

# > Flussi di sostanze nei rottami elettronici svizzeri

*Metalli, non metalli, sostanze ignifughe e bifenili policlorurati  
nei piccoli apparecchi elettrici ed elettronici*

*Riassunto della pubblicazione «Stoffflüsse im Schweizer Elektroniksrott»  
[www.bafu.admin.ch/uz-1717-d](http://www.bafu.admin.ch/uz-1717-d)*

## > Riassunto

### Situazione iniziale e obiettivi

La composizione dei rottami di piccoli apparecchi elettrici ed elettronici in Svizzera è stata determinata per la prima volta nel 2003. Da allora la composizione degli apparecchi è fortemente mutata e per determinate sostanze ignifughe sono entrati in vigore nuovi divieti e restrizioni, segnatamente nell'ordinanza sulla riduzione dei rischi inerenti ai prodotti chimici (ORRPChim, RS 814.81). La presente indagine, realizzata nel 2011, ha determinato le concentrazioni e i flussi di sostanze attuali di varie sostanze contenute nei piccoli apparecchi elettrici ed elettronici in Svizzera ed evidenziato le variazioni rispetto al 2003. Sono state analizzate le seguenti sostanze chimiche:

**Tab. 1 > Sostanze analizzate**

Metalli e antimonio	Non metalli	Composti organici
Al, Sb, Pb, Cd, Cr, Fe, Cu, Ni, Hg, Zn, Sn	Br, Cl, P	Bifenili policlorurati: PCB 28, 52, 101, 118, 123, 126, 138, 153, 156, 157, 167, 180, 189 e PCB totali  Sostanze ignifughe: PBDE (BDE 28, 47, 99, 100, 153, 154, 183, 197, 206, 207, 208, 209) e i derivati PentaBDE, OctaBDE e DecaBDE; HBCDD, TBBPA, DecaBB, TBP, DBE-DBCH, PBT, PBEB, HBB, Mirex, EH-TBB, BTBPE, BEH-TEBP, DDC-CO, DBDPE, TTBP-TAZ

### Procedura

L'indagine ha potuto essere realizzata come nel 2003 nell'impianto della Immark AG di Regensdorf. A tal fine, nel marzo 2011 nell'impianto sono state trattate circa 220 tonnellate di rottami elettrici ed elettronici con una composizione rappresentativa delle varie categorie di apparecchi. Durante due giorni sono stati prelevati campioni da tutti i flussi di massa in uscita dall'impianto (output) in base a un piano di campionamento prestabilito e riuniti sul posto per formare campioni misti. I campioni sono stati analizzati dallo stesso laboratorio che aveva svolto le analisi in occasione della prima indagine. Per controllare la qualità e raggiungere limiti di quantificazione più bassi per varie sostanze ignifughe, alcuni campioni sono stati analizzati anche dall'EMPA.

Per determinare i flussi di sostanze, le concentrazioni rilevate mediante analisi di campioni misti dei vari output sono state moltiplicate per i flussi di massa degli output. Le concentrazioni nei rottami elettrici ed elettronici (input) sono state calcolate in base alla concentrazione delle sostanze nei flussi di massa degli output. È così stato possibile definire anche i coefficienti di trasferimento dall'input ai singoli output. Per determinare i flussi annui di sostanze, i risultati della sperimentazione sono stati estrapolati per la totalità dei rottami elettrici ed elettronici prodotti annualmente sul territorio svizzero, pari a 70 000 tonnellate l'anno.

**Risultati e conclusioni**

Per determinare la composizione dei rottami elettrici ed elettronici è fondamentale disporre di una miscela rappresentativa delle categorie di apparecchi smaltiti nella media annuale. Mediante i dati di SWICO, di SENS e dell'EMPA è stato possibile stabilire il seguente mix di apparecchi:

- > piccoli apparecchi domestici (SENS+SWICO): 25 %
- > elettronica d'intrattenimento (SWICO): 36 %
- > tecnica delle comunicazioni (SWICO): 3 %
- > informatica e buroatica (SWICO): 36 %

