

**SCHRIFTENREIHE  
UMWELT NR. 338**

**Umweltgefährdende  
Stoffe**

**Ausgewählte  
polybromierte  
Flammschutzmittel**

**PBDEs und TBBPA**

**Stoffflussanalyse**

**Autoren**

Morf Leo, Geo Partner, Zürich

Smutny Roman, RMA, Wien

Taverna Ruedi, Geo Partner, Zürich

Daxbeck Hans, RMA, Wien

Avec résumé en français

Con riassunto in italiano

With summary in English

**Herausgegeben vom Bundesamt  
für Umwelt, Wald und Landschaft  
(BUWAL)  
Bern, 2002**

## **Herausgeber**

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft  
BUWAL

## **Autoren**

Leo Morf, Ruedi Taverna                      GEO Partner AG (GEO), Zürich  
Hans Daxbeck, Roman Smutny            Ressourcen Management Agentur (RMA), Wien

## **Fotos Titelblatt**

Great Lakes Chemical Corporation, Manchester

## **Bezug**

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft  
Dokumentation  
3003 Bern  
Fax + 41 (0) 31 324 02 16  
E-Mail: [docu@buwal.admin.ch](mailto:docu@buwal.admin.ch)  
Internet: [www.buwalshop.ch](http://www.buwalshop.ch)

## **Bestellnummer**

SRU-338-D

## **Preis**

CHF 22.-- (inkl. MWSt)

© BUWAL 2002

# Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	3
Abkürzungen.....	7
Abstracts.....	9
Vorwort .....	11
Zusammenfassung.....	13
Résumé .....	20
Riassunto.....	27
Summary .....	34
1 Ausgangslage in der OECD .....	41
2 Zielsetzung und Fragestellungen.....	43
3 Grundlagen .....	45
3.1 Brom .....	45
3.2 Flammschutzmittel (FS) .....	45
3.2.1 Wirkungsweise von Flammschutzmitteln.....	45
3.2.2 Einsatzgebiete von Flammschutzmitteln .....	46
3.2.3 Gehalte an Flammschutzmitteln .....	46
3.2.4 Verwendete Flammschutzmittelsubstanzen .....	46
3.3 Bromierte Flammschutzmittel (BFS).....	47
3.3.1 Wirkungsweise von bromierten Flammschutzmitteln .....	47
3.3.2 Eigenschaften der untersuchten bromierten Flammschutzmittel.....	47
3.3.3 Verbrauch an bromierten Flammschutzmitteln .....	48
3.3.4 Einsatz der untersuchten bromierten Flammschutzmittel .....	49
3.3.4.1 PentaBDPE .....	49
3.3.4.2 OctaBDPE.....	50
3.3.4.3 DecaBDPE .....	50
3.3.4.4 TBBPA .....	51
3.4 Umweltrelevanz der untersuchten Flammschutzmittel.....	51
4 Methodisches Vorgehen.....	55
4.1 Verwendete Methode .....	55
4.2 Systemanalyse.....	55
4.2.1 Systemgrenzen.....	55
4.2.2 Definition der Prozesse und Güter .....	56
4.2.3 Untersuchte Stoffe .....	65

4.3	Verwendete Daten .....	66
5	Anwendungsbereiche und Vorkommen.....	67
5.1	Verkehr mit Produkten .....	67
5.1.1	Einteilung der Produkte .....	68
5.1.2	Probleme bei der Bestimmung der FS-frachten in Produkten .....	69
5.1.3	Elektro- und Elektronikprodukte (EE-Produkte).....	70
5.1.3.1	Leiterplatten.....	72
5.1.3.2	Gehäuse.....	75
5.1.3.3	Kleinbauteile aus Kunststoff in EE-Geräten .....	78
5.1.4	Verkehrsmittel.....	78
5.1.4.1	Strassenfahrzeuge.....	78
5.1.4.2	Schienefahrzeuge.....	79
5.1.4.3	Flugzeuge.....	80
5.1.5	Baumaterialien und Textilien.....	80
5.1.5.1	PUR-, EPS-, XPS- und PE-Dämmschäume.....	81
5.1.5.2	Kunststofffolien .....	82
5.1.5.3	Epoxidharze und Polycarbonate im Bausektor.....	83
5.1.5.4	Textilien .....	84
5.1.6	Prozess „Produktion, Handel und Konsum“ .....	84
5.1.6.1	Bandbreiten der Daten.....	84
5.1.6.2	Prozess „Produktion“ .....	85
5.1.6.3	Prozess „Handel“ .....	87
5.1.6.4	Prozess „Konsum“ .....	88
5.2	Teilsystem „Abfallwirtschaft“ .....	93
5.2.1	Abfallsammlungen.....	93
5.2.2	Wiederaufbereitung .....	97
5.2.3	Abwasserreinigungsanlage (ARA) .....	99
5.2.4	Kehrichtverbrennungsanlage (KVA).....	101
5.2.5	Deponie.....	104
5.2.6	Teilsystem Umwelt .....	105
5.2.7	Atmosphäre .....	106
5.2.8	Hydrosphäre.....	107
5.2.9	Pedo- bzw. Lithosphäre.....	109
5.2.10	Biota.....	111
6	Resultate .....	113

---

6.1	Datenqualität.....	113
6.1.1	Datenlücken und Unsicherheiten im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“...113	113
6.1.2	Datenlücken und Unsicherheiten im Teilsystem „Abfallwirtschaft“.....	117
6.1.3	Datenlücken und Unsicherheiten im Teilsystem „Umwelt“.....	120
6.2	Stoffflüsse in den Teilsystemen.....	123
6.2.1	Teilsystem „Verkehr mit Produkten“.....	123
6.2.1.1	PentaBDPE (Pentabromdiphenyl Ether).....	123
6.2.1.2	OctaBDPE (Octabromdiphenyl Ether).....	125
6.2.1.3	DecaBDPE (Decabromdiphenyl Ether).....	128
6.2.1.4	TBBPA (Tetrabrombisphenol A).....	130
6.2.2	Teilsystem „Abfallwirtschaft“.....	132
6.2.2.1	PentaBDPE (Pentabromdiphenyl Ether).....	132
6.2.2.2	OctaBDPE (Octabromdiphenyl Ether).....	134
6.2.2.3	DecaBDPE (Decabromdiphenyl Ether).....	135
6.2.2.4	TBBPA (Tetrabrombisphenol A).....	137
6.2.3	Teilsystem Umwelt.....	138
6.2.3.1	PentaBDPE (Pentabromdiphenyl Ether).....	139
6.2.3.2	OctaBDPE (Octabromdiphenyl Ether).....	140
6.2.3.3	DecaBDPE (Decabromdiphenyl Ether).....	141
6.2.3.4	TBBPA (Tetrabrombisphenol A).....	142
6.3	Stoffflüsse im Gesamtsystem.....	143
6.3.1	PentaBDPE (Pentabromdiphenyl Ether) – Gesamtbilanz Schweiz.....	143
6.3.2	OctaBDPE (Octabromdiphenyl Ether) – Gesamtbilanz Schweiz.....	144
6.3.3	DecaBDPE (Decabromdiphenyl Ether) – Gesamtbilanz Schweiz.....	145
6.3.4	TBBPA (Tetrabrombisphenol A) – Gesamtbilanz Schweiz.....	147
7	Schlussfolgerungen.....	149
7.1	Einleitung.....	149
7.2	Metabolismus der untersuchten Flammschutzmittel in der Schweiz.....	149
7.3	Unsicherheit der Daten.....	151
7.4	Datenlücken, Handlungs- und Forschungsbedarf.....	151
8	Literatur.....	155
9	Anhang.....	165
9.1	Anhang 1 – Verkehr mit Produkten.....	165
9.1.1	Nationale und weltweite Vergleiche.....	165
9.1.1.1	Grundlagen.....	165

---

9.1.1.2	Kunststoffe.....	166
9.1.1.3	Flammschutzmittel.....	168
9.1.2	Kunststoffrezepturen.....	172
9.1.3	Elektro- und Elektronikgeräte (EE-Geräte).....	174
9.1.3.1	Marktanalysen von EE-Geräten.....	174
9.1.3.2	Leiterplatten.....	177
9.1.3.3	Aussengehäuse von EE-Geräten.....	177
9.1.4	Verkehrsmittel.....	180
9.1.5	Baumaterialien und Textilien.....	181
9.1.6	Zusammenfassung des Datenmaterials für Produkte.....	183
9.1.7	Frachten und Lager im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“.....	187
9.1.7.1	Prozess „Produktion“.....	187
9.1.7.2	Prozess „Handel“.....	189
9.1.7.3	Prozess „Konsum“.....	192
9.2	Anhang 2 – Abfallwirtschaft und Umwelt.....	199
9.2.1	Grundlagen und Annahmen.....	199
9.2.2	Flüsse im Teilsystem Abfall-/Abwasserwirtschaft.....	199
9.2.3	Flüsse im Teilsystem Umwelt.....	203
9.3	Anhang 3 – Stoffeigenschaften der untersuchten FS.....	206
9.3.1	PentaBDPE.....	207
9.3.2	OctaBDPE.....	208
9.3.3	DecaBDPE.....	209
9.3.4	TBBPA.....	210

# Abkürzungen

## Allgemein

SFA	Stoffflussanalyse
PHH	Privathaushalt
IG	Industrie und Gewerbe
VIC	voluntary industry commitment
UBA	Umweltbundesamt
UL	Underwriters Laboratory
APME	Associations of plastic manufacturers in Europe
BSEF	Bromine Science and Environmental Forum
PCDD+PCDF	Polychlorierte Dioxine und Furane
PBDD+PBDF	Polybromierte Dioxine und Furane
PXDD+PXDF	Halogenierte Dioxine und Furane
M%	Masseprozent

## Flammschutzmittel

FS	Flammschutzmittel
BFS	bromierte Flammschutzmittel
DecaBDPE <sup>1</sup>	Decabromdiphenylether
OctaBDPE <sup>1</sup>	Octabromdiphenylether
PentaBDPE <sup>1</sup>	Pentabromdiphenylether
PBDEs	Polybromierte Diphenylether: Gruppenbezeichnung für DecaBDPE, OctaBDPE und PentaBDPE
TBBPA	Tetrabrombisphenol A
HBCD	Hexabromcyclododecan

## Güter, Geräte und Geräteteile

EE	Elektro- und Elektronik (-geräte)
LP	Leiterplatten
FR4	Glasfaserverstärkte Epoxidharz Lamine auf Leiterplatten
FR2	Papierverstärkte phenolische Lamine auf Leiterplatten
PR	Prepegs

## Prozesse im System

ARA	Abwasserreinigungsanlage
KVA	Kehrichtverbrennungsanlagen

## Kunststoffe

ABS	Acrylonitril butadien Styrol
PE	Polyethylen
LDPE	Low Density Polyethylen
HDPE	High Density Polyethylen

---

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

PP	Polypropylen
PVC	Polyvinylchlorid
PS	Polystyrol
PA	Polyamid
PC	Polycarbonat
HIPS	High-impact Polystyrol
EPS	Expandierter Polystyrolschaum
XPS	Extrudierter Polystyrolschaum
PUR	Polyurethan (Montageschaum und Dämmschaum)
PC/ABS	Polymerblend aus Polycarbonat und Acrylonitril butadien Styrol
PPE/HIPS	Polymerblend aus Polyphenylenether und High-impact Polystyrol
UP	ungesättigter Polyester

## Abstracts

Bromierte Flammschutzmittel (BFS) sind Kunststoffadditive, die vor allem in Elektro- und Elektronikgeräten und in Baustoffen eingesetzt werden. In den letzten Jahrzehnten hat sich der Verbrauch der vier untersuchten Flammschutzmittel (PentaBDPE, OctaBDPE, DecaBDPE, TBBPA) weltweit nahezu verdoppelt. Einige BFS haben typische Eigenschaften persistenter organischer Schadstoffe (POP; Persistent Organic Pollutants) und stehen im Verdacht kanzerogen und östrogen aktiv zu sein. Die vorliegende Studie über die Schweiz zeigt auf, über welche Güter die BFS importiert, exportiert, verbraucht und entsorgt werden. Weiter wird gezeigt, über welche Wege die BFS in die Umwelt gelangen. Grundlage sind vorhandene Literaturdaten und eigene Abschätzungen. Basierend auf den vier Stoffflussanalysen werden Datenlücken und ein zukünftiger Handlungs- und Forschungsbedarf dargestellt.

Les produits ignifuges bromés sont des additifs synthétiques employés surtout dans les appareils électriques et électroniques et dans les matériaux de construction. Durant les dernières décennies, la consommation mondiale des quatre produits ignifuges examinés (pentaBDPE, octaBDPE, décaBDPE et TBBPA) a quasiment doublé. Certains de ces produits présentent les caractéristiques typiques des polluants organiques persistants (POP) et sont suspectés de posséder des effets cancérogènes et œstrogènes. La présente étude sur la Suisse dresse un bilan des produits dans lesquels ces substances sont importées, exportées, consommées et éliminées. Elle montre en outre par quelles voies les produits ignifuges bromés atteignent l'environnement. Elle repose sur des données issues de la littérature et sur ses propres évaluations. En se basant sur les quatre analyses de flux des matières, elle présente les données qui devront être complétées à l'avenir, les mesures qui s'imposent et les recherches nécessaires.

I prodotti ignifughi bromati (PIB) sono additivi sintetici utilizzati essenzialmente in apparecchi elettrici e elettronici e in materiali da costruzione. Negli ultimi decenni il consumo dei quattro prodotti ignifughi bromati esaminati (penta-, octa-, decaBDPE, TBBPA) è quasi raddoppiato a livello mondiale. Alcuni PIB hanno le caratteristiche tipiche degli inquinanti organici persistenti (POP; Persistent Organic Pollutants) e si teme che siano cancerogeni ed estrogeni. Il presente studio condotto in Svizzera indica tramite quali merci i PIB sono importati, esportati, consumati e smaltiti. Inoltre mostra con quali canali i PIB giungono nell'ambiente. Lo studio poggia sui dati della letteratura scientifica e su proprie stime. Sulla base delle quattro analisi del flusso di sostanze vengono evidenziati le carenze di dati e i settori nei quali agire e proseguire con la ricerca in futuro.

Brominated flame retardants (BFRs) are synthetic additives, which are used above all in electrical and electronic appliances, and in construction materials. Over recent decades, global consumption of the four flame retardants that are examined here (penta-, octa- and decaBDPEs, and TBBPAs) has almost doubled. The properties of some BFRs are typical of persistent organic pollutants (POPs), and these substances are suspected of being carcinogenic and of having oestrogenic activity. The present study, carried out in Switzerland, shows via which goods BFRs are imported, exported, used and disposed of, and the ways in which BFRs get into the environment. The study is based on data drawn from the literature, and on our own estimates. Flow chart analyses for the four groups of substances show where there are gaps in the data and where there is a need for future action and research.



## Vorwort

Einige bromierte Flammschutzmittel (BFS) gelten als persistente, schwer abbaubare Verbindungen, die sich in der Nahrungskette anreichern können (z.B. PentaBDPE, TBBPA). Sie können bei unkontrollierter Verbrennung zur Bildung von bromierten Dioxinen und Furanen führen und möglicherweise eine kanzerogene (z.B. DecaBDPE) und östrogene Wirkung (z.B. PentaBDPE) aufweisen.

Das BUWAL hat deshalb im Jahr 2001 beschlossen, die Situation in der Schweiz näher untersuchen und für vier bromierte Flammschutzmittel (PentaBDPE, OctaBDPE, DecaBDPE und TBBPA) eine Stoffflussanalyse erstellen zu lassen. Diese vier Verbindungen stellen zusammen rund zwei Drittel der Weltproduktion an bromierten Flammschutzmitteln.

Für die Erstellung der Stoffflussanalyse beauftragte das BUWAL die beiden Firmen GeoPartner, Zürich und RMA, Wien. Ihre Analyse, die sich allein auf Literaturangaben stützt, gibt den Stand in der Schweiz Ende der 90er Jahre wieder und zeigt, wie sich der Verbrauch der vier Stoffverbindungen in den letzten Jahren entwickelt hat.

Für die Risikoreduktion ist es wichtig, auf persistente und bioakkumulierende Stoffe nach Möglichkeit zu verzichten. Allein, es genügt in der heutigen Zeit weltumspannender Stoffströme nicht, wenn nur die Schweiz so handelt. Massnahmen müssen international, z.B. im Rahmen der OECD beschlossen und von vielen Staaten umgesetzt werden. Die vorliegende Stoffflussanalyse ist in diesem Sinne ein Beitrag zu diesem Ziel, weil er am Beispiel Schweiz die Bedeutung und Grössenordnung des Problems aufzeigt.

Es ist mir ein Anliegen, allen an diesem Bericht beteiligten Personen für ihr Engagement zu danken.

Georg Karlaganis  
Chef der Abteilung Stoffe, Boden, Biotechnologie



## Zusammenfassung

Bromierte Flammenschutzmittel (BFS) werden seit mehr als 15 Jahren kontrovers diskutiert. Heute weiss man mehr über Verhalten und Bedrohungspotenzial der bromierten Flammenschutzmittel für Mensch und Umwelt, als man beispielsweise seinerzeit über PCB beim Inkrafttreten von Anwendungs- und Produktionsverboten dieses Stoffes wusste. Das Bedrohungspotenzial einiger der untersuchten Flammenschutzmittel besteht vor allem darin, dass sie persistent sind und sich in der Nahrungskette anreichern können (z.B. PentaBDPE, TBBPA), dass es bei unkontrollierter Verbrennung zur Bildung von bromierten Dioxinen und Furanen kommen kann (z.B. DecaBDPE), und dass es Hinweise auf ein kanzerogenes Potenzial (z.B. DecaBDPE) und östrogene Wirkung (z.B. PentaBDPE) gibt.

Ziel dieser Studie ist die Erstellung einer Stoffflussanalyse für vier ausgewählte Vertreter bromierter Flammenschutzmittel: Pentabromdiphenylether [PentaBDPE], Octabromdiphenylether [OctaBDPE], Decabromdiphenylether [DecaBDPE] und Tetrabrombisphenol A [TBBPA].

Die Studie basiert ausschliesslich auf Literaturangaben und untersucht den Einsatz der BFS in der Schweiz Ende der 90er Jahre. Ausgehend vom Import von flammgeschützten Halb- und Fertigprodukten in die Schweiz, wurde deren anthropogenes Lager ermittelt. Zudem wurden die jährlichen Flüsse in den Export, in die Abfallwirtschaft und die Emissionen in die Umwelt bestimmt.

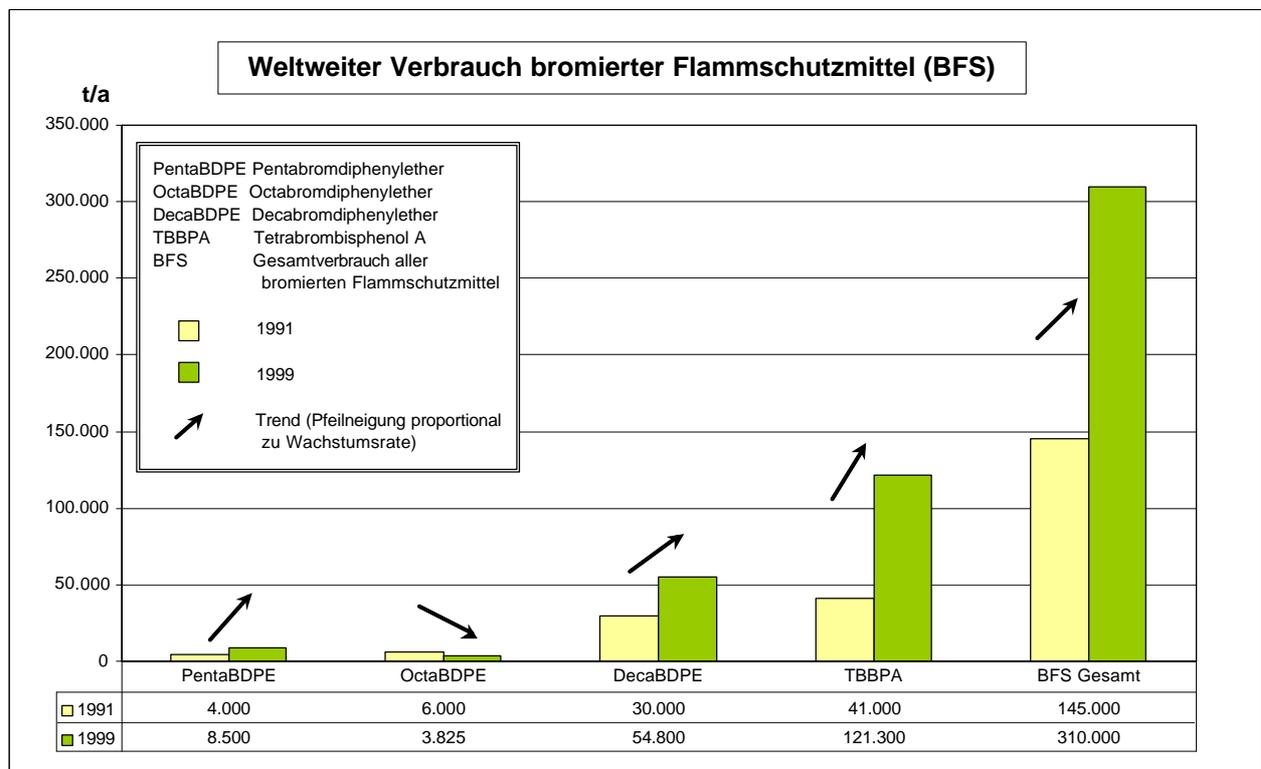


Abbildung 1: Vergleich weltweit verarbeiteter BFS-Mengen (Quellen: TBBPA 1991 [OECD, 1994], PBDEs 1991 [IPCS 1994b], TBBPA+PBDEs 1999 [Leisewitz & Schwarz, 2000], BFS Gesamt: Werte von 1990 und 2000 [Arias, 2001])

Rund zwei Drittel des Weltbedarfs an BFS wurde in den 90er Jahren durch die vier untersuchten Substanzen gedeckt. In den letzten Jahrzehnten ist der Bedarf durch den Anstieg des Kunststoffverbrauchs und durch strengere Brandschutzvorschriften stark gestiegen. Der weltweite Verbrauch der untersuchten BFS stieg in der Zeitspanne von 1991 bis 1999 von 100.000 t/a auf 190.000 t/a an, und es wird mit einem weiteren jährlichen Wachstum von 5 bis 7 % bis zum Jahr 2005 gerechnet. Im Detail betrachtet, nahm der Verbrauch von OctaBDPE in den 90er Jahren stark ab, jener von PentaBDPE, DecaBDPE und TBBPA stieg hingegen stark an (siehe Abbildung 1).

## Resultate

In Halb- und Fertigprodukten gelangen jährlich etwa 1'700 t der vier untersuchten BFS in die Schweiz. Etwa 46 % davon werden in Fertigprodukten wieder exportiert, der Rest wird in der Schweiz konsumiert (Verkehr mit Produkten). Haupteinträge in den Konsum der Schweiz sind für PentaBDPE: Kraftfahrzeuge (Polsterungen, Textilien), für OctaBDPE: Elektro- und Elektronikgeräte (EE-Geräte) und Kraftfahrzeuge, für DecaBDPE: EE-Geräte (EDV- und Bürogeräte), Kraftfahrzeuge und Baumaterialien (PE-Folien) und für TBBPA: EE-Geräte (Computer).

Durch den Konsum von flammgeschützten Produkten in den letzten 20 Jahren wurde in der Schweiz ein Lager von etwa 12'000 t der untersuchten BFS akkumuliert. Gegenwärtig werden die Lager von PentaBDPE und OctaBDPE abgebaut, jenes von TBBPA wächst und jenes von DecaBDPE ist nahezu im Fließgleichgewicht.

Etwa 900 t BFS verlassen jährlich das Lager im Konsum. Nahezu die gesamte Menge geht über die festen Abfälle in die Abfallwirtschaft. Dort werden die in den festen Abfällen befindlichen BFS schliesslich mit Ausnahme des PentaBDE (23 %) zum grössten Teil (65–85 %, je nach BFS) durch thermische Behandlung in kontrollierten Verbrennungsprozessen entsorgt und dabei praktisch vollständig zerstört. Neben dem Lager im Konsum wurde in den letzten Jahrzehnten ein zehnmal kleineres Lager von 1'500 t BFS in Schweizer Deponien aufgebaut. Dieses Lager wächst jährlich um etwa 130 t. Es stellt bei unsachgerechtem Management eine potentielle zukünftige Gefahr für Mensch und Umwelt dar. Die Schätzung der Flüsse sowohl aus dem Konsum als auch aus der Abfallwirtschaft in die Umwelt ist zur Zeit ohne aktuelle Messungen für die Schweiz nur sehr grob möglich.

## PentaBDPE

Im Vergleich zu den anderen Flammenschutzmitteln wurden Ende der 90er Jahre geringe Mengen von PentaBDPE flammgeschützten Produkten in der Schweiz eingesetzt. Jährlich werden etwa 1.9 t PentaBDPE in Fertigprodukten in die Schweiz importiert und davon etwa 1.5 t konsumiert. Der Grossteil der pentaBDPE-haltigen Konsumgüter sind Polsterungen, Textilien und Kunststoffe von Kraftfahrzeugen. Im Vergleich zu den anderen BFS sind Penta-BDPE-Frachten um das 10- bis 1'000-fache geringer.

Durch vielfältige Nutzung in den letzten beiden Jahrzehnten hat sich ein Lager von 500 t PentaBDPE im Konsum aufgebaut, welches zu 91 % aus pentaBDPE-haltigen Baumaterialien besteht. Gegenwärtig wird dieses Lager um rund 30 t/a abgebaut. Setzt sich dieser Trend in den nächsten Jahren fort, so wird in etwa 7 bis 10 Jahren das Lager in der Abfallwirtschaft mit rund 280 t das bedeutendste anthropogene Lager darstellen.

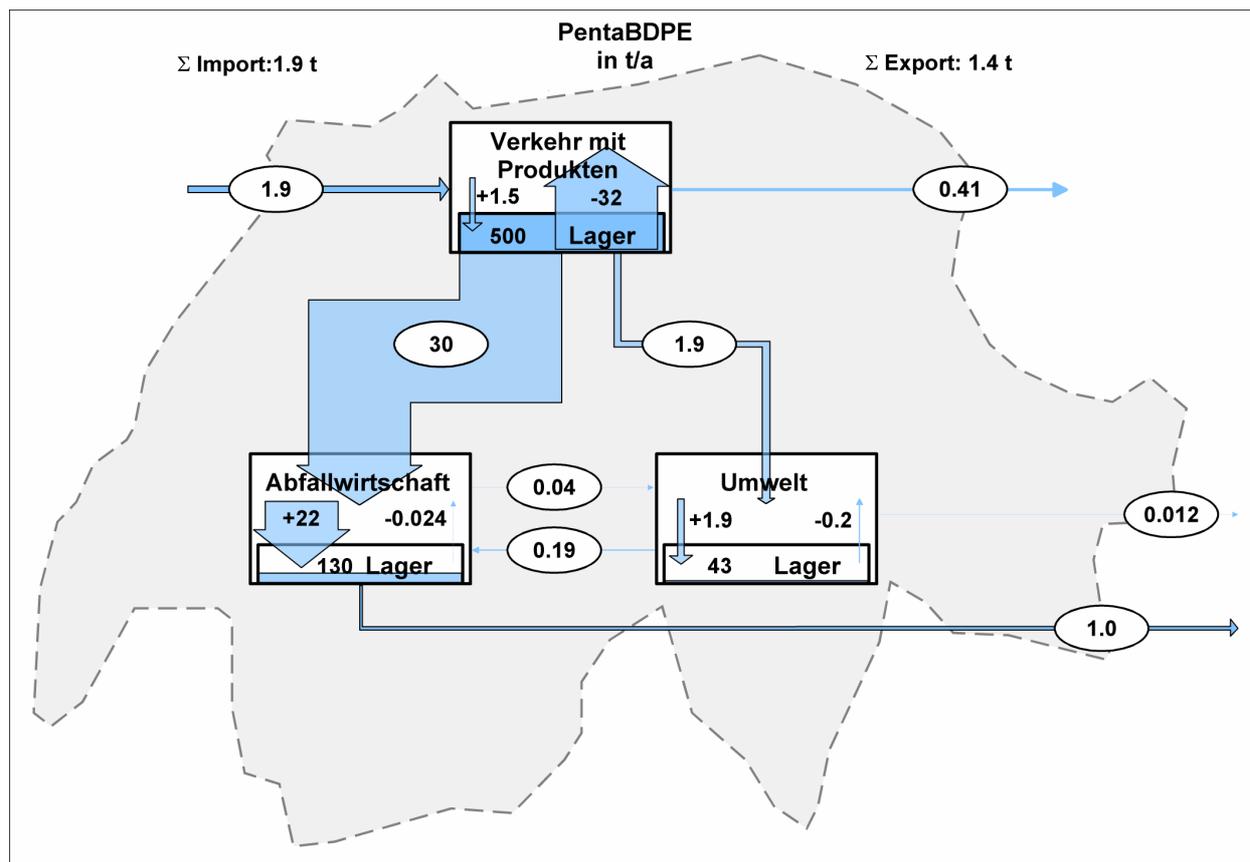


Abbildung 2: PentaBDPE-Flüsse in der Schweiz, Ende der 90er Jahre

In die Abfallwirtschaft gelangen derzeit jährlich rund 30 t/a PentaBDPE, wovon der überwiegende Teil (72 %) auf Deponien geht und rund 20 % in Verbrennungsanlagen zerstört wird. Ein kleiner Rest von 1 t/a (3 %) wird exportiert.

Aus dem Lager im Konsum diffundieren jährlich etwa 1.9 t/a, welche nahezu vollständig in die Peda-/Lithosphäre gelangt. In Bezug auf die jährlich diffundierte Fracht liegt PentaBDPE deutlich über OctaBDPE und TBBPA.

## OctaBDPE

Jährlich werden etwa 41 t OctaBDPE als Flammenschutzmittel in Produkten in die Schweiz importiert und davon etwa 22 t/a konsumiert, der Rest wird exportiert. Die konsumierte OctaBDPE-Fracht befindet sich zu etwa 67 % in EE-Geräten und zu etwa 33 % in Kraftfahrzeugen.

In den letzten beiden Jahrzehnten wurde ein Lager von 680 t OctaBDPE im Konsum aufgebaut, welches zu 69 % aus EE-Geräten, zu 21 % aus Kraftfahrzeugen und zu 10 % aus Baumaterialien besteht. Gegenwärtig wird dieses Lager um rund 40 t/a abgebaut. Setzt sich dieser Trend in den nächsten Jahren fort, so wird in etwa 13 bis 18 Jahren das Lager in der Abfallwirtschaft mit rund 160 t das bedeutendste anthropogene Lager darstellen.

Die Abfälle aus dem Konsum enthalten jährlich rund 62 t OctaBDPE, wovon fast die gesamte Fracht (87 %) in Verbrennungsanlagen zerstört wird und etwa 10 % auf Deponien abgelagert werden. Der Rest (ca. 3 %) wird exportiert.

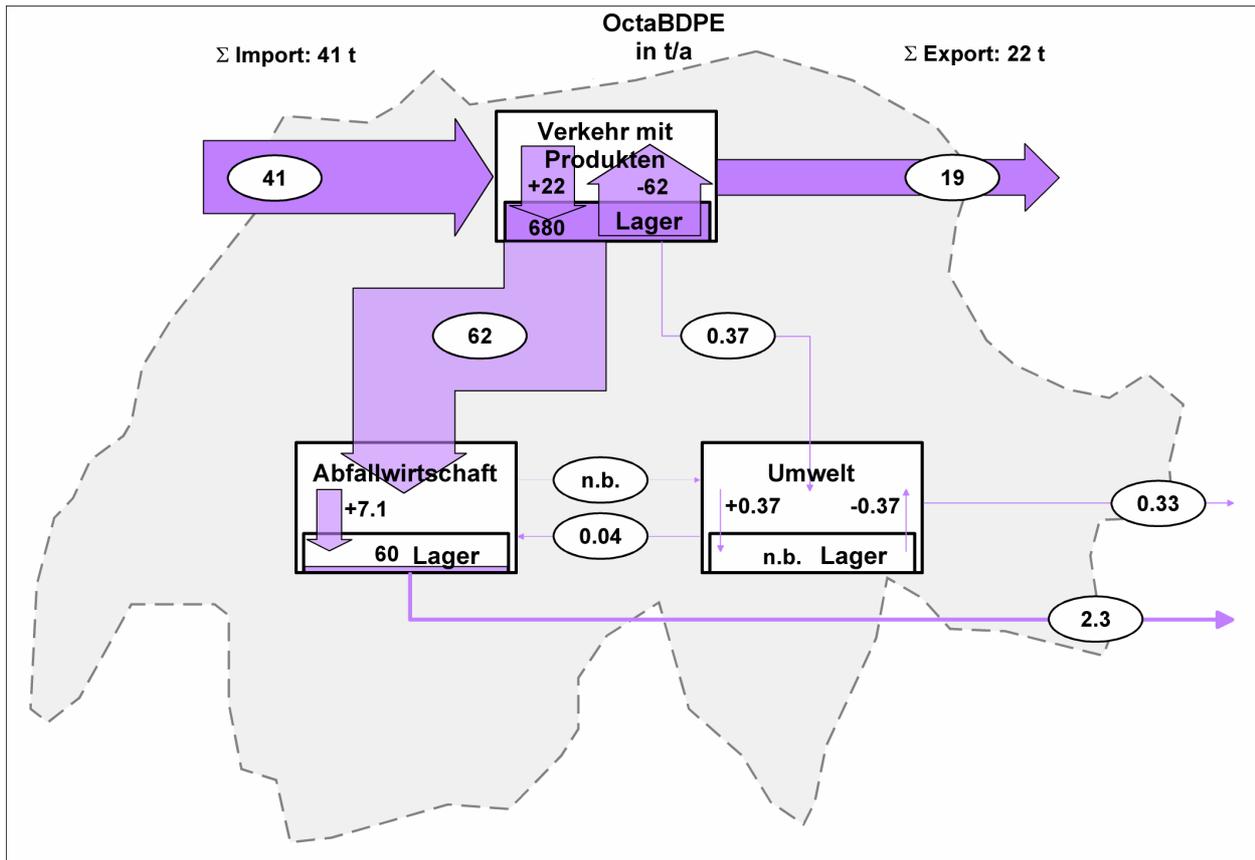


Abbildung 3: OctaBDPE-Flüsse in der Schweiz, Ende der 90er Jahre

Jährlich diffundiert rund 0.4 t Octa-BDPE aus dem Lager im Konsum und lagert sich nahezu vollumfänglich in der Pedo-/Lithosphäre ab.

### DecaBDPE

Ende der 90er Jahre wurden jährlich 550 t DecaBDPE-Flammschutz in Halb- und Fertigprodukten in die Schweiz importiert. Davon wurden etwa 320 t/a konsumiert und der Rest wieder exportiert. Etwa 45 % des in der Schweiz konsumierten Deca-BDPEs befindet sich in EE-Geräten (EDV- und Bürogeräte), rund 30 % steckt in den importierten Kraftfahrzeugen und etwa 25 % in Baumaterialien (PE-Folien).

Das Lager an DecaBDPE in konsumierten Produkten beträgt etwa 5'600 t und befindet sich ungefähr im Fließgleichgewicht. Das bedeutet, dass etwa dieselbe Deca-BDPE-Fracht, welche konsumiert wird, wieder durch Abfälle entsorgt wird. Die rund 370 t/a DecaBDPE in Abfällen werden zum überwiegenden Teil (rund 80 %) in Verbrennungsanlagen zerstört. Ca. 9 % werden exportiert und ein Anteil von rund 13 % auf Deponien abgelagert. Hält dieser Zustand an, so bleibt das Lager im Konsum, im Vergleich zum Deponielager und dem Lager in der Umwelt, in den nächsten 20 Jahren das bedeutendste Lager.

Das DecaBDPE-Lager im Konsum besteht zu 40 % aus EE-Geräten und zu jeweils 30 % aus Baumaterialien und Kraftfahrzeugen. Aus diesem Lager diffundiert jährlich etwa 2.1 t/a DecaBDPE und lagert sich nahezu vollständig in der Pedo-/Lithosphäre ab.

