%									
P	530	500	94%	360	220	61%	170	47%									

Signifikante Zunahme
 Signifikante Abnahme
 Fehler ≥ 50%

Quelle: 1) La Guardia et al: Environ. Sci. Technol. 2006, 40, 6247-6254

Die Gehalte an PentaBDE und OctaBDE wurden gemäss den Kongeneranteilen aus La Guardia et al. (2006) bestimmt.

> Verzeichnisse

Abkürzungen

a

Jahr

Al

Aluminium

AltIV

Altlasten-Verordnung (Verordnung über die Sanierung von belasteten Standorten, SR 814.680)

approx.

approximativ

APME

Associations of Plastic Manufacturers in Europe

Ba

Barium

BDE

Bromdiphenylether

BEH-TEBP

Bis(2-ethylhexyl)tetrabromphthalat

BG

Bestimmungsgrenze

Br

Brom

BTBPE

1,2-Bis(2,4,6-tribromphenoxy)ethan

CCFL

Cold Cathode Fluorescent Lamp

Cd

Cadmium

Cl

Chlor

Cr

Chrom

Cu

Kupfer

CRT

Cathode Ray Tube (Kathodenstrahlröhre, Röhrenbildschirm)

DBDPE

Decabromdiphenylethan

DBE-DBCH

1,2-Dibrom-4-(1,2-dibromethyl)cyclohexan

DDC-CO

1,2,3,4,7,8,9,10,13,13,14,14-Dodecachlor-1,4,4a,5,6,6a,7,10,10a,11,12,12a-dodecahydro-1,4:7,10-dimethanodibenzo[*a, e*]cycloocten (alternative Bezeichnung: «Dechloran Plus»)

DecaBB

Decabrombiphenyl

DecaBDE

Decabromdiphenylether

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

EH-TBB

2-Ethylhexyl-2,3,4,5-tetrabrombenzoat

EMPA

Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt

Fe

Eisen

FS

Flammschutzmittel (Stoffe mit flammhemmender Wirkung)

GC/HRMS

Gaschromatographie/hochauflösende Massenspektrometrie

GKG

Gewerbekühlgeräte

HBB

Hexabrombenzol

HBCDD

Hexabromcyclododecan

Hg

Quecksilber

HHGG

Haushaltgrossgeräte

KG

Kleingeräte

KI

Konfidenzintervall: In dieser Arbeit werden jeweils 95 %-KI auf Basis der Stichproben in den Mischproben, bezogen auf die Mittelwerte angegeben

KS

Kunststoff

LCD

Liquid Crystal Display (Flüssigkristall-Anzeige)

LOD

Limit of Detection (Nachweisgrenze)

Mirex

1,2,3,4,5,5,6,7,8,9,10,10-Dodecachlorpentacyclo[5.3.0.0^{2,6}.0^{3,9}.0^{4,8}]decan

MP

Mischprobe

MW

Mittelwert

NE

Nicht-Eisen

Ni

Nickel

NWG

Nachweisgrenze

OctaBDE

Octabromdiphenylether

OECD

Organisation for Economic Co-operation and Development

OLED

Organic Light Emitting Diode (organische Leuchtdiode)

P

Phosphor

Pb

Blei

PBB

Polybromierte Biphenyle

PBDE

Polybromierte Diphenylether: Gruppenbezeichnung für DecaBDE, OctaBDE und PentaBDE

PBEB

2,3,4,5,6-Pentabromethylbenzol

PBT

2,3,4,5,6-Pentabromtoluol

PC

Personal Computer

PCB

Polychlorierte Biphenyle

PentaBDE

Pentabromdiphenylether

QZ

Querzerspanner

rel.

relativ

Sb

Antimon

SENS

Stiftung Entsorgung Schweiz

SFA

Stoffflussanalyse

Sn

Zinn

SP

Stichprobe

SWICO

Schweizerischer Wirtschaftsverband der Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik

TBBPA

Tetrabrombisphenol A

TBP

2,4,6-Tribromphenol

TS

Trockensubstanz

TTBP-TAZ
2,4,6-Tris(2,4,6-tribromphenoxy)-1,3,5-triazin

TV
Fernsehgerät

VREG
Verordnung vom 14. Januar 1998 über die Rückgabe, die Rücknahme und Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (SR 814.620)

Zn
Zink

Abbildungen

Abb. 1 Verteilung des EEKG-Schrotts in die aggregierten Outputfraktionen	9
Abb. 2 Fraktionsverteilung der SWICO- und SENS-Sammlung im Jahr 2009	22
Abb. 3 Aggregiertes System	22
Abb. 4 Allgemeines Schema für die Probenaufbereitung und Analyse im Projekt	28
Abb. 5 Gerätemix EE-Kleingeräte in der Schweiz 2009 und beim Versuch 2011	30
Abb. 6 Massenverteilung des EEKG-Schrott Input in die aggregierten Outputgüter	31
Abb. 7 Stoffflüsse und mittlere Transferkoeffizienten der untersuchten Metalle und Antimon in aggregierten Outputfraktionen	47
Abb. 8 Stoffflüsse und mittlere Transferkoeffizienten der untersuchten Nichtmetalle in aggregierten Outputfraktionen	49
Abb. 9 Stoffflüsse und mittlere Transferkoeffizienten der ausgewählten FS in aggregierten Outputfraktionen	50
Abb. 10 Stoffflüsse und mittlere Transferkoeffizienten der PCB in aggregierten Outputfraktionen	53