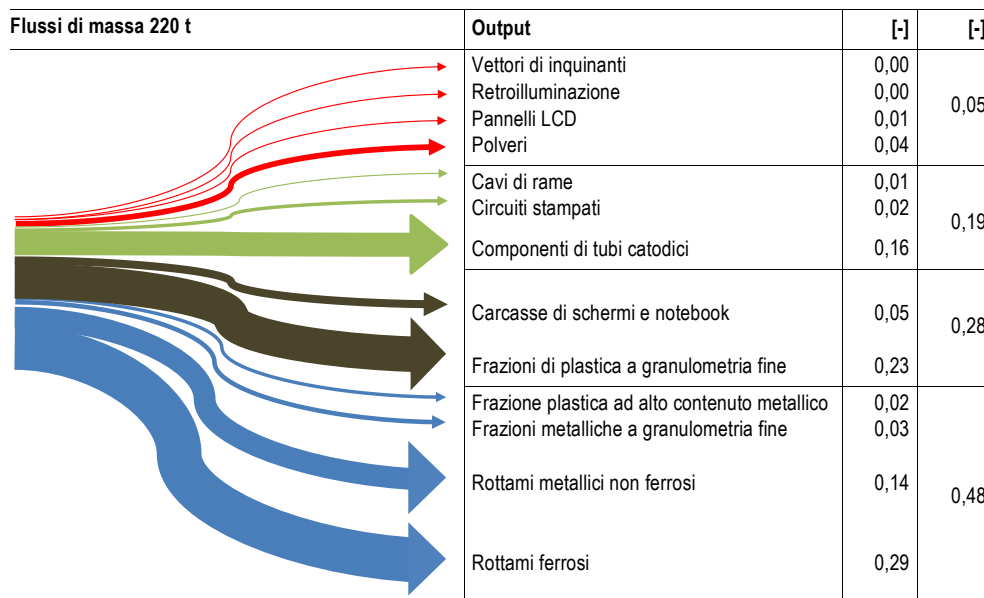
Il mix dell'input impiegato nella sperimentazione rispecchia molto bene la composizione degli apparecchi stabilita da SENS e SWICO: piccoli apparecchi domestici (+3,4 %), elettronica d'intrattenimento (-18 %), comunicazioni ( $\pm 0$  %), informatica e buroatica (+4,8 %).

La distribuzione in massa dell'output corrisponde a grandi linee alla seguente distribuzione: metalli 50 per cento, materie plastiche 30 per cento, trattamento separato 20 per cento. A produrre il maggior flusso di massa sono i rottami ferrosi, seguiti dalle frazioni di plastica a granulometria fine. Il 16 per cento dei rottami elettrici ed elettronici proviene da vecchi componenti di tubi catodici. Questa quota è destinata a scomparire progressivamente in seguito alla conversione del mercato verso gli schermi piatti. Sommate, le frazioni di rottami metallici non ferrosi, metallo a granulometria fine e plastica ad alto contenuto metallico, importanti per il recupero dell'alluminio (Al), del rame (Cu) e di altri metalli pregiati, rappresentano quasi il 20 per cento della massa. La figura 1 mostra la distribuzione secondo le frazioni aggregate dell'output.

Materiale in entrata (input)

Flussi di materiale e di sostanze

**Fig. 1 > Distribuzione dei rottami elettrici ed elettronici nelle frazioni aggregate dell'output**



Considerata la scelta accurata del mix dell'input e il campionamento rappresentativo dell'output è presumibile che i risultati delle analisi rispecchino il tenore effettivo delle sostanze nei rottami elettrici ed elettronici svizzeri.

I tre metalli più frequenti nei rottami elettrici ed elettronici svizzeri sono il ferro (Fe, 35 % in peso), l'alluminio (Al, circa 6 % in peso) e il rame (Cu, circa 5 % in peso). La percentuale di tutti gli altri metalli non supera l'1 per cento in peso. Il tenore dei singoli non metalli analizzati fosforo (P), cloro (Cl) e bromo (Br) si attesta attorno all'1 per mille dell'input totale. A causa della grande dispersione dei risultati misurati, l'intervallo d'incertezza per il P è elevato (oltre il 90 %). Le sostanze ignifughe alogenate riscontrate con maggior frequenza sono il tetrabromobisfenolo A (TBBPA), il decabromodifenil etero (DecaBDE), il decabromodifeniletano (DBDPE), l'1,2-bis(2,4,6-tribromofenossi)etano (BTBPE) e l'octabromodifenil etero (OctaBDE). Queste cinque sostanze presentano un tenore >100 milligrammi per chilogrammo. Le incertezze del 30 per cento circa rispecchiano la distribuzione eterogenea nelle frazioni. Il tenore di PCB nei rottami elettrici ed elettronici è pari a 2 milligrammi per chilogrammo ( $\pm 1$  mg/kg). La fonte principale di PCB nei rottami elettrici ed elettronici sono i condensatori negli apparecchi elettrici.

La tab. 2 riporta la concentrazione delle sostanze rilevata nei rottami di piccoli apparecchi elettrici ed elettronici in Svizzera nel 2011.

**Tab. 2 > Concentrazione delle sostanze analizzate nei rottami di piccoli apparecchi elettrici ed elettronici in Svizzera nel 2011**

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

\*Spesso inferiore al limite di quantificazione

<sup>#</sup> Secondo l'ordinanza sui siti contaminati (OSiti), i PCB totali sono calcolati moltiplicando la somma dei sei congeneri PCB 28, 52, 101, 138, 153 e 180 per il fattore 4,3.

Composizione dei rottami elettrici ed elettronici

I coefficienti di trasferimento indicano quali quote delle singole sostanze sono trasferite in quali frazioni dell'output durante il trattamento.

Coefficienti di trasferimento

Per le singoli sostanze si riscontrano schemi di distribuzione tipici (cfr. tab. 3):

**Tab. 3 > Schemi di distribuzione delle singole sostanze**

Gruppo	Sostanza	Frazione
Metalli e antimonio	Al, Zn, Cu	1. Rottami metallici non ferrosi, 2. Frazione metallica a granulometria fine
	Cr, Ni	1. Rottami metallici non ferrosi, 2. Rottami ferrosi
	Fe	Rottami ferrosi
	Sn	1. Frazione metallica a granulometria fine, 2. Circuiti stampati
	Sb	1. Componenti di schermi, 2. Frazione di plastica a granulometria fine
	Pb	Distribuzione dispersa
	Cd	1. Frazione di plastica a granulometria fine, 2. Vettori di inquinanti
Non metalli	Hg	1. Retroilluminazione, 2. Vettori di inquinanti, 3. Polveri
	P	1. Carcasce di schermi e notebook, 2. Frazione di plastica a granulometria fine
	Cl	1. Cavi di rame, 2. Frazione di plastica a granulometria fine, 3. Rottami metallici non ferrosi
Sostanze ignifughe	Br	1. Frazione di plastica a granulometria fine, 2. Circuiti stampati
	Tutti tranne il PentaBDE	1. Frazione di plastica a granulometria fine, 2. Carcasce di schermi e notebook
PCB	PentaBDE	1. Polveri, 2. Frazione di plastica a granulometria fine
	Tutti tranne i PCB 28	1. Polveri, 2. Vettori di inquinanti, 3. Frazione di plastica a granulometria fine
	PCB 28	1. Polveri, 2. Frazione di plastica a granulometria fine

A livello quantitativo, i tre elementi più importanti tra quelli analizzati nei rottami elettrici ed elettronici sono il ferro (Fe, 24000 t/a), l'alluminio (Al, 4300 t/a) e il rame (Cu, 3300 t/a). Il carico dei metalli pesanti cadmio (Cd) e mercurio (Hg) si attesta rispettivamente a circa 1 tonnellata e a 100 chilogrammi. Per le sostanze ignifughe alogenate, il flusso di massa più elevato è rappresentato dal TBBPA con oltre 40 tonnellate l'anno, seguito dal DecaBDE e dal DBDPE con circa 25 tonnellate l'anno ciascuno. Il carico di PCB è pari a circa 140 chilogrammi l'anno. A causa della distribuzione molto eterogenea dei PCB nei componenti di apparecchi e dei bassi valori misurati, questo valore è tuttavia soggetto a un'incertezza relativamente grande ( $\pm 33\%$ , cfr. tab. 4).