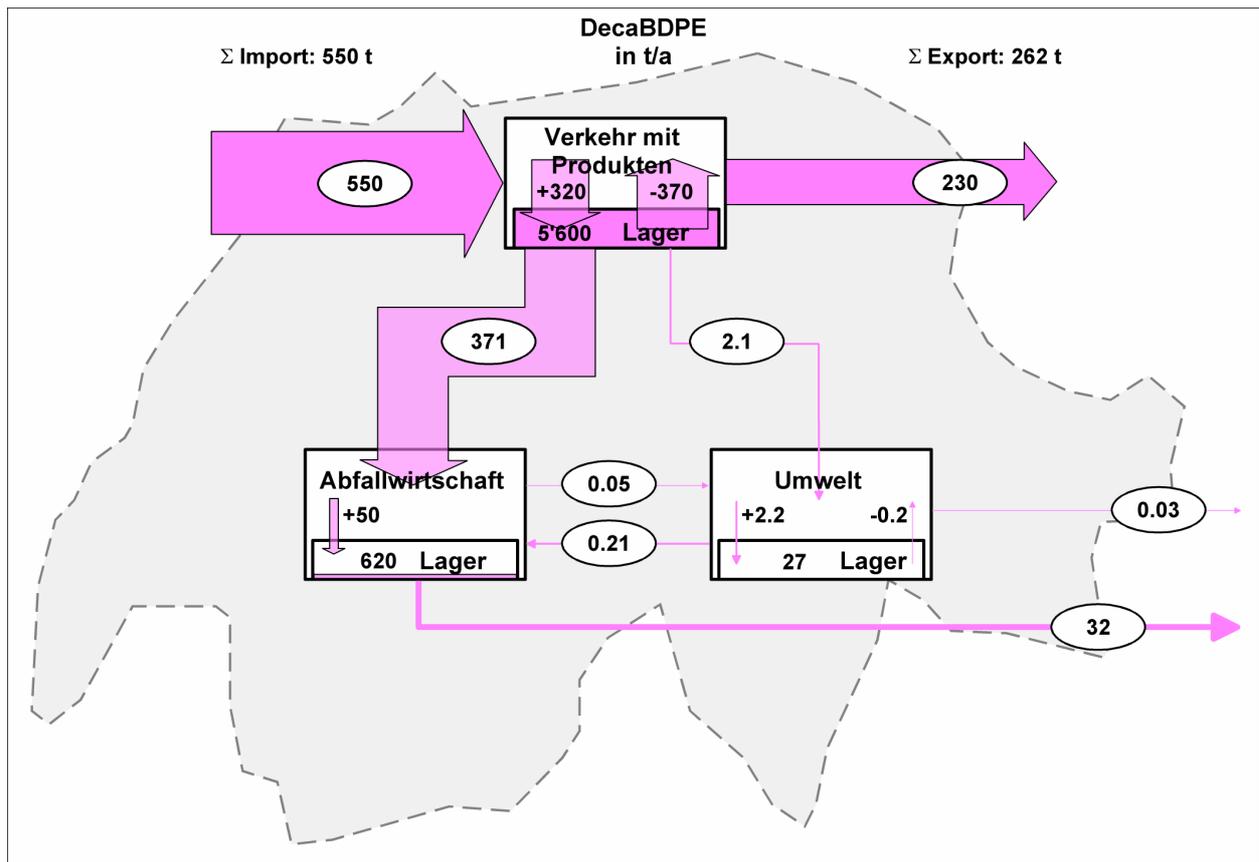


Abbildung 4: DecaBDPE-Flüsse in der Schweiz, Ende der 90er Jahre

Beachtenswert ist, dass im Vergleich zu PentaBDPE trotz des relativ hohen Lagerbestands etwa die selbe Fracht in die Umwelt diffundiert.

## TBBPA

Ende der 90er Jahre wurden jährlich 1'130 t TBBPA-Flammschutz in Halb- und Fertigprodukten in die Schweiz importiert. Hiervon wurden etwa 570 t/a konsumiert und der Rest wieder exportiert. Nahezu die gesamte konsumierte TBBPA-Fracht (etwa 83 %) befindet sich in EE-Geräten: Etwa 83 % in Computern und rund 11 % in Unterhaltungselektronikgeräten. Im Vergleich zu den anderen BFS sind die gehandelten und konsumierten TBBPA-Frachten die höchsten.

Das Lager an TBBPA in konsumierten Produkten beträgt etwa 5'600 t und besteht zum überwiegenden Teil (59 %) aus EE-Geräten und zu kleineren Teilen (je 20 %) aus Baumaterialien und Kraftfahrzeugen. Obwohl im Vergleich zu Deca-BDPE etwa die doppelte Menge TBBPA jährlich konsumiert wird, ist der Lagerbestand etwa gleich gross. Dies resultiert daraus, dass die meisten TBBPA-haltigen Produkte kurzlebiger sind als decaBDPE-haltige.

Gegenwärtig wächst das Lager im Konsum um rund 180 t/a. Setzt sich dieser Trend in den nächsten Jahren fort, so bleibt das Lager im Konsum, im Vergleich zum Deponielager und dem Lager in der Umwelt, in den nächsten 20 Jahren das bedeutendste.

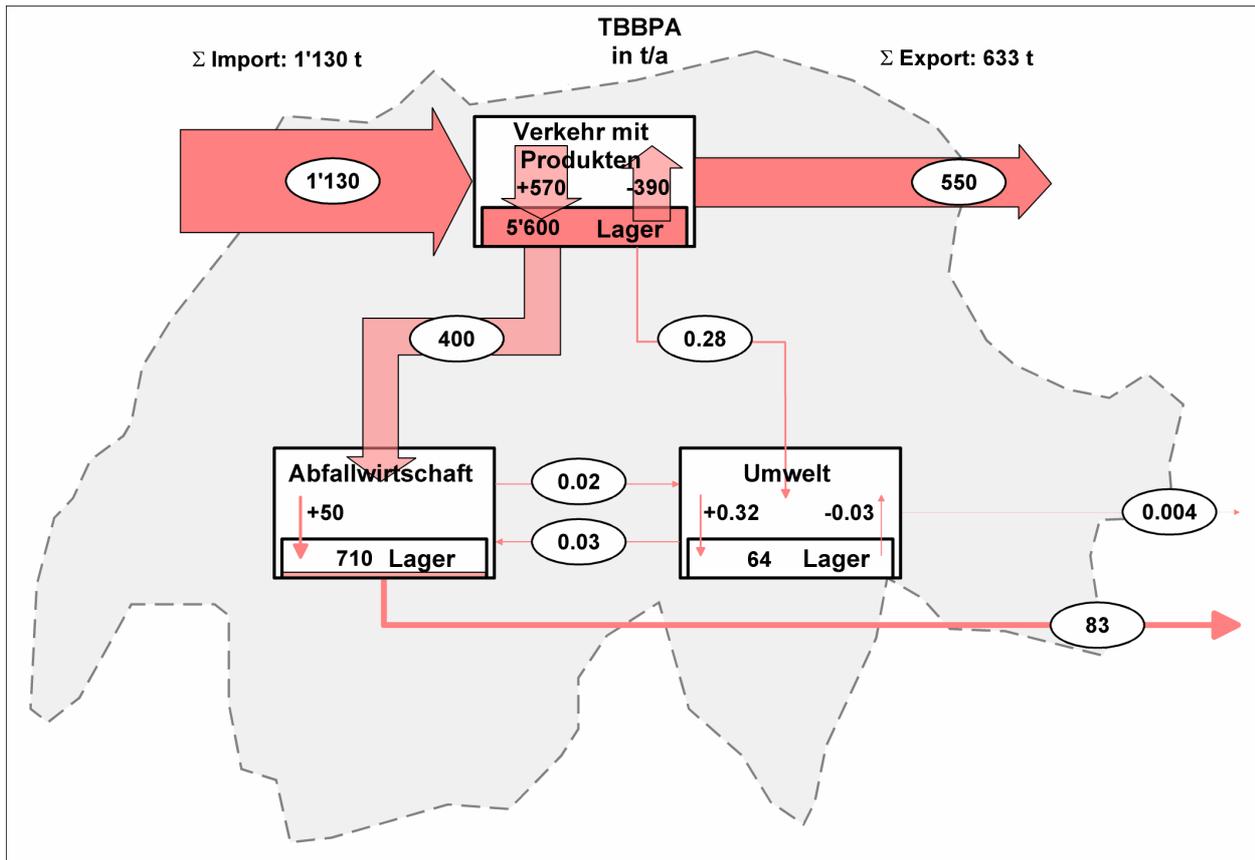


Abbildung 5: TBBPA-Flüsse in der Schweiz, Ende der 90er Jahre

Pro Jahr diffundiert etwa 0.3 t TBBPA aus dem Lager im Konsum in die Umwelt und lagert sich nahezu vollumfänglich in der Pedo-/Lithosphäre ab. Im Vergleich mit den anderen untersuchten BFS ist dies, trotz des grössten Lagerbestandes die geringste diffuse Emission.

### Schlussfolgerungen

- Die Mehrzahl der Unternehmen haben ungenügende Informationen über die stoffliche Zusammensetzung der von ihnen in Verkehr gesetzten Produkte. Aus der Sicht eines vorsorgenden Umweltschutzes müssen die Unternehmen über das Umwelt- und Gesundheitspotential der von ihnen in Verkehr gebrachten Produkte Bescheid wissen. Dies ist zur Zeit nicht in genügendem Ausmass der Fall. Eine Möglichkeit der Optimierung der betrieblichen Strukturen ist der Einsatz einer betrieblichen Stoffbuchhaltung.
- Zur Zeit stehen nur wenig Informationen über die globale Verteilung der BFS zur Verfügung. Auf globaler Ebene sollen die Wege der Produkte und damit auch der Stoffflüsse zusammen mit Produzenten der Grundstoffe, der Halb- und Fertigprodukte verfolgt werden. Fernziel ist es, Informationen über Massenflüsse von kritischen Substanzen entweder dem Produkt direkt beizufügen oder zumindest verfügbar zu machen.
- Die Grösse und Zusammensetzung des anthropogenen Lagers ist nicht ausreichend genau bestimmt. Dieses Lager ist in seiner Dynamik zu erfassen und zu modellieren. Erst dann wird es möglich sein, es aktiv zu bewirtschaften, diffuse Emissionen abzuschätzen und zukünftige Abfallflüsse vorherzusagen. Erst so kann der Fluss in die Deponien und damit die

diffusen Emissionen aus den Deponien gesteuert und minimiert werden sowie können auch entsprechende Rückbaukonzepte entwickelt werden.

- Aus dem Konsum gelangen grosse Flüsse in die Prozesse der Abfallwirtschaft. Welche Mengen an Emissionen aus den abfallwirtschaftlichen Prozessen resultieren, ist bis heute wenig (Verbrennung) bis gar nicht (Verwertung, Deponie, unkontrollierte Entsorgung) bekannt. Dieses Wissen ist aber eine Grundvoraussetzung, um ein optimales Management auch in der Entsorgungs- und Wiederverwertungsphase zu gewährleisten. Daher sind Messungen in den wichtigsten abfallwirtschaftlichen Prozessen (KVA, Deponie, Wiederverwertung, ARA) notwendig.

## Résumé

Les produits ignifuges bromés font l'objet de vives controverses depuis plus de quinze ans. On dispose aujourd'hui de plus de connaissances sur le comportement de ces produits et sur les dangers qu'ils représentent pour l'être humain et l'environnement que l'on en disposait sur les PCB, par exemple, à l'époque où leur utilisation et leur production ont été interdites. Les principaux dangers associés à certains des produits ignifuges étudiés sont dus au fait qu'ils sont persistants et qu'ils peuvent s'accumuler dans la chaîne alimentaire (p. ex. pentaBDPE, TBBPA), que leur combustion incontrôlée peut provoquer la formation de dioxines et de furanes bromés (p. ex. décaBDPE) et qu'il existe des indices suggérant l'existence d'un potentiel cancérigène (p. ex. décaBDPE) et œstrogène (p. ex. pentaBDPE).

L'objectif de cette étude est d'établir une analyse du flux de matières pour quatre représentants des produits ignifuges bromés : le pentabromodiphényléther [pentaBDPE], l'octabromodiphényléther [octaBDPE], le décabromodiphényléther [décaBDPE] et le tétrabromobisphénol A [TBBPA].

Cette étude repose exclusivement sur des données issues de la littérature disponible et examine l'emploi des produits ignifuges bromés en Suisse à la fin des années 90. Le stock anthropique des produits ignifuges bromés a été établi sur la base de l'importation en Suisse de produits finis et semi-finis ignifugés. Les flux annuels sous forme d'exportation, de rejet dans les déchets et d'émission dans l'environnement ont également été calculés.

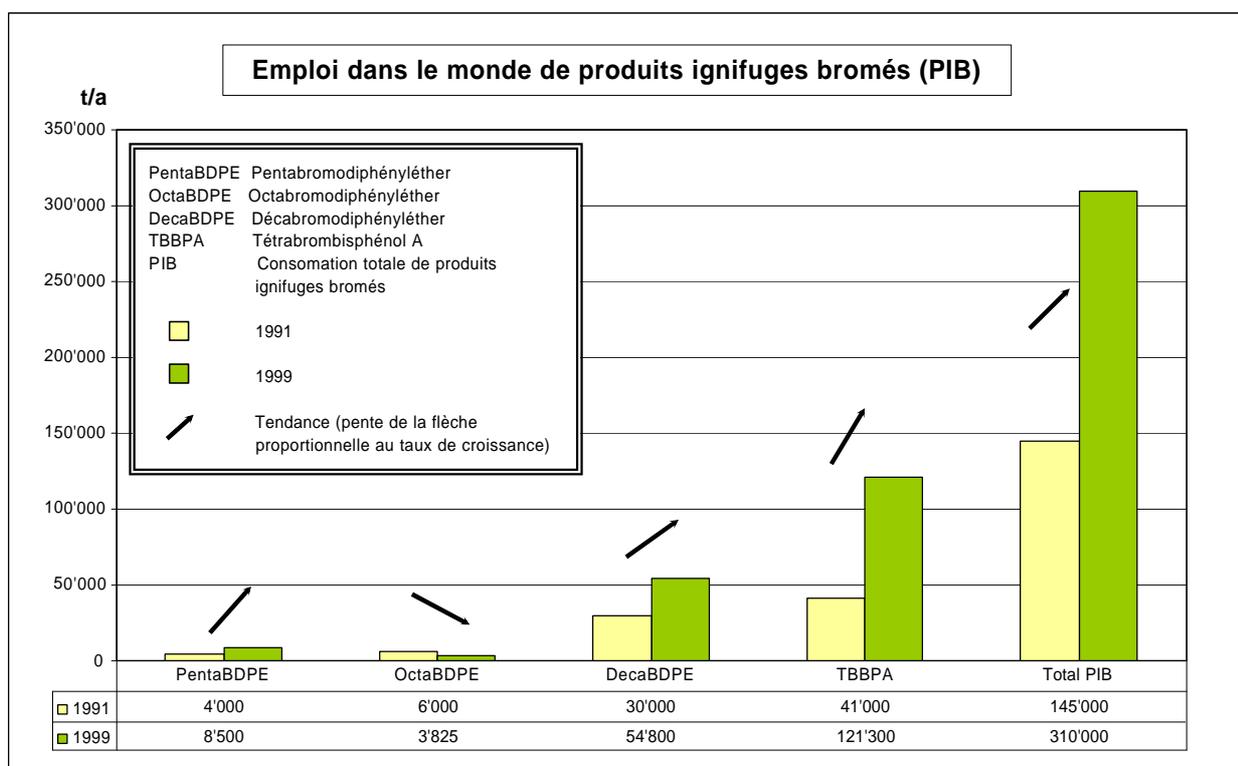


Figure 1: Comparaison de quantités de produits ignifuges bromés utilisés dans le monde (sources: TBBPA 1991 [OECD, 1994], PBDEs 1991 [IPCS 1994b], TBBPA + PBDEs 1999 [Leisewitz & Schwarz, 2000], Total PIB: valeurs de 1990 et 2000 [Arias, 2001])

Dans les années 90, près des deux tiers des besoins mondiaux de produits ignifuges bromés étaient couverts par les quatre substances examinées. Durant ces dernières décennies, les besoins ont fortement augmenté en raison de la hausse de la consommation de matières plastiques et de l'entrée en vigueur de prescriptions de protection contre le feu plus sévères. La consommation mondiale des produits ignifuges bromés étudiés est passée de 100'000 tonnes par an en 1991 à 190'000 tonnes par an en 1999. Une croissance annuelle supplémentaire de 5 à 7 % est attendue jusqu'en 2005. La tendance n'est toutefois pas la même pour tous les produits ignifuges bromés : la consommation d'octaBDPE a fortement reculé dans les années 90, alors que celle de pentaBDPE, de décaBDPE et de TBBPA a connu une hausse très importante (voir figure 1).

## Résultats

Chaque année, près de 1'700 tonnes des quatre produits ignifuges bromés examinés parviennent en Suisse dans des produits semi-finis et finis. De cette quantité, quelque 46 % sont de nouveau exportées dans des produits finis; le reste est consommé en Suisse (commerce de produits). Les principales contributions à la consommation en Suisse sont, pour le pentaBDPE, les véhicules à moteur (rembourrages, textiles), pour l'octaBDPE, les appareils électriques et électroniques et les véhicules à moteur, pour le décaBDPE, les appareils électriques et électroniques (appareils informatiques et de bureau), les véhicules à moteur et les matériaux de construction (films en PE), et pour le TBBPA, les appareils électriques et électroniques (ordinateurs).

Un stock de près de 12'000 tonnes des produits ignifuges bromés examinés s'est constitué en Suisse suite à la consommation de produits ignifuges durant ces dernières vingt années. Actuellement, les stocks de pentaBDPE et d'octaBDPE diminuent, le stock de TBBPA augmente et celui de décaBDPE est proche de la stabilité.

Près de 900 tonnes de produits ignifuges bromés quittent chaque année le stock des produits de consommation. Quasiment la totalité de cette quantité passe avec les déchets solides dans la gestion des déchets. La plus grande partie des produits ignifuges bromés présents dans les déchets solides (de 65 à 85 % selon le produit), exception faite du pentaBDPE (23 %), y est finalement éliminée et pratiquement complètement détruite par traitement thermique dans des processus de combustion contrôlés. A côté du stock des produits de consommation, un stock dix fois plus petit, de 1'500 tonnes, s'est constitué durant ces dernières décennies dans les décharges contrôlées suisses. Ce stock augmente de près 130 tonnes par an. Traité de manière inappropriée, il représente un danger potentiel futur pour l'être humain et l'environnement. Comme on ne dispose pas de mesures récentes pour la Suisse, les flux allant des produits de consommation et des déchets vers l'environnement ne peuvent actuellement être évalués que très grossièrement.

## PentaBDPE

A la fin des années 90, les quantités de produits ignifuges au pentaBDPE utilisées en Suisse étaient faibles par rapport aux quantités d'autres produits ignifuges bromés. Chaque année, près de 1,9 tonnes de pentaBDPE sont importées en Suisse dans des produits finis, dont près de 1,5 tonnes sont consommées. La plupart des biens de consommation contenant du pentaBDPE sont des rembourrages, des textiles et des matières plastiques de véhicules à moteur. Les charges de pentaBDPE sont de 10 à 1'000 plus faibles que celles des autres produits ignifuges bromés.



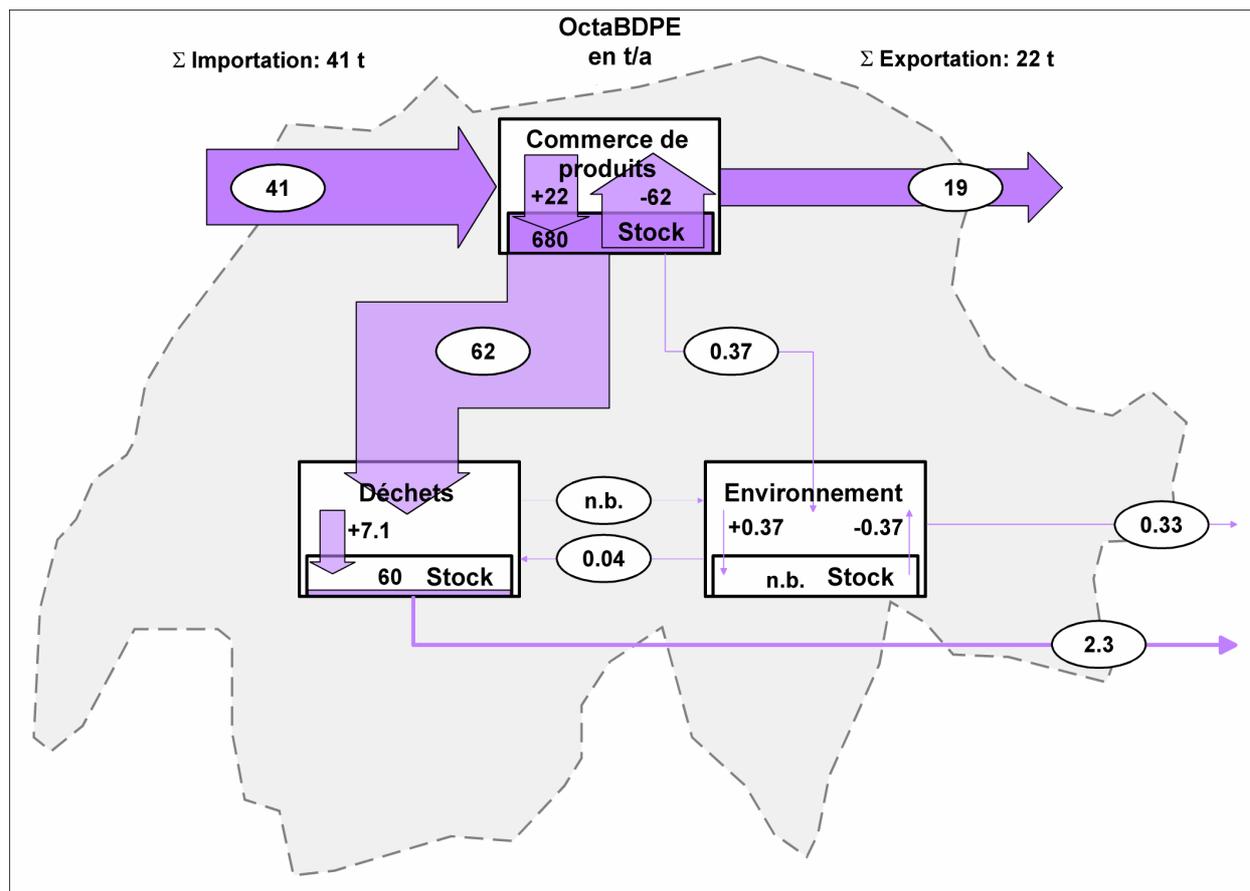


Figure 3: Flux d'octaBDPE en Suisse, à la fin des années 90

Un stock de 680 tonnes d'octaBDPE s'est constitué ces vingt dernières années dans les produits de consommation. Ce stock consiste pour 69 % en appareils électriques et électroniques, pour 21 % en véhicules à moteur et pour 10 % en matériaux de construction. Il recule actuellement de près de 40 tonnes par an. Si cette tendance se maintient ces prochaines années, le stock contenu dans les déchets, avec près de 160 tonnes, sera le stock anthropique le plus important dans 13 à 18 ans.

Les déchets de produits de consommation éliminés annuellement contiennent près de 62 tonnes d'octaBDPE, dont quasiment la totalité (87 %) est détruite dans des usines d'incinération et près de 10 % sont déposés dans des décharges contrôlées. Le reste (environ 3 %) est exporté. Chaque année, près de 0,4 tonne d'octaBDPE quitte le stock des produits de consommation et quasiment la totalité de cette quantité se dépose dans la pédosphère ou la lithosphère.

### DécaBDPE

A la fin des années 90, 550 tonnes de l'agent ignifuge décaBDPE ont été importées en Suisse chaque année dans des produits semifinis et finis, dont près de 320 tonnes ont été consommées et le reste a été réexporté. Les appareils électriques et électroniques (appareils informatiques et de bureau) abritent près du 45 % du décaBDPE consommé en Suisse, environ 30 % se trouvent dans les véhicules à moteur importés et quelque 25 % se trouvent dans des matériaux de construction (films PE).

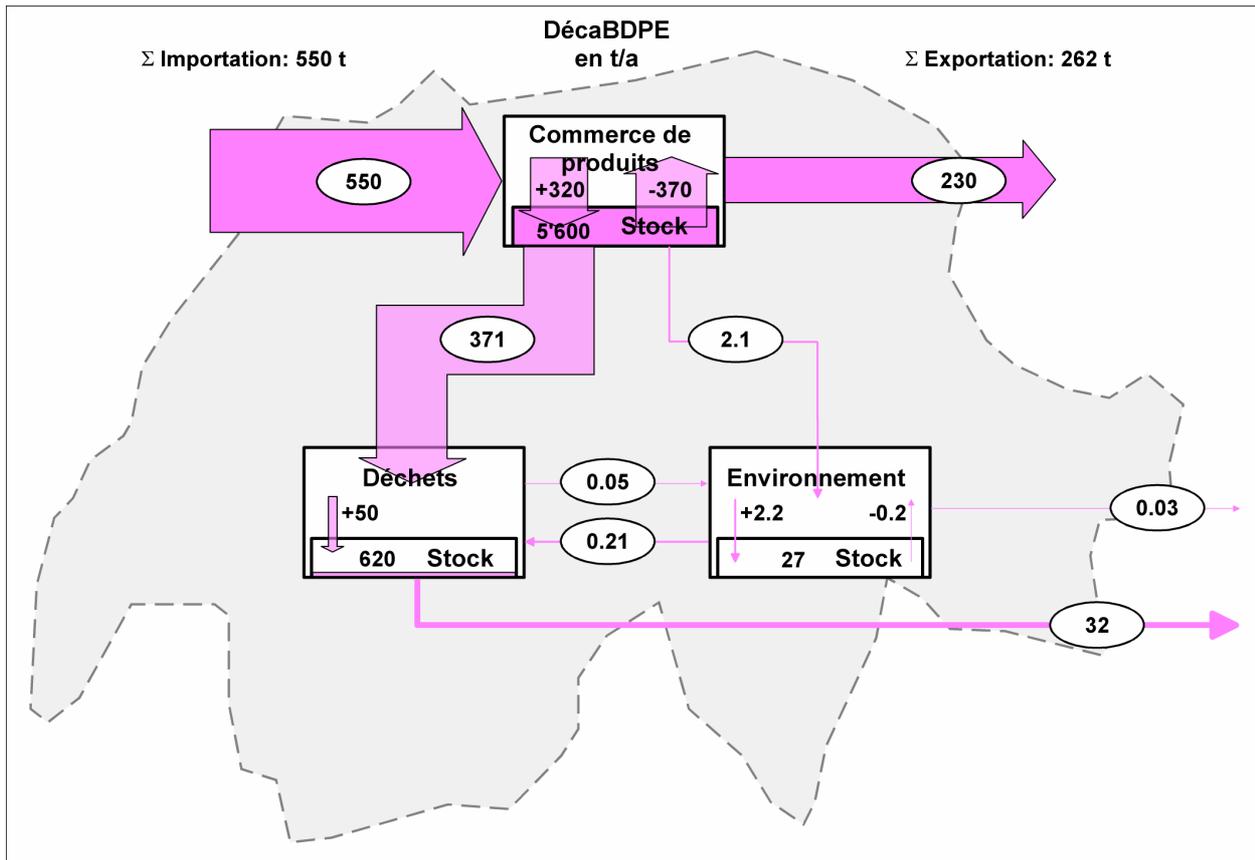


Figure 4: Flux de décaBDPE en Suisse, à la fin des années 90

Le stock de décaBDPE dans les produits de consommation se monte à 5'600 tonnes environ et est pratiquement stable. Cela signifie que l'on élimine avec les déchets environ autant de décaBDPE que l'on en consomme. La majeure partie (environ 80 %) des quelque 370 tonnes annuelles de décaBDPE contenus dans les déchets est détruite dans des usines d'incinération. Près de 9 % sont exportés et une fraction de 13 % environ est stockée dans des décharges contrôlées. Si cette situation se maintient, le stock des produits de consommation restera, au cours de ces vingt prochaines années, plus important que le stock des décharges contrôlées et que le stock dans l'environnement.

Le stock de décaBDPE dans les produits de consommation consiste pour 40 % environ en appareils électriques et électroniques, pour 30 % en matériaux de construction et pour 30 % en véhicules à moteur. Près de 2.1 tonnes de décaBDPE sont émises chaque année à partir de ce stock et quasiment la totalité de cette quantité se dépose dans la pédosphère ou la lithosphère. Il est intéressant de noter que la charge de décaBDPE émise dans l'environnement est similaire à celle de pentaBDPE, malgré l'importance du stock de décaBDPE.

### TBBPA

A la fin des années 90, 1'130 tonnes par an du produit ignifuge TBBPA ont été importées en Suisse dans des produits semi-finis et finis, dont près de 570 tonnes ont été consommées et le reste a été réexporté. Les appareils électriques et électroniques abritent quasiment la totalité de la charge de TBBPA consommée: près de 83 % de cette quantité se trouve dans des ordinateurs et environ 11 % dans des appareils électroniques de loisir. Par rapport aux autres produits

ignifuges bromés, les quantités de TBBPA commercialisées et consommées sont les plus élevées.

Le stock de TBBPA dans les produits de consommation se monte à 5'600 tonnes environ, dont la majeure partie (59 %) consiste en appareils électriques et électroniques et de plus petites fractions en matériaux de construction (20 %) et en véhicules à moteur (20 %). Bien que la quantité de TBBPA consommée annuellement soit proche du double de celle de décaBDPE, les quantités en stock sont comparables. Cela est dû au fait que la plupart des produits contenant du TBBPA présentent une durée de vie plus courte que les produits contenant du décaBDPE.

Actuellement, le stock de TBBPA dans les produits de consommation croît de près de 180 tonnes par an. Si cette tendance se maintient ces prochaines années, le stock des produits de consommation restera plus important ces vingt prochaines années que le stock des décharges contrôlées et que le stock dans l'environnement.

Les déchets issus des produits de consommation contiennent une charge annuelle de TBBPA de près de 400 tonnes, dont environ 68 % sont détruites dans des usines d'incinération, près de 11 % sont déposées dans des décharges et environ 21 % sont exportées.

Chaque année, le stock des produits de consommation émet près de 0,3 tonne de TBBPA dans l'environnement et quasiment la totalité de cette quantité se dépose dans la pédosphère ou la lithosphère. Par rapport aux autres produits ignifuges bromés étudiés, et bien que le stock de TBBPA soit le plus important, cela représente l'émission diffuse la plus faible.

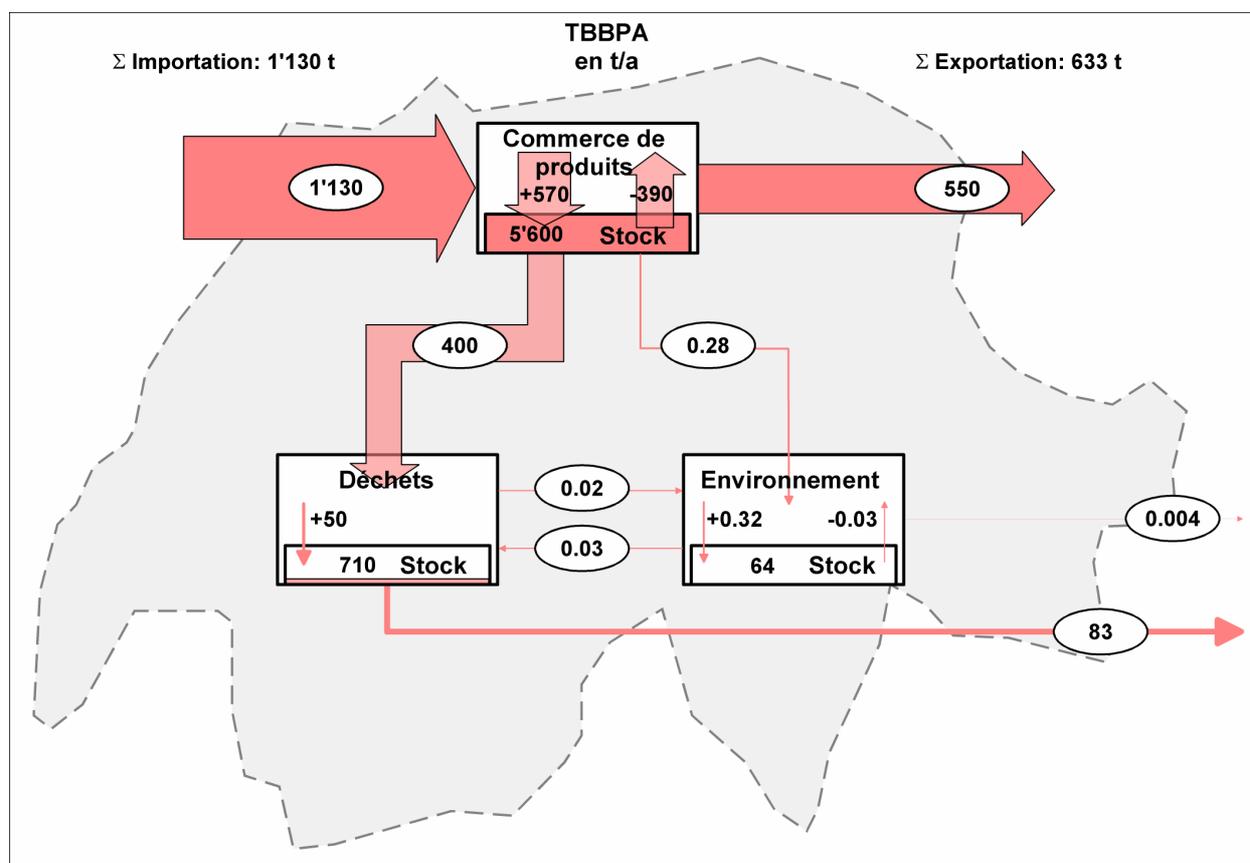


Figure 5: Flux de TBBPA en Suisse, à la fin des années 90

## Conclusions

- La plupart des entreprises ne disposent pas d'informations suffisantes sur la composition chimique des produits qu'elles mettent en circulation. Dans la perspective d'une politique préventive de protection de l'environnement, les entreprises doivent être informées de l'impact possible, pour l'environnement et la santé, des produits qu'elles mettent en circulation. Cette information n'est actuellement pas suffisante. La tenue d'une comptabilité des substances par les entreprises pourrait être une façon d'optimiser leur fonctionnement.
- On ne dispose actuellement que de peu d'informations relatives à la répartition globale des produits ignifuges bromés. De manière générale, les chemins pris par les produits et donc également les flux de matières devraient être connus, de même que les producteurs des substances de base, des produits semi-finis et des produits finis. Le but visé à long terme est de joindre directement au produit les informations relatives aux flux de matières des substances critiques ou au moins de rendre disponibles ces informations.
- La taille et la composition du stock anthropique n'ont pas été déterminées avec suffisamment de précision. Il ne sera possible de gérer activement ce stock, d'évaluer les émissions diffuses et de prévoir les futurs flux de déchets qu'une fois que la dynamique du stock aura été caractérisée et modélisée. Ce n'est qu'ainsi que le flux vers les décharges et par conséquent également les émissions diffuses qui proviennent des déchets pourront être contrôlés et réduits autant que possible, et que les stratégies de démolition adéquates pourront être mises au point.
- D'importantes quantités de produits ignifuges bromés passent des produits de consommation aux déchets. Les quantités d'émissions qui résultent des processus du traitement des déchets ne sont pour le moment que peu connues (combustion), voire pas du tout étudiées (recyclage, décharges contrôlées, élimination non-contrôlée). Ces connaissances sont toutefois une condition fondamentale pour garantir également une gestion optimale dans les phases d'élimination et de recyclage. C'est pourquoi il est indispensable de procéder à des mesures dans les principaux processus de gestion des déchets (UIOM, décharges contrôlées, recyclage, STEP).

## Riassunto

Da oltre 15 anni si dibatte sui prodotti ignifughi bromati (PIB). Oggi si hanno maggiori informazioni sul comportamento e sul potenziale di minaccia dei prodotti ignifughi bromati per l'umanità e l'ambiente di quanto si sapesse per esempio sui PCB all'epoca dell'entrata in vigore del divieto di utilizzare e produrre tali sostanze. Il potenziale di minaccia di alcuni prodotti ignifughi esaminati consiste essenzialmente nel fatto che sono persistenti e possono accumularsi nella catena alimentare (per. es. il pentaBDPE, il TBBPA), e che nel caso di incenerimento incontrollato possono provocare la formazione di diossine bromate e furani (per es. il decaBDPE). Inoltre si teme che tali sostanze siano cancerogene (per es. il decaBDPE) e abbiano un effetto estrogeno (per es. il pentaBDPE).

Scopo del presente studio è effettuare un'analisi del flusso di sostanze per i quattro campioni selezionati di prodotti ignifughi bromati: il derivato pentabromato [PentaBDPE], il derivato octabromato [OctaBDPE], il derivato decabromato [DecaBDPE] e il tetrabrombisfenolo A [TBBPA].

Lo studio si basa esclusivamente sui dati della letteratura scientifica e analizza l'uso dei PIB in Svizzera alla fine degli anni '90. A partire dall'importazione in Svizzera di prodotti ignifughi semifiniti e finiti è stato possibile risalire ai loro depositi antropogeni. Inoltre sono stati stabiliti i flussi annuali nell'esportazione e nella gestione dei rifiuti, come pure le emissioni nell'ambiente.