Abb. 11 Konzentrationen der untersuchten Metalle und Antimon im EEKG-Schrott der Schweiz 2011	56
Abb. 12 Konzentrationen der untersuchten Nichtmetalle im EEKG-Schrott der Schweiz 2011	57
Abb. 13 Konzentrationen der untersuchten FS im EEKG-Schrott der Schweiz 2011	58
Abb. 14 Konzentrationen der untersuchten PCB im EEKG-Schrott der Schweiz 2011	59
Abb. 15 Stofffrachten der untersuchten Metalle und Antimon im EEKG-Schrott der Schweiz 2011	60
Abb. 16 Stofffrachten der untersuchten Nichtmetalle im EEKG-Schrott der Schweiz 2011	61
Abb. 17 Stofffrachten der untersuchten FS im EEKG-Schrott der Schweiz 2011	62
Abb. 18 Stofffrachten der untersuchten PCB im EEKG-Schrott der Schweiz 2011	63
Abb. 19 Fraktionseinflüsse beim Element Cd	65
Abb. 20 Fraktionseinflüsse beim Element Hg	65
Abb. 21 Fraktionseinflüsse bei DecaBDE	66
Abb. 22 Fraktionseinflüsse bei PentaBDE	67
Abb. 23 Fraktionseinflüsse bei OctaBDE	67
Abb. 24 Fraktionseinflüsse bei TBBPA	68
Abb. 25 Fraktionseinflüsse bei HBCDD	69
Abb. 26 Fraktionseinflüsse bei BTBPE	69
Abb. 27 Fraktionseinflüsse bei DDC-CO	70

Abb. 28 Fraktionseinflüsse bei TTBP-TAZ	70	Abb. 44 Vergleich ausgewählter FS-Gehalte in CRT-PC-Monitoren	84
Abb. 29 Fraktionseinflüsse bei den PCB	71	Abb. 45 Übersicht der Aufbereitungsmethoden der Bachema	97
Abb. 30 Vergleich der Gehalte an Cu, Al und Fe im EEKG-Schrott 2003 und 2011	72	Tab. 41 Batteriezusammensetzung und Gewichtsanteil des Batteriemix	127
Abb. 31 Vergleich der Gehalte an Ni, Zn und Cr im EEKG-Schrott 2003 und 2011	73	Tab. 45 Metall- und Antimonkonzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)	131
Abb. 32 Vergleich der Gehalte an Sb, Sn und Pb im EEKG-Schrott 2003 und 2011	73	Metall- und Antimonkonzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)	132
Abb. 33 Vergleich der Gehalte an Hg und Cd im EEKG-Schrott 2003 und 2011	74	Metall- und Antimonkonzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)	133
Abb. 34 Vergleich der Gehalte an P, Br und Cl im EEKG-Schrott 2003 und 2011	75	Metall- und Antimonkonzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)	134
Abb. 35 Vergleich der FS-Gehalte im EEKG-Schrott 2003 und 2011	75	Tab. 47 Brom-, Chlor- Phosphor- und PCB-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)	136
Abb. 36 Vergleich der PCB-Gehalte im EEKG-Schrott 2003 und 2011	76	Brom-, Chlor- Phosphor- und PCB-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)	137
Abb. 37 Vergleich der Hg-Gehalte einzelner CCFL-Röhrchen mit einer EMPA-Studie von 2008	77	Tab. 48 Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)	138
Abb. 38 Vergleich der Pb-, Hg-, Cd-, Cr-, Sb- und Cu-Gehalte in CRT-PC-Monitoren	78	Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)	139
Abb. 39 Vergleich der Pb-, Hg-, Cd-, Cr-, Sb- und Cu-Gehalte in CRT-TV	79	Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)	140
Abb. 40 Vergleich der Pb-, Hg-, Cd-, Cr-, Sb- und Cu-Gehalte in LCD-TV	80	Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate Bachema)	141
Abb. 41 Vergleich der Cl-, Br- und P-Gehalte in CRT-PC-Monitoren	81	Abb. 46 Konzentrationen des EEKG-Schrotts bei Weglassen einzelner Fraktionen	153
Abb. 42 Vergleich der Cl-, Br- und P-Gehalte in CRT-TV	82	Tabellen	
Abb. 43 Vergleich der Cl-, Br- und P-Gehalte in LCD-TV	83	Tab. 1 Untersuchte Stoffe	8
		Tab. 2 Konzentrationen der untersuchten Stoffe im EEKG-Schrott in der Schweiz 2011	10