Carichi provenienti dai rottami elettrici ed elettronici

**Tab. 4 > Carico annuo di singole sostanze per la Svizzera e relativa incertezza**

Sostanza	Valore medio e incertezza [t/a]		Sostanza	Valore medio e incertezza [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			
PCB totali <sup>#</sup>	0,14	± 0,046			

\*Spesso inferiore al limite di quantificazione

<sup>#</sup> Secondo l'ordinanza sui siti contaminati (OSiti), i PCB totali sono calcolati moltiplicando la somma dei sei congeneri PCB 28, 52, 101, 138, 153 e 180 per il fattore 4,3.

Determinati elementi e composti si ritrovano in singole frazioni dell'output in misura particolarmente alta. È quanto emerge dalla tab. 5. Per alcune sostanze ignifughe e i PCB, la quota della frazione dell'output indicata non è significativamente diversa dalla quota della frazione successiva in ordine d'importanza a causa dei grandi intervalli d'incertezza.

Quote in singole frazioni dell'output

**Tab. 5 > Quota nelle singole frazioni dell'output**

Gruppo	Sostanza	Frazione	Quota	Significatività
Metalli	Cd	Frazione di plastica a granulometria fine	55 %	Sì
		Vettori di inquinanti	30 %	Sì
	Hg	Retroilluminazione	60 %	Sì
		Vettori di inquinanti	20 %	Sì
Sostanze ignifughe	DecaBDE	Tutte le carcasse (CRT+LCD)	40 %	Sì
	OctaBDE	Tutte le carcasse (CRT+LCD)	40 %	No
	TBBPA	Tutte le carcasse (CRT+LCD)	30 %	Sì
	HBCDD	Carcasse CRT	30 %	No
	BTBPE	Carcasse CRT	40 %	Sì
	DDC-CO	Carcasse CRT	40 %	No
	TTBP-TAZ	Carcasse LCD + notebook	45 %	No
PCB	PCB totali <sup>#</sup>	Polveri	38 %	No

<sup>#</sup> Secondo l'ordinanza sui siti contaminati (OSiti), i PCB totali sono calcolati moltiplicando la somma dei sei congeneri PCB 28, 52, 101, 138, 153 e 180 per il fattore 4,3.

Evoluzione dal 2003

Le variazioni delle concentrazioni determinate nei rottami elettrici ed elettronici tra le due indagini del 2003 e del 2011 attestano l'efficacia delle restrizioni e dei divieti per il cadmio, gli inquinanti organici persistenti (POP) come i difenileteri polibromati nonché i PCB. D'altro canto appare chiaro che il progresso tecnico nell'industria elettronica e le variazioni nel mix di apparecchi, come ad esempio l'introduzione di schermi piatti a cristalli liquidi (schermi LCD) con tubi fluorescenti a catodo freddo (tubi CCFL) in sostituzione degli schermi a tubo a raggi catodici (schermi CRT), possono mutare il tenore di determinate sostanze nei rottami elettrici ed elettronici. Di conseguenza, tra il 2003 e il 2011 nei rottami elettrici ed elettronici la concentrazione di mercurio, impiegato come agente luminoso nei tubi CCFL, è aumentata. Per una parte delle sostanze analizzate sono state rilevate variazioni non significative della concentrazione (cfr. tab. 6).

A segnare le maggiori variazioni nei rottami elettrici ed elettronici sono le sostanze inquinanti. La diminuzione della concentrazione di PentaBDE, di OctaBDE e dei PCB, oggi vietati, supera in parte il 90 per cento. Le variazioni sono tutte significative. Anche per i metalli le maggiori variazioni sono state rilevate per le sostanze inquinanti. Il tenore di cadmio (Cd) è diminuito di oltre il 90 per cento, mentre quello di mercurio (Hg) è aumentato di oltre il 120 per cento. Siccome i tubi CCFL sono smontati, suddivisi e smaltiti separatamente a mano, questo aumento della concentrazione di mercurio non provoca maggiori emissioni. Altre variazioni significative della concentrazione sono state registrate per il nichel (Ni), il cromo (Cr), l'antimonio (Sb) e lo stagno (Sn), che sono diminuiti, e per lo zinco (Zn) e il rame (Cu), che sono invece aumentati. Mentre i tenori di cloro (Cl) e bromo (Br) hanno segnato una flessione significativa, il forte incremento per il fosforo (P) non è significativo, considerati i grandi intervalli d'incertezza dei valori misurati.

**Tab. 6 > Variazione della concentrazione dal 2003**

Sostanza	Variazione		Significatività	Sostanza	Variazione		Significatività
	[mg/kg]	[%]			[mg/kg]	[%]	
PentaBDE	-32	-93 %	Oui	Al	+13 000	+27 %	No
OctaBDE	-408	-77 %	Oui	Sb	-700	-41 %	Si
DecaBDE (BDE 209)	-120	-24 %	Oui	Pb	+100	+3 %	No
HBCDD	-3	-18 %	Non	Cd	-165	-92 %	Si
TBBPA	-770	-55 %	Oui	Cr	-5 400	-55 %	Si
PCB totali <sup>#</sup>	-11	-85 %	Oui	Fe	-10 000	-3 %	No
				Cu	+8 000	+20 %	Si
				Ni	-6 700	-65 %	Si
				Hg	+1	+121 %	Si
				Zn	+2 800	+55 %	Si
				Sn	-400	-17 %	Si
				Br	-1 000	-18 %	Si
				Cl	-2 700	-28 %	Si
				P	170	47 %	No

<sup>#</sup> Secondo l'ordinanza sui siti contaminati (OSiti), i PCB totali sono calcolati moltiplicando la somma dei sei congeneri PCB 28, 52, 101, 138, 153 e 180 per il fattore 4,3.

In Svizzera, ogni anno sono prodotte circa 24 000 tonnellate di Fe, 4300 tonnellate di Al e 3300 tonnellate di Cu provenienti dai rottami elettrici ed elettronici. In base alla quantità totale di rottami ferrosi, pari a circa 1,2 milioni di tonnellate l'anno, ciò equivale al 2 per cento circa. La quantità annua di rottami di Al è stimata a grandi linee a circa 140 000 tonnellate. La quota proveniente dai rottami elettrici ed elettronici è quindi del 3 per cento. Per il Cu ogni anno sono prodotte complessivamente 38 000 tonnellate, la quota proveniente dai rottami elettrici ed elettronici sfiora il 10 per cento.

Potenziale per le risorse

Il riciclaggio di questi metalli consente di risparmiare una notevole quantità di energia. L'uso di materiale riciclato invece dei minerali metalliferi permette di risparmiare il 95 per cento dell'energia primaria per l'Al, il 90 per cento per il Cu e il 70 per cento per l'acciaio.

Il netto calo del tenore medio di sostanze inquinanti nei rottami elettrici ed elettronici dal 2003 mostra che in pochi anni le disposizioni normative e le restrizioni nonché il progresso tecnico possono favorire una netta variazione della situazione delle sostanze inquinanti. Ciò vale in particolare per il PentaBDE, l'OctaBDE e i PCB.

Situazione delle sostanze inquinanti

Sul fronte dei carichi si è evidenziato un aumento delle quantità del 40 per cento circa dal 2003. Sostanze come l'HBCDD o il DecaBDE, che oggi presentano una concentrazione inferiore, registrano un aumento del carico rispetto al 2003 o sono rimaste stabili.

#### **Interrogativi in sospeso e dati mancanti**

Per alcune frazioni è stato necessario procedere a stime per mancanza di analisi (circuiti stampati ad alto e basso valore). Per altre frazioni, come le pile o i condensatori, la rappresentatività statistica è limitata poiché le quantità dei campioni erano esigue. Un maggior numero di campioni avrebbe però fatto esplodere il limite finanziario del progetto.

Un altro problema è costituito dai limiti di quantificazione dei metodi di analisi per misurare le «nuove» sostanze ignifughe e i PCB. Spesso i tenori nei campioni erano inferiori al limite di quantificazione. In questi casi i calcoli sono stati effettuati con un limite di quantificazione dimezzato. Di conseguenza alcuni tenori sono probabilmente sopravvalutati (p. es. i PCB nelle frazioni di plastica).