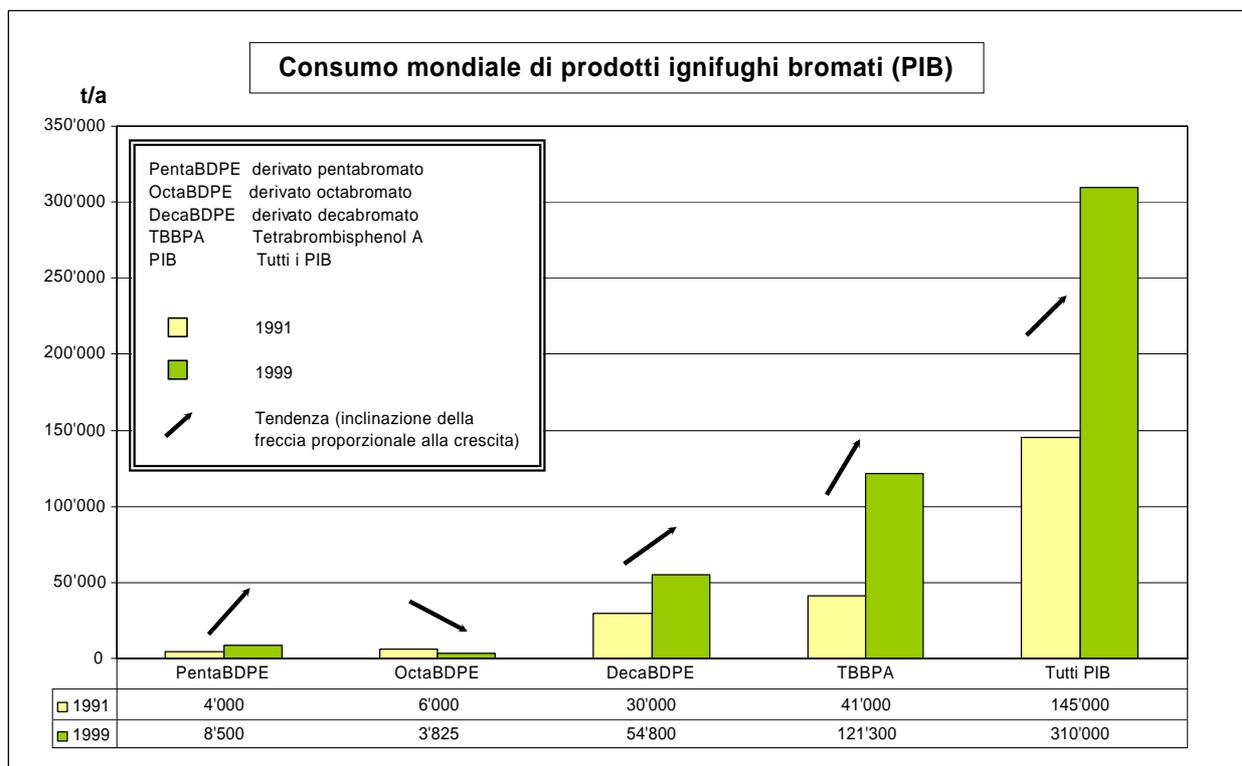


Grafico 1: Quantità dei PIB diffusi in tutto il mondo a confronto (Fonte: TBBPA 1991 [OCSE, 1994], PBDE 1991 [IPCS 1994b], TBBPA+PBDE 1999 [Leisewitz & Schwarz, 2000], Tutti PIB:1990 e 2000 [Arias, 2001])

Circa due terzi del fabbisogno mondiale di PIB sono stati coperti negli anni '90 dalle quattro sostanze prese in esame. Negli ultimi decenni tale fabbisogno è cresciuto notevolmente da un canto a causa dell'aumento del consumo di materia plastica e, dall'altro, a causa di prescrizioni anti incendio sempre più rigide. Il consumo mondiale dei PIB esaminati è aumentato dal 1991 al 1999 da 100.000 t/a a 190.000 t/a, e sino al 2005 si prevede un'ulteriore crescita annua del 5-7 %. Se si osserva la situazione più da vicino, si nota che, negli anni '90, il consumo di octaBDPE è diminuito notevolmente, mentre quello di pentaBDPE, decaBDPE e TBBPA è aumentato vertiginosamente (cfr. grafico 1).

## Risultati

Ogni anno, in Svizzera, circa 1'700 t dei quattro PIB esaminati finiscono in prodotti semifiniti o finiti. Il 46 % circa delle quali è nuovamente esportato sotto forma di prodotti finiti, mentre ciò che resta viene consumato in Svizzera (commercio dei prodotti). I valori più alti nel consumo della Svizzera si registrano nei veicoli a motore (imbottitura, tessuti) per il pentaBDPE, negli apparecchi elettrici e elettronici (EE) e nei veicoli a motore per l'octaBDPE, negli apparecchi EE (strumenti EDP e per l'ufficio), nei veicoli a motore e nei materiali di costruzione (fogli di PE) per il decaBDPE, e negli apparecchi EE (computer) per il TBBPA.

Il consumo di prodotti ignifughi negli ultimi 20 anni in Svizzera ha determinato l'esistenza di un deposito nel quale sono accumulate circa 12'000 t dei PIB esaminati. Attualmente i depositi di pentaBDPE e di octaBDPE vengono smantellati, quello di TBBPA aumenta, mentre quello di decaBDPE resta più o meno costante.

Ogni anno circa 900 t delle sostanze esaminate che si accumulano nei depositi vengono consumate. Di cui quasi la totalità finisce tramite i rifiuti solidi nella gestione dei rifiuti dove i PIB contenuti nei rifiuti solidi vengono smaltiti e in pratica completamente distrutti (dal 65 % all'85 %, secondo la sostanza, salvo il pentaBDPE al 23 %), attraverso il trattamento termico nel processo di incenerimento controllato. Oltre al deposito nel consumo, negli ultimi anni è stato costruito un deposito dieci volte più piccolo di 1'500 t di PIB nelle discariche svizzere. Questo deposito cresce ogni anno di circa 130 t e se mal gestito costituisce un potenziale pericolo per le future generazioni e l'ambiente. Poiché attualmente mancano dati aggiornati, le stime sui flussi sia provenienti dal consumo, sia provenienti dalla gestione dei rifiuti verso l'ambiente sono solo approssimative.

## PentaBDPE

Rispetto agli altri prodotti ignifughi, alla fine degli anni '90 sono stati utilizzate in Svizzera quantità inferiori di prodotti ignifughi contenenti pentaBDPE. Ogni anno vengono importate in Svizzera circa 1.9 t/a di pentaBDPE sotto forma di prodotti finiti, di cui ne vengono consumate circa 1.5 t/a. La maggior parte dei beni di consumo che contengono pentaBDPE sono le imbottiture, i prodotti tessili e i materiali sintetici dei veicoli a motore. Rispetto agli altri PIB, le merci contenenti penta-BDPE sono da 10- a 1'000 volte inferiori.

Attraverso le diverse applicazioni, negli ultimi vent'anni è venuto a crearsi nel consumo un deposito di 500 t di pentaBDPE composto per il 91 % da materiali di costruzione contenenti pentaBDPE. Attualmente si sta procedendo all'eliminazione di circa 30 t/a del deposito. Qualora la tendenza dovesse persistere nei prossimi anni, fra 7 - 10 anni il deposito nella gestione dei rifiuti con circa 280 t sarà il principale deposito antropogeno.

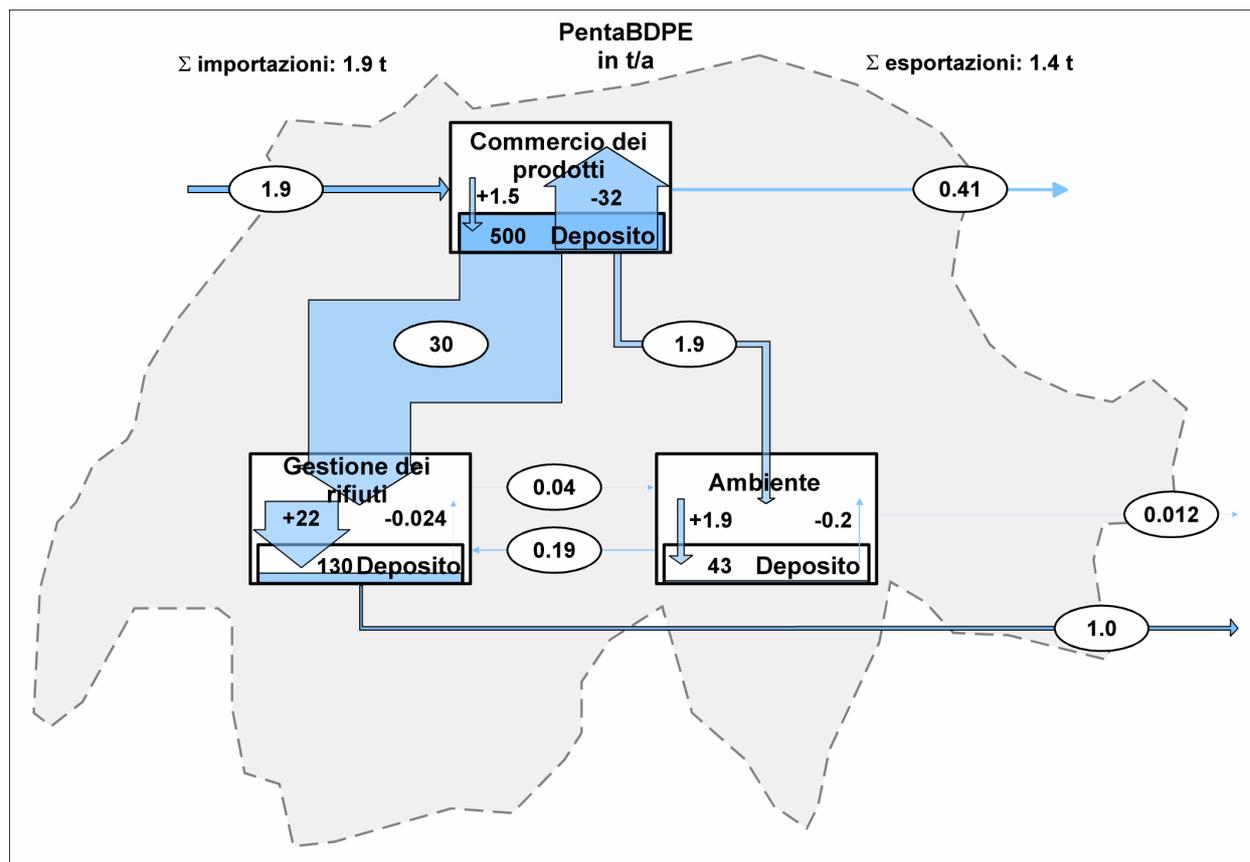


Grafico 2: flussi di pentaBDPE in Svizzera, fine anni '90

Ogni anno finiscono nella gestione dei rifiuti circa 30 t/a di pentaBDPE, di cui la maggior parte (72 %) viene distrutta in discariche e circa il 20 % in impianti di incenerimento. Una minima parte di 1 t/a (3 %) viene esportata.

Dal deposito nel consumo si diffondono ogni anno circa 1.9 t/a, che finiscono quasi interamente nella pedosfera e nella litosfera. Quanto al carico diffuso ogni anno, per il pentaBDPE vengono registrati valori superiori a quelli per l'octaBDPE e per il TBBPA.

### OctaBDPE

Ogni anno vengono importate in Svizzera circa 41 t di octaBDPE sotto forma di materiale ignifugo nei prodotti, 22 t/a circa delle quali vengono consumate. Ciò che resta viene esportato. Il carico di octaBDPE consumato è pari al 67 % circa negli apparecchi EE e al 33 % circa nei veicoli a motore.

Negli ultimi due decenni è stato allestito un deposito nel consumo di 680 t di octaBDPE composto per il 69 % da apparecchi EE, per il 21 % da veicoli a motore e per il 10 % da materiali da costruzione. Attualmente si procede all'eliminazione di circa 40 t/a del deposito. Qualora la tendenza dovesse persistere nei prossimi anni, fra 13 - 18 anni il deposito nel settore della gestione dei rifiuti con circa 160 t sarà il principale deposito antropogeno.

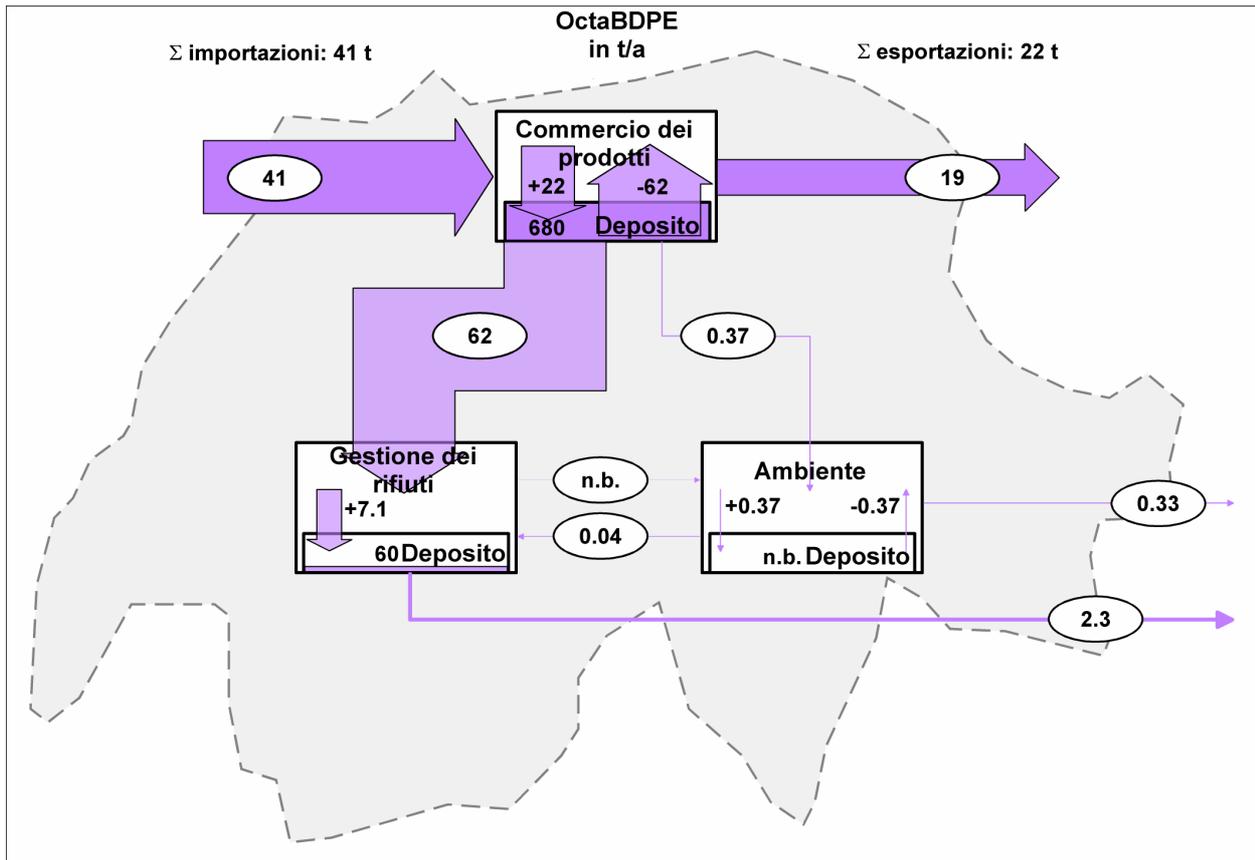


Grafico 3: flussi di octaBDPE in Svizzera, fine anni '90

I rifiuti provenienti dal consumo contengono ogni anno circa 62 t/a di octaBDPE. La maggior parte delle merci (l'87 %) viene distrutta in impianti d'incenerimento e il 10 % circa viene depositato in discariche. Ciò che resta (circa il 3 %) viene esportato.

Ogni anno circa 0.4 t/a di octa-BDPE si diffondono dai depositi nel consumo e giungono quasi nella loro totalità nella pedosfera e nella litosfera.

### DecaBDPE

Alla fine degli anni '90 sono stati importati in Svizzera ogni anno 550 t di sostanze ignifughe con decaBDPE sotto forma di prodotti semifiniti o finiti. 320 t/a circa delle quali sono state consumate e il resto nuovamente esportato. Il 45 % circa delle deca-BDPE consumate in Svizzera si trova negli apparecchi EE (strumenti EDP e per l'ufficio), il 30 % circa nei veicoli a motore importati e il 25 % circa nei materiali da costruzione (fogli di PE).

Il deposito di decaBDPE nei prodotti consumati ammonta a 5'600 t ed è più o meno costante. Il che significa che lo stesso carico di deca-BDPE che viene consumato, viene poi smaltito tramite i rifiuti. Le 370 t/a circa di decaBDPE presenti nei rifiuti vengono in gran parte (80 %) distrutte in impianti d'incenerimento. Il 9 % circa viene esportato, mentre il 13 % circa viene depositato in discariche. Se questa situazione persiste, nei prossimi 20 anni il deposito nel consumo sarà più importante del deposito di discarica e di quello nell'ambiente.

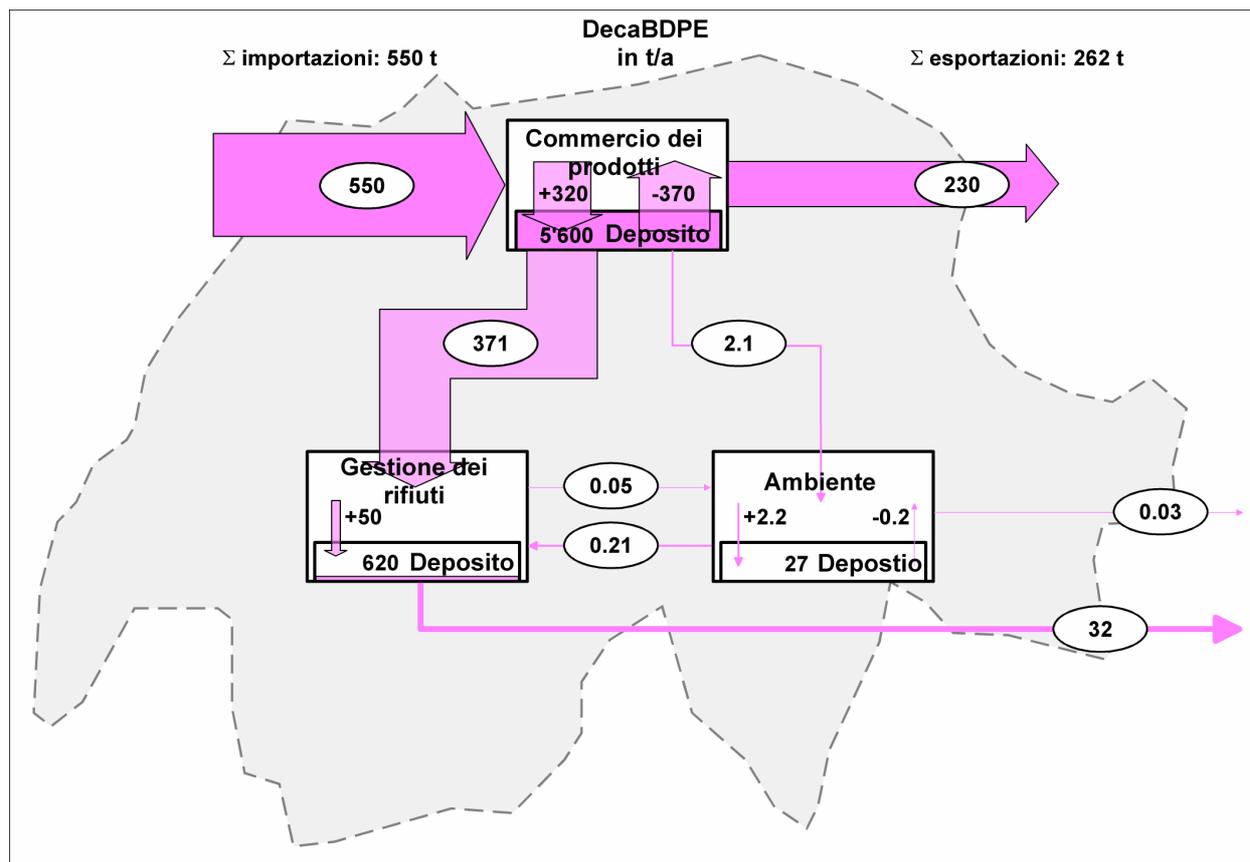


Grafico 4: flussi di decaBDPE in Svizzera, fine degli anni '90

Il deposito di decaBDPE nel consumo è costituito per il 0 % da apparecchi EE, per un 30 % da materiali da costruzione e da un altro 30 % da veicoli a motore. Ogni anno dal deposito nel consumo si diffondono circa 2.1 t/a di decaBDPE che giungono quasi nella loro totalità nella pedosfera e nella litosfera. Va notato che nonostante le importanti scorte, rispetto al pentaBDPE, viene diffuso nell'ambiente quasi lo stesso carico.

### TBBPA

Alla fine degli anni '90 sono state importate in Svizzera ogni anno 1'130 t di sostanze ignifughe con decaBDPE in prodotti semifiniti o finiti. 570 t/a circa delle quali sono state consumate e il resto nuovamente esportato. Quasi la totalità del carico di TBBPA consumato si trova negli apparecchi EE: l'83 % circa nei computer e l'11 % circa in apparecchi elettronici d'intrattenimento. Rispetto agli altri PIB i carichi di TBBPA commercializzati e consumati sono i più elevati.

Il deposito di TBBPA nei prodotti consumati am-monta a circa 5'600 t ed è costituito in gran parte (59 %) da apparecchi EE e in minor parte (20 %) da materiali da costruzione e da veicoli a motore (20%). Nonostante rispetto al deca-BDPE venga consumata ogni anno una quantità doppia di TBBPA, le scorte sono più o meno le stesse. Il che dipende dal fatto che la maggior parte dei prodotti che contengono TBBPA sono meno durevoli di quelli che contengono decaBDPE.

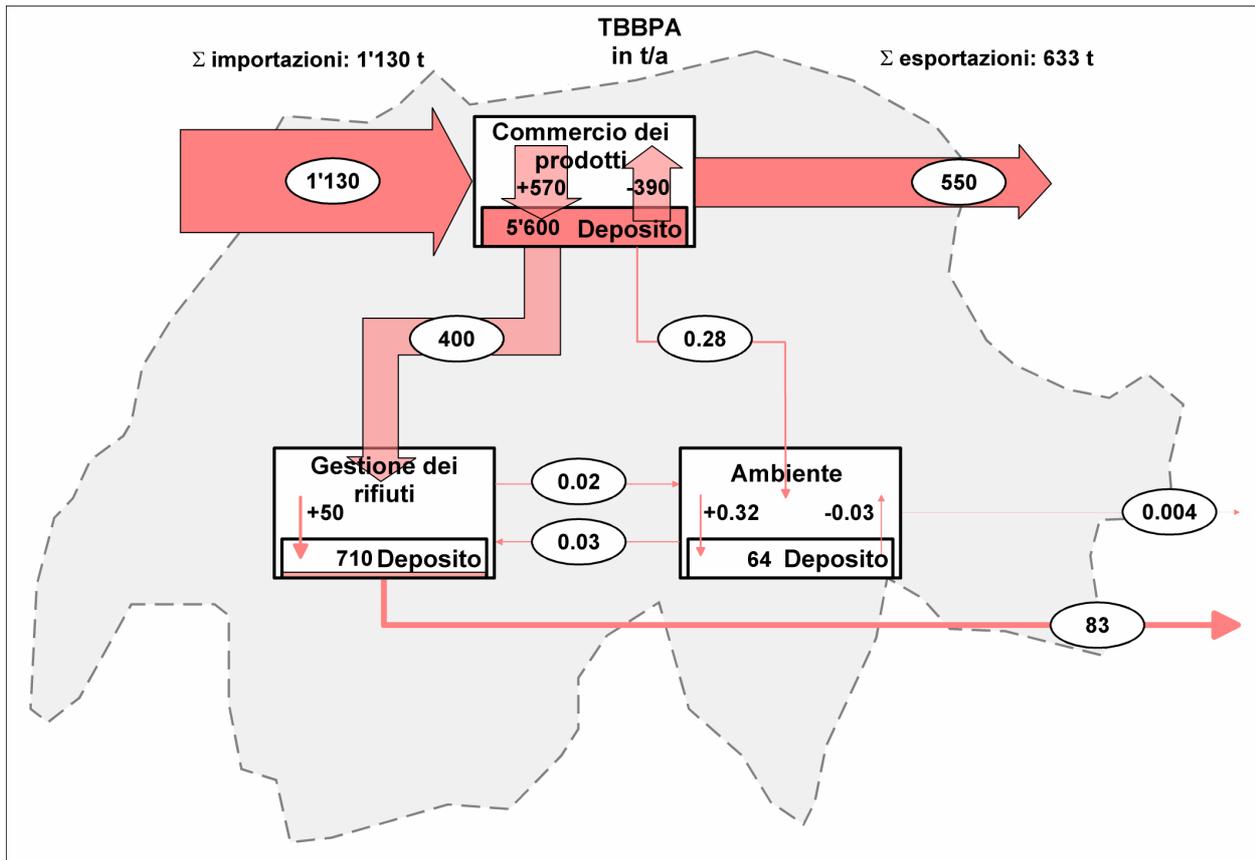


Grafico 5: flussi di TBBPA in Svizzera, fine anni '90

Attualmente il deposito nel consumo aumenta di circa 180 t/a. Se tale tendenza dovesse persistere nei prossimi anni, il deposito nel consumo rimarrà nei prossimi 20 anni più importante rispetto a quello delle discariche e quello nell'ambiente.

I rifiuti provenienti dal consumo contengono ogni anno circa 400 t/a di TBBPA, di cui il 68 % viene distrutto in impianti d'incenerimento, l'11 % depositato e il 21 % esportato.

Ogni anno circa 0,3 t/a di TBBPA provenienti dal deposito nel consumo si diffondono nell'ambiente e si depositano nella loro quasi totalità nella pedosfera e nella litosfera. Rispetto agli altri PIB presi in esame, e nonostante si tratti delle scorte più importanti, questa è l'emissione meno diffusa.

## Conclusioni

- La maggior parte delle imprese non dispone di informazioni sufficienti sulla composizione delle sostanze dei prodotti da loro messi sul mercato. Da un punto di vista della protezione previdenziale dell'ambiente le imprese dovrebbero conoscere il potenziale di danno alla salute dei prodotti da loro commercializzati. Per il momento tuttavia ciò non avviene in misura sufficiente. Un modo per ottimizzare le strutture aziendali sarebbe quello di introdurre un sistema di contabilità delle sostanze.
- Attualmente sono poche le informazioni di cui si dispone sulla distribuzione totale dei PIB. A livello globale occorre seguire, insieme ai produttori delle materie di base, dei prodotti semifiniti e dei prodotti finiti, i percorsi dei prodotti e pertanto anche dei flussi di sostanze. L'obiet-

tivo di lungo periodo è quello di scrivere sul prodotto, o per lo meno rendere accessibili, le informazioni sui flussi di massa delle sostanze critiche.

- Le dimensioni e la composizione del deposito antropogeno non sono sufficientemente definiti. Occorre rilevare e modellare l'andamento del deposito. Solo così sarà possibile gestirlo in modo attivo, stimare le emissioni diffuse e prevedere futuri flussi di rifiuti. Sarà inoltre possibile incanalare il flusso nelle discariche che consentirà di controllare e ridurre le emissioni diffuse dalle discariche e elaborare i relativi progetti di trasformazione.
- Dal consumo finiscono nei processi della gestione dei rifiuti grandi flussi. Quali siano tuttavia le emissioni che provengono dai processi di gestione dei rifiuti non è tuttavia attualmente ancora noto (incenerimento) o lo è solo parzialmente (recupero, discarica, smaltimento incontrollato). Tali informazioni sono nondimeno il presupposto fondamentale per garantire una gestione ottimale anche nelle fasi di smaltimento e di riciclaggio. Ecco perché risulta indispensabile effettuare rilevamenti nei processi principali della gestione dei rifiuti (IIRU, discarica, riciclaggio, IDA).

## Summary

Brominated flame retardants (BFRs) have been a controversial topic for over 15 years. Nowadays, more is known about the behaviour of BFRs and about the potential threat that they present to human beings and to the environment than was for instance known about PCBs at the time when bans on the use and production of PCBs came into force. Some BFRs examined here present a potential threat in that they are persistent and can accumulate in the food-chain (e.g. pentaBDPEs and TBBPAs), that their uncontrolled combustion can lead to the formation of brominated dioxins and furans (e.g. from decaBDPEs), and that there are indications that they have carcinogenic potential (e.g. for decaBDPEs) and oestrogenic activity (e.g. pentaBDPEs).

The aim of the present study is to do substance flow analyses for four selected representative groups of brominated flame retardants: pentabromodiphenylethers [pentaBDPEs], octabromodiphenylethers [octaBDPEs], decabromodiphenylethers [decaBDPEs] and tetrabromobisphenol As [TBBPAs].

The study is based exclusively on data from the literature, and it examines the use of BFRs in Switzerland in the late 1990s. Based on the import into Switzerland of semi-finished and finished products treated with flame retardants, their storage by man was determined. In addition, the annual flows through export, waste management, and emissions into the environment were estimated.

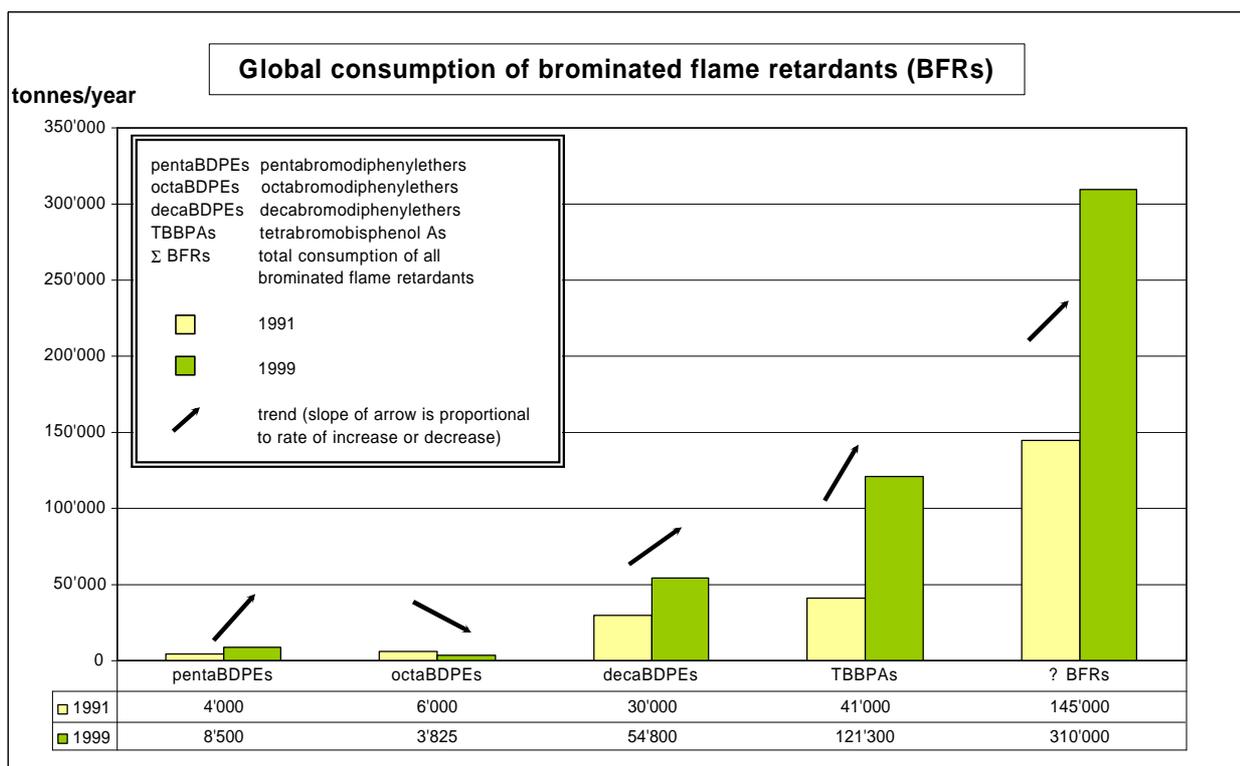


Figure 1: Comparison between the global consumption of different BFRs (sources: TBBPAs 1991 [OECD, 1994], PBDEs 1991 [IPCS 1994b], TBBPAs + PBDEs 1999 [Leisewitz & Schwarz, 2000], Total BFRs: values from 1990 and 2000 [Arias, 2001]).

In the 1990s, about two thirds of world demand for BFRs was met by the four groups of substances examined here. In recent decades, the demand has risen sharply as a result of the increased use of plastics, and stricter fire protection regulations. Between 1991 and 1999, global consumption of the BFRs examined here rose from 100,000 tonnes per year to 190,000 tonnes per year, and further annual increases of 5 to 7 percent are expected until the year 2005. If the data are broken down in detail, it can be seen that consumption of octaBDPEs decreased strongly during the 1990s, whereas that of pentaBDPEs, decaBDPEs and TBBPAs rose sharply (see Figure 1).

## Results

About 1,700 tonnes of the four BFRs studied come into Switzerland annually, in semi-finished and finished products. About 46 percent of this is re-exported in finished products, and the remainder is consumed in Switzerland (trade in products). The main entries for consumption within Switzerland are for pentaBDPEs: motor vehicles (upholstery materials, textiles), for octaBDPEs: electrical and electronic appliances (EE appliances) and motor vehicles, for decaBDPEs: EE appliances, EDP and office appliances, motor vehicles and building materials (PE sheets) and for TBBPAs: EE appliances (computers).

Over the past twenty years, the consumption of flame-protected products in Switzerland has given rise to the accumulation of about 12,000 tonnes of the BFRs studied here. Currently, the stores of pentaBDPEs and octaBDPEs are being reduced, whereas the amount of stored TBBPAs is increasing, and that of decaBDPEs is virtually stable.

Each year, approximately 900 tonnes of BFRs leave storage to be consumed. Nearly all of this quantity is disposed of as solid waste. The BFRs in solid waste are mainly disposed of by thermal treatment in controlled incineration processes (65 to 85 percent, depending which BFR, except for pentaBDPEs, where the figure is 23 percent), and they are almost completely destroyed in this way. In addition to storage during consumption, over recent decades, a ten fold lesser storage of 1,500 tonnes of BFRs has accumulated in Swiss landfill sites. This store increases by about 130 tonnes per year. If managed inappropriately, this could represent a potential future danger for man and the environment. At present, it is only possible to make rough estimates of flows into the environment from consumption and from waste management, in the absence of current measurements for Switzerland.

## PentaBDPEs

In the late 1990s, the quantities of products treated with pentaBDPE flame retardants imported into Switzerland were low compared with figures for other flame retardants. About 1.9 tonnes of pentaBDPEs are imported into Switzerland annually in finished products, and of this, about 1.5 tonnes per year are consumed. The majority of pentaBDPE-treated consumer goods are upholstery materials, textiles and plastics for motor vehicles. The amounts of pentaBDPEs are about ten to one thousand fold lower than for the other BFRs.

Over the past two decades, as a result of the various uses of pentaBDPEs, about 500 tonnes have accumulated during consumption, and 91 percent of this consists of construction materials. This store is currently decreasing by about 30 tonnes per year. If this trend continues over the next few years, then in 7 to 10 years time, the amount stored in waste management will represent the most important man-made store, of about 280 tonnes.

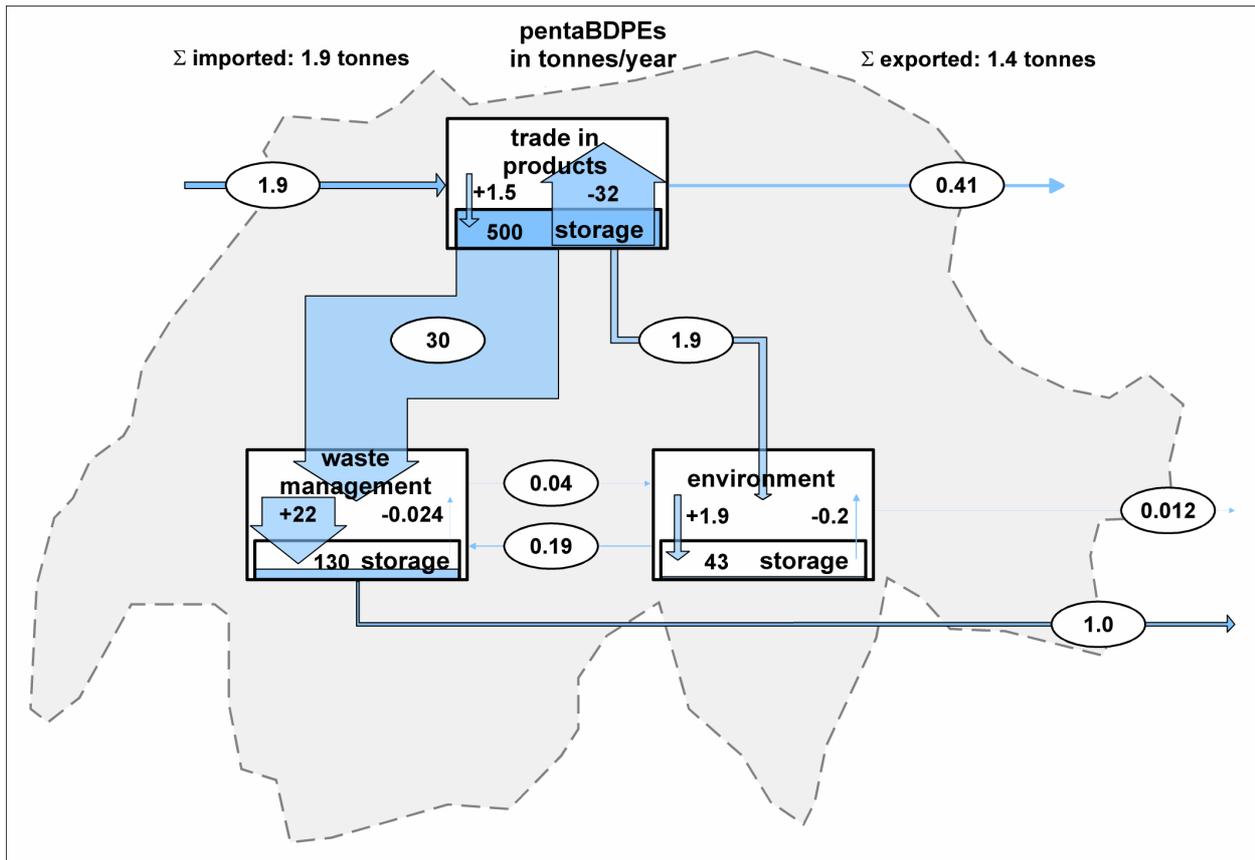


Figure 2: Flows of pentaBDPEs in Switzerland, late 1990s

At present, about 30 tonnes of pentaBDPEs per year are treated as waste, most of which (72 percent) goes to landfill sites, and about 20 percent of which is destroyed by incineration. A small remainder (1 tonne per year, 3 percent) is exported.

Every year, about 1.9 tonnes diffuses from its storage in consumption, and almost all of this gets into the pedosphere and lithosphere. Annual diffusion of penta BDPEs is considerably greater than that for octaBDPEs and TBBPAs.

### OctaBDPEs

About 41 tonnes of octaBDPEs are imported into Switzerland annually as flame retardants in products, and about 22 tonnes of this is consumed, whereas the remainder is exported. About 67 percent of the octaBDPE is in EE appliances, and about 33 percent in motor vehicles.

Over the past two decades, about 680 tonnes of octaBDPEs have accumulated during consumption, comprising 69 percent EE appliances, 21 percent motor vehicles and 10 percent construction materials. This store is currently being reduced by about 40 tonnes per year. If this trend continues over the next few years, in about 13 to 18 years time, the largest man-made store (about 160 tonnes) will be in as waste.

Waste from consumption contains about 62 tonnes of octaBDPEs per year, almost all of which (87 percent) is destroyed in incineration plant, with 10 percent stored in landfill sites. The remainder (about 3 percent) is exported.

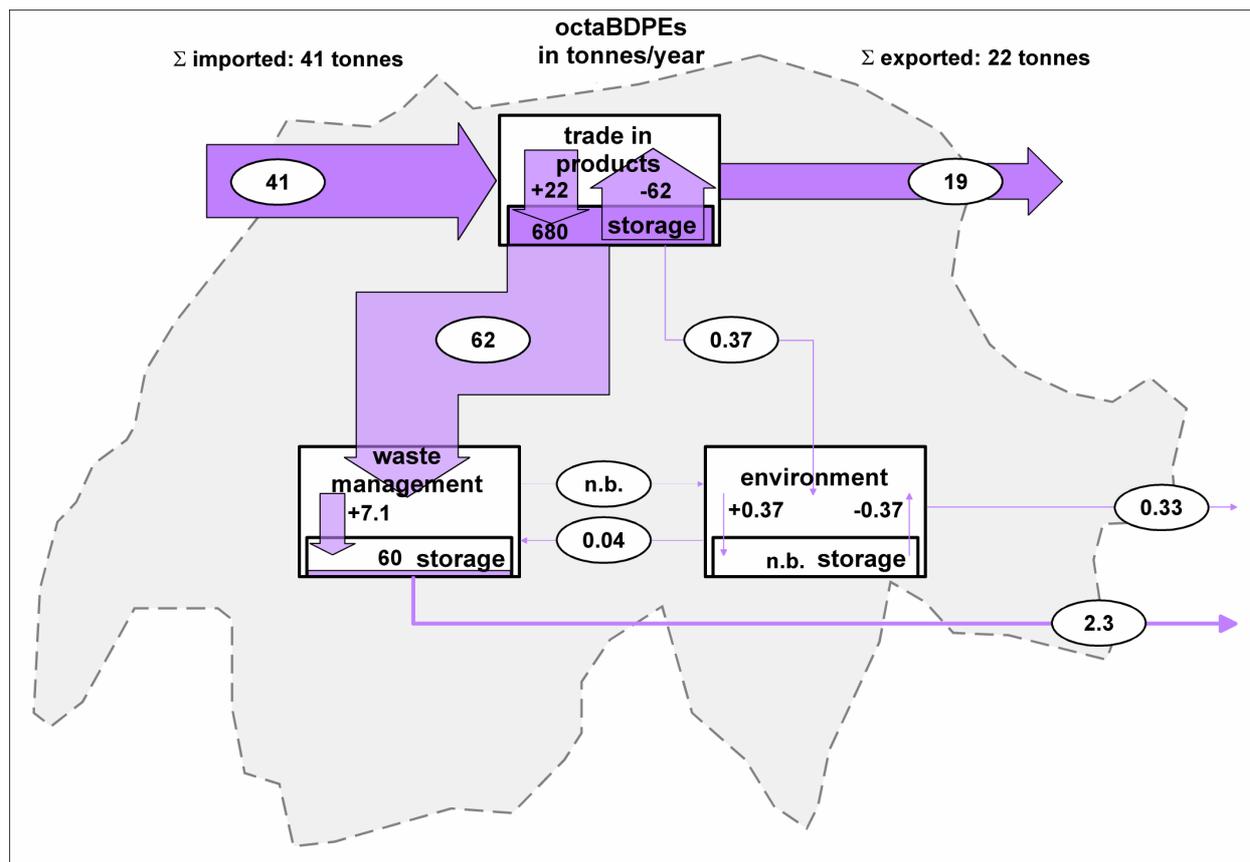


Figure 3: Flows of octaBDPEs in Switzerland, late 1990s

About 0.4 tonnes per year of octaBDPEs diffuse from storage in consumption and are almost entirely deposited in the pedosphere and lithosphere.

### DecaBDPEs

In the late 1990s, 550 tonnes of decaDBPE flame retardants were imported into Switzerland annually in semi-finished and finished products. Of this, about 320 tonnes per year were consumed and the remainder was re-exported. About 45 percent of decaBDPEs consumed in Switzerland are in EE appliances (EDP and office equipment), about 30 percent is in imported motor vehicles, and about 25 percent in construction materials (PE sheets).

The storage of decaBDPEs in consumed products amounts to approximately 5,600 tonnes, and is approximately in a steady state. This means that approximately the same amounts of decaBDPEs are consumed as are disposed of as waste. Of the approximately 370 tonnes per year of decaBDPEs in waste, the great majority (about 80 percent) is destroyed in incineration plant. About 9 percent is exported, and about 13 percent is disposed of in landfill sites. If this situation continues, then in the next 20 years, storage in consumption will remain the largest store, in comparison with storage in landfill sites and in the environment.

Stores of decaBDPEs in consumption comprise 40 percent in EE appliances and 30 percent in construction materials and motor vehicles. About 2.1 tonnes of decaBDPEs diffuse from this store annually, and are then deposited almost entirely in the pedosphere and lithosphere.

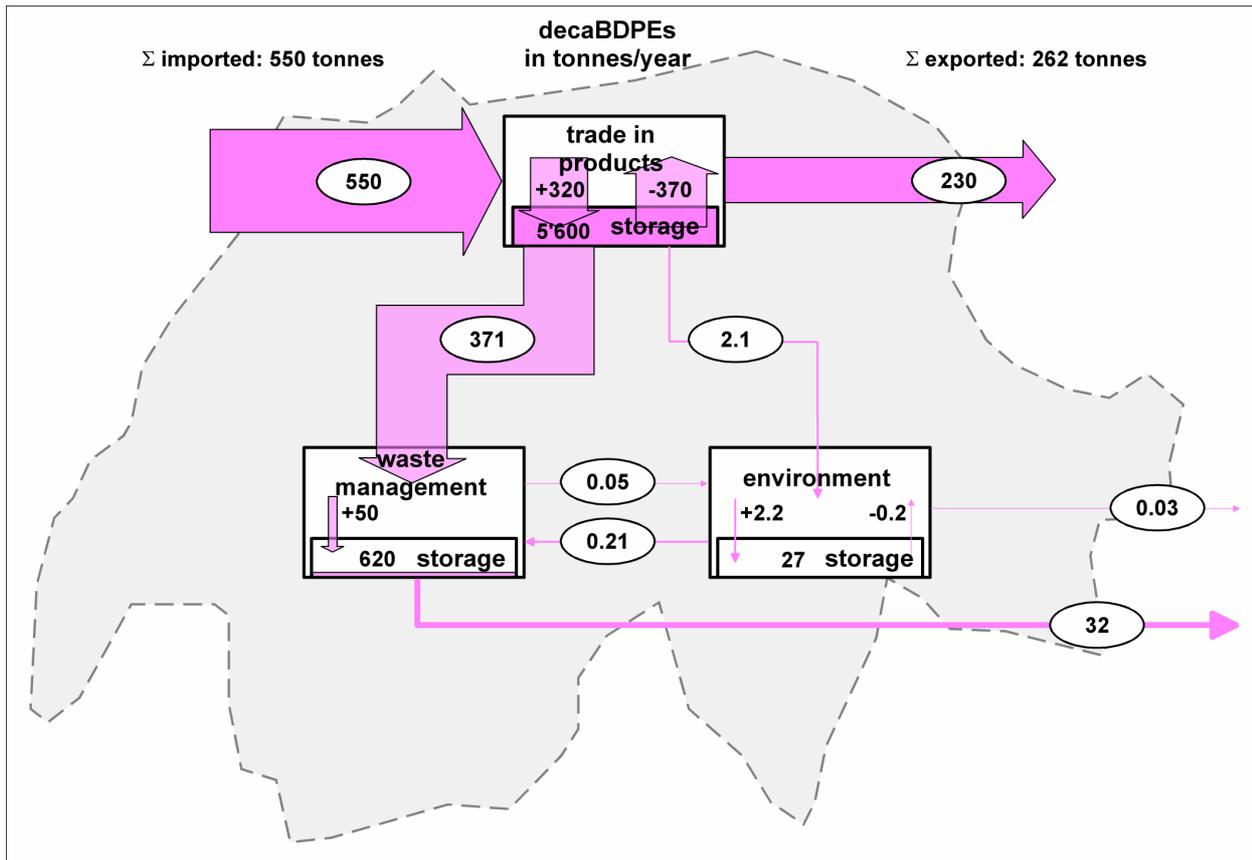


Figure 4: Flows of decaBDPEs in Switzerland, late 1990s

It is worth noting that, despite the relatively large amounts of decaBDPEs stored, similar amounts diffuse into the environment as for pentaBDPEs.

### TBBPAs

In the late 1990s, 1,130 tonnes of TBBPA flame retardants were imported into Switzerland annually as semi-finished and finished products. About 570 tonnes of this were consumed annually, and the remainder was re-exported. Almost all the TBBPAs consumed are in EE appliances, with about 83 percent in computers, and about 11 percent in consumer electronic equipment. The amounts of TBBPAs traded and consumed are greater than for other BFRs.

The stores of TBBPAs in consumer products come to about 5,600 tonnes, and consist predominantly (59 percent) of EE appliances and to a lesser extent (20 percent each) of construction materials and motor vehicles. Although the amount of TBBPAs consumed annually is about double that for decaBDPEs, the amount of each stored is similar. This is a result of the fact that most products containing TBBPAs have a shorter life than products containing decaBDPEs.

Storage in consumption is currently increasing by about 180 tonnes per year. If this trend continues over the next few years, then over the next 20 years the store in consumption will remain greater than that in landfill sites and in the environment.

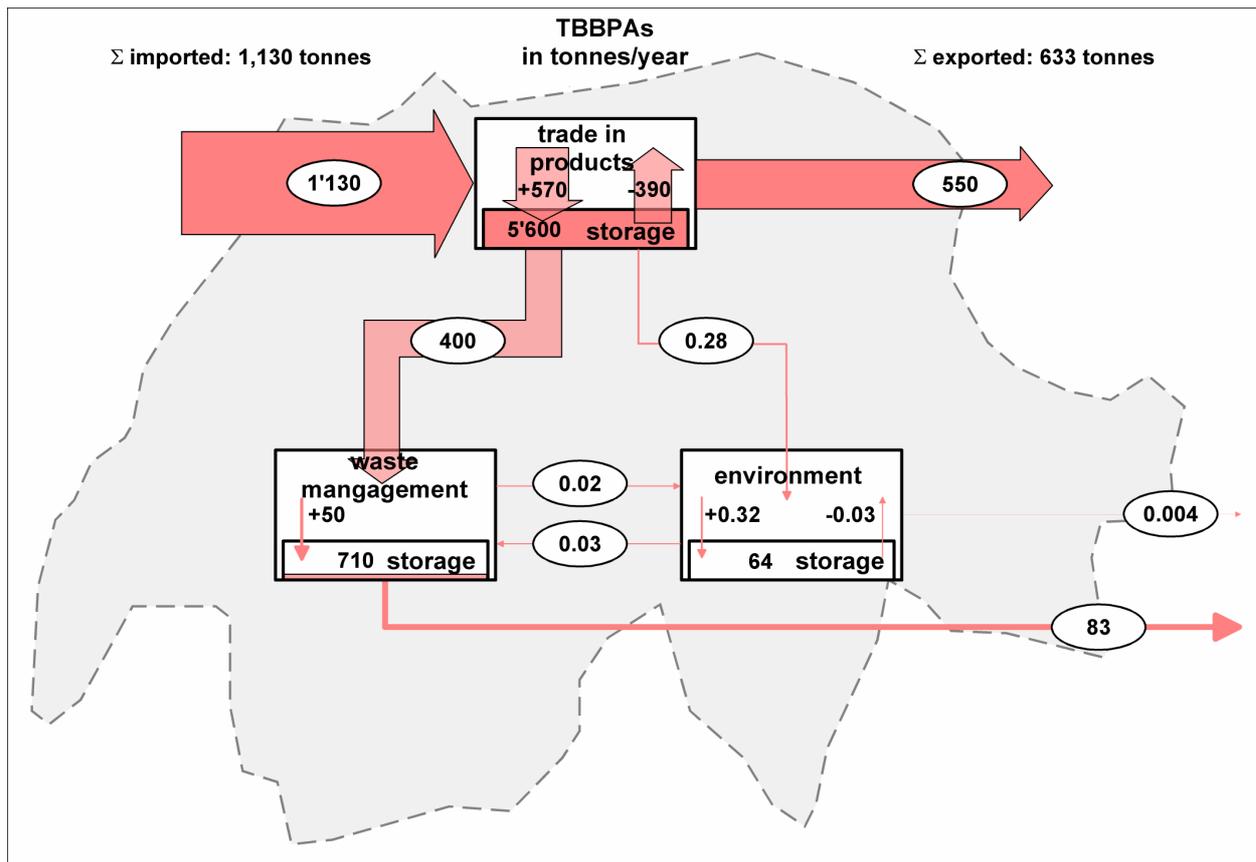


Figure 5: Flows of TBBPAs in Switzerland, late 1990s

Waste from consumption contains about 400 tonnes of TBBPAs per year. Of this, about 68 percent is destroyed in incineration plant, about 11 percent is disposed of in landfill sites, and about 21 percent is exported.

Approximately 0.3 tonnes of TBBPAs per year diffuse from storage in consumption into the environment, and this is virtually entirely deposited in the pedosphere and lithosphere. Despite the fact that there is greater storage of TBBPAs than of the other BFRs studied, this is the lowest diffuse emission.

## Conclusions

- The majority of companies have insufficient information about the material composition of products that they put on the market. To ensure a precautionary approach to environmental protection, companies have to be aware of the environmental and health potential of the products that they put on the market. At present, this is too often not the case. The use of materials flow charts gives the possibility of optimising company structures.
- At present, only a small amount of information is available about the global distribution of BFRs. At the global level, the routes by which products transit, and the relevant material flows, have to be followed up through the producer. The long-term objective is that information on material flows for critical substances either be provided with the product, or at least that such information be made available.

- The size and composition of man-made stores is not known sufficiently accurately. The dynamics of these stores have to be assessed and modelled. It is only then that it will be possible to manage these stores actively, to assess diffuse emissions and to predict future flows as waste. It is only in this way that the flow to landfill sites, and thereby any diffuse emissions from landfill can be minimised, and that appropriate corrective plans can be developed.
- There are considerable flows from consumption to processes of waste management. At present, our knowledge of the quantities emitted from waste management processes is scant (in the case of incineration) or none (in the case of recycling, landfill, and unchecked disposal). However, this knowledge is a basic prerequisite for ensuring optimum management in the phases of waste disposal and recycling. Therefore, it is essential that measurements be done during the most important phases of waste management (in municipal waste incineration plants, at landfill sites, during recycling and at waste water treatment plant).

# 1 Ausgangslage in der OECD

Im Jahre 1990 wurde von der OECD Ratsversammlung eine Entscheidungs- Empfehlung über die zusammenarbeitende Untersuchung und Risiko-Reduktion von im Handel stehenden Chemikalien übernommen. Als eine von fünf spezifischen Chemikalien (oder Gruppe von Chemikalien) wurden von den OECD Mitgliedstaaten in einem Pilotprojekt bromierte Flammschutzmittel gewählt.

Die Schweiz leitet zusammen mit den Ländern Holland, Schweden und Grossbritannien die Koordinationsstelle für die Untersuchungen bezüglich dieser Stoffgruppe. Diese vier Länder begannen 1993 mit der Sammlung von Daten als Basis für den 1994 erschienenen Band „Risk Reduction Monograph No. 3, Selected brominated flame retardants – Background and national experience with reduction risk“ der OECD.

Die Industrie verpflichtete sich 1995 freiwillig zu verschiedenen Massnahmen bezüglich einer Reihe der im OECD-Risiko-Reduktionsprogramm enthaltenen Substanzen PentaBDPE, OctaBDPE, DecaBDPE, TBBPA (VIC; voluntary industry commitment). Die im Rahmen dieser Verpflichtung von der Industrie gelieferten Daten werden von den koordinierenden vier Ländern aufbereitet und regelmässig in internationalen Konferenzen diskutiert.

Ein erster Bericht der Industrie erschien 1998 und wurde von den koordinierenden Ländern evaluiert. Es fand ein Treffen der Arbeitsgruppe zusammen mit den Vertretern der koordinierenden Länder statt, an dem die Forderungen nach Verbesserungen laut wurden. Es wurde beschlossen, dass bis im Jahr 2000 ein zweiter Report vorgelegt werden soll.

Der zweite Report, datiert vom 13.12.1999, wurde vom 8. bis 11. Februar 2000 bei einem Treffen der Arbeitsgruppe zusammen mit den Vertretern der koordinierenden Länder in Paris diskutiert. An dieser Sitzung in Paris wurde vereinbart, dass die Koordinationsstelle unter der Leitung der Schweiz bis zum nächsten Meeting im Februar 2002 Empfehlungen abgebe, ob (1) Massnahmen im Umgang mit den gewählten bromierten Flammschutzmitteln nötig seien und falls ja, (2) ob konkrete Massnahmen vorzuschlagen seien. Als Basis dienen die verfügbaren Daten der Industrie, sowie die zusätzlich auf nationaler Ebene verfügbaren Daten.

Um diesen Auftrag bis zum Beginn des Jahres 2002 erfüllen zu können, entschied das BUWAL, eine Stoffflussanalyse für ausgewählte bromierte Flammschutzmittel in der Schweiz in Auftrag zu geben.



## 2 Zielsetzung und Fragestellungen

Das Ziel dieser Studie ist die Erstellung einer Stoffflussanalyse für vier gewählte Vertreter bromierter Flammschutzmittel (Pentabromdiphenylether [PentaBDPE], Octabromdiphenylether [OctaBDPE], Decabromdiphenylether [DecaBDPE] und Tetrabrombisphenol A [TBBPA]), als Grundlage für die Ableitung von Handlungsempfehlungen.

Es sollen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

- Welches sind in der Schweiz die wichtigsten Güter, Prozesse und Lager in Bezug auf die untersuchten bromierten Flammschutzmittel, und wie gross sind die sich daraus ergebenden Güter-, Stoffflüsse und Lager?
- Gibt es Datenlücken im untersuchten Stoffhaushalt? Welche Lücken müssen geschlossen werden?
- Wie gross sind die Unsicherheiten der für das System sensiblen Daten?



## 3 Grundlagen

### 3.1 Brom

Brom (von griechisch bromos = Gestank) ist ein nichtmetallisches chemisches Element aus der VII. Hauptgruppe des Periodensystems (Halogene). Seine wichtigsten Eigenschaften sind: Ordnungszahl 35, relative Atommasse 79.916; bei Normaltemperatur dunkelrotbraune Flüssigkeit, Schmelzpunkt  $-7.2^{\circ}\text{C}$ , Siedepunkt  $58.78^{\circ}\text{C}$ , Dichte  $3.12\text{ g/cm}^3$ . Es kommt in der Natur nur in Form einwertiger Verbindungen vor (Bromide). Brom ist Ausgangsprodukt für eine grosse Anzahl organischer Synthesen (Farbstoffe, Arzneimittel, Lösungsmittel u. a.). Silberbromid spielt in der Photo-Industrie eine wichtige Rolle. Als Additiv zu Antiklopfmitteln in Treibstoffen wird Äthylendibromid verwendet. Die Verwendung des Broms ist ebenso wie sein chemisches Verhalten vergleichbar mit der des Chlors.

Von etwa 0.5 Mio. t jährlicher Bromproduktion (70 % davon in den USA und in Israel) werden etwa ein Drittel bis die Hälfte für die Flammenschutzmittelproduktion eingesetzt. Der Grossteil der bromierten Flammenschutzmittel stammt aus den USA und Israel [Danish EPA, 1999]. In Europa werden bromierte FS in Belgien, Frankreich, Deutschland und Grossbritannien produziert [UN, 2000].

### 3.2 Flammenschutzmittel (FS)

#### 3.2.1 Wirkungsweise von Flammenschutzmitteln

FS werden gebraucht, um die Entflammbarkeit von Kunststoffergezeugnissen herabzusetzen, so dass sie diesbezügliche Prüfanforderungen der Elektrotechnik, des Fahrzeugbaus und des Bauwesens erfüllen. Die FS werden in die Kunststoffe (Polymere) eingebaut oder den Textilfasern aufgelegt.

Grundsätzlich sind drei verschiedene Wirkungsweisen von FS zu unterscheiden:

Produktion von Radikalen:

FS produzieren bei erhöhten Temperaturen leichtflüchtige und schwach-aktive Radikale. Diese Radikale, z.B. Brom oder Chlor, können die Radikal-Kettenreaktion unterbrechen.

Bildung eines Kohle-Überzuges:

FS bilden bei Erhitzung einen Kohle-Überzug auf der Polymeroberfläche. Dieser Überzug unterbindet weiteren Hitze- und Massetransport und somit eine Reaktion von atmosphärischem Sauerstoff mit dem Polymer.

Verdünnung und Kühlung der Verbrennungsgase:

FS verdampfen bei erhöhter Temperatur, behalten aber eine hohe thermische Kapazität. Auf diese Weise werden die Gase verdünnt und gekühlt.

### 3.2.2 Einsatzgebiete von Flammschutzmitteln

FS werden hauptsächlich in folgenden Bereichen eingesetzt:

- Elektrische und elektronische Geräte (EE-Geräte):  
Elektrische und elektronische Produkte wie Computer, Unterhaltungselektronik, Bürogeräte, Haushaltgeräte und andere, wo Leiterplattenlamine, Kunststoffgehäuse und Kunststoffinnenteile flammgeschützt ausgeführt werden können.
- Verkehrs-/Transportmittel:  
Autos, Eisenbahnen, Flugzeuge und Schiffe, in welchen Textil- und Kunststoffeinrichtungen sowie elektrische Bauteile (Leiterplatten, Kunststoffkleinteile) flammgeschützt ausgeführt werden können.
- Baumaterialien:  
Montageschäume, Dämmstoffplatten, geschäumte Isolationen, Rohre, Wand- und Bodenüberzüge, Kunststofffolien, Harze etc..
- Möbel und Textilien:  
Polstermöbel, Möbelüberzüge, Matratzen, Vorhänge, Teppiche, flexible Schaumstoffe, Schutzkleider.

Die Kunststoffindustrie ist dabei der weitaus grösste Abnehmer von FS. Kleinere Mengen gehen in die Textil- und Papierindustrie [Davenport et al., 1999].

### 3.2.3 Gehalte an Flammschutzmitteln

Der Gehalt an FS in Produkten ist hauptsächlich abhängig vom verwendeten Kunststoff, vom eingesetzten FS selbst und dem geforderten Brandschutz. Der Anteil an FS im Kunststoff kann bei organischen FS bis zu 30 %, bei anorganischen FS sogar bis 80 % betragen. Eine Übersicht über gebräuchliche Mischungen kann dem „Handbook of Plastic Additives“ [Troitzsch, 1993] entnommen werden. Detaillierte Angaben über die in den verschiedensten Produkten eingesetzten FS sind z.B. in einer dänischen [Danish EPA, 1999] und in einer deutschen [Leisewitz & Schwarz, 2000] Studie zu finden. Informationen zu Gehalten von FS in Produkten sind ausführlicher in Kapitel 5.1 erläutert.

### 3.2.4 Verwendete Flammschutzmittelsubstanzen

Es werden mehr als 200 verschiedene Substanzen kommerziell als FS eingesetzt. Sie werden aufgrund ihres Chemismus wie folgt eingeteilt [IPCS, 1997]. Die Wahl der FS ist neben wirtschaftlichen Überlegungen abhängig von der Polymermatrix (Kompatibilität FS-Polymer), den Verarbeitungstemperaturen und dem geforderten Brandschutz.

Tabelle 3-1: Flammschutzmittelgruppen und deren Produktionsanteile [Danish EPA, 1999]

Produktionsanteil weltweit	Flammschutzmittel (FS)
50 %	Anorganische FS
25 %	Halogenierte (bromierte und chlorierte) FS
20 %	Organophosphor FS (können auch Chlor oder Brom enthalten)
5 %	Stickstoff-basierte FS

Zu den halogenierten FS gehören [Danish EPA, 1999]:

- Chlorierte Paraffine
- Aromatische, bromierte FS:
  - TBBPA Tetrabrombisphenol A
  - TBBPA-Derivate
  - PBDEs polybromierte Diphenylether (PentaBDPE, OctaBDPE, DecaBDPE)
  - PBB polybromierte Biphenyle
  - andere
- Aliphatische, bromierte FS (relativ geringer Produktionsanteil)
- Cycloaliphatische, bromierte FS (z.B. HBCD Hexabromcyclododecan)
- Andere bromierte FS

### 3.3 Bromierte Flammschutzmittel (BFS)

#### 3.3.1 Wirkungsweise von bromierten Flammschutzmitteln

Chlor oder Brom enthaltende organische Verbindungen spalten bei Flammeinwirkung Produkte ab, die den Sauerstoffzutritt erschweren und Brandreaktionen chemisch abbremsen (Produktion von Radikalen). BFS (wie auch die Phosphorierten FS) können (auch kombiniert) in Monomere chemisch eingebaut oder in Polymere als Additive eingearbeitet werden. Es wird daher zwischen **reaktiven** und **additiven** BFS unterschieden [Saechtling, 1986].

Diese Unterscheidung ist wesentlich, da additive FS im Gegensatz zu reaktiven FS bedeutend leichter aus dem Kunststoff diffundieren können. Reaktive FS haben keine weichmachenden Effekte und beeinflussen die thermische Stabilität des Polymers nicht. Reaktive FS sind meist teurer als additive FS und ihr Einsatz ist auf bestimmte Polymere beschränkt. Sie werden hauptsächlich in Duroplasten (Polyesterharze, Epoxidharze, Polyurethane, Polycarbonat) verwendet, für die jedoch auch additive FS in Frage kommen.

Da reaktive FS chemisch gebunden werden, sind sie im Endprodukt als Stoff per se nur mehr als Spurenelement vorzufinden. Zwecks Vereinfachung und Übersichtlichkeit wird jedoch in der Stoffflussanalyse der Endprodukte die bei der Produktion eingesetzte Gesamtmenge an FS bilanziert.

#### 3.3.2 Eigenschaften der untersuchten bromierten Flammschutzmittel

Die wichtigsten Eigenschaften der untersuchten BFS sind im „Anhang 3 – Stoffeigenschaften der untersuchten FS“ zusammenfassend dargestellt.

### 3.3.3 Verbrauch an bromierten Flammschutzmitteln

In den letzten Jahrzehnten ist der Verbrauch von BFS durch den Anstieg des Kunststoffverbrauchs und strengerer Brandschutzvorschriften stark gestiegen. Der weltweite Konsum stieg in den Jahren 1992 bis 1995 von 150.000 t/a auf 200.000 t/a; er wird für das Jahr 2000 auf 250.000 t/a prognostiziert [Danish EPA, 1999]. In den nächsten 5 Jahren wird für den gesamten FS-Markt mit einem jährlichen Wachstum von 3.5 bis 4 % gerechnet [Davenport et al., 1999]. Für BFS wird in einer anderen Studie (Roskill, zitiert in [Danish EPA, 1999]) ein jährliches Wachstum von 8 % angegeben. In der Konferenz „BFR 2001“ wurde für BFS jedoch ein Wachstum von etwa 4 % vorhergesagt [Arias, 2001].

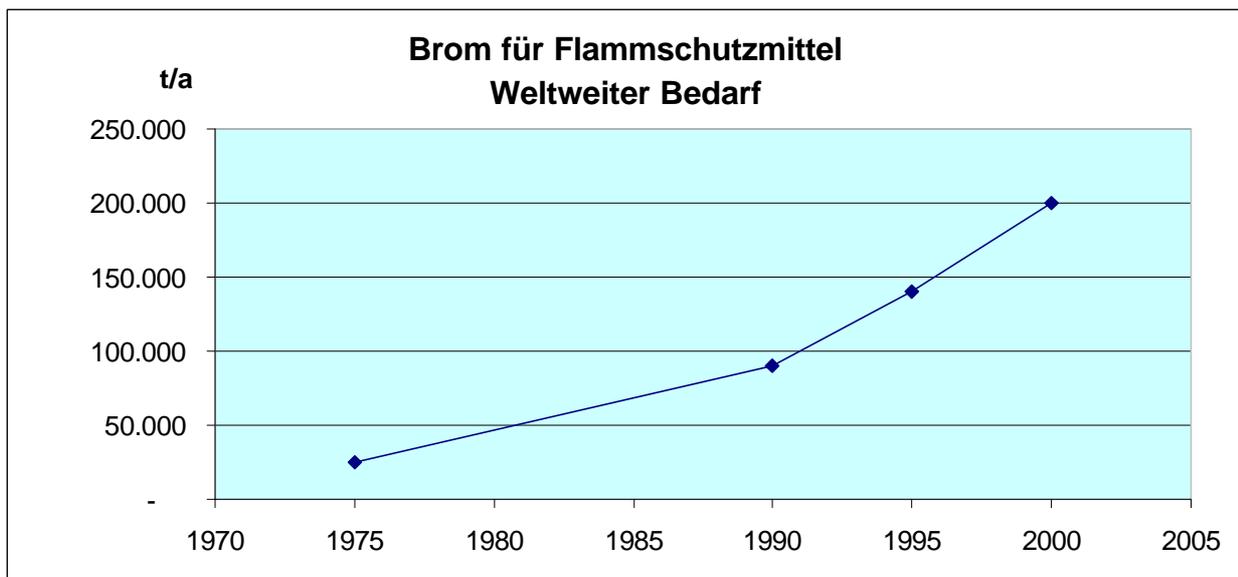


Abbildung 3-1: Weltbedarf Brom für Flammschutzmittelproduktion [Arias, 2001]

Kommerziell werden etwa 40 verschiedene Substanzen eingesetzt. Laut einer Stoffbilanz für Dänemark 1997 machen PBDEs und TBBPA etwa 60 % der bromierten Flammschutzmittel (BFS) in Konsumgütern und etwa 70 % - 80 % der BFS in Siedlungsabfällen aus [Danish EPA, 1999]. Für Japan 1994, wo etwa ein Drittel aller BFS verarbeitet wurden, lag der Anteil von PBDEs und TBBPA bei etwa 77 % aller eingesetzten BFS [IPCS, 1997]. Weltweit gesehen haben PBDEs und TBBPA einen Anteil von etwa  $\frac{2}{3}$  des Weltbedarfs an BFS. Dieser Anteil blieb in den 90er Jahren ungefähr konstant [Arias, 2001].

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden ausschliesslich PBDEs (und davon nur Penta-, Octa-, und DecaBDPE) und TBBPA aus der Gruppe der aromatischen, bromierten FS betrachtet.

Polybromierte Diphenylether (PBDEs) werden in anderen Studien auch als polybromierte Diphenylether (PBDEs), polybromierte biphenylether (PBBEs) oder polybromierte biphenylether (PBBOs) bezeichnet. Die kommerziellen Produkte sind immer ein Gemisch mehrerer polybromierter Diphenylether [Danish EPA, 1999] (siehe Tabelle 4-5).

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die produzierten bzw. verarbeiteten FS-Mengen.

Tabelle 3-2: Überblick über die produzierten bzw. verarbeiteten FS-Mengen

Verbrauch	Quelle	PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA
Erde, 1991	TBBPA [OECD, 1994] (S. 125) PBDEs [IPCS, 1994b] (S. 34)	4.000 t/a	6.000 t/a	30.000 t/a	60.000 t/a
Erde, 1998	Schätzung der weltweiten Produktion von Great Lakes Chemical [Kuhn, 1999]	10.000 t/a konstant	<20.000 t/a starker Rückgang	50.000 t/a Tendenz steigend	>50.000 t/a Tendenz steigend
Erde, 1999	Verkauf laut BSEF [Leisewitz & Schwarz, 2000] <sup>1)</sup>	8.500 t/a	3.825 t/a	54.800 t/a	121.300t/a
Asien, 1999	Verkauf laut BSEF [Leisewitz & Schwarz, 2000]	0 t/a	2.000 t/a	23.000 t/a	85.900 t/a
Amerika, 1999	Verkauf laut BSEF [Leisewitz & Schwarz, 2000]	8.290 t/a	1.375 t/a	24.300 t/a	21.600 t/a
Europa, 1999	Verkauf laut BSEF [Leisewitz & Schwarz, 2000]	210 t/a	450 t/a	7.500 t/a	13.800 t/a
Deutschland	Schätzungen [Leisewitz & Schwarz, 2000]	0 t/a	0 t/a	1.000 t/a	3.800 t/a

1) Siehe auch [Renner, 2000]

Die FS-Absatzmärkte haben aufgrund verschiedener Produktionsschwerpunkte und Umweltstandards unterschiedliche Anteile der vier BFS (PentaBDPE, OctaBDPE, DecaBDPE, TBBPA). So ist in Asien durch die massive Elektronik- und Leiterplattenfertigung der Anteil von hierfür benötigtem TBBPA weit höher (77 %, bezogen auf den Gesamteinsatz der 4 BFS) als in Amerika (39 %).

In Amerika liegt der Anteil der PBDEs an den 4 BFS bei 61 %. In Europa liegt dieser Wert bei 37 % und in Deutschland gar nur bei 21 %. Diese Unterschiede hängen mit regionalen Gewohnheiten, unterschiedlichem Umweltbewusstsein und unterschiedlicher Normung zusammen.

Bei den TV- und Computer-Monitoren gab es in den letzten 10 Jahren in Europa (v.a. Deutschland, Holland, Skandinavien) einen starken Trend weg vom Einsatz von PBDEs. Diese Entwicklung ist unter anderem auf die deutsche Dioxinverordnung, verschiedene Ökolabel, Druck von Konsumenten und auf die Umweltpolitik ansässiger Unternehmen zurückzuführen [Danish EPA, 1999].

### 3.3.4 Einsatz der untersuchten bromierten Flammschutzmittel

PBDEs werden generell additiv eingesetzt, und als Zusatz wird meist Antimontrioxid ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) beigemischt. TBBPA wird zum Grossteil (80 – 90 %) reaktiv eingesetzt und Antimontrioxid wird, wenn überhaupt, nur bei additivem TBBPA-Einsatz hinzugefügt.

#### 3.3.4.1 PentaBDPE

PentaBDPE ist das einzige kommerzielle PBDE in flüssiger Form. Laut einer Risk-Reduction-Studie der OECD [OECD, 1994] sind die häufigsten Anwendungen Gummiartikel (Fließbänder z.B. in Indien oder Grossbritannien, Beschichtungen, Bodenbeläge z.B. in französischen Zügen)

und flexible PUR-Schäume (für Möbel und als Montageschaum). Eine Untersuchung der EU [European Commission, 1996] gibt den Anteil der gesamten jährlichen PentaBDPE-Produktionsmenge Anfang der 90er Jahre, welcher in der Textilbehandlung eingesetzt wird, mit 60 % an.

Die Publikationen von OECD und WHO erwähnen jedoch nicht den Einsatz von PentaBDPE für Leiterplatten, der bis in die frühen 90er Jahre in FR2-Laminaten (Phenolharz) aus Asien üblich war [Danish EPA, 1999]. Analysen von Leiterplatten in Altgeräten belegen jedoch diesen Einsatz [Leisewitz & Schwarz, 2000] <sup>1</sup>.

Im Risk Assessment Report [RA, 2000a] wird als Hauptanwendungsgebiet von PentaBDPE der additive Einsatz als Flammenschutz für flexiblen PUR Schaum für Möbel und Polsterungen angegeben, jedoch wird dort auch darauf hingewiesen, dass nicht alle Anwendungsgebiete quantifiziert werden konnten. Im Environmental Health Criteria EHC 192 [WHO, 1997] werden Textilien und PUR-Schaum als Einsatzgebiete erwähnt.

Die Bromindustrie [BSEF, 1999] nimmt an, dass, durch den stark emissiven Einsatz einer Mischung aus PentaBDPE als hydraulische Flüssigkeit bei Erdölbohrungen und im Bergbau bis vor 1-2 Jahrzehnten, auch heute noch hohe Konzentrationen von PentaBDPE in Umweltmedien nachgewiesen werden können.

### 3.3.4.2 OctaBDPE

Typische Anwendungen sind ABS-, HIPS-, Polyolefine- und Polyamid-Kunststoffe. Haupteinsatzgebiet mit etwa 70 % der jährlich produzierten Menge OctaBDPE sind ABS-Kunststoffe für Gehäuse von TV und ähnlichen Geräten [European Commission, 1996].

### 3.3.4.3 DecaBDPE

Die Einsatzgebiete von DecaBDPE sind sehr vielfältig, da die Substanz in fast allen Kunststoffen (PUR, ungesättigter Polyester, Epoxidharz, PE, PP, PS, PA, Latex, Textilien HIPS, PBT/PET, Polycarbonat, Styrol-Butadien-Kautschuk) einsetzbar ist. Potentielle Einsatzgebiete bei Endprodukten sind Kunststoffgehäuse, elektrische Bauteile aus Kunststoff, Kabel, Textilrückenbeschichtungen aus Latex, Kunststofffolien im Baubereich etc (siehe Tabelle 3-3).

Andere Quellen [IPCS, 1994b, S.71], [European Commission, 1996] geben den Einsatzanteil von DecaBDPE für HIPS-Gehäuse mit 40 % an. Der derzeitige Einsatz von DecaBDPE bei HIPS liegt laut Schätzung des BFS-Produzenten Albemarle [Leisewitz et al., 2000] bei etwa 85 %.

Als Substitutionsstoffe werden vor allem TBBPA sowie andere halogenierte und nicht-halogenierte FS eingesetzt. In Europa wird teilweise auch ganz auf den Einsatz von FS verzichtet. Zur Zeit werden von verschiedenen Produzenten (Siemens, HP) die bromierten FS, insbesondere auch TBBPA, durch Phosphor-basierte FS ersetzt [Renner, 2000].

---

<sup>1</sup> S. 174: Untersuchung der Universität Hannover 1997

Tabelle 3-3: Einsatzgebiete von DecaBDPE [OECD, 1994]

Anteil am Weltmarkt	Kunststoff	Produkte
30%	Polystyrol (HIPS)	Formteile, Paneele, Konsolen, Gehäuse, TV
20%	Terephthalat (PBT, PET)	Formteile, Stecker, Schalter, elektrische Geräte
15%	Polyamid (PA)	Spritzgussteile, Schutzkontakte, Spulen, elektrische Bauteile
10%	Styrol-Kunststoff (SBR)	Latex, Teppichverstärkung, Einrichtung
5%	Polycarbonat (PC)	Formteile, Paneele, Konsolen, Gehäuse, Computer, Flugzeuge
5%	PP	Spritzgussteile, TV, Kondensatoren, elektronische Bauteile
15%	Others: Azetat-Copolymer (EVA), ungesättigtes Polyesterharz (UPE)	EVA: Extrusion, Beschichtung, Kabel, Elektrizitätsverteilung UPE: Formteile, Paneele, Konsolen, elektrische Geräte

### 3.3.4.4 TBBPA

TBBPA ist global gesehen das massenmäßig wichtigste BFS in Bezug auf Produktion und Verbrauch. Dieses Flammenschutzmittel wird, je nach Anwendung, reaktiv (90 % der Anwendungen [Danish EPA, 1999] bzw. 80 - 85 % der Anwendungen [Leisewitz & Schwarz, 2000] oder additiv dem Kunststoff beigemischt. Typische additive Anwendungen sind ABS- und HIPS-Kunststoffe, wo meist Antimontrioxid als Zusatzstoff verwendet wird. Typische reaktive Anwendungen sind Epoxidharz, ungesättigter Polyester und Polycarbonat.

Tabelle 3-4: Einsatzgebiete von TBBPA [Leisewitz et al., 2000]

Anteil am Weltmarkt	Kunststoff	Produkte
70%	Epoxidharz	Leiterplatten (FR2- und FR4-Lamine)
15%	Polystyrol (HIPS)	Gehäuse
10%	-	Weiterverarbeitung zu TBBPA Derivaten
5%	ABS, Terephthalate (PBT, PET), etc	Diverse

## 3.4 Umweltrelevanz der untersuchten Flammenschutzmittel

Bromierte Flammenschutzmittel (BFS) sind synthetische Substanzen, die in der Natur bis auf wenige geringfügige Ausnahmen in Meeresschwämmen und Seegrass [BSEF, 2000] nicht natürlich gebildet werden. Sie belasten die Umwelt auf mehrere Arten:

- **Öko- und Humantoxizität:** Die akute Toxizität von PBDEs und TBBPA ist sehr niedrig (siehe weiter unten). Derivate von PBDEs und TBBPA greifen laut EU-Forschungsprojekt „RENCO“ NL, GB, S [Kuhn, 2000] aktiv in den Hormonhaushalt des Schilddrüsenhormons Thyroxin sowie der Sexualhormone ein (siehe auch [SEPA, 1998], [de Wit, 2000] und [Meerts et al., 2000]).

- Persistenz und Bioakkumulation:** Aufgrund der hohen Lipophilie und der Persistenz von PBDEs können diese Substanzen in verschiedensten Organismen und Sedimenten nachgewiesen werden [Allchin, et al., 1999]. Diese Eigenschaft einiger BFS bewirkt eine Anreicherung in Umweltmedien (z.B. in Flusssedimenten, Fettgeweben von Meerestieren) und eine mögliche Gefährdung speziell der höheren Stufen der Nahrungskette. Nach einer Untersuchung des schwedischen Karolinska-Instituts verdoppelten sich zwischen 1972 und 1997 die Konzentrationen von Tetra-, Penta-, und HexaBDPE in der Muttermilch alle 5 Jahre, wobei durch den Fischkonsum besonders nordische Völker davon betroffen sind. In den Jahren 1998 bis 2000 konnte bei Tetra- und PentaBDPE jeweils ein Rückgang von etwa 30 % festgestellt werden. Diese Abnahme ist möglicherweise auf das aus dem Verkehr ziehen von PBDEs in Schweden und der Abnahme der Produktion und Verarbeitung von PBDEs in Europa zurückzuführen [Guvenius & Norén, 2001]. Bei polaren Völkern werden schwer abbaubare organische Substanzen in 10- bis 20-fach höheren Konzentrationen gefunden als in Industrieländern [Grote, 1999]. BFS, die kommerziell nicht mehr produziert werden, können aufgrund deren Persistenz dennoch auf lange Zeit hinaus weiterhin die Umwelt belasten.
- Abbauprodukte:** In Umweltmedien können unter anderem durch UV-Einstrahlung höher bromierte Diphenylether (z.B. DecaBDPE) in niedrigerbromierte Diphenylether (Nona- bis HexaBDPE) und bromierte Dibenzofurane abgebaut werden [Tysklind et al., 2001], [IPCS, 1994b], [Renner, 2000], [Kierkegaard, Balk et al., 1999]. Von den PBDEs werden in der Umwelt vor allem die Tetra- und Penta-Congener<sup>1</sup> gefunden, obwohl das am meisten eingesetzte Congener das DecaBDPE ist. TBBPA kann im Boden und in der Hydrosphäre unter aeroben und anaeroben Bedingungen teilweise abgebaut werden [IPCS, 1995], jedoch wird in der vorliegenden Literatur nicht angegeben, welche Substanzen entstehen können. Diese chemischen Abbauprozesse (Debromierung) sind in der Literatur noch nicht ausreichend behandelt, um quantitative Rückschlüsse zu bilden.
- Bildung von Dioxinen und Furanen:** Wenn BFS erhitzt werden (z.B. für DecaBDPE 300° - 800°) können bromierte Dioxine und Furane (PBDD+PBDF) entstehen. Wenn hierbei auch chlorhaltige Substanzen vorhanden sind, können chlorierte Dioxine und Furane entstehen (PCDD+PCDF). Eine sorgfältig kontrollierte Verbrennung (z.B. in KVA's ausgerüstet nach westeuropäischem Standard) führt jedoch nicht zu signifikanten Emissionen von bromierten Dioxinen und Furanen [OECD, 1994]. Die Bildung von PBDD+PBDF bei der Produktion von BFS und der Umformung flammgeschützter Kunststoffe konnte nachgewiesen werden [IPCS, 1997]. Über die Bildung von Furanen während der Nutzung liegen keine Studien vor.
- Gefährliche Zusatzstoffe (Synergisten):** In Kombination zu BFS wird häufig Antimontrioxid ( $Sb_2O_3$ ) eingesetzt, um die Brandschutzwirkung zu verstärken. Das Verhältnis von im Kunststoff eingesetzten Konzentrationen von  $Sb_2O_3$  und BFS beträgt typischerweise 1:2 bis 1:4. Alternative FS benötigen kein Antimontrioxid. Antimon fördert durch Katalysatorwirkung die Bildung von Dioxinen und Furanen bei der Verbrennung. Antimontrioxid ist in Deutschland als „eindeutig krebserzeugender Arbeitsstoff“ eingestuft [Borms, 1993, zitiert in Frey, 1999]. ( $Sb_2O_3$ -Gehalte in Kunststoffen siehe [OECD, 1994] S.35)

Unter dem „International Programme on Chemical Safety“ (IPCS) der WHO wurden Environmental-Health-Criteria Studien über BFS verfasst [IPCS, 1994a; IPCS, 1994b; IPCS, 1995; IPCS, 1997; IPCS, 1998]. Aufgrund der fehlenden Information über Langzeitwirkungen und der

<sup>1</sup> Congenere sind gleichartige chemische Substanzen.

Persistenz und Bioakkumulation von BFS geben die Studien die Empfehlung ab, einige Substanzen nicht mehr kommerziell zu verwenden, wenn passende alternative FS eingesetzt werden können. Weiter soll in Zukunft die Entwicklung von neuen alternativen FS unterstützt werden.

**Die Umweltrelevanz der einzelnen in dieser Studie untersuchten Stoffe kann wie folgt zusammengefasst werden:**

**PentaBDPE** [IPCS, 1994b]

Pentabromdiphenylether ist persistent und reichert sich in Biota (Bioakkumulation) an. Aufgrund des sehr hohen BCF (Biotenkonzentrationsfaktor) und der Persistenz der Substanz besteht eine hohe Gefährdung für Mensch und Umwelt. Verdacht auf östrogene Wirkung. Die akute Toxizität ist sehr gering. Information über Langzeitwirkung und Krebsrisiko ist nicht vorhanden.

**OctaBDPE** [IPCS, 1994b]

Octabromdiphenylether ist persistent und reichert sich im Boden und in Sedimenten an. Aufgrund des hohen Molekulargewichts ist eine Bioakkumulation, ausser für niedrigbromierte Komponenten (etwa 10 % OctaBDPE-Anteil), unwahrscheinlich. Die akute Toxizität ist sehr gering. Information über Langzeitwirkung und Krebsrisiko ist nicht vorhanden. OctaBDPE wird immer zusammen mit Antimontrioxid ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ ) eingesetzt. Es gibt Hinweise für einen Abbau zu niedrig bromierten, problematischen Congeneren wie PentaBDPE.

**DecaBDPE** [IPCS, 1994b], [Leisewitz et al., 2001] und [Kruse et al., 2001]

DecaBDE ist akut nicht toxisch. Zur Langzeit-Toxizität gibt es wenig publizierte Daten<sup>1</sup>. In Tierversuchen wurde neurotoxische Wirkung auf Neugeborene nachgewiesen [Viberg et al., 2001]. Decabromdiphenylether ist persistent und reichert sich im Boden und in Sedimenten an. Aufgrund des hohen Molekulargewichts ist eine Bioakkumulation unwahrscheinlich. Die Absorption von DecaBDE im Verdauungstrakt ist minimal. Da die akute Toxizität sehr gering ist, kann das Risiko der Bevölkerung durch derzeitige DecaBDE-Konzentrationen als minimal angesehen werden. Es bestehen Hinweise auf karzerogenes Potential aus arbeitsmedizinischen und tierexperimentellen Untersuchungen. Bei thermischen Prozessen und beim Recycling werden erhebliche Mengen an bromierten Furanen gebildet. Es gibt Hinweise für einen Abbau zu niedrig bromierten, problematischen PBDEs wie PentaBDE.

**TBBPA** [IPCS, 1995], [Leisewitz et al., 2001] und [Kruse et al., 2001]

Beim Einsatz als reaktives Flammenschutzmittel besteht geringe Gefahr der Freisetzung der Substanz. Der Einsatz als additives Flammenschutzmittel führt zum Eintrag in Umweltmedien und Nahrungsketten. TBBPA ist persistent. Es gibt Hinweise, dass Tetrabrombisphenol A bioakkumulativ und stark toxisch für Fische, Algen und Daphnien ist. Es reichert sich im Boden und in Sedimenten an. Bioakkumulation ist wahrscheinlich. In der Biota konnte TBBPA trotz hohem Bioakkumulationsfaktor normalerweise nicht nachgewiesen werden, da die Ausscheidung sehr schnell erfolgt. Die Absorption von TBBPA im Verdauungstrakt ist minimal. Da die akute Human-Toxizität (keine Hinweise auf Tertogenität, Mutagenität im Tierexperiment) sehr gering ist, kann das Risiko der Bevölkerung durch derzeitige TBBPA-Konzentrationen als minimal angesehen werden. TBBPA ist hoch toxisch für Wasserorganismen. Es fehlt die Karzerogenitätsprü-

---

<sup>1</sup> Es existieren Daten aus einer 2 jährigen Langzeitfütterungsstudie an Mäusen (1986 vom U.S. National Toxicology Program - NTP publiziert und in einer WHO-Studie [IPCS, 1994b] detailliert beschrieben). Ausser umstrittenen Effekten auf die Leber konnten damals keine nennenswerte Effekte festgestellt werden.

fung. Aufgrund des relativ hohen Dampfdrucks kann es bei additiv eingesetztem TBBPA potentiell signifikante Evaporation geben.

### **Empfehlungen, freiwillige Verpflichtungen und Regelungen:**

Toxizitätsstudien, die von der WHO im Rahmen des IPCS (international program on chemical safety) durchgeführt wurden, empfehlen, kommerziellen PentaBDPE-Flammschutz nicht mehr zu verwenden [IPCS, 1994b], [OECD, 1994].

Die Industrie gab 1995 im Rahmen des OECD Risk-Reduction-Programms folgende freiwillige Verpflichtung (VIC; voluntary industry commitment) bekannt [OECD, 1995a]:

- Verzicht auf Produktion und auf Verkauf von PBB (Ausnahme: Elf Atochem (F) produziert PBB noch bis Ende 2000).
- Verzicht auf Produktion und auf Verkauf von neuen PBDEs.
- Minimierung der Emissionen bei der Produktion von PentaBDPE.
- Reinheit von DecaBDPE > 97 %.
- Minimierung von niedrigbromierten Substanzen in OctaBDPE.
- Minimierung von Einträgen in die Umwelt aus dem Produktionsprozess.
- Minimierung der Belastung der Beschäftigten im Produktionsprozess.
- Bereitstellung von Daten.

Japanische Hersteller einigten sich freiwillig auf eine Einstellung der Produktion und Einfuhr von PentaBDPE [OECD, 1995b].

Im Rahmen des EU-Risk-Assessments werden derzeit folgende Substanzen hinsichtlich ihrer Toxizität untersucht: DecaDPE, OctaDBPE, PentaDBPE, TetraDBPE, HBCD, Chlorierte Paraffine. Der Bericht für PentaDBPE ist abgeschlossen [RA, 2000a], für DecaDPE und OctaDBPE lagen zu Redaktionsschluss (Nov 2001) lediglich Draft-Reports vor.

Im Januar des Jahres 2001 wurde der Europäischen Kommission ein Entwurf für eine Richtlinie [Draft Directive 2001/0018(COD), 2001] vorgelegt, welche das Inverkehrbringen von PentaBDPE unterbinden will.

Das „National Chemicals Inspectorate“ (KEMI) in Schweden empfiehlt, PBB, PentaBDPE, OctaBDPE und DecaBDPE nicht mehr zu produzieren [KEMI, 1999].

In Europa wurde aufgrund freiwilliger Verpflichtungen PBB fast vollständig und PBDEs vielfach durch TBBPA und andere FS ersetzt. Jedoch sind alternative FS (z.B. auf Phosphorbasis) für Gehäusekunststoffe kostenintensiver als BFS [Kuhn, 2000].

In Deutschland wurde 1986 von VKE (Verband der kunststofferzeugenden Industrie) und TEGEWA (Verband der Textilhilfsmittel-, Lederhilfsmittel-, Gerbstoff- und Waschrohstoff-Industrie) eine freiwillige Verzichtserklärung des Einsatzes von PBDEs ausgesprochen, die zu einer ausgeprägten Verbrauchsminderung führte.

## 4 Methodisches Vorgehen

### 4.1 Verwendete Methode

Der vorliegende Bericht orientiert sich an der Anleitung „Stoffflussanalyse Schweiz“ [BUWAL, 1996]. Nachdem die Stoffflüsse in Teilsystemen bestimmt wurden, erfolgte deren Zusammenfassung im Gesamtsystem.

Im Einzelnen wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Anwendungsbereiche/Vorkommen in den verschiedenen Prozessen wurden ermittelt
- Produkte/Produktgruppen wurden identifiziert
- Strukturierung des Systems wurde vorgenommen
- Bilanzierung im Teilsystem wurde durchgeführt
- Aggregation der Teilbilanzen
- Gesamtsystem wurde identifiziert und bilanziert

### 4.2 Systemanalyse

Mit Hilfe der Systemanalyse wird ein Ersatzbild der Wirklichkeit erstellt. Dabei wird von realen komplexen Gegebenheiten mit einer Vielzahl von Prozessen und Verknüpfungen (Güterflüssen) ein vereinfachtes, überschaubares und handhabbares Modell erstellt. Dieses ist auf wesentliche Bestandteile reduziert, ist auf die Aufgabenstellung der Studie zugeschnitten und wird den Rahmenbedingungen der Studie gerecht.

Die Systemanalyse besteht aus drei Schritten:

- Zeitliche und räumliche Abgrenzung des Systems nach aussen
- Festlegung der inneren Struktur des Systems: Auswahl und Definition der Prozesse und deren Input- und Outputgüter sowie Festlegung der Verknüpfungen
- Definition der untersuchten Stoffe

#### 4.2.1 Systemgrenzen

Das System stellt den Umsatz von 4 bromierten Flammschutzmitteln in der Schweiz Ende der 90er Jahre dar.

Die räumliche Systemgrenze entspricht den politischen Grenzen der Schweiz. Die zeitliche Systemgrenze wurde ein Jahr gewählt. Aufgrund der unterschiedlich verfügbaren Daten konnte kein bestimmtes Jahr bilanziert werden. Es ist nur möglich, ein grobes Abbild der Situation der Schweiz für Ende der 90er Jahre zu geben. Welche Daten verwendet wurden, ist jeweils im Text erwähnt.

## 4.2.2 Definition der Prozesse und Güter

Das System wird in drei Teilsysteme unterteilt, welche folgende Prozesse zusammenfassen:

- **Verkehr mit Produkten** (Abbildung 4-1 bzw. Tabelle 4-1):  
Produktion, Handel, Konsum
- **Abfallwirtschaft** (Abbildung 4-2 bzw. Tabelle 4-2):  
Verwertung, Abwasserreinigung (ARA), Verbrennung, Deponie
- **Umwelt** (Abbildung 4-3 bzw. Tabelle 4-3):  
Atmosphäre, Hydrosphäre, Pede- bzw. Lithosphäre, Biota

Im Folgenden werden zuerst die Prozesse und Güter der drei Teilsysteme beschrieben bzw. definiert, dann das Gesamtsystem.

### Teilsystem „Verkehr mit Produkten“:

Abbildung 4-1: Systemanalyse des Teilsystems „Verkehr mit Produkten“

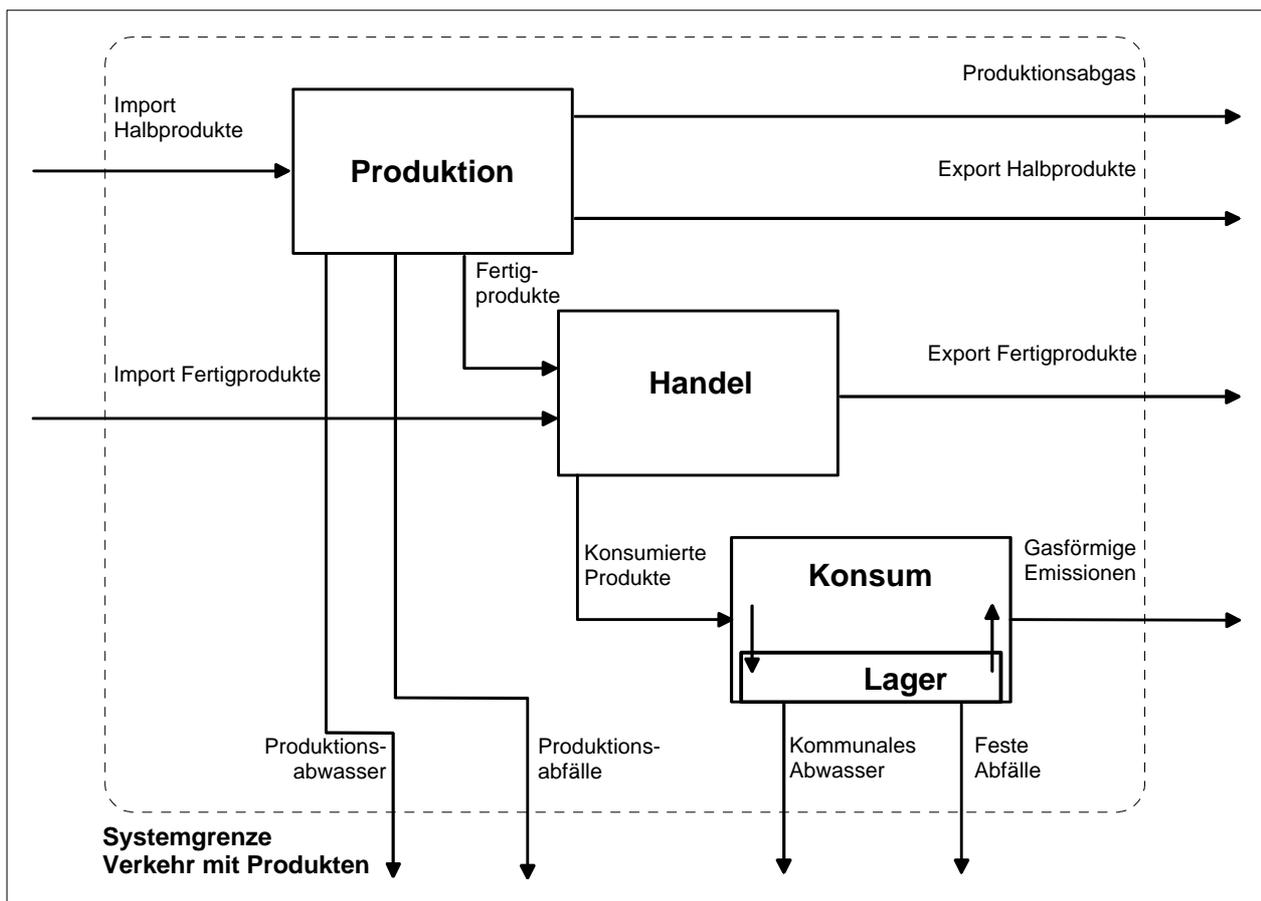


Tabelle 4-1: Prozesse und Güter im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“

PROZESS „PRODUKTION“	
<b>Der Prozess umfasst die Produktion von Halb- (Kunststoffformteile) und Fertigprodukten (Baumaterialien, EE-Geräte), welche die untersuchten BFS enthalten. Der Handel von hierfür eingesetzten Chemikalien und Halbprodukten wird ebenfalls betrachtet.</b>	
<b>Inputgüter</b>	
Import Halbprodukte	In die Schweiz importierte Halbprodukte (Chemikalien, ungeformte, und geformte Kunststoffe, Computerbestandteile, etc.) für die Verarbeitung zu Fertigprodukten.
<b>Outputgüter</b>	
Fertigprodukte	In der Schweiz produzierte Fertigprodukte (EE-Produkte, Baumaterialien, Verkehrsmittel)
Export Halbprodukte	Aus der Schweiz exportierte Halbprodukte (Chemikalien, ungeformte und geformte Kunststoffe, Computerbestandteile, etc.)
Produktionsabfälle	Feste Abfälle aus der Produktion (z.B. Leiterplattenverschnitt)
Produktionsabwasser	Abwasser aus der Produktion
Produktionsabgas	Abgase aus der Produktion
PROZESS „HANDEL“	
<b>Der Prozess umfasst den Handel mit Fertigprodukten (EE-Produkte, Baumaterialien, Verkehrsmittel), welche die untersuchten BFS enthalten.</b>	
<b>Inputgüter</b>	
Import Fertigprodukte	In die Schweiz importierte Fertigprodukte (EE-Produkte, Baumaterialien, Verkehrsmittel)
Fertigprodukte	In der Schweiz prod. Fertigprodukte (EE-Produkte, Baumat., Verkehrsm.)
<b>Outputgüter</b>	
Export Fertigprodukte	Aus der Schweiz exportierte Fertigprodukte (EE-Produkte, Baumaterialien, Verkehrsmittel)
Konsumierte Produkte	In der Schweiz konsumierte Fertigprodukte (EE-Produkte, Baumaterialien, Verkehrsmittel)
PROZESS „KONSUM“	
<b>Der Prozess umfasst den Konsum von Fertigprodukten (EE-Produkte, Baumaterialien, Verkehrsmittel), welche die untersuchten BFS enthalten.</b>	
<b>Inputgüter</b>	
Konsumierte Produkte	In der Schweiz konsumierte Fertigprodukte (EE-Produkte, Baumaterialien, Verkehrsmittel)
<b>Outputgüter</b>	
<b>Feste Abfälle</b>	Gemischte Siedlungsabfälle, Separat gesammelte Siedlungsabfälle, Elektronikschrott, Alt-KFZ, Baustellenabfälle, Baurestmassen
Kommunales Abwasser	Abwasser aus Siedlungsgebieten. Eintrag der untersuchten FS durch Reinigung (z.B. Textilien) und durch Infrastruktur (PE-Dachfolien).
Gasförmige Emissionen	Diffuse Emissionen der additiv verarbeiteten BFS aus benutzten Gütern (EE-Produkte, Möblierung, Verkehrsmittel) und Gebäuden.
<b>Lager</b>	
Lager Konsum	Lagerbestand aus benutzten Gütern (EE-Produkte, Möblierung, Verkehrsmittel) und Gebäuden.

**Teilsystem „Abfallwirtschaft“:**

Abbildung 4-2: Systemanalyse des Teilsystems „Abfallwirtschaft“

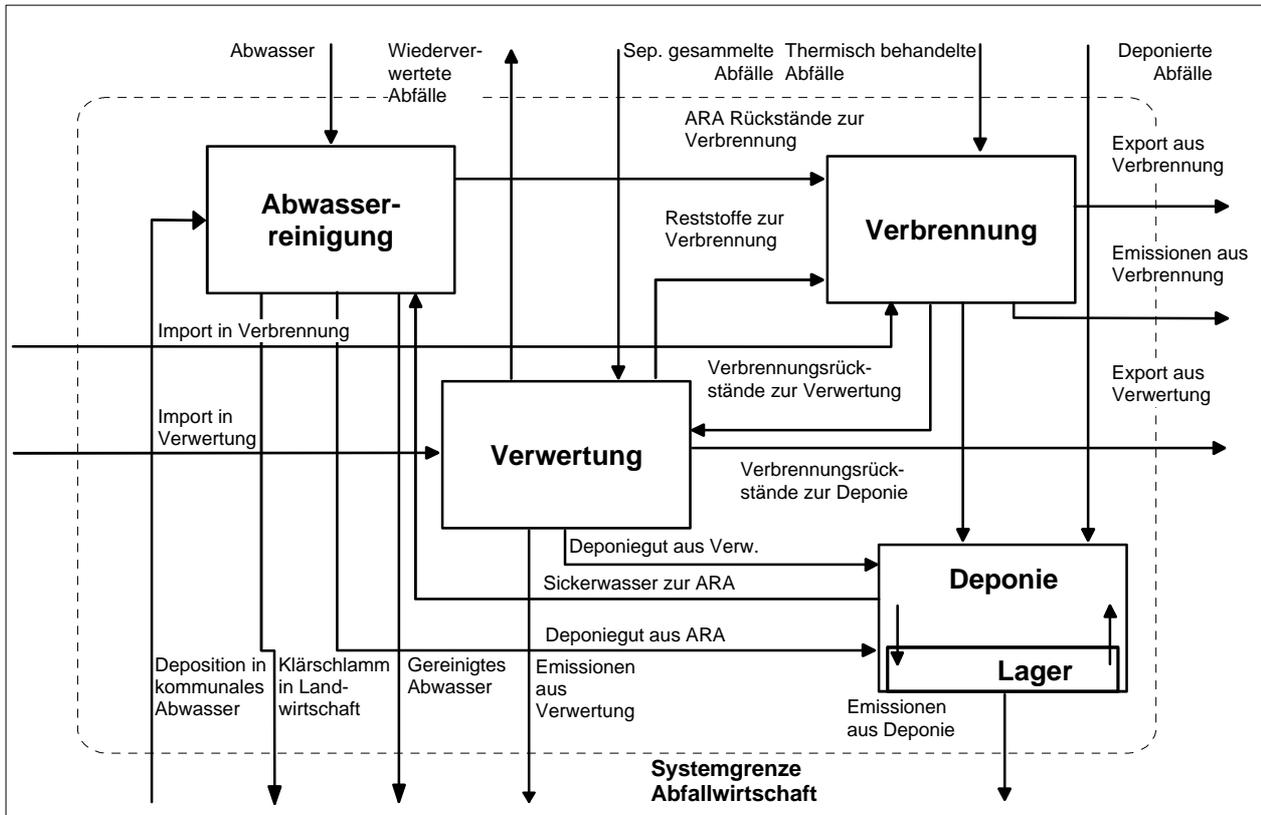


Tabelle 4-2: Prozesse und Güter im Teilsystem „Abfallwirtschaft“

PROZESS „VERWERTUNG“	
<b>Der Prozess umfasst die Sammlung und Behandlung aller aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ separat gesammelten Abfälle in Wiederverwertungsanlagen.</b>	
<b>Inputgüter</b>	
Import in Verwertung	In die Schweiz importierte Abfälle, welche im Prozess Wiederverwertung behandelt werden.
Separat gesammelte Abfälle	Anteil der dem Prozess „Verwertung“ zugeführten Abfälle aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“. Dies betrifft für die hier behandelten Fragestellungen die Abfälle: Elektro- und Elektronik-Abfälle, Verkehrsmittel-Abfälle, Textil- und Möbel-Abfälle, Biogene Abfälle. Relevante Bauabfälle werden direkt den beiden Prozessen „Verbrennung“ und „Deponie“ zugeordnet.
<b>Outputgüter</b>	
Wiederverwertete Abfälle	Anteil der im Prozess „Verwertung“ behandelten Abfälle, welcher innerhalb der Schweiz wieder in den Prozess „Verkehr mit Produkten“ zurückfliesst.
Deponiegut aus Verwertung	Aus der Schweiz exportierte Abfälle aus dem Prozess „Verwertung“
Export aus Verwertung	Anteil der im Prozess „Verwertung“ behandelten Abfälle, welcher in der Schweiz exportiert wird.

Outputgüter	Fortsetzung
Reststoffe zur Verbrennung	Anteil der im Prozess „Verwertung“ behandelten Abfälle, welcher in der Schweiz einer thermischen Behandlung zugeführt wird.
Emissionen aus Verwertung	Aus dem Prozess „Verwertung“ resultierende Emissionen in die Umwelt. Diese bestehen im Wesentlichen aus Emissionen in die Atmosphäre (Abluft). Abwasser wird vernachlässigt.

PROZESS „ABWASSERREINIGUNG (ARA)“	
<b>Der Prozess umfasst die Behandlung der kommunalen Abwässer in Abwasserreinigungsanlagen der Schweiz. Mit enthalten sind Abwässer aus der Produktion, für welche angenommen wird, dass diese auch über das kommunale Abwasser entsorgt werden.</b>	
Inputgüter	
Abwasser	Kommunales Abwasser aus dem Prozess „Konsum“ und Abwasser aus dem Prozess „Produktion“
Deposition kommunales Abwasser	Anteil der atmosphärische Deposition von Partikeln, welche auf die Siedlungsfläche fallen und mittels der kommunalen Abwasserentsorgung erfasst werden.
Sickerwasser zur ARA	Erfasstes Sickerwasser aus dem Prozess „Deponie“
Outputgüter	
Deponiegut aus ARA	Anteil der im Prozess „ARA“ produzierten Klärschlammmenge, welche in der Schweiz deponiert wird.
ARA Rückstände zur Verbrennung	Anteil der im Prozess „ARA“ produzierten Klärschlammmenge, welche in der Schweiz einer thermischen Behandlung zugeführt wird.
Klärschlamm in Landwirtschaft	Anteil des Klärschlammes aus dem Prozess „ARA“, welcher in der Schweiz landwirtschaftlich verwertet wird (Eintrag in Prozess „Pedo-/Lithosphäre“).
Gereinigtes Abwasser	Gereinigtes Abwasser aus dem Prozess „ARA“, welches dem Vorfluter zugeführt wird.
PROZESS „VERBRENNUNG“	
<b>Der Prozess umfasst die Behandlungsprozesse, in welchen Abfälle thermisch (Verbrennung) behandelt werden. Für diese Studie entspricht dieser Prozess im Wesentlichen der Summe aller Kehrrichtverbrennungsanlagen (sowie andere thermische Prozesse wie z.B. Wirbelschichten, Zementwerke) in der Schweiz.</b>	
Inputgüter	
Thermisch behandelte Abfälle	Anteil der dem Prozess „Verbrennung“ zugeführten und dort thermisch behandelten Abfälle aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“.
Reststoffe zur Verbrennung	Anteil der im Prozess „Wiederverwertung“ behandelten Abfälle, welcher in der Schweiz einer thermischen Behandlung zugeführt wird.
ARA Rückstände zur Verbrennung	Anteil der im Prozess „ARA“ behandelten Abwässer, welcher in der Schweiz einer thermischen Behandlung zugeführt wird.
Outputgüter	
Export aus Verbrennung	Anteil der Verbrennungsprodukte aus dem Prozess „Verbrennung“, welcher in das Ausland exportiert wird (Rauchgasreinigungsrückstände, Filterasche).
Verbrennungsrückstände zur Deponie	Anteil der Verbrennungsprodukte aus dem Prozess „Verbrennung“, welcher in der Schweiz deponiert wird (vor allem Schlacke).
Emissionen aus Verbrennung	Aus dem Prozess „Verbrennung“ resultierende Emissionen in die Umwelt. Diese bestehen im Wesentlichen aus Emissionen in die Atmosphäre (Abgas). Abwasser wird vernachlässigt.

PROZESS „DEPONIE“	
<b>Der Prozess umfasst alle Deponien innerhalb der Schweiz, auf welchen Abfälle abgelagert werden.</b>	
<b>Inputgüter</b>	
Deponierte Abfälle	Anteil der dem Prozess „Deponie“ zugeführten Abfälle aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“.
Deponiegut aus Verwertung	Anteil der im Prozess „Verwertung“ behandelten Abfälle, welcher in der Schweiz deponiert wird.
Deponiegut aus ARA	Anteil der im Prozess „ARA“ produzierten Klärschlammmenge, welcher in der Schweiz deponiert wird.
Verbrennungsrückstände zur Deponie	Anteil der Verbrennungsprodukte aus dem Prozess „Verbrennung“, welcher in der Schweiz deponiert wird (vor allem Schlacke).
<b>Outputgüter</b>	
Sickerwasser zur ARA	Erfasstes Sickerwasser aus dem Prozess „Deponie“
Emissionen aus Deponie	Aus dem Prozess „Deponie“ resultierende Emissionen in die Umwelt. Diese bestehen im Wesentlichen aus Emissionen in die Hydrosphäre (Sickerwasser). Deponiegas wird vernachlässigt.
<b>Lager</b>	
Deponielager	Akkumulierung der dem Prozess „Deponie“ zugeführten Abfälle.

### Teilsystem „Umwelt“:

Abbildung 4-3: Systemanalyse des Teilsystems „Umwelt“

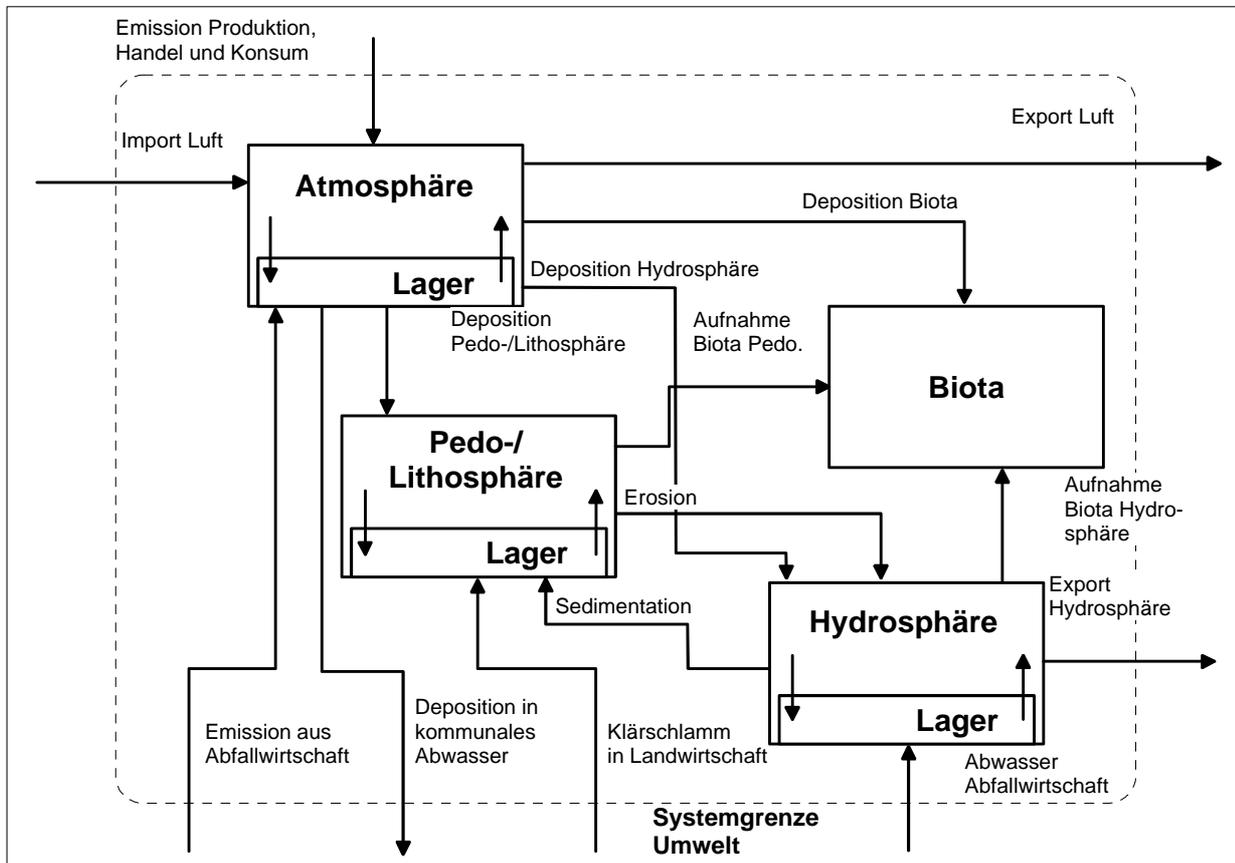


Tabelle 4-3: Prozesse und Güter im Teilsystem „Umwelt“

PROZESS „ATMOSPHERE“	
<b>Der Prozess umfasst die Luftschicht oberhalb der Landesfläche der Schweiz (erste 500m Höhenmeter).</b>	
<b>Inputgüter</b>	
<b>Import Luft</b>	Import über die Luft aus dem Ausland in die Schweiz.
Emission aus Produktion, Handel und Konsum	Emissionen aus Abgasen aus dem Prozess „Produktion“ und diffuse Emissionen der additiv verarbeiteten BFS aus benutzten Gütern (EE-Produkte, Möblierung, Verkehrsmittel) und Gebäuden.
Emission aus Abfallwirtschaft	Abgase aus der Verwertung und der Verbrennung. Abgase aus der Deponie werden vernachlässigt.
<b>Outputgüter</b>	
<b>Export Luft</b>	Export über die Luft aus der Schweiz ins Ausland.
Deposition Pedo-/Lithosphäre	Anteil der Deposition aus der Atmosphäre auf den Boden, ohne Siedlungsflächen.
Deposition Hydrosphäre	Anteil der Deposition aus der Atmosphäre auf die Gewässer.
Deposition Biota	Anteil der Deposition aus der Atmosphäre auf die Pflanzen.
Deposition kommunales Abwasser	Anteil der Deposition aus der Atmosphäre auf Siedlungsflächen, welcher dann in die kommunale Abwasserentsorgung gelangt.
<b>Lager</b>	
Lager Atmosphäre	Umfasst die in der Luftschicht oberhalb der Landesfläche der Schweiz (erste 500m Höhenmeter) akkumulierte Menge an Stoffen.
PROZESS „HYDROSPHÄRE“	
<b>Der Prozess umfasst die Gewässer in der Schweiz (Seen, Flüsse und Grundwasser).</b>	
<b>Inputgüter</b>	
Abwasser Abfallwirtschaft	Betrifft die Summe aus gereinigtem Abwasser aus dem Prozess „ARA“, dem Deponiesickerwasser aus dem Prozess „Deponie“, welches nicht dem Prozess „ARA“ zugeführt wird, und Leckagen aus dem Abwassersammelsystem.
Deposition Hydrosphäre	Anteil der Deposition aus der Atmosphäre auf die Gewässer.
Erosion	Eintrag aus dem Boden in die Gewässer durch Erosionsvorgänge.
<b>Outputgüter</b>	
Austrag über HS	Export der Stoffe in den Gewässern über die Systemgrenze Schweiz (im wesentlichen im Rhein und der Rhone)
Sedimentation	Eintrag aus dem Gewässer in die Gewässersedimente (Pedo-/Lithosphäre).
Aufnahme Biota Hydrosphäre	Stoffaufnahme der Pflanzen und Lebewesen aus den Gewässern.
<b>Lager</b>	
Lager Hydrosphäre	Umfasst die in den Gewässern akkumulierte Menge an Stoffen.

PROZESS „PEDO-, LITHOSPHERE“	
<b>Der Prozess umfasst den Boden in der Schweiz. Dabei handelt es sich um den festen, gewachsenen Untergrund und um das Muttergestein (geologische Grundschicht) in der Schweiz.</b>	
<b>Inputgüter</b>	
Deposition Pedo-/Lithosphäre	Anteil der Deposition aus der Atmosphäre auf den Boden (ohne Siedlungsflächen).
Klärschlamm in Landwirtschaft	Anteil des Klärschlammes aus dem Prozess „ARA“, welcher in der Schweiz landwirtschaftlich verwertet wird.
Sedimentation	Eintrag aus dem Gewässer in die Gewässersedimente.
<b>Outputgüter</b>	
Erosion	Eintrag aus dem Boden in die Gewässer durch Erosionsvorgänge.
Aufnahme Biota Pedosphäre	Stoffaufnahme der Pflanzen und Lebewesen aus dem Boden.
<b>Lager</b>	
Bodenlager	Umfasst die im Boden akkumulierte Menge an Stoffen.
PROZESS „BIOTA“	
<b>Der Prozess umfasst die Gesamtheit aller Lebewesen und Pflanzen.</b>	
<b>Inputgüter</b>	
Aufnahme Biota Pedosphäre	Stoffaufnahme der Pflanzen und Lebewesen aus dem Boden.
Deposition Biota	Anteil der Deposition aus der Atmosphäre auf die Pflanzen.
Aufnahme Biota Hydrosphäre	Stoffaufnahme der Pflanzen und Lebewesen aus den Gewässern.
<b>Outputgüter</b>	
	Kein Output berücksichtigt
<b>Lager</b>	
Lager Biota	Umfasst die in der Biota akkumuliert Menge an Stoffen.

**Gesamtsystem „Schweiz“:**

Abbildung 4-4: Systemanalyse des Gesamtsystems „Schweiz“

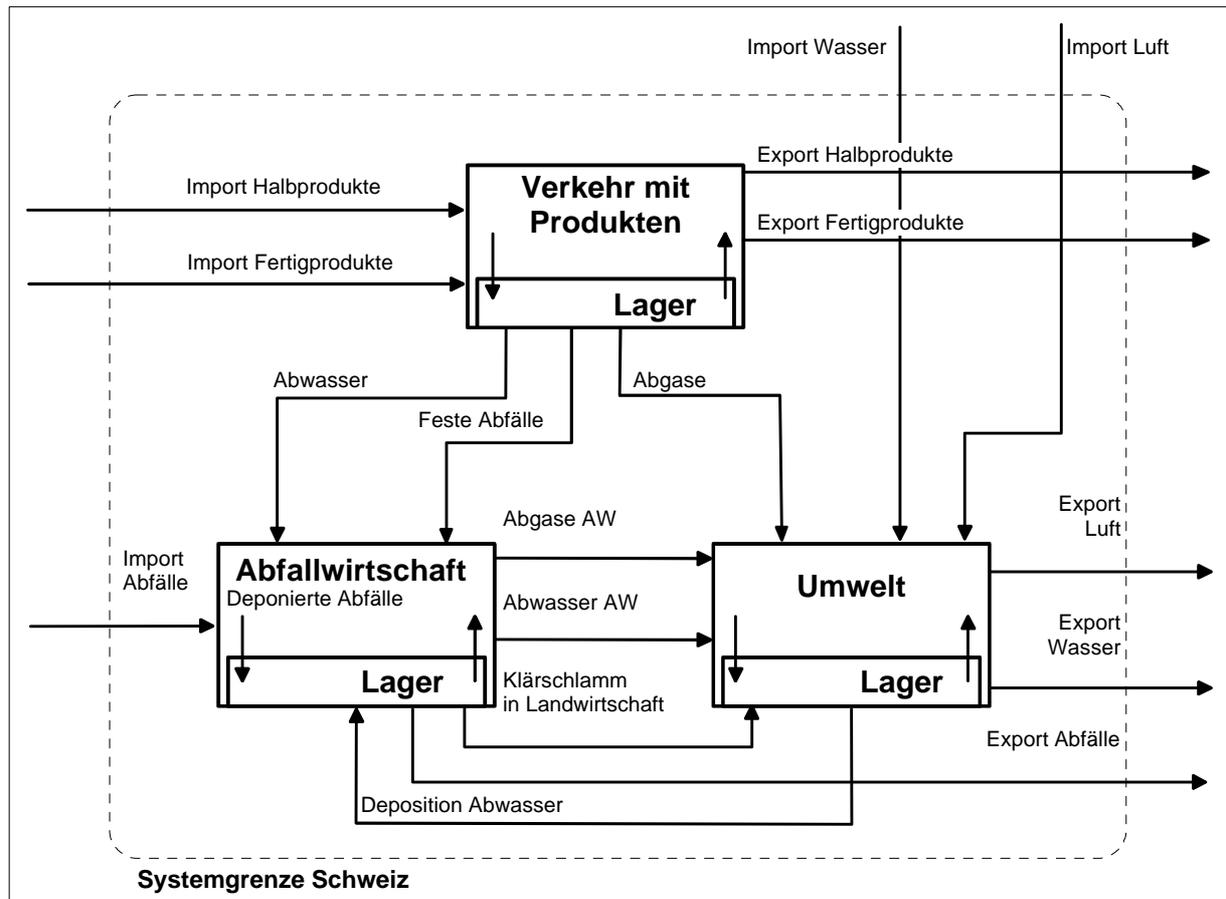


Tabelle 4-4: Prozesse und Güter im Gesamtsystem

PROZESS „VERKEHR MIT PRODUKTEN“	
<b>Der Prozess umfasst alle Prozesse aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“.</b>	
<b>Inputgüter</b>	
Import Halbprodukte	In die Schweiz importierte Halbprodukte (Chemikalien, ungeformte und geformte Kunststoffe, Computerbestandteile, etc.) für die Verarbeitung zu Fertigprodukten.
Import Fertigprodukte	In die Schweiz importierte Fertigprodukte (EE-Produkte, Baumaterialien, Verkehrsmittel)
<b>Outputgüter</b>	
Export Halbprodukte	Aus der Schweiz exportierte Halbprodukte (Chemikalien, ungeformte und geformte Kunststoffe, Computerbestandteile, etc.)
Export Fertigprodukte	Aus der Schweiz exportierte Fertigprodukte (EE-Produkte, Baumaterialien, Verkehrsmittel)
Abwasser	Abwasser aus der Produktion und Abwasser aus Siedlungsgebieten (kommunales Abwasser).
Feste Abfälle	Abfälle aus dem Prozess „Konsum“ (Gemischte Siedlungsabfälle, Separat gesammelte Siedlungsabfälle, Elektronikschrott, Alt-KFZ, Baustellenabfälle, Baurestmassen) sowie Produktionsabfälle (Feste Abfälle aus der Produktion; z.B. Leiterplattenverschnitt)

<b>Outputgüter</b>	<b>Fortsetzung</b>
Abgase	Abgase aus der Produktion sowie diffuse Emissionen der additiv verarbeiteten BFS aus benutzten Gütern (EE-Produkte, Möblierung, Verkehrsmittel) und Gebäuden.
<b>Lager</b>	
Lager Prozess „Verkehr mit Produkten“	Lagerbestand aus benutzten Gütern (EE-Produkte, Möblierung, Verkehrsmittel) und Gebäuden.
<b>PROZESS „ABFALLWIRTSCHAFT“</b>	
<b>Der Prozess umfasst alle Prozesse aus dem Teilsystem „Abfallwirtschaft“.</b>	
<b>Inputgüter</b>	
Import Abfälle	In die Schweiz importierte Abfälle
Abwasser	Siehe oben; (Prozess „Verkehr mit Produkten“)
Feste Abfälle	Siehe oben; (Prozess „Verkehr mit Produkten“)
Deposition kommunales Abwasser	Teil der atmosphärische Deposition von Partikeln, der auf die Siedlungsfläche fällt und mittels der kommunalen Abwasserentsorgung erfasst wird.
<b>Outputgüter</b>	
Export Abfälle	Aus der Schweiz exportierte Abfälle.
Abwasser AW	Betrifft die Summe aus dem gereinigtem Abwasser aus dem Prozess „ARA“, Deponiesickerwasser aus dem Prozess „Deponie“, welches nicht der ARA zugeführt wird und Leckagen aus dem Kanalsystem in die ARA.
Abgase AW	Betrifft die gasförmigen Emissionen aus dem Prozess Abfallwirtschaft (im Wesentlichen aus den Prozessen „Verbrennung“ und „Verwertung“).
Klärschlamm in Landwirtschaft	Anteil des Klärschlammes aus dem Prozess „ARA“, welcher in der Schweiz landwirtschaftlich verwertet wird.
<b>Lager</b>	
Lager Prozess „Abfallwirtschaft“	Im Wesentlichen die Akkumulierung der dem Prozess „Deponie“ zugeführten Abfälle.
<b>PROZESS „UMWELT“</b>	
<b>Der Prozess umfasst alle Prozesse aus dem Teilsystem „Umwelt“,</b>	
<b>Inputgüter</b>	
Import Wasser	Stoffeintrag in die Schweiz über die Gewässser
Import Luft	Stoffeintrag in die Schweiz über die Luft
Abgase	Siehe oben (Prozess „Verkehr mit Produkten“)
Abgase AW	Siehe oben; (Prozess „Abfallwirtschaft“)
Abwasser AW	Siehe oben; (Prozess „Abfallwirtschaft“)
Klärschlammdünger	Siehe oben; (Prozess „Abfallwirtschaft“)
<b>Outputgüter</b>	
Export Wasser	Stoffexport aus der Schweiz über die Gewässer (im Wesentlichen im Rhein und der Rhone)
Export Luft	Stoffexport aus der Schweiz über die Luft
Deposition kommunales Abwasser	Siehe oben; (Prozess „Abfallwirtschaft“)
<b>Lager</b>	
Lager Prozess „Umwelt“	Im Wesentlichen die Akkumulierung der Stoffe in den Prozessen „Pedo-/Lithosphäre“, „Hydrosphäre“ und „Atmosphäre“.

AW= Abfallwirtschaft

### 4.2.3 Untersuchte Stoffe

Die untersuchten Flammschutzmittel sind als kommerzielle Produkte keine chemisch reinen Substanzen (und daher keine Stoffe) sondern Gemische aus chemisch ähnlichen Substanzen. In Tabelle 4-5 wurden die in der Literatur erhobenen Zusammensetzungen der untersuchten kommerziellen BFS zusammengefasst.

Tabelle 4-5: Zusammensetzung der untersuchten kommerziellen BFS-Produkte

	Tri-BDPE	Tetra-BDPE	Penta-BDPE	Hexa-BDPE	Hepta-BDPE	Octa-BDPE	Nona-BDPE	Deca-BDPE	Brom
PentaBDPE <sup>2)</sup>	0-1%	24-38%	50-62%	4-8%					
PentaBDPE <sup>3)</sup>									71%
OctaBDPE <sup>1)</sup>				4%	62%	34%			
OctaBDPE <sup>1)</sup>				6.9%	46.8%	35.9%	10.4%		
OctaBDPE <sup>2)</sup>				10-12%	43-44%	31-35%	9-11%	0-1%	
OctaBDPE <sup>4)</sup>				1.4-12%	43-58%	26-35%	8-14%	0-3%	
OctaBDPE <sup>3)</sup>									79%
DecaBDPE <sup>1)</sup>								97-98%	
DecaBDPE <sup>5)</sup>						0.8%	21.8%	77.4%	
DecaBDPE <sup>1)</sup>						?	0.3-4.5%	94-99%	
DecaBDPE <sup>1)</sup>						0.5%	11.0%	88.1%	
DecaBDPE <sup>1)</sup>							0.3-3%	97-99%	
DecaBDPE <sup>1)</sup>						?	?	93-98.5%	
DecaBDPE <sup>4)</sup>							3%	97%	
DecaBDPE <sup>1)</sup>						1%	2%	97%	
DecaBDPE <sup>3)</sup>									83%
TBBPA <sup>6)</sup>									59%

Quellen:

- 1) [OECD, 1994] S.127-129
- 2) IPCS, 1994b
- 3) [Danish EPA, 1999]
- 4) [OECD, 2000]
- 5) Produkt in frühen 70er Jahren [OECD, 1994] S.127
- 6) Kommerzielles TBBPA besitzt eine durchschnittliche Reinheit von etwa 98,5 % [Danish EPA, 1999]

Um die Stoffe bilanzieren zu können, mussten die Werte, welche die kommerziellen FS betreffen, auf chemische Substanzen umgerechnet werden. Für kommerzielles PentaBDPE wurde mit einer Konzentration von 59 % PentaBDPE und für kommerzielles OctaBDPE mit einer Konzentration von 34 % OctaBDPE gerechnet. Für kommerzielles DecaBDPE und TBBPA wurde näherungsweise angenommen, dass es sich um chemisch reine Substanzen handelt.

## 4.3 Verwendete Daten

### Teilsystem „Verkehr mit Produkten“

Im Rahmen dieser Studie war es nicht möglich, Marktanalysen oder umfangreiche Firmenbefragungen durchzuführen. Es wurden lediglich Daten aus der Literatur herangezogen. Die Stoffflüsse wurden mittels Güterflüssen und den Konzentrationen (Kunststoffanteile, Anteile der eingesetzten FS, FS-Konzentrationen) der vier BFS berechnet. Die Güterflüsse wurden durch vorhandene Marktanalysen für die Schweiz und andere europäische Länder bestimmt. Der Anteil potentiell flammgeschützter Bauteile (Gehäuse, Leiterplatten, EE-Kleinbauteile) in den Produkten wurde der Literatur entnommen. Die Konzentrationen der Flammschutzmittel in Kunststoffen wurden aufgrund von Angaben der FS-Hersteller und der kunststoffverarbeitenden Industrie und aufgrund von Analysen von EE-Alt- und Neugeräten bestimmt. Die Lagerabschätzung im Prozess „Verkehr mit Produkten“ erfolgte anhand einer durchschnittlichen Nutzungsdauer der Konsumprodukte.

### Teilsystem „Abfallwirtschaft“

Für die Inputflüsse aus dem Prozess „Verkehr mit Produkten“ wurden einerseits die für diesen Prozess für die Schweiz ermittelten Daten verwendet. Dabei wurden Stoffflüsse anhand der produktbezogenen Anwendung unter Berücksichtigung der Entsorgungssituation in der Schweiz den Behandlungsprozessen der Abfallwirtschaft zugeordnet. Andererseits standen Daten aus anderen Studien (z.B. [Danish EPA, 1999]) zur Verfügung und wurden zu Vergleichszwecken verwendet. Die Flüsse zwischen den verschiedenen Prozessen der Abfallwirtschaft und in den Produkten der Entsorgungsprozesse wurden anhand von Transferkoeffizienten berechnet. Diese Resultate wurden, falls die Möglichkeit bestand, mit Angaben aus der Literatur verglichen. Die Lagerschätzung für die akkumulierten Deponiemengen erfolgte anhand einer Schätzung für den Input aus dem Prozess „Verkehr mit Produkten“.

### Teilsystem „Umwelt“

Für das Teilsystem „Umwelt“ wurden einerseits die Inputs aus den Teilsystemen „Verkehr mit Produkten“ und „Abfallwirtschaft“ übernommen. Andererseits wurde versucht, anhand von Literaturangaben zu Konzentrationsmessungen ausserhalb der Schweiz, die Flüsse und Lager grob zu schätzen. Zur Zeit stehen für die Schweiz keine Messungen der vier untersuchten Substanzen in den Umweltkompartimenten zur Verfügung.

## 5 Anwendungsbereiche und Vorkommen

*Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Anwendung der untersuchten Flammschutzmittel in Halb- und Fertigprodukten, mit der Behandlung flammenschutzmittelhaltiger Abfälle und dem Vorkommen der untersuchten Flammschutzmittel in den Umweltmedien Luft, Wasser, Boden und Biomasse (Biota).*

*Die hier geschaffene Datenbasis dient zur Berechnung der Güter- und Stoffflüsse und zur Bestimmung der relevantesten Güter. Es werden Rohdaten angeführt, Annahmen begründet und die Berechnung der Stoffflüsse nachvollziehbar dargestellt. Um diesen Abschnitt nicht mit Datenmaterial zu überladen, sind nur die wichtigsten Schritte angeführt, eine detaillierte Betrachtung befindet sich im Anhang.*

*Die getroffenen Annahmen, Schätzungen und Vergleiche sind lediglich im Rahmen dieser Studie zu verwenden, da die Genauigkeit auf die Zielstellungen der Studie und auf die Bedeutung der einzelnen Güter und Produkte für das Gesamtsystem abgestimmt ist.*

### 5.1 Verkehr mit Produkten

*Dieses Kapitel beschäftigt sich mit dem Einsatz der untersuchten Flammschutzmittel in Halb- und Fertigprodukten. Es wird sowohl der frühere als auch der derzeitige Einsatz für die einzelnen Produktgruppen beleuchtet.*

*Anfangs erfolgen ein Überblick und eine Einteilung der betrachteten Anwendungsbereiche, danach ein Abschnitt bezüglich der Datenerfassung (Kapitel 5.1.2), darauffolgend detaillierte Abhandlungen der Produkte (Kapitel 5.1.3 - 5.1.5) und schliesslich die Berechnung der Güter- und Stoffflüsse (5.1.6 und folgende).*

Weltweit wurden und werden bromierte Flammschutzmittel fast vollständig in der Kunststoffindustrie eingesetzt. Andere derzeitige Einsatzgebiete sind Impregnierungen von Textilien und Zusatzstoffe von Lacken.

Ein seit 1-2 Jahrzehnten nicht mehr aktuelles Einsatzgebiet ist laut Bromindustrie [BSEF, 1999] die Verwendung einer Mischung aus PentaBDPE als hydraulische Flüssigkeit bei Erdölbohrungen und im Bergbau. Da hierzu in der Literatur keine Verbrauchsdaten gefunden werden konnten, wurde dieser Anwendungsbereich in dieser Studie nicht weiter betrachtet. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass dieser historische, stark emissive Einsatz von PentaBDPE zukünftig unbedingt untersucht werden muss. Dies im Besonderen, da aktuelle Studien (z.B. [Allchin et al., 1999]) bedeutende Konzentrationen von PentaBDPE in Umweltmedien nachweisen können.

### 5.1.1 Einteilung der Produkte

Generell wird unterschieden in:

- **Chemikalien und Halbprodukte:** Flammschutzmittel (PBDEs, TBBPA), ungeformte Kunststoffe (Masterbatches), Kunststoffteile (Leiterplatten, Kunststoffgehäuse)
- **Fertigprodukte:** Elektro- und Elektronikgeräte (EE-Geräte), Verkehrsmittel, Baumaterialien, Möbel, Textilien

Tabelle 5-1: Einteilung der relevanten Fertigprodukte

Einteilung nach Produktgruppe	Einteilung nach Einsatzort	Einteilung nach flammgeschützten Produktteilen
<b>EE-Produkte:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- EDV-Geräte (Computer, Drucker)</li> <li>- Bürogeräte (Kopiergeräte, Rechenmaschinen)</li> <li>- Kommunikationstechnik (Telefon, Fax)</li> <li>- Unterhaltungselektronik (TV, Audio, Video, Spiele)</li> <li>- Kleine Haushaltsgeräte</li> <li>- Grosse Haushaltsgeräte (in Küche und Bad inkl. Nähmaschine, Staubsauger, Klimageräte)</li> <li>- Spezialgeräte (Labor, Medizin, Prozesssteuerung, Automaten, Elektrowerkzeuge)</li> <li>- EE-Kleinteile (Stecker, Schalter, Trafo, Sicherungskasten, Beleuchtung, Kabel)</li> </ul>	<b>Privathaushalt (PHH):</b> (Beispiele siehe Zelle links) <ul style="list-style-type: none"> <li>- EDV-Geräte</li> <li>- Unterhaltungselektronik</li> <li>- Kommunikationstechnik PHH</li> <li>- Haushaltsgeräte</li> <li>- Spezialgeräte (Elektrowerkzeuge)</li> <li>- EE-Kleinteile PHH</li> <li>- Privat-Pkw, Motorrad</li> <li>- Baumaterialien und Einrichtungsgegenstände PHH</li> </ul>	<b>Leiterplatten:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- in Computern</li> <li>- in Kopierern, Druckern, Fax</li> <li>- in Telefonen</li> <li>- in Unterhaltungselektronik</li> <li>- in Haushaltsgeräten</li> <li>- in sonstigen Geräten</li> </ul>
<b>Verkehrsmittel:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- KFZ (PKW, LKW, Motorrad)</li> <li>- Bahn</li> <li>- Flugzeug</li> </ul>	<b>Industrie, Gewerbe, Service, Verwaltung (IG):</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- EDV-Geräte IG</li> <li>- Bürogeräte</li> <li>- Kommunikationstechnik IG</li> <li>- Spezialgeräte IG</li> <li>- EE-Kleinteile IG</li> <li>- Firmen-Pkw und öffentliche Verkehrsmittel</li> <li>- Baumaterialien und Einrichtungsgegenstände IG</li> </ul>	<b>Kunststoffgehäuse:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- von Computer</li> <li>- von Kopierern, Druckern, Fax</li> <li>- von Unterhaltungselektronik (TV+HiFi)</li> <li>- von Haushaltsgeräten</li> <li>- von Verkehrsmitteln (Textilien, Polsterungen und grossen Kunststoffbauteilen)</li> <li>- in sonstigen Geräten</li> </ul>

Einteilung nach Produktgruppe	Einteilung nach Einsatzort	Einteilung nach flammgeschützten Produktteilen
<b>Baumaterialien und Textilien:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Dämmschaumstoffe</li> <li>- Folien und Beschichtungen</li> <li>- Harze und Kleber</li> <li>- Textilien und Polsterungen</li> </ul>		<b>Sonstige:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- EE-Kleinteile (Kabel, Lampenfassungen, Stecker, Schalter, elektronische Bauteile, Trafos)</li> <li>- Baumaterialien und Einrichtungsgegenstände</li> </ul>

Anmerkung: Die Bezeichnung „Computer“ steht in dieser Studie für die Zusammenstellung von einem Rechner, einem Monitor, einer Tastatur und einer Maus.

Zur Bestimmung der Flammschutzmittelfrachten wurde von der Produkteinteilung nach flammgeschützten Produktteilen ausgegangen (siehe Tabelle 5-1, rechte Spalte). Anschliessend wurden die gewonnenen Daten auf Produktgruppen umgelegt und wenn möglich auch auf Einsatzorte aufgeteilt.

### 5.1.2 Probleme bei der Bestimmung der FS-frachten in Produkten

- Die Hersteller der meisten EE-Geräte (Elektro- und Elektronikgeräte) wissen zumeist nicht, welche FS in Neuprodukten enthalten sind. Es ist lediglich die Information über die erfüllte Brandschutzklasse vorhanden [Wegmann et al., 1999]. Aufgrund wechselnder Zulieferfirmen kommt es vor, dass Geräte der selben Typen unterschiedliche FS enthalten.
- Der PC ist für den FS-Markt eines der wichtigsten Produkte [Danish EPA, 1999]. Dieses Produkt wird jedoch ständig stark verändert (Zusammensetzung, Kunststoffart, Kunststoffadditive), da es etwa halbjährlich auf den Markt kommt, und die Entwicklungszeit vom Konzept zum fertigen PC nur etwa 6-8 Monate dauert [Atlantic Consulting, 2000].
- Die Zusammensetzung von EE-Geräten, Verkehrsmitteln und Baumaterialien hat sich in den letzten Jahrzehnten stark gewandelt. Kunststoffanteil, Kunststoffart und Flammschutzmittelart haben sich zum Teil völlig gewandelt. Daher kann von Neugeräten nicht auf derzeit in Verwendung befindliche Geräte geschlossen werden.
- Im Allgemeinen haben die Hersteller über Flammschutzmittelgehalte in Altgeräten keine Informationen.
- Weiter erschwerend bei der Datenerfassung ist die Tatsache, dass die meisten EE-Geräte ausserhalb Europas produziert und importiert werden. Eine deutsche Studie [Leisewitz & Schwarz, 2000] gibt an, dass der Importanteil bei den IT-Geräten hoch ist und auch die laut Statistik inländisch oder in Europa produzierten Geräte nur unter Verwendung eines mehr oder weniger grossen Anteils an importierten Vorprodukten zusammengebaut werden (Assemblierung).
- Die Anzahl der bisher beprobten EE-Geräte ist im Vergleich zu den im Umlauf befindlichen gering. Ein Rückschluss von FS-Konzentrationen in den Proben auf den gesamten Schweizer Markt ist daher mit hohen Unsicherheiten verbunden. Zum Beispiel wurde in einer Studie für Dänemark mittels einer Analyse von nur etwa 150 EDV-Geräten auf die FS-Fracht in Gehäusen von gesamthaft etwa 130.000 verkauften EDV-Geräten geschlossen.
- Aufgrund des hohen Importanteils der meisten EE-Geräte und Verkehrsmittel und der mangelnden Informationen über Importgeräte, konnten keine Angaben über Anteile der einge-

setzten Kunststoffarten gemacht werden. Der Importanteil der in Dänemark konsumierten EE-Geräte liegt zum Beispiel bei 90 % [Danish EPA, 1999].

- Es konnten keine Angaben über Anteile der eingesetzten FS in den jährlich (weltweit) produzierten Mengen der jeweiligen Kunststoffarten gemacht werden.

Um trotz der oben genannten Probleme zu ausreichend gesicherten Resultaten zu gelangen, wurden parallel unterschiedliche Wege zur Bestimmung der Flammschutzmittelfrachten angewandt und deren Ergebnisse miteinander verglichen.

Tabelle 5-2: Wege zur Bestimmung der gesuchten Frachten

<b>GESUCHTE FRACHTEN UND KONZENTRATIONEN VON KONSUMPRODUKTEN</b>	<b>MÖGLICHKEITEN ZUR BESTIMMUNG</b>
Güterfrachten	1. Zollstatistik, Mikrozensus 2. Vergleich mit anderen europäischen Ländern (Deutschland, Dänemark)
Flammschutzmittelfrachten	1. Güterfrachten und Flammschutzmittelkonzentrationen aller relevanten EE-Einzelprodukte (PC, Kopierer,...) 2. Frachten der Kunststoffarten in den Produktgruppen (EE-Geräte, Fahrzeuge, Baustoffe), kombiniert mit den Anteilen und typischen Konzentrationen der Flammschutzmittel. 3. Vergleich mit anderen mitteleuropäischen Ländern (Deutschland, Dänemark) 4. Rückschluss vom weltweiten Verbrauch an Flammschutzmitteln.

Der Lagerbestand im Konsum konnte aufgrund der Vielzahl an Unbekannten nur grob geschätzt werden. Die durchschnittliche Lebenszeit der Produkte konnte der Literatur entnommen werden.

### 5.1.3 Elektro- und Elektronikprodukte (EE-Produkte)

*Zu Beginn dieses Kapitels erfolgt eine grobe Schätzung der Kunststoff- und Flammschutzmittelfrachten aufgrund europäischer, deutscher und Schweizer Statistiken. Anschliessend werden die flammgeschützten Gerätebauteile (Leiterplatten, Gehäuse, Kleinbauteile) und deren Einsatz bei den Produkten und Produktgruppen behandelt. Die Einteilung der EE-Produkte in Produktgruppen ist in Tabelle 5-1 dargestellt.*

Der Konsum von Kunststoffen in EE-Produkten lag im Jahr 2000 in Westeuropa bei 2.67 Mio. t; somit um 25.4 % höher als im Jahr 1995 ([APME, 2001] und [APME, 1995]). Bei Annahme eines linearen Zuwachses kann die jährliche Wachstumsrate von konsumierten EE-Kunststoffen mit etwa 4.6 % angegeben werden. Für die einzelnen Produktgruppen ist diese Rate jedoch höchst unterschiedlich<sup>1</sup>:

<sup>1</sup> Eine detaillierte Zusammenstellung der Wachstumsraten mit zugehörigen Berechnungen findet sich in Tabelle 9-2.

- Unterhaltungselektronik (TV-, Audio-, Video-, DVD-Geräte): - 1.4 % (negativ)
- Computer: + 31 %
- EE-Bürogeräte (Kopiergeräte, Fax) und Drucker: + 18 %
- EE-Kleinteile: + 2.1 %

Folgende Tabelle soll einen groben Anhaltspunkt und eine Kontrolle für die weitere detailliertere Betrachtung der einzelnen Produkte geben. Die Rohdaten stammen aus Berichten der „Association of plastic manufacturers in Europe“ ([APME, 2001] sowie [APME, 1995]), und die detaillierte Berechnung findet sich im Anhang unter „Nationale und weltweite Vergleiche“.

Tabelle 5-3: Konsum von EE-Produkten und darin enthaltenen Kunststoffen und Flammschutzmitteln in der Schweiz 1998

KONSUM VON EE-PRODUKTEN	Geräte	Kunststoffe	Flammgeschützte Kunststoffe		Bromierte Flamm- schutzmittel	
	kt	kt	%	t	%	t
Unterhaltungselektronik	21.36	5.243	34% <sup>1)</sup>	1'788	83%	1'484
EDV-Geräte (ohne Drucker)	27.70	5.928	65%	3'853	83%	3'198
Telekommunikation	2.74	1.624	0% <sup>2)</sup>	0	0%	0
EE-Bürogeräte	10.49	1.505	20%	301	83% <sup>5)</sup>	250
Kleine Haushaltsgeräte	7.26	3.090	2%	62	50% <sup>6)</sup>	31
Grosse Haushaltsgeräte	63.57	11.725	1%	117	50% <sup>6)</sup>	59
Kabel	88.34	22.146	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
EE-Kleinteile	65.28	4.325	20% <sup>2)</sup>	865	54%	467
E-Werkzeuge	2.26	0.225	2% <sup>3)</sup>	5	50% <sup>6)</sup>	2
Ausgabeautomaten	1.14	0.205	20% <sup>4)</sup>	41	50% <sup>6)</sup>	20
Spielzeug	0.26	0.164	2% <sup>3)</sup>	3	50% <sup>6)</sup>	2
Medizinische Geräte	2.94	0.094	20% <sup>4)</sup>	19	50% <sup>6)</sup>	9
Beleuchtung	2.16	0.061	20% <sup>4)</sup>	12	50% <sup>6)</sup>	6
Überwachungs- und Kontrollin- strumente	0.12	0.061	20% <sup>4)</sup>	12	50%	6
Subtotal IT+Telekomm.	40.9	9.1		4'154		3'448
Subtotal EE-Geräte	142.0	29.9		5'903		5'068
<b>TOTAL EE-Sektor</b>	<b>295.6</b>	<b>56.4</b>	<b>12%</b>	<b>6'768</b>		<b>5'535</b>

Anmerkung: Die Produktfrachten sind immer ohne Stecker, Unterbrecher und Kabeln angegeben. Subtotal IT+Telekommunikation umfasst neben Telekommunikation auch EDV-Geräte und EE-Bürogeräte. Subtotal EE-Geräte umfasst alles ausser Kabeln und EE-Kleinteilen. Quellen: Tabelle 9-2, Anteil FS-Kunststoffe aus [APME, 2001] und Anteil bromierte FS aus [APME, 1995]  
k.A.: keine Angabe

- 1) Für TV und einige wenige audiovisuelle Geräte: 55 %. Unterhaltungselektronik gesamt: 34 % (berechnet).
- 2) [APME, 1995]
- 3) Annahme: wie kleine Haushaltsgeräte
- 4) Annahme: wie Bürogeräte
- 5) Annahme: wie EDV-Geräte und Unterhaltungselektronik
- 6) Eigene Annahme

### 5.1.3.1 Leiterplatten

Leiterplatten bestehen aus einem elektrisch isolierenden Trägermaterial (Basismaterial), auf dem sich leitende Strukturen (Kupferfolie, EE-Bauteile) befinden. Der konstruktive Aufbau von Leiterplatten kann einseitig, doppelseitig, mehrlagig (Multylayer) oder flexibel sein.

Unverstärkte (flexible) Lamine bestehen aus Polyester oder Polyamid und haben ein geringeres Marktvolumen (7-8 % Marktanteil in Deutschland [Achternbosch & Brune, 1996]) als verstärkte. Aufgrund des geringen Marktvolumens und da keine Detailinformationen über den Gehalt an BFS gefunden werden konnten, wurde diese Laminatgruppe in vorliegender Studie nicht weiter betrachtet.

Das Basismaterial besteht aus einem Reaktionsharz und einem Verstärkungsmaterial. Meist ist das Basismaterial ein- oder zweiseitig mit Kupferfolie kaschiert. Man spricht dann von einem Laminat. Unkaschierte Basismaterialien werden auch Prepregs (vorimpregnierte „preimpregnated“ Papier- oder Gewebefolien) genannt. Die Gewichtsanteile eines Laminats sind etwa 45 % Harz, 45 % Verstärkungsmaterial und 9 % Kupfer [Behrendt et al., 1998]. Das Gewicht der Leiterplattenbestückung (elektrische und elektronische Bauelemente) beträgt etwa gleich viel wie das des Laminats [Schütte, 1997].

Die Flammchutzanforderung der eingesetzten Harze wird laut UL94-Test (Underwriters Laboratory, USA) mit V0 festgelegt. Diese Anforderung schreibt ein Selbstverlösch der Materialien im Brandfall in weniger als 10 Minuten vor. Folgende Tabelle zeigt die meist angewandten Basismaterialien:

Tabelle 5-4: Flammgeschützte Lamine für Leiterplatten [Leisewitz & Schwarz, 2000]

Bezeichnung <sup>1</sup>	Reaktionsharz	Verstärkungsmaterial	Einsatzgebiet
FR1	Phenol	Hartpapier	Billig Konsumelektronik (Video, CD, Fernbedienung)
<b>FR2</b>	Phenol <sup>2)</sup>	Hartpapier	Konsumelektronik (Fernseher, Radio, Video) Kfz-Elektronik, Weisse Ware (Waschmaschine, Küchengeräte u.ä.)
FR3	Epoxid	Hartpapier	wie FR2, Telekommunikation
<b>FR4</b>	Epoxid	Glasfasergewebe	Bürogeräte, Telekommunikation, höherwertige Konsum- und Kfz-Elektronik, Industrie-Steuerungen, Messinstrumente, Medizingeräte, Militär, Raumfahrt
FR5	Epoxid	Glasfasergewebe	wie FR4 (für höhere thermische Belastung)
CEM1	Epoxid	Kern: Papier, Abdeckung: Glashartgewebe	Weisse Ware (Armaturen), Kfz-Elektronik (Armaturen), Telekommunikation (Tischapparate), höherwertige Konsumelektronik (TV)
CEM3	Epoxid	Kern: Glasvlies, Abdeckung: Glashartgewebe	wie FR4, Messgeräte, Fernsprechvermittlung

Anmerkung: Die Lamine mit den höchsten Marktanteilen sind fett gedruckt. CEM1 + CEM3 sind sogenannte Composites mit einem Kern und einer Abdeckung.

<sup>1)</sup> Lt. DIN- bzw. NEMA-Norm (National Electrical Manufacturers Association, USA)

<sup>2)</sup> Neben den klassischen FR2-Laminaten (reines Phenolharz) werden auch FR2-Typen angeboten, die eine Beimengung an Epoxidharz (bis zu 90 % der Harzmenge) enthalten [Leisewitz & Schwarz, 2000].

Die Anteile der jährlich produzierten Laminat sind in folgender Tabelle dargestellt. In SO-Asien werden etwa 50 % aller FR4-Laminat und über 70 % aller FR2-Laminat hergestellt. Eine detaillierte Berechnung befindet sich im Anhang - Leiterplatten.

Tabelle 5-5: Internationaler Laminatmarkt 1998 (Rohdaten aus [Leisewitz & Schwarz, 2000]<sup>1)</sup>)

	Flächenanteile	Flächengewicht [kg/m <sup>2</sup> ]	Gewichtsanteile
FR4	56 %	3	66 %
High-Perform <sup>1)</sup>	3 %	2	2.4 %
FR2	32 %	2	25 %
Composites	9 %	2	7 %
Summe	100 %	-	100 %

Anmerkung: 100 % Flächenanteil entspricht 216 Mio. m<sup>2</sup> und 100 % Gewichtsanteil entspricht 550.000 t. Marktanteile anderer Laminat in Deutschland: unbedeutend FR1; 0,9 % FR3; 1,6 % FR5.

<sup>1)</sup> High-Perform-Laminat basieren auf anderen Reaktionsharzen als Epoxid oder Phenol: Polyimid, Bismaleinimid/Triazinharze [BT], BT-Epoxi-Blends Polyphenylenether usw.)

Die weitere Untersuchung wurde auf FR2- und FR4-Laminat beschränkt. Es wurde angenommen, dass FR2-Laminat in allen Taschenrechnern, Unterhaltungselektronik-Geräten (ausser in Spielzeugen und Musikinstrumenten) und EE-Haushaltsgeräten (ausser in Waagen und Uhren) eingesetzt werden, und die übrigen Produkte mit FR4-Laminat bestückt sind (siehe Tabelle 5-4).

#### 5.1.3.1.1 BFS in Leiterplatten

BFS werden vor allem in Laminat, aber auch in Kunststoffumhüllungen für elektrische Bauteile und in sonstigen Kunststoffteilen auf Leiterplatten eingesetzt. Die zwei wichtigsten Laminat werden hier näher betrachtet.

##### FR4-Laminat

Es wird angenommen, dass dieses Laminat in allen EDV-, Büro- und Spezialgeräten eingesetzt wird [Danish EPA, 1999]. FR4 wird meistens mit reaktiv eingesetztem TBBPA flammgeschützt (Bromanteil 18-20 % im Harz [Leisewitz & Schwarz, 2000]) oft auch unter zusätzlicher Beimengung von Antimontrioxid. TBBPA-freier Flammenschutz ist derzeit schon technisch möglich, jedoch wird mit einem zukünftigen Marktanteil von nur etwa 5 % gerechnet (unter anderem aufgrund des um etwa 30 % höheren Preises) [Leisewitz & Schwarz, 2000]. Aus der dänischen Studie [Danish EPA, 1999] wird der TBBPA-Gehalt von etwa 0.42 kg/m<sup>2</sup> übernommen.

##### FR2-Laminat

Diese Laminat werden für elektronische Haushaltsgeräte verwendet und enthalten laut der dänischen Studie [Danish EPA, 1999] additive FS. Im Gegensatz zur dänischen Studie gibt die deutsche Studie [Leisewitz & Schwarz, 2000] an, dass die FS **reaktiv** eingesetzt werden, wenn es sich um eine Harzmischung aus Phenol und Epoxid handelt. Für die weitere Betrachtung wird daher angenommen, dass TBBPA zur Hälfte reaktiv (bei Harzmischungen mit einem

<sup>1</sup> S.145

Bromanteil von 4.5 % im Harz [Leisewitz & Schwarz, 2000]) und zur anderen Hälfte additiv (bei reinen Phenolharzen) eingesetzt wird.

PBDEs wurden traditionell für FR2-Lamine eingesetzt [Leisewitz & Schwarz, 2000]<sup>1</sup>. In den frühen 90er-Jahren wurden FR2-Lamine aus Europa mit TBBPA flammgeschützt, während für die Produktion aus Asien PentaBDPE eingesetzt wurde [Danish EPA, 1999]. Später erfolgte in Asien eine Substitution durch DecaBDPE und dann durch TBBPA. In Analysen von entstückten FR2-Leiterplatten in Elektroschrott ist etwa 35 % des Gehalts an PBDEs auf PentaBDPE zurückzuführen [Leisewitz & Schwarz, 2000]. Es wird angenommen, dass FR2-Lamine in Altgeräten zu etwa 25 % mit PentaBDPE, zu 65 % mit DecaBDPE und zu 10 % mit TBBPA flammgeschützt wurden.

Im Gegensatz zum derzeitigen Weltmarkt, wo der Anteil bromierter FS für FR2 gegenüber den nichtbromierten überwiegt, ist in Deutschland dieses Verhältnis umgekehrt [Leisewitz & Schwarz, 2000]. Es wird angenommen, dass 90 % aller derzeit produzierten FR2-Lamine mit BFS ausgestattet sind. Aus der dänischen Studie [Danish EPA, 1999] wird die Annahme übernommen, dass etwa 30 % der derzeit produzierten FR2-Lamine mit PBDEs (Annahme: DecaBDPE) flammgeschützt werden.

Für TV-Geräte werden meist FR2-Lamine eingesetzt, und es kann angenommen werden, dass in Neuprodukten keine PBDEs eingesetzt werden [Danish EPA, 1999] (Marktanteile der FS: 90 % TBBPA, 10 % andere).

### Kunststoffumhüllungen und elektronische Bauteile [Danish EPA, 1999]

Tabelle 5-6: Marktanteil und Konzentration der eingesetzten FS in Leiterplatten

FLAMMSCHUTZMITTEL IN LEITERPLATTEN	FS-EINSATZANTEILE				FS-KONZENTRATIONEN			
	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA
	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]
<b>Neuprodukte (1998)</b>								
FR2-Laminat	0	0	30	60	0	0	36	36
FR2-Laminat für TV	0	0	0	90	0	0	0	36
FR4-Laminat	0	0	0	100	0	0	0	420
<b>Altprodukte (1990)</b>								
FR2-Laminat	25	0	65	10	36	0	36	36
FR2-Laminat für TV	25	0	65	10	36	0	36	36
FR4-Laminat	0	0	0	100	0	0	0	420

Anmerkung: Es wurde zwischen früheren Anwendungen (Altprodukte, Baujahr 1990) und derzeitigen Anwendungen (Baujahr 1998) unterschieden. Die %-Spalten der FS-Einsatzanteile geben an, dass x % der jährlich in der Schweiz konsumierten Leiterplatten mit dem jeweiligen FS behandelt wurde. Die g/m<sup>2</sup>-Spalte zeigt das Flächengewicht des FS in der Leiterplatte.

Kunststoffumhüllungen für elektrische Bauteile der Leiterplatten sind vorherrschend aus Epo-

<sup>1</sup> S.163

xidharz welches mit TBBPA (etwa 90 g/m<sup>2</sup>)<sup>1</sup> flammgeschützt wird [Danish EPA, 1999]. Für Kunststoffe in elektronischen Bauteilen wird zusätzlich ein PBDEs-Gehalt (Annahme: DecaBD-PE) von maximal 10 g/m<sup>2</sup> geschätzt. Sonstige Kunststoffteile auf Leiterplatten haben ein Gewicht von 4.5 % der Leiterplatte.

#### 5.1.3.1.2 Leiterplattenproduktion

In der Schweiz findet keine Produktion von Grundleiterplatten statt; es werden jedoch Leiterplatten bestückt. Dabei fällt ein Produktionsabfall von <5 – 20 % der Grundleiterplatten an. Der gesamte Schweizer Markt wird auf jährlich 300'000 – 350'000 m<sup>2</sup> Basismaterial geschätzt [Grangier, 2001], [Gallana, 2001]. Das ergibt eine Produktionsabfall-Menge von <15'000 – 70'000 m<sup>2</sup> pro Jahr. Laut Angaben zweier Bestückungsfirmen werden die Produktionsabfälle in KVA verbrannt [Grangier, 2001], [Gallana, 2001].

Bei den in der Schweiz verarbeiteten Leiterplatten dürfte es sich zum grössten Teil um FR4- und in einem kleineren Ausmass um FR2-Lamine handeln. Die europäischen Lamine (FR4 und FR2) enthielten schon Anfang der 90er Jahre ausschliesslich TBBPA als Flammenschutzmittel. Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass in der Schweiz auch Lamine aus den USA und Asien verarbeitet werden.

Um den Stofffluss aus den Leiterplatten-Bestückungsabfällen schätzen zu können, wird davon ausgegangen, dass 20 % der in der Schweiz bestückten Leiterplatten zum FR-2-Typ gehören. Die Stoffflüsse sind in *Tabelle 5-16* zusammengefasst.

#### 5.1.3.2 Gehäuse

*Tabelle 5-7: Anteil bromierter Aussengehäuse einiger EE-Geräte [Leisewitz & Schwarz, 2000]*

Bromierte Gehäuse	Baujahr 1990 <sup>1)</sup>	Baujahr 1999 <sup>1)</sup>	Baujahr 1997-2000 <sup>2)</sup>	Baujahr 1997/98 <sup>3)</sup>	Baujahr 1998 <sup>4)</sup>	Baujahr 1997 <sup>5)</sup>
Monitore	50 %	25 %	11-28 %	28 %	33 %	45-80 %
Computer				22 %	33 %	45 %
Notebooks			29-30 %			30 %
Tastatur				11 %		
Tintenstrahldrucker	33 %	33 %	0-36 %			30 %
Laserdrucker	80 %	50 %	43-100 %			100 %
Kopiergeräte	80 %	50 %				100 %
Fax, Telex						100 %
TV-Geräte (Rückwand)	50 %	10 %	7-11 %			10 %

1) [Leisewitz & Schwarz, 2000] S.262

2) Stiftung Warentest [Leisewitz & Schwarz, 2000] (S.244): Es wurden keine PBDEs gefunden

3) Umfrage deutscher BUND [Leisewitz & Schwarz, 2000] (S.238)

4) LGA Bayern [Leisewitz & Schwarz, 2000] (S.240)

5) [Danish EPA, 1999] S.213

<sup>1</sup> In der deutschen Studie [Leisewitz & Schwarz, 2000] wird mit einem TBBPA-Anteil in Umhüllungen von 20 % zusätzlich zum Laminat gerechnet. Dies ergibt für FR4-Lamine einen Gehalt von etwa 84 g/m<sup>2</sup>.

Als Gehäuse von EE-Geräten werden die grossflächigen Aussengehäuse bezeichnet, nicht jedoch die Innengehäuse. Aussengehäuse bestehen meistens aus Styrolpolymersaten (HIPS, ABS) und Polymerblends (Mischungen) mit diesen.

In der deutschen Studie wird der Anteil an Gehäusen mit BFS für Alt- und Neugeräte geschätzt (siehe Tabelle 5-7). Der durchschnittliche Rückgang bromhaltiger Gehäuse beträgt laut dieser Schätzung etwa 50 %. Laut dänischer Studie [Danish EPA, 1999] sind etwa 70 % aller bromierten Flammschutzmittel in Gehäusen TBBPA oder PBDEs.

In der europäischen Kunststoffstatistik ist der Kunststoffeinsatz für den gesamten EE-Sektor (abgesetzte Produkte in Westeuropa) dokumentiert. Im Jahr 1995 [APME, 1995] war der Einsatz von Polystyrol (inkl. PS-Blends) gleich hoch wie ABS (inkl. ABS-Blends). Im Jahr 2000 [APME, 2001] lag der Einsatz von ABS (inkl. ABS-Blends) bei etwa 70 % über Polystyrol (inkl. PS-Blends).

Der Trend bei den Kunststoffen für Aussengehäuse ging vom Marktführer ABS (90er Jahre) in Richtung PC/ABS und HIPS. Bei Monitoren und Computern sind derzeit Gehäuse aus PC/ABS vorherrschend, bei TV-Geräten dominiert HIPS [Leisewitz & Schwarz, 2000]. Anfang der 90er war HIPS das grösste (30 %) Anwendungsgebiet für DecaBDPE und ABS das grösste (95 %) Anwendungsgebiet für OctaBDPE [Danish EPA, 1999].

Gehäuse von derzeit in Europa hergestellten Computern oder Monitoren bestehen aus ABS oder PC/ABS und enthalten keine BFS. Computer und Monitore, die ausserhalb Europas gefertigt werden, machen etwa 80 % des Marktanteils aus und können aus HIPS oder PPE/HIPS bestehen [Leisewitz & Schwarz, 2000].

Lediglich ABS- oder HIPS-Gehäuse können derzeit noch BFS enthalten (17 % TBBPA additiv oder andere FS) [Leisewitz & Schwarz, 2000]. Laut Schätzung von BASF lag der Marktanteil von Gehäusen aus ABS im Jahr 1996 bei etwa 60 % und von Gehäusen aus PC/ABS im Jahr 1999 bei etwa 80 %. Für Neugeräte wird angenommen, dass 10 % der Gehäuse aus HIPS bestehen und mit TBBPA flammgeschützt werden.

PBDEs dominierten Anfang der 90er Jahre den Flammschutzmittelmarkt von Gehäusekunststoffen, wurden dann im Laufe der Jahre durch TBBPA und andere substituiert und sind bei neuen Geräten nur noch selten zu finden [Leisewitz & Schwarz, 2000].

Es sind keine Mengenangaben weder über die eingesetzten Kunststoffsorten noch über die angewandten FS verfügbar und auch schwer abzuschätzen [Leisewitz & Schwarz, 2000]. Um die Grössenordnungen der eingesetzten FS trotzdem abzuschätzen, wurden die Anteile der eingesetzten Kunststoffe betrachtet, Kunststoffrezepturen der FS-Hersteller erhoben und Ergebnisse von Marktforschungsstudien verwendet (siehe Tabelle 5-8).

Tabelle 5-8: Grobe Schätzung des Einsatzanteils und der Konzentration der eingesetzten FS in Gehäusekunststoffen

FLAMMSCHUTZMITTEL IN GEHÄUSEKUNSTSTOFFEN VON EE-GERÄTEN	FS-EINSATZANTEILE				FS-KONZENTRATIONEN			
	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
<b>Neuprodukte (1998)</b>								
Monitore	0	1	5	15	0	154	115	190
Rechner	0	1	5	15	0	154	115	190
Notebooks	0	0	0	25	0	0	0	190
Tastatur	0	0	5	5	0	0	115	190
Inkjetdrucker	0	1	5	15	0	154	115	190
Laserdrucker	0	2	15	20	0	154	115	190
Kopiergeräte	0	2	15	20	0	154	115	190
Fax, Telex	0	2	15	20	0	154	115	190
TV-Geräte (Rückenwand)	0	0	3	5	0	0	115	170
<b>Altprodukte (1990)</b>								
Monitore	0	15	10	15	0	200	110	200
Rechner	0	15	10	15	0	200	110	200
Notebooks	0	15	10	15.0	0	200	110	200
Tastatur	0	10	10	10.0	0	200	110	135
Inkjetdrucker	0	10	5	10.0	0	200	110	200
Laserdrucker	0	30	20	10.0	0	200	110	200
Kopiergeräte	0	30	20	10.0	0	200	110	200
Fax, Telex	0	30	20	10.0	0	200	110	200
TV-Geräte (Rückenwand)	0	20	20	5.0	0	200	110	135

Anmerkung: Es wurde zwischen früheren Anwendungen (Altprodukte, Baujahr 1990) und derzeitigen Anwendungen (Baujahr 1998) unterschieden. Die %-Spalten der FS-Einsatzanteile geben an, dass x % der jährlich in der Schweiz konsumierten Produkte mit dem jeweiligen FS behandelt wurde. Die g/kg-Spalte zeigt die Konzentration des FS im Kunststoffgehäuse. Die FS-Konzentrationen in den Kunststoffen stammen von FS-Herstellern.

Quellen: Deutsche Studie [Leisewitz & Schwarz, 2000] (S.224-245, 262-264), eigene Annahmen und Anhang - Aussengehäuse von EE-Geräten (Kapitel 9.1.3.3): Tabelle 5-7, Tabelle 9-10, Tabelle 9-16, Tabelle 9-17, Tabelle 9-18.

Für die untersuchten Produkte, die nicht in Tabelle 5-8 erscheinen, wurden bezüglich des FS-Gehalts eigene Annahmen, basierend auf Literaturangaben [APME, 1995], getroffen (siehe auch Anhang - Aussengehäuse von EE-Geräten (Kapitel 9.1.3.3):

- Taschenrechner: FS-Gehalt beträgt 20 % des FS-Gehalts einer Tastatur.
- Unterhaltungselektronik: 10 % Geräte (exkl. Autoradios und Foto-Altgeräte) haben vergleichbare Gehäuse wie Computer. Der Rest der Geräte besitzt Gehäuse ohne Flammenschutz.
- EE-Haushaltsgeräte, EE-Spielzeug, Musikinstrumente und Spezialgeräte: Gehäuse ohne Flammenschutz.

### 5.1.3.3 Kleinbauteile aus Kunststoff in EE-Geräten

Sonstige Kunststoffbauteile von EE-Geräten sind z.B. Kabelumhüllungen, Schalter, Stecker, Transformatoren, Relais, Spulen, Kondensatoren, Widerstände und Ähnliches.

Laut einer Kunststoffstatistik für Westeuropa [APME, 1995] sind in kleinen Haushaltsgeräten nur Innenteile flammgeschützt; der flammgeschützte Anteil an der gesamten Kunststoffmasse dieser Geräte liegt bei etwa 2 %. Für grosse Haushaltgeräte liegt dieser Wert bei 1 %. In der deutschen Studie [Leisewitz & Schwarz, 2000] wird angegeben, dass etwa die Hälfte der Kleinbauteile von EE-Geräten flammgeschützt ausgeführt wird, und dass für diese zu 80 % die Flammschutzmittel PBB, DecaBDPE, TBBPA oder TBBPA-Derivate eingesetzt werden.

Eine Untersuchung von TV-Geräten [Behrendt et al., 1998] gibt den Gewichtanteil von Kunststoffen in elektronischen Bauteilen mit rund 3 % des Gesamtgewichts oder etwa einem Sechstel des Gehäusegewichts an.

Es wird angenommen, dass der Kunststoff-Gewichtsanteil von Kleinbauteilen bei etwa 3 % des Gesamtgewichts von EE-Geräten liegt. Für grosse EE-Haushaltsgeräte und Spezialgeräte wird dieser Anteil etwas niedriger mit 2 % geschätzt.

Weiter wird angenommen, dass von diesen Kunststoffen 5 % mit OctaBDPE, 15 % mit DecaBDPE und 10 % mit TBBPA flammgeschützt werden.

Tabelle 5-9: Marktanteil und Konzentration der eingesetzten FS in Leiterplatten

FLAMMSCHUTZMITTEL IN KLEINBAUTEILEN VON EE-GERÄTEN	FS-EINSATZANTEILE				FS-KONZENTRATIONEN			
	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
In Neu- und Altgeräten	0	5	15	10	0	150	150	150

Anmerkung: Die %-Spalten der FS-Einsatzanteile geben an, dass x % der jährlich in der Schweiz konsumierten Kleinbauteile mit dem jeweiligen FS behandelt wurde. Die g/kg-Spalte zeigt die FS-Konzentration bezogen auf das Gewicht der Kunststoff-Kleinbauteile.

## 5.1.4 Verkehrsmittel

Bei Verkehrsmitteln wurden Strassenfahrzeuge und Schienenfahrzeuge untersucht. Von dem FS-Einsatz in Schienenfahrzeugen wurde eine Schätzung für die Anwendung in Flugzeugen getroffen.

### 5.1.4.1 Strassenfahrzeuge

BFS werden in Leiterplatten, grossen Kunststoffbauteilen, Textilien, Polsterungen und kleinen EE-Bauteilen (Schalter, Trafo, Beleuchtung) eingesetzt. Intensiv studiert wurden PKW von denen dann Rückschlüsse auf LKW, Motorräder und andere gezogen wurden.

Die Zahl verkaufter und genutzter KFZ wurde aus einer Statistik für Österreich auf die Schweiz umgerechnet. Die FS-Konzentrationen und Frachten in grossen Kunststoffbauteilen, Textilien, Polsterungen konnten aufgrund von Daten für Dänemark berechnet werden (siehe Kapitel 9.1.4); sie sind in folgender Tabelle zusammengefasst. Die Zahlen beziehen sich auf das gesamte Kunststoffgewicht der Fahrzeuge.

Tabelle 5-10: Konzentration der untersuchten BFS in Kunststoffen von Strassenfahrzeugen

FLAMMSCHUTZMITTEL in KUNSTSTOFFEN von STRASSENFAHRZEUGEN	PentaBDPE		OctaBDPE		DecaBDPE		TBBPA	
	Neu	Alt	Neu	Alt	Neu	Alt	Neu	Alt
	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
KFZ	0.044	0.089	0.017	0.085	0.625	1.8	0.63	0.75

Anmerkung: Die FS-Konzentrationen beziehen sich auf die Gesamtmasse an Kunststoffen in KFZ exklusive EE-Bauteile aus Kunststoff (Schalter, Trafo, Beleuchtung). Die FS-Konzentrationen geben bereits die untersuchten Stoffe und nicht die kommerziellen FS-Produkte an. Es wurde in Fahrzeuge älteren Baujahrs (*Alt*) und fabrikneue Fahrzeuge (*Neu*) unterschieden.

Die FS-Konzentrationen in anderen Bauteilen sind in Kapitel 5.1.3.1 „Leiterplatten“ und Kapitel 5.1.3.3 „Kleinbauteile aus Kunststoff in EE-Geräten“ beschrieben, wobei für Leiterplatten in KFZ angenommen werden kann, dass sie aus FR4-Laminaten bestehen. Für EE-Bauteile kann angenommen werden, dass sie gewichtsmässig rund 10 % [APME, 1999] des gesamten Kunststoffgewichtes ausmachen.

#### 5.1.4.2 Schienenfahrzeuge

BFS werden in Leiterplatten, grossen Kunststoffbauteilen und kleinen EE-Bauteilen (Schalter, Trafo, Beleuchtung) eingesetzt.

Die FS-Frachten in grossen Kunststoffbauteilen wurden von Werten für Deutschland [Leisewitz & Schwarz, 2000] abgeleitet. Zusätzlich mussten eigenen Annahmen für die Marktanteile der FS getroffen werden.

Ein Schienenfahrzeug enthält etwa 5 M% Kunststoffe, die sich auf etwa 75 M% UP-Harze (ungesättigte Polyesterharze) und etwa 10 M% PVC und rund 15 M% sonstige aufteilen. Als Faustregel kann auch mit 400-500 kg UP-Harz pro Durchschnittswaggon gerechnet werden. Der Mittelwert (450 kg) wurde sowohl für Personenwaggons als auch für Triebfahrzeuge für die Berechnung verwendet.

Bis Ende der 80er Jahre wurden 100 % aller UP-Harze mit BFS flammgeschützt, wobei vor allem DecaBDPE, aber auch PentaBDPE und TBBPA eingesetzt wurden. Der Einsatz von FS in anderen Kunststoffen wurde hier nicht weiter untersucht. Daher beziehen sich die Werte in folgender Tabelle nur auf die eingesetzten UP-Harze.

Die FS-Konzentrationen in anderen Bauteilen sind in Kapitel 5.1.3.1 „Leiterplatten“ und Kapitel 5.1.3.3 „Kleinbauteile aus Kunststoff in EE-Geräten“ beschrieben, wobei für Leiterplatten in Schienenfahrzeugen angenommen werden kann, dass sie aus FR4-Laminaten bestehen. Die Kunststoffmasse in EE-Bauteilen wurde grob mit 10 % der Masse an UP-Harzen geschätzt.

Tabelle 5-11: Marktanteil und Konzentration der untersuchten BFS in UP-Harzen in Schienenfahrzeugen

FLAMMSCHUTZMITTEL IN UP-HARZEN VON SCHIENENFAHRZEUGEN	FS-EINSATZANTEILE				FS-KONZENTRATIONEN			
	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
Baujahr 1990	0	0	5	1	0	0	85	50
Baujahr 1980	5	0	50	5.0	50	0	85	50

Anmerkung: Die Angaben der FS-Konzentrationen beziehen sich auf die kommerziellen FS-Produkte und nicht auf die untersuchten Stoffe. Die %-Spalten der FS-Einsatzanteile geben an, dass x % der jährlich in der Schweiz konsumierten Produkte mit dem jeweiligen FS behandelt wurde. Die g/kg-Spalte zeigt die Konzentration des FS im UP-Harz.

### 5.1.4.3 Flugzeuge

Für Flugzeuge wird eine ähnliche Kunststoffzusammensetzung wie für Schienenfahrzeuge angenommen: Etwa 5 M% vom Gesamtgewicht sind Kunststoffe, von denen etwa 75 M% UP-Harze (ungesättigte Polyesterharze) ausmachen. Daher wurden für Flugzeuge die Werte aus Tabelle 5-11 übernommen.

### 5.1.5 Baumaterialien und Textilien

Dieser Abschnitt befasst sich mit flammgeschützten Kunststoffen und Textilien, die im Bausektor, in Einrichtungsgegenständen und in Spezialbekleidungen eingesetzt werden. Im Speziellen sind dies:

- PUR-, EPS- und XPS-Dämmschäume
- Kunststofffolien im Baubereich
- Epoxidharze und Polycarbonate im Bausektor
- Flexible PUR-Schäume für Möbelpolsterungen
- Beschichtete Textilien für Einrichtungsgegenstände und Spezialbekleidungen.

Die Lebensdauer von Baumaterialien wird in einer BUWAL-Studie mit 30-50 Jahren angegeben [Arx, 1995].

Die Studie für Dänemark [Danish EPA, 1999, S.110] ergab einen Anteil TBBPA und PBDEs von etwa 2.5 % in Baumaterialien und Textilien, bezogen auf die Gesamtmasse TBBPA und PBDEs in Fertigprodukten. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass diese Produktgruppe mengenmässig auch in der Schweiz eine untergeordnete Rolle spielt. Die recht groben Annahmen, die zur Schätzung der Flüsse und Lager getroffen worden sind, erfüllen die Zielsetzung dieser Studie deshalb in ausreichendem Masse.

### 5.1.5.1 PUR-, EPS-, XPS- und PE-Dämmschäume

Etwa 5 % aller EPS-Dämmschäume und etwa 80 % aller XPS-Dämmschäume werden in Dänemark flammgeschützt eingebaut. Derzeit wird hierfür beinahe ausschliesslich HBCD als FS eingesetzt. Die Studie für Dänemark gibt HBCD-Konzentrationen für EPS mit 0.5 – 1.0 M% und für XPS mit 1.0 – 2.0 M% an. [Danish EPA, 1999] (S.77+80).

In der Schweiz wurden 1994 im Bausektor etwa 6'000-12'000 t Polyurethan als Hartschaum für die Wärmedämmung und etwa 13'000 t EPS verwendet [Arx, 1995]. EPS wird mit etwa 1-1.5 M% HBCD flammgeschützt [Arx, 1995].

Es wird angenommen, dass die EPS Verbrauchsmenge in der Schweiz 1998 geringfügig höher bei etwa 15'000 t/a liegt, und dass die XPS Verbrauchsmenge, wie in Deutschland [Leisewitz & Schwarz, 2000] (S.97), bei etwa einem Fünftel der EPS Masse, also bei etwa 3'000 t/a liegt. Früher wurde für XPS bevorzugt DecaBDPE eingesetzt. Durch Reduktion der Extrusionstemperaturen stellte man jedoch vollkommen auf HBCD um. Es wird angenommen, dass 80 % der XPS-Altprodukte DecaBDPE mit einer Konzentration von 2 M% enthalten.

Für flammgeschützten PUR-Schaum wird laut Studien für Dänemark und Deutschland derzeit weder TBBPA noch PBDEs noch HBCD eingesetzt. Früher wurde TBBPA und PentaBDPE für PUR Montageschaum eingesetzt [Leisewitz & Schwarz, 2000] (S.74) es sind jedoch keine Daten über Anteil und Einsatzmenge bekannt. Es wird angenommen, dass ein Viertel der früher eingebauten Montageschäume mit PentaBDPE und ein Drittel mit TBBPA flammgeschützt wurden. Die FS-Konzentration von Montageschäumen liegt mit 22 M% deutlich höher als die von anderen PUR-Schäumen (4-13 M%) [Leisewitz & Schwarz, 2000] (S.85). Bezogen auf alle PUR-Dämmschäume, liegt der derzeitige Anteil von konsumierten Montageschäumen bei etwa 20 M% [Leisewitz & Schwarz, 2000] (S.85).

PE-Schäume werden in geringem Ausmass als Isolierung bei Heisswasserleitungen eingesetzt und können mit HBCD oder PBDEs flammgeschützt werden. Für Dänemark wird die jährlich verbrauchte Menge PE-Schaum mit 30 – 50 t/a und PBDEs mit etwa 0 – 1 t/a angegeben [Danish EPA, 1999] (S.78). Unter der Annahme, dass hierfür nur DecaBDPE eingesetzt wird, ergibt dies für die Schweiz eine jährliche Menge von etwa 0.67 t/a DecaBDPE (von etwa 54 t/a PE-Schaum).

In Deutschland wurden in der Zeit von 1967-1997 etwa 1 Mio. t PUR-Dämmschaum (ohne Montageschaum) verbaut [Leisewitz & Schwarz, 2000] (S.93). Das entsprechende Lager an Montageschaum wird durch den derzeitigen Verbrauch [Leisewitz & Schwarz, 2000] (S.85) mit 0.26 Mio. t geschätzt. Die EPS- und XPS-Lager in Deutschland werden mittels des sehr konstant gebliebenen Verbrauchsverhältnisses (siehe Tabelle 9-25) mit etwa 2.4 Mio. t und 0.46 Mio. t geschätzt. Das Lager an PE-Schaum wird aufgrund des Verbrauchsverhältnisses EPS zu PE geschätzt.

Mittels Einwohnerzahlen umgerechnet auf die Schweiz ergeben sich folgende Lagerbestände:

EPS: 210.000 t

XPS: 40.000 t

PUR inkl. Montageschaum: 110.000 t

PE-Schaum: 750 t

Zusammenfassend werden in folgender Tabelle die Werte für die Berechnung angegeben:

Tabelle 5-12: Marktanteil und Konzentration der untersuchten BFS in Dämmschäumen

	FS-EINSATZANTEILE				FS-KONZENTRATIONEN			
	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA
	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
<b>Neuprodukte (1998)</b>								
EPS-Dämmschaum	0	0	0	0	0	0	0	0
XPS-Dämmschaum	0	0	0	0	0	0	0	0
PUR-Dämmschaum	0	0	0	0	0	0	0	0
PE-Dämmschaum	0	0	50	0	0	0	20	0
<b>Altprodukte (1990)</b>								
EPS-Dämmschaum	0	0	0	0	0	0	0	0
XPS-Dämmschaum	0	0	80	0	0	0	20	0
PUR-Dämmschaum	5	0	0	6.7	220	0	0	220
PE-Dämmschaum	0	0	0	0	0	0	0	0

Anmerkung: Die Angaben der FS-Konzentrationen beziehen sich auf die kommerziellen FS-Produkte und nicht auf die untersuchten Stoffe. Es wurde in frühere Anwendungen (Altprodukte) und derzeitige (Neuprodukte) unterschieden. Die %-Spalten der FS-Einsatzanteile geben an, dass x % der jährlich in der Schweiz konsumierten Produkte mit dem jeweiligen FS behandelt wurden. Die g/kg-Spalte zeigt die Konzentration des FS im Kunststoff.

### 5.1.5.2 Kunststofffolien

Kunststofffolien werden aus Thermoplasten (PE, PP, etc.) oder Duroplasten (PVC) erzeugt.

PVC enthält für die meisten Anwendungen kein Flammschutzmittel [Danish EPA, 1999] (S.78). Falls PVC flammgeschützt werden soll, wird hierfür etwa 5 % phosphathaltiges FS eingesetzt [Arx, 1995]. Ein Kunststoffhandbuch [Gächter & Müller, 1987] gibt jedoch als Beispiel für einen PVC-Flammschutz 4.9 M% PentaBDPE an, und ein FS-Hersteller [Dead Sea Bromine, 2001] empfiehlt DecaBDPE als PVC-Flammschutz.

Laut einer Studie für Dänemark sind 10 - 20 % der für den Tiefbau eingesetzten Folien möglicherweise flammgeschützt [Danish EPA, 1999] (S.79).

Kunststofffolien aus Thermoplasten werden mit PBDEs, HBCD oder anderen BFS mit einer Konzentration von 1.3 – 5 M% behandelt [Danish EPA, 1999] (S.78). Ein Kunststoffhandbuch und ein FS-Hersteller geben jedoch meist höhere FS-Konzentrationen an:

- PP mit 4.8-24 M% DecaBDPE je nach Flammschutz [Dead Sea Bromine, 2001],
- PP mit 5.2 M% TBBPA für geringen Flammschutz [Dead Sea Bromine, 2001],
- PE als Baustoff mit 20-24 M% DecaBDPE [Dead Sea Bromine, 2001],
- HDPE mit 5.0 M% OctaBDPE für geringen Flammschutz [Gächter & Müller, 1987],
- HDPE mit 10.0 M% DecaBDPE für hohen Flammschutz [Gächter & Müller, 1987] und
- LDPE mit 4.9 M% OctaBDPE für geringen Flammschutz [Gächter & Müller, 1987]

Da keine detaillierteren Daten bezüglich des Einsatzes der FS gefunden werden konnten, wurde eine Reihe von Annahmen getroffen, welche auf den bereits erwähnten Literaturwerten basieren (siehe Tabelle 5-13).

Tabelle 5-13: Marktanteil und Konzentration der untersuchten BFS in Kunststofffolien

	FS-EINSATZANTEILE				FS-KONZENTRATIONEN			
	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA
	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
<b>Neuprodukte (1998)</b>								
PE-Folie	0	0	10	0	0	0	100	0
PP-Folie	0	0	10	10	0	0	100	52
PVC-Folie	0	0	5	0	0	0	50	0
<b>Altprodukte (1990)</b>								
PE-Folie	0	10	20	0	0	50	100	0
PP-Folie	0	0	20	10	0	0	100	52
PVC-Folie	5	0	10	0	49	0	50	0

Anmerkung: Die Angaben der FS-Konzentrationen beziehen sich auf die kommerziellen FS-Produkte und nicht auf die untersuchten Stoffe. Es wurde in frühere Anwendungen (Altprodukte) und derzeitige (Neuprodukte) unterschieden. Die %-Spalten der FS-Einsatzanteile geben an, dass x % der jährlich in der Schweiz konsumierten Produkte mit dem jeweiligen FS behandelt wurden. Die g/kg-Spalte zeigt die Konzentration des FS in der Folie.

### 5.1.5.3 Epoxidharze und Polycarbonate im Bausektor

Tabelle 5-14: Marktanteil und Konzentration der untersuchten BFS in Epoxidharzen und Polycarbonaten

	FS-EINSATZANTEILE				FS-KONZENTRATIONEN			
	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA
	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
<b>Neuprodukte (1998)</b>								
Epoxidharz	0	0	0	10	0	0	0	20
Polycarbonat	0	0	0	10	0	0	0	20
<b>Altprodukte (1990)</b>								
Epoxidharz	0	0	0	10	0	0	0	20
Polycarbonat	0	0	0	10	0	0	0	20

Anmerkung: Die Angaben der FS-Konzentrationen beziehen sich auf die kommerziellen FS-Produkte und nicht auf die untersuchten Stoffe. Es wurde in frühere Anwendungen (Altprodukte) und derzeitige (Neuprodukte) unterschieden. Die %-Spalten der FS-Einsatzanteile geben an, dass x % der jährlich in der Schweiz konsumierten Produkte mit dem jeweiligen FS behandelt wurden. Die g/kg-Spalte zeigt die Konzentration des FS im Kunststoff.

In Epoxidharzen und in Polycarbonaten wird TBBPA reaktiv als FS eingesetzt. Epoxidharze werden im Bausektor als Oberflächen- und Korrosionsschutz für Fließbeläge, Mörtelbeläge und

Betonböden sowie als Baukleber verwendet. Im Jahre 1990 wurden in Westeuropa etwa 120'000 t/a Epoxidharze und etwa 35'000 t/a Polycarbonate im Bausektor eingesetzt [Arx, 1995]. Umgelegt auf die Schweiz sind das etwa 4'700 t/a Epoxidharze und etwa 1'400 t/a Polycarbonate.

Da keine weiteren Werte bezüglich flammgeschütztem Anteil und Konzentration der FS bekannt waren, konnte dieser Bereich quantitativ nicht beurteilt werden. (In Epoxidharzummüllungen von elektrischen Bauteilen wird eine TBBPA-Konzentration von 2 % angegeben [Danish EPA, 1999]).

#### 5.1.5.4 Textilien

Dieser Abschnitt behandelt Arbeitsbekleidungen, Planen (Zelte und Wagenplanen), Textilien in der Inneneinrichtung von Räumen (Teppiche, Vorhänge, Möbelbezüge) und Polsterungen.

Ein wichtiger Einsatzbereich von DecaBDPE und HBCD ist der Flammenschutz von Polsterstoffen und von Vorhängen und Bezügen aus Polypropylen. Das FS wird in einem Latexverband den Produkten durch eine Rückbeschichtung angebracht [Drohmann, 2000].

Auch eine Direktbehandlung der Faser ist möglich. So wird zum Beispiel DecaBDPE für Polyester und Zellulosefasern (Zelt-, Markisen- und Möbelbezugsstoffe sowie Wagenplanen) eingesetzt [Leisewitz & Schwarz, 2000] (S.291).

Die gesamte Flammenschutzmittelfracht in Textilien, welche 1997 in Deutschland abgesetzt wurde, wurde mit etwa 1'250 t geschätzt [Leisewitz & Schwarz, 2000] (S.296). Der Einsatz von DecaBDPE und PentaBDPE wird hierbei minimal eingeschätzt, kann jedoch nicht ausgeschlossen werden.

PentaBDPE in flexiblen PUR-Schäumen scheint allgemein aus dem Verkehr gezogen zu sein [Danish EPA, 1999]. TBBPA, und DecaBDPE wurden und werden nicht als FS von Textilien eingesetzt. Für Dänemark 1997 wurde der Einsatz von DecaBDPE für Textilien mit weniger als 5 t angegeben. Umgerechnet auf die Schweiz sind das weniger als 7 t/a.

### 5.1.6 Prozess „Produktion, Handel und Konsum“

Die detaillierte Datenaufstellung und Erläuterung befindet sich im Anhang 1 – Verkehr mit Produkten; Kapitel 9.1.7.

#### 5.1.6.1 Bandbreiten der Daten

Die Bandbreite der Güter- und Stofffrachten wurde unter der Annahme berechnet, dass sich alle Parameter innerhalb eines realitätsnahen Minimums beziehungsweise eines realitätsnahen Maximum befinden. Die Parameter sind alle zur Berechnung notwendigen Frachten und Faktoren, die in den vorangehenden Kapiteln angeführt wurden. Die Bandbreite der einzelnen Parameter ergibt sich direkt aus der Literatur, aufgrund unterschiedlicher Angaben in der Literatur oder aufgrund von Bandbreiten bei eigenen Annahmen.

Die Bandbreiten der Berechnungsparameter werden in Bezug auf die Mittelwerte<sup>1</sup> angegeben, welche in den vorangehenden Kapiteln bestimmt wurden:

- Güterfrachten: Minimaler Absatz von Baumaterialien um 20 % geringer und von allen restlichen Produkten (ausser Computer) und 10 % geringer als der Mittelwert. Maximaler Absatz von Verkehrsmitteln sowie Haushalts- und Spezialelektrogeräten um 30 % höher, von Baumaterialien und EE-Kleinteilen um 20 % höher und von allen restlichen Produkten (ausser Computern) um 10 % höher.
- Konzentrationen: Aufgrund der Bandbreite in der Literatur (etwa  $\pm 10\%$ ).
- Marktanteile der Flammschutzmittel: Die Marktanteile der FS wurden, bezogen auf den Gesamtmarkt, 5 % hinauf- bzw. hinabgesetzt. Dies bedeutet je nach mittlerem Marktanteil (z.B.: 10 % oder 25 %) eine unterschiedlich hohe Unsicherheit (z.B.:  $\pm 50\%$  oder  $\pm 20\%$ ).
- Bauteilgewichte und Leiterplattenflächen:  $\pm 10\%$ .
- Lebenszeiten: Aufgrund der Bandbreite in der Literatur (etwa  $\pm 30\%$ ).
- Anteil Altprodukte (Baujahr 1990) im Lager und in entsorgten Abfällen: Der Altprodukteanteil wurde, bezogen auf das Gesamtlager bzw. die gesamt entsorgten Abfälle, 10 % hinauf- bzw. hinabgesetzt.

### 5.1.6.2 Prozess „Produktion“

In der Schweiz werden keine der untersuchten BFS produziert, jedoch bedeutende Mengen an ungeformten Kunststoffen, Kunststoffhalbprodukten und Fertigprodukten aus Kunststoff hergestellt.

#### 5.1.6.2.1 Produzierte Fertigprodukte

Da keine detaillierten Produktionsstatistiken<sup>2</sup> vorlagen (ausser für Computer), wurden die Produktionsfrachten von Fertigprodukten durch Bilanzierung des Prozesses „Handel“ geschätzt. Hierbei wurde angenommen, dass sich die jährliche Grösse eines möglichen Lagers im Handel Ende der 90er Jahre nicht verändert hat.

Um zu berücksichtigen, dass in der Schweiz produzierte Güter weit geringere Konzentrationen der PBDEs enthalten als die Importgüter, wurden diese Konzentrationen bei EDV-, Büro-, Telekommunikations- und TV-Geräten auf einen Zehntel des ursprünglichen Wertes herabgesetzt. Als Ausgleich wurden bei Importgeräten geringfügig höhere Konzentrationen für PBDEs angesetzt<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> Es handelt sich hierbei nicht um arithmetische Mittelwerte sondern um möglichst realitätsnahe Werte.

<sup>2</sup> Aus der: Kunststoff-Statistik 1998 der Schweiz Kunststoffverband Schweiz (1998) Kunststoffstatistik 1998. Aarau., konnten die Frachten an gehandelten und verarbeiteten ungeformten Kunststoffen und Kunststoffhalbprodukten entnommen werden, jedoch nicht deren Zuordnung auf Fertigprodukte und damit auch nicht deren Frachten an FS.

<sup>3</sup> Bei Importgeräten wurden geringfügig höhere PBDEs-Konzentrationen angesetzt, um den Prozess zu bilanzieren und um für die Summe der produzierten und importierten Geräte wieder die durchschnittlichen Konzentrationen an PBDEs sicherzustellen.

Für Spezialgeräte, Baumaterialien und Textilien konnten keine Aussenhandelszahlen erhoben werden. Vereinfachend wurde angenommen, dass diese Produkte vollständig in der Schweiz produziert werden.

Tabelle 5-15: Güter- und Stofffrachten von produzierten Fertigprodukten (CH, 1998)

PRODUZIERTE PRODUKTE Schweiz, 1998	Güterfracht	PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA
	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
<b>EDV- und Büroelektronik</b>	<b>38.3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>12</b>	<b>301</b>
Computer+Monitore (pHH)	1.2	0	0.0	0.2	11.9
Computer+Monitore (Büro)	3.5	0	0.1	0.6	35.7
Server	0.0	0	0.0	0.0	0.2
Notebook	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Laserprinter	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Tintenstrahldrucker	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Kopiergeräte	32.8	0	0.8	10.8	249.8
Rechenmaschinen	0.8	0	0.0	0.1	3.7
<b>Kommunikationstechnik</b>	<b>2.5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>13</b>
<b>Unterhaltungselektronik</b>	<b>4.6</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>15</b>
<b>Haushaltgeräte - klein</b>	<b>10.4</b>	<b>0</b>	<b>0.8</b>	<b>7.0</b>	<b>6.4</b>
<b>Haushaltgeräte - gross</b>	<b>30.5</b>	<b>0</b>	<b>1.6</b>	<b>13.8</b>	<b>9.7</b>
<b>Spezialgeräte</b>	<b>11.7</b>	<b>0</b>	<b>0.6</b>	<b>6.3</b>	<b>58.0</b>
<b>EE-Kleinteile</b>	<b>160.8</b>	<b>0</b>	<b>1.2</b>	<b>13.3</b>	<b>13.1</b>
<b>Verkehrsmittel</b>	<b>3.8</b>	<b>0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.5</b>	<b>0.2</b>
<b>Baumaterialien und Textilien</b>	<b>47.5</b>	<b>0</b>	<b>0.0</b>	<b>72.1</b>	<b>17.5</b>
<b>Total</b>	<b>310.1</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>128</b>	<b>435</b>

#### 5.1.6.2.2 Feste Abfälle und Emissionen aus dem Produktionsprozess

EDV-Geräte und viele andere EE-Produkte werden in der Schweiz durch den Zusammenbau von meist importierten Bauteilen produziert (Assemblerung), und es kann davon ausgegangen werden, dass aus diesem Prozess keine FS-haltigen Abfälle und Emissionen entstehen.

Die Menge der in der Schweiz hergestellten EE-Bauteile und einzelner Baumaterialien konnte nicht bestimmt werden. Daher konnten Abfallflüsse und Emissionen aus dem Produktionsbereich nicht vollständig angegeben werden, jedoch wurden einzelne Bereiche geschätzt.

Ein Vergleich mit Dänemark [Danish EPA, 1999] zeigt, dass die Abfälle und Emissionen aus der Produktion im Vergleich zu denen aus dem Prozess „Konsum“ niedrig liegen. Die grösste FS-Fracht in Produktionsabfällen stammt aus der Bestückung von Leiterplatten. Dieser Bereich wurde für die Schweiz geschätzt:

Tabelle 5-16: Produktionsabfälle aus der Bestückung von Leiterplatten

Bestückung von Leiterplatten in der Schweiz		Güter- fracht	DecaBDPE	TBBPA
		[t/a]	[t/a]	[t/a]
Produktionsabfälle	Min	45	0.03	5.1
	Mittel	135	0.09	14.4
	Max	225	0.15	23.7

### 5.1.6.3 Prozess „Handel“

Die Importe und Exporte von Fertigprodukten wurden durch Daten der eidgenössischen Zollverwaltung ermittelt. Für Spezialgeräte, Baumaterialien und Textilien konnten keine Aussenhandelszahlen erhoben werden. Um den Bereich grob abzuschätzen, wurde angenommen, dass diese Produktgruppen in der Schweiz produziert werden und der Export vernachlässigbar ist.

Tabelle 5-17: Güter- und Stofffrachten von importierten Fertigprodukten (CH, 1998)

IMPORTIERTE PRODUKTE Schweiz, 1998	Güterfracht	PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA
	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
<b>EDV- und Büroelektronik</b>	<b>46.6</b>	<b>0.00</b>	<b>16</b>	<b>204</b>	<b>476</b>
Computer+Monitore (pHH)	5.3	0.00	1.1	11.4	53.4
Computer+Monitore (Büro)	14.8	0.00	3.1	32.3	149.4
Server	1.1	0.00	0.2	1.9	10.7
Notebook	0.6	0.00	0.0	0.6	13.7
Laserprinter	8.9	0.00	2.1	29.5	88.3
Tintenstrahldrucker	13.4	0.00	2.1	22.2	142.4
Kopiergeräte	2.0	0.00	7.4	103.8	15.0
Rechenmaschinen	0.6	0.00	0.1	2.3	3.0
<b>Kommunikationstechnik</b>	<b>3.1</b>	<b>0.00</b>	<b>0.5</b>	<b>5.1</b>	<b>17</b>
<b>Unterhaltungselektronik</b>	<b>21.6</b>	<b>0.00</b>	<b>1.9</b>	<b>30</b>	<b>57</b>
<b>Haushaltgeräte - klein</b>	<b>14.2</b>	<b>0.00</b>	<b>1.1</b>	<b>9.7</b>	<b>9.6</b>
<b>Haushaltgeräte - gross</b>	<b>89.7</b>	<b>0.00</b>	<b>4.6</b>	<b>40.5</b>	<b>27.8</b>
<b>Spezialgeräte</b>	<b>3.6</b>	<b>0.00</b>	<b>0.2</b>	<b>1.6</b>	<b>1.1</b>
<b>EE-Kleinteile</b>	<b>33.2</b>	<b>0.00</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
<b>Verkehrsmittel</b>	<b>586.1</b>	<b>1.91</b>	<b>11.8</b>	<b>125.1</b>	<b>103.1</b>
<b>Baumaterialien und Textilien</b>	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
<b>Total</b>	<b>798.1</b>	<b>2</b>	<b>36</b>	<b>423</b>	<b>692</b>

n.b. nicht bestimmt

Tabelle 5-18: Güter- und Stofffrachten von exportierten Fertigprodukten (CH, 1998)

EXPORTIERTE PRODUKTE Schweiz, 1998	Güterfracht	PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA
	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
<b>EDV- und Büroelektronik</b>	<b>56.0</b>	<b>0.00</b>	<b>12</b>	<b>161</b>	<b>482</b>
Computer+Monitore (pHH)	0.7	0.00	0.1	1.3	7.2
Computer+Monitore (Büro)	2.0	0.00	0.3	3.6	20.1
Server	0.1	0.00	0.0	0.3	1.4
Notebook	0.1	0.00	0.0	0.1	1.4
Laserprinter	7.3	0.00	1.7	24.4	72.9
Tintenstrahldrucker	11.1	0.00	1.7	18.3	117.6
Kopiergeräte	33.7	0.00	7.9	110.8	256.1
Rechenmaschinen	1.1	0.00	0.1	1.8	5.0
<b>Kommunikationstechnik</b>	<b>2.2</b>	<b>0.00</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>12</b>
<b>Unterhaltungselektronik</b>	<b>3.8</b>	<b>0.00</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>
<b>Haushaltgeräte - klein</b>	<b>8.4</b>	<b>0.00</b>	<b>0.6</b>	<b>5.7</b>	<b>7.5</b>
<b>Haushaltgeräte - gross</b>	<b>64.8</b>	<b>0.00</b>	<b>3.3</b>	<b>29.3</b>	<b>20.1</b>
<b>Spezialgeräte</b>	<b>0.2</b>	<b>0.00</b>	<b>0.0</b>	<b>0.1</b>	<b>0.1</b>
<b>EE-Kleinteile</b>	<b>38.0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
<b>Verkehrsmittel</b>	<b>134.7</b>	<b>0.41</b>	<b>2.6</b>	<b>27.7</b>	<b>22.4</b>
<b>Baumaterialien und Textilien</b>	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
<b>Total</b>	<b>308.0</b>	<b>0.41</b>	<b>19</b>	<b>230</b>	<b>554</b>

n.b. nicht bestimmt

### 5.1.6.4 Prozess „Konsum“

#### 5.1.6.4.1 FS-Frachten in konsumierten Produkten

Die Stoffflüsse in den konsumierten Fertigprodukten wurden aufgrund von Güterfrachten und Stoffkonzentrationen bestimmt:

Tabelle 5-19: Güter- und Stofffrachten von konsumierten Produkten (CH, 1998)

KONSUMIERTE PRODUKTE Schweiz, 1998	Güterfracht	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
<b>EDV- und Büroelektronik</b>	<b>28.9</b>	<b>0.00</b>	<b>5.0</b>	<b>55</b>	<b>295</b>
Computer+Monitore (pHH)	5.7	0.00	1.0	10.3	58.0
Computer+Monitore (Büro)	16.3	0.00	2.8	29.4	165.0
Server	0.9	0.00	0.2	1.7	9.4
Notebook	0.5	0.00	0.0	0.5	12.3
Laserprinter	1.5	0.00	0.4	5.1	15.4
Tintenstrahldrucker	2.3	0.00	0.4	3.9	24.8
Kopiergeräte	1.1	0.00	0.3	3.8	8.7
Rechenmaschinen	0.4	0.00	0.0	0.6	1.7
<b>Kommunikationstechnik</b>	<b>3.3</b>	<b>0.00</b>	<b>0.3</b>	<b>3.6</b>	<b>18.0</b>
<b>Unterhaltungselektronik</b>	<b>22.4</b>	<b>0.00</b>	<b>1.8</b>	<b>28.5</b>	<b>62.7</b>

KONSUMIERTE PRODUKTE  Schweiz, 1998	Güterfracht	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
Haushaltgeräte – klein	16.2	0.00	1.2	11.0	8.5
Haushaltgeräte – gross	55.4	0.00	2.8	25.1	17.4
Spezialgeräte	15.2	0.00	0.8	7.9	59.0
EE-Kleinteile	156.0	0.00	1.2	13.3	13.1
Verkehrsmittel	455.3	1.50	9.2	98.0	80.9
Baumaterialien und Textilien	47.5	0.00	0.0	79.1	17.5
<b>Total</b>	<b>800.2</b>	<b>1.50</b>	<b>22</b>	<b>322</b>	<b>573</b>

#### 5.1.6.4.2 Alternative Berechnung der FS-Frachten in konsumierten Produkten

*In diesem Kapitel erfolgt eine Schätzung der in der Schweiz in Verkehr befindlichen FS aufgrund von Vergleichen mit anderen Nationen und mit dem weltweiten FS-Einsatz.*

Die in diesem Abschnitt behandelten Vergleiche sind nur im Rahmen dieser Studie zulässig, da sie vor allem einer groben Schätzung und einer Absicherung anderer Berechnungen dienen. Natürlich können der Schweizer Markt und das Konsumverhalten der Schweizer nur eingeschränkt mit jenen anderer europäischer Nationen verglichen werden.

Verglichen werden der Konsum und die Nutzung von Endprodukten, welche die untersuchten FS enthalten. Die relevantesten Produktgruppen sind EE-Geräte und Automobile. Da diese Produkte in der EU generell einen hohen Importanteil haben (es werden z.B. 90 % der in Dänemark verkauften PCs importiert [Danish EPA, 1999]), kann davon ausgegangen werden, dass die Zusammensetzung der in den einzelnen EU-Staaten verkauften Produkten ähnlich ist.

Tabelle 5-20: Grobe Schätzung der Flammschutzmittel in konsumierten Endprodukten in der Schweiz

FS in konsumierten Endprodukten	PentaBDPE-FS <sup>4)</sup>	OctaBDPE-FS <sup>4)</sup>	DecaBDPE	TBBPA
	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
Schweiz, 1997, Minimum <sup>1)</sup>	3.8	1.7	24	240
Schweiz, 1997, Mittelwert <sup>1)</sup>	9.5	4.3	61	360
Schweiz, 1997, Maximum <sup>1)</sup>	15	6.8	98	480
Schweiz, 1999, Mittelwert <sup>2)</sup>	k.A.	k.A.	87	330
Schweiz, 1999, Mittelwert <sup>3)</sup>	39	18	250	560

1) Berechnungsgrundlage: Stoffflussanalyse für Dänemark [Danish EPA, 1999] (S.88), Weltproduktion PBDEs 1999 lt. BSEF [Leisewitz et al., 2000] (Bd.I,S.20)

2) Berechnungsgrundlage: Geschätzte FS-Frachten der FS-Hersteller und -Händler für Deutschland [Leisewitz et al., 2000] (Bd.I,S.27+31)

3) Berechnungsgrundlage: Weltweit abgesetzte FS-Frachten laut Angaben des BSEF (Bromine Science and Environmental Forum) [Leisewitz et al., 2000] (Bd.I,S.20)

4) Die Frachten an PentaBDPE-FS und OctaBDPE-FS beziehen sich auf die kommerziellen Produkte, welche rund 59 % PentaBDPE bzw. rund 34 % OctaBDPE enthalten.

In der Tabelle 5-20 befinden sich die Flammenschutzmittelfrachten, welche durch nationale und weltweite Vergleich bestimmt wurden. Die Berechnungen hierfür und FS-Produktionsdaten befinden sich im Anhang „Nationale und weltweite Vergleiche“, Kapitel 9.1.1. Die berechneten Werte befinden sich in der selben Grössenordnung, wie die aufgrund von Güterfrachten und Stoffkonzentrationen konventionell berechneten Werten (Tabelle 5-19). Die Werte für PentaBDPE liegen etwas höher und die von OctaBDPE und DecaBDPE etwas tiefer als die konventionell berechneten Werte.

#### 5.1.6.4.3 FS im Lager und in festen Siedlungsabfällen

Die Abschätzung des in Haushalten vorhandenen Lagers an elektrischen und elektronischen Geräten ist mit grossen Unsicherheiten verbunden. Nur ein kleiner Teil der aus dem Verkehr gezogenen Geräte, wird in der Regel kurzfristig entsprechend den Regelungen über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte (VREG) entsorgt. Es ist anzunehmen, dass fast jeder Haushalt im Keller oder Dachboden eine Unzahl von alten Radios, Tonbandgeräten, PCs, Staubsauger etc. aufbewahrt und dass dadurch einerseits das Lager an BFS in Haushalten deutlich höher ist und andererseits die BFS-Fracht in Siedlungsabfällen deutlich niedriger liegt.

Tabelle 5-21: Güter- und Stofffrachten von entsorgten Abfällen (CH, 1998)

ENTSORGTE ABFÄLLE Schweiz, 1998	Güterfracht	PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA
	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
<b>EDV- und Büroelektronik</b>	<b>13.7</b>	<b>0</b>	<b>16</b>	<b>33</b>	<b>134</b>
Computer+Monitore (pHH)	2.4	0.0	2.5	5.5	24.8
Computer+Monitore (Büro)	6.9	0.0	7.2	15.6	70.5
Server	0.4	0.0	0.4	0.9	4.0
Notebook	0.2	0.0	0.2	0.4	4.8
Laserprinter	1.1	0.0	2.4	4.1	8.6
Tintenstrahldrucker	1.6	0.0	1.3	2.6	15.7
Kopiergeräte	0.8	0.0	1.8	3.0	4.5
Rechenmaschinen	0.3	0.0	0.1	0.6	1.1
<b>Kommunikationstechnik</b>	<b>2.7</b>	<b>0.0</b>	<b>0.9</b>	<b>3.1</b>	<b>14.0</b>
<b>Unterhaltungselektronik</b>	<b>13.2</b>	<b>0.60</b>	<b>23.4</b>	<b>48.6</b>	<b>31.7</b>
<b>Haushaltgeräte - klein</b>	<b>14.8</b>	<b>0.00</b>	<b>1.1</b>	<b>10.0</b>	<b>7.8</b>
<b>Haushaltgeräte - gross</b>	<b>42.6</b>	<b>0.03</b>	<b>2.2</b>	<b>19.3</b>	<b>13.3</b>
<b>Spezialgeräte</b>	<b>10.2</b>	<b>0.00</b>	<b>0.5</b>	<b>5.3</b>	<b>39.7</b>
<b>EE-Kleinteile</b>	<b>71.1</b>	<b>0.00</b>	<b>3.3</b>	<b>42.2</b>	<b>16.2</b>
<b>Verkehrsmittel</b>	<b>329.8</b>	<b>2.37</b>	<b>9.0</b>	<b>106.2</b>	<b>66.3</b>
<b>Baumaterialien und Textilien</b>	<b>23.7</b>	<b>27.4</b>	<b>5.2</b>	<b>102.1</b>	<b>66.2</b>
<b>Total</b>	<b>521.7</b>	<b>30</b>	<b>62</b>	<b>369</b>	<b>389</b>

Die Güter- und Stofffrachten entsorgter Abfälle wurden durch Zeitreihen von Verbrauchszahlen und Lebenszeiten der einzelnen Produkte und Produktgruppen berechnet (siehe Anhang). Für Altgeräte (Baujahr 1990) wurden andere, meist höhere, Stoffkonzentrationen herangezogen.

Der Anteil der Altgeräte im Lager wurde geschätzt:

- Computer: 50 % Altgeräte
- Drucker, Bürogeräte, Kommunikationstechnik und kleine Haushaltgeräte: 70 % Altgeräte
- Sonstige: 100 % Altgeräte

Das Lager der Stoffe in der Anthroposphäre (Prozess Konsum) wurde durch Zeitreihen von Verbrauchszahlen und Lebenszeiten der einzelnen Produkte und Produktgruppen berechnet. Für Altgeräte (Baujahr 1990) wurden andere, meist höhere, Stoffkonzentrationen herangezogen. Der Anteil der Altgeräte im Lager wurde geschätzt:

- Computer: 10 % Altgeräte
- Drucker, Bürogeräte, Kommunikationstechnik und kleine Haushaltgeräte: 20 % Altgeräte
- Sonstige: 60 % Altgeräte

Tabelle 5-22: Güter- und Stofflager von genutzten Fertigprodukten (CH, 1998)

PRODUKTE in Nutzung Schweiz, 1998	Güterlager	PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA
	[1'000 t]	[t]	[t]	[t]	[t]
<b>EDV- und Büroelektronik</b>	<b>105</b>	<b>0.07</b>	<b>43</b>	<b>218</b>	<b>1'057</b>
Computer+Monitore (pHH)	19	0.00	6	35	188
Computer+Monitore (Büro)	53	0.00	18	100	536
Server	3	0.00	1	6	30
Notebook	2	0.00	0	2	39
Laserprinter	8	0.00	7	29	79
Tintenstrahldrucker	13	0.00	4	21	131
Kopiergeräte	6	0.00	5	21	44
Rechenmaschinen	2	0.07	0	4	9
<b>Kommunikationstechnik</b>	<b>20</b>	<b>0.00</b>	<b>3</b>	<b>22</b>	<b>109</b>
<b>Unterhaltungselektronik</b>	<b>278</b>	<b>7.53</b>	<b>304</b>	<b>753</b>	<b>711</b>
<b>Haushaltgeräte - klein</b>	<b>109</b>	<b>0.00</b>	<b>8</b>	<b>73</b>	<b>57</b>
<b>Haushaltgeräte - gross</b>	<b>715</b>	<b>0.28</b>	<b>36</b>	<b>324</b>	<b>223</b>
<b>Spezialgeräte</b>	<b>200</b>	<b>0.00</b>	<b>10</b>	<b>104</b>	<b>779</b>
<b>EE-Kleinteile</b>	<b>1'944</b>	<b>0.00</b>	<b>60</b>	<b>760</b>	<b>335</b>
<b>Verkehrsmittel</b>	<b>6'614</b>	<b>34</b>	<b>143</b>	<b>1'685</b>	<b>1'127</b>
<b>Baumaterialien und Textilien</b>	<b>549</b>	<b>455</b>	<b>69</b>	<b>1'661</b>	<b>1'163</b>
<b>Total</b>	<b>10'534</b>	<b>498</b>	<b>678</b>	<b>5'601</b>	<b>5'561</b>

#### 5.1.6.4.4 Emissionen aus dem Konsumprozess:

Emissionen von BFS in die Atmosphäre entstehen vor allem aus Produkten mit additiven BFS. Bei Gütern mit reaktiven BFS (z.B. FR4-Leiterplatten von Bürogeräten) kann nur ein äusserst minimaler Anteil der BFS, welcher sich bei der Produktion nicht chemisch gebunden hat, emittiert werden. Da der Anteil von reaktiv eingesetztem TBBPA, welches sich nicht chemisch bindet, nur etwa 0.0004 % [Danish EPA, 1999] beträgt, können die daraus folgenden Emissionen hier vernachlässigt werden. Emissionen aus FR2-Leiterplatten können signifikant werden, wenn sich die Leiterplatten durch den Gebrauch erwärmen.

Unveröffentlichte Daten der Universität Stockholm (zitiert in der dänischen Studie [Danish EPA, 1999]) belegen, dass schon bei Temperaturen von 30°-40°C signifikante Mengen an FS ausgasen. In wässriger Lösung könne FS schon bei Raumtemperatur freigesetzt werden [Riess, 1999].

Emissionsfaktoren sind mit einer hohen Ungenauigkeit behaftet. Hier werden die maximal möglichen Emissionsfaktoren aus der dänischen Studie [Danish EPA, 1999] übernommen.

Tabelle 5-23: Worst-Case Emissionsfaktoren [Danish EPA, 1999]

<b>Bromierte Flammschutzmittel (BFS)</b>	<b>Weltmarktanteil 1992</b>	<b>Emissionsfaktor pro Jahr</b>
DecaBDPE (Decabromdiphenylether)	20 %	0.038 %
OctaBDPE (Octabromdiphenylether)	4 %	0.054 %
PentaBDPE (Pentabromdiphenylether)	2.7 %	0.39 %
TBBPA (Tetrabrombisphenol A) reaktiv	36 %	0 %
TBBPA (Tetrabrombisphenol A) additiv	4 %	0.05 %
Andere BFS, reaktiv	14 %	0 %
Andere BFS, additiv	14 %	0.05 %
<b>BFS Gesamt</b>	<b>100 %</b>	

Anmerkung: Etwa 10 % des weltweit erzeugten TBBPA-Flammschutzes wird additiv eingesetzt.

Emittierte BFS binden sich an Partikeln und sind im Staub in Elektronikgeräten zu finden. Wenn sie nicht während der Nutzung oder dem Recycling abgesaugt werden, gelangen sie in die Atmosphäre. Es wird angenommen, dass im ungünstigsten Fall die Gesamtmenge emittierter BFS in die Atmosphäre gelangt.

FS-Frachten in kommunalem Abwasser konnten aus Schätzungen für Dänemark [Danish EPA, 1999] (S.77) ermittelt werden. Durch das Waschen von Textilien (Arbeitsbekleidungen, Vorhang, Teppich) gelangen etwa 70 kg DecaBDPE in das Abwasser. Durch den Gebrauch von BFS-haltigen Dachfolien gelangen bis zu 0.38 t DecaBDPE ins Abwasser.

Die FS-Frachten in kommunalen Abwässern und diffusen Emissionen sind in Tabelle 6-3 zusammengefasst.

#### 5.1.6.4.5 BFS in Nahrungsmitteln:

Mehrere Studien mit Angaben zu Konzentrationen von PBDPEs und TBBPA in Nahrungsmitteln sind mittlerweile durchgeführt worden. Konzentrationen von Milchprodukten liegen in der Nähe von  $10^{-12}$  kg/kg an [Ryan & Patry, 2001]. Die tägliche Nahrungsaufnahme in Schweden (Uppsala) für PBDEs wird mit minimal 9.7, maximal 56.9 und im Mittel 27 ng/Tag angegeben [Lind et al., 2001].

## 5.2 Teilsystem „Abfallwirtschaft“

Im Subsystem Abfallwirtschaft liegen die Daten in der Regel nicht produktbezogen vor. Stattdessen sind auf der Inputseite die Mengen und Konzentrationen, bzw. die aggregierten Stoffflüsse gesamter Abfallfraktionen bekannt. Auf der Outputseite sind teilweise Transferkoeffizienten für die Stoffe in Prozessen bekannt, oder es werden die Mengen und Konzentrationen der Produkte der Abfallwirtschaft erfasst.

Die Abfälle stammen aus dem Prozess „Verkehr mit Produkten“ und werden durch die verschiedenen abfallwirtschaftlichen Prozesse „Abwasserreinigung“, „Verwertung“, „Verbrennung“ und „Deponie“ behandelt bzw. abgelagert.

In den folgenden Abschnitten werden für das Teilsystem „Abfallwirtschaft“ die im Zusammenhang mit den untersuchten BFS relevanten Abfallarten sowie die durch deren Behandlung in den einzelnen Abfallprozessen produzierten Outputprodukte (Schlacke, gereinigtes Abwasser etc.) für die Schweiz mengenmässig erfasst und dargestellt. Weiter werden aus der Literatur bekannte Konzentrationen in den Abfall-Fraktionen zusammengestellt. Falls Transferkoeffizienten für die Verteilung der untersuchten Stoffe in die Produkte der Entsorgung in der Literatur beschrieben sind, werden diese auch dargestellt.

### 5.2.1 Abfallsammlungen

#### a) Allgemeines

Die öffentliche Sammlung lieferte ihre Abfallmengen sowohl anfangs- wie auch Ende der 90er Jahre zu rund 80 % an die Kehrichtverbrennungsanlagen und zu 20 % auf Deponien. 1992 wurden 77 % der Siedlungabfälle verbrannt, 1998 waren es 81 % [BUWAL, 1999a]. Verschiedene Abfallgüter wurden und werden mittels Separatsammlung zur Entsorgung oder auch zur Wiederaufbereitung gebracht. Der folgende Abschnitt beschreibt die separat gesammelten Abfälle, gibt aber auch an, welche Mengen über die öffentliche Sammlung entsorgt werden.

#### b) Separatsammlung

##### Elektro- und Elektronik-Abfälle

In der Schweiz wurden 1999 36'500 t Elektro- und Elektronik-Geräte und Bestandteile von Geräten durch die S.EN.S (vgl. Tabelle 5-24) und 17'000 t über die SWICO-Recycling Garantie (vgl. Tabelle 5-25) entgegengenommen und verarbeitet. Das ergibt zusammen 53'500 t Elektro- und Elektronik-Abfälle. Diese Fracht entspricht gemäss einer Schätzung gut 50 % der erwarteten Gesamtmenge des Abfalls aus dem Elektro- und Elektronikbereich [S.E.N.S., 1999]. Alle brennbaren, nicht verwertbaren Abfälle aus der Separatsammlung wurden in Kehrichtverbrennungsanlagen, Zementöfen und Hochtemperaturverbrennungsanlagen verbrannt. Dazu gehören alle Kunststofffraktionen und Geräteteile mit organischen Schadstoffen. Mengenmässig macht das ca. 25 % oder 13'300 t aus. Sämtliche mit BFS behandelten Materialien aus der Elektro- und Elektronik-Separatsammlung wurden demnach in der Kehrichtverbrennung entsorgt. Die Aufteilung auf die einzelnen Verbrennungsschienen ist nicht bekannt [S.EN.S, 1999]. Gesamthaft sind in der Schweiz 1999 ca. 100'000 t Elektro- und Elektronikschrott angefallen [S.EN.S, 1999]. Die Menge des nicht separat gesammelten Elektro- und Elektronikschrotts beträgt ca. 50'000 t. Die Entsorgung erfolgte wahrscheinlich über die normale öffentliche Samm-

lung und gelangte damit zu ca. 80 % oder 40'000 t in eine Abfallverbrennungsanlage. Die restlichen 20 % oder 10'000 t wurden zusammen mit dem anderen Siedlungsabfall deponiert.

Tabelle 5-24: Durch S.EN.S verarbeitete Geräte [S.EN.S, 1999]

MATERIAL	MENGEN [1999] [t]
Fraktionen	4'000
Grossgeräte	9'900
Kühlgeräte	6'500
Elektroklein- und Elektronikgeräte	16'100
Total	36'500

Tabelle 5-25: Über SWICO-Recycling Garantie zurückgenommene Geräte, Zahlen gerundet [SWICO, 2000]

MATERIAL	MENGEN [1999] [t]
Kabel	400 t
Kunststoffe	3'300 t
Bildröhren	2'000 t
Leiterplatten und Stecker	1'000 t
Schadstoffe und Sonderabfälle	150 t
Eisen- und Nichteisenmetalle	9'300 t
Übrige Stoffe	750 t
Total	16'900 t

Die Untersuchungen im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ ergaben für die Schweiz folgende BFS-Flüsse über die EE-Abfälle: 1 t/a PentaBDPE, 47 t/a OctaBDPE, 161 t/a DecaBDPE und 257 t/a TBBPA.

In einer dänischen Studie [Danish EPA, 1999] wurden die BFS-Mengen im dänischen Abfall geschätzt. Umgerechnet auf die Schweiz ergeben sich daraus ca. 110 t PBDEs. Anfang der 90er Jahre wurden noch vermehrt FR2-Leiterplatten eingesetzt, welche mit PentaBDPE flammgeschützt waren [Danish EPA, 1999]. Über die Gehalte aus früheren Jahren liegen aber keine Angaben vor. Über die Fraktion Elektro- und Elektronikschrott fallen in der Schweiz anhand der Daten aus [Danish EPA, 1999] auf die Schweiz angewendeten Daten ca. 5 t/a PentaBDPE, 100 t/a TBBPA an. Für PentaBDPE ist dieser Wert deutlich höher, für TBBPA deutlich tiefer als die in dieser Studie in Kapitel 5.1 ermittelten Daten. Als Summe für alle PBDPEs würden anhand dieser Grundlagen für die Schweiz 110 t/a berechnet. Auch dieser Wert ist nur etwa die Hälfte des für die Schweizer Verhältnisse geschätzten Wertes. Für Octa- und DecaBDPE sind aus der dänischen Studie keine Daten vorhanden.

### Bauabfälle

1998 wurden in der Schweiz 327'000 t brennbare Bauabfälle an die Entsorgungsanlagen angeliefert (1992: 390'000 t) [BUWAL, 1999a]. Davon bestand aber ein erheblicher Teil aus Sperrmüll aus Hausräumungen und Altholz aus Industriebetrieben. Insgesamt fallen in der Schweiz jährlich rund 430'000 t brennbare Bauabfälle sowie Altholz aus dem Bausektor an [BUWAL,

1999a]. Aus Modellrechnungen wird erwartet, dass es sich bei den 1998 an die Entsorgungsanlagen angeliefereten Bauabfällen um rund 150'000 t „echte“ brennbare Bauabfälle gehandelt hat, wovon ca. 80 % oder 120'000 t verbrannt und 20 % oder 30'000 t deponiert wurden [BUWAL, 1999a]. 1992 wären damit bei einer ähnlichen Verteilung der brennbaren Bauabfälle wie 1998 ca. 180'000 t „echte“ brennbare Bauabfälle angeliefert worden. Im Gegensatz zu 1998 wurden 1992 jedoch noch ca. 75 % oder 135'000 t der brennbaren Bauabfälle deponiert und nur 25 % oder 45'000 t verbrannt [BUWAL, 1999a].

Für Dänemark wird ein Stofffluss von 1 t PBDEs und 0.35 t TBBPA aus dem Bauabfällen angenommen [Danish EPA, 1999]. Umgerechnet auf die Schweiz ergibt das die folgenden Mengen. Für 1998: PBDEs: 1.34 t und TBBPA: 0.47 t. Für 1992 über die Bauabfallmengen umgerechnet: 1992: PBDEs: 1.60 t und TBBPA: 0.56 t.

Für das Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ resultieren für die Schweiz folgende BFS-Flüsse über die Bauabfälle: 27 t/a PentaBDPE, 5 t/a OctaBDPE, 102 t/a DecaBDPE und 66 t/a TBBPA. Diese für die Schweizer Verhältnisse ermittelten Zahlen sind z.T. doch deutlich unterschiedlich zu den in Dänemark ermittelten Zahlen. Eine Erklärung dafür liegt in der Tatsache begründet, dass detaillierter