Tab. 3	Verteilungsmuster der einzelnen Stoffe	11	Tab. 20	Gehalte in Leiterplatten inkl. 95 %-Konfidenzintervall	39
Tab. 4	Jahresfrachten einzelner Stoffe für die Schweiz und deren Unsicherheiten	12	Tab. 21	Gehalte in Bildröhrenkomponenten inkl. 95 %-Konfidenzintervall	40
Tab. 5	Anteile in einzelnen Output-Fractionen	12	Tab. 22	Gehalte in Bildschirm- und Notebookgehäusen inkl. 95 %-Konfidenzintervall	41
Tab. 6	Veränderung der Konzentrationen seit 2003	13	Tab. 23	Gehalte in der feinkörnigen KS-Fraktion inkl. 95 %-Konfidenzintervall	42
Tab. 7	Übersicht über Verbote und Beschränkungen von Stoffen in EE-Geräten	16	Tab. 24	Gehalte in der feinkörnigen Metallfraktion inkl. 95 %-Konfidenzintervall	43
Tab. 8	Untersuchte Stoffgruppen	17	Tab. 25	Gehalte in der Metallschrottfraktion inkl. 95 %-Konfidenzintervall	44
Tab. 9	Untersuchte Einzelsubstanzen (Flammschutzmittel)	18	Tab. 26	Gehalte im Fe-Schrott inkl. 95 %-Konfidenzintervall	45
Tab. 10	Gerätemix der EE-Kleingeräte in der Schweiz 2009	21	Tab. 27	Gasförmige Anteile von Hg in CCFL-Röhrchen	77
Tab. 11	Definition und Beschreibung der einzelnen aggregierten Güter	25	Tab. 28	Vergleich der Konzentrationen und Frachten des EEKG-Schrotts 2003 und 2011	86
Tab. 12	Ort der Probenahme zur Konzentrationsbestimmung und Aggregation der einzelnen Outputs	27	Tab. 29	Probenahmeschema Immark AG	91
Tab. 13	Massenflüsse der Outputprodukte im Versuch (mit angenommenem 5 % Fehlerbereich)	32	Tab. 30	Im Königswasser bestimmte Elemente	93
Tab. 14	Mittlere Stoffkonzentrationen der Schadstoffträger mit Angabe eines 95 %-Konfidenzintervalls	33	Tab. 31	Im Kunststoffaufschluss bestimmtes Element	93
Tab. 15	Mittlere Hg-Gehalte von Monitoren von LCD-TV, LCD-PC und Notebooks inkl. 95 %-Konfidenzintervall	34	Tab. 32	Sowohl im Königswasser wie auch im Kunststoffaufschluss bestimmte Elemente	93
Tab. 16	Gehalte in den LCD-Panels von TV-, PC- und Notebookgeräten inkl. 95 %-Konfidenzintervall	35	Tab. 33	Im offenen Königswasseraufschluss bestimmte Elemente	94
Tab. 17	Gehalte im Unterkorn inkl. 95 %-Konfidenzintervall	36	Tab. 34	Prüfobjekte	101
Tab. 18	Gehalte im Staub inkl. 95 %-Konfidenzintervall	37	Tab. 35	Prüfobjekte	105
Tab. 19	Gehalte in Cu-Kabeln inkl. 95 %-Konfidenzintervall	38			

Tab. 36		Tab. 51	
Vergleich der FS EMPA/Bachema	109	Schätzung der Gehalte in hoch- und minderwertigen Leiterplatten	148
Vergleich der FS EMPA/Bachema	110	Tab. 52	
Vergleich der FS EMPA/Bachema	111	Metalle, Antimon und Phosphor (Resultate EMPA)	148
Vergleich der FS EMPA/Bachema	112	Metalle, Antimon und Phosphor (Resultate EMPA)	149
Vergleich der FS EMPA/Bachema	113	Tab. 53	
Tab. 37		Chlor und Brom (Resultate EMPA)	149
Vergleich der PCB EMPA/Bachema	114	Tab. 54	
Tab. 38		Flammschutzmittel (Resultate EMPA)	150
Vergleich der Anorganika EMPA/Bachema	116	Flammschutzmittel (Resultate EMPA)	151
Tab. 39		Tab. 55	
Nicht oder nur teilweise analysierte Fraktionen (Literaturwerte)	124	PCB (Resultate EMPA)	152
Nicht oder nur teilweise analysierte Fraktionen (Literaturwerte)	125	Tab. 56	
Tab. 40		Konzentrationen im EEKG-Schrott der Schweiz 2011	157
Kleinversuch Batteriemix Immark	126	Tab. 57	
Tab. 42		Gegenüberstellung der Konzentrationen im Schweizer EE-Schrott 2003 und 2011	158
Hg-Konzentration in CCFL-Röhren aus LCD-TV-Geräten	128		
Tab. 43			
Hg-Konzentration in CCFL-Röhren aus LCD-PC-Monitoren	129		
Tab. 44			
Hg-Konzentration in CCFL-Röhren aus Notebook-Geräten	130		
Tab. 46			
Liste der aussortierten Fraktionen	135		
Tab. 49			
Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate EMPA)	142		
Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate EMPA)	143		
Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate EMPA)	144		
Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate EMPA)	145		
Flammschutzmittel-Konzentrationen der untersuchten Outputs (Resultate EMPA)	146		
Tab. 50			
Nachweisgrenze Flammschutzmittel (EMPA)	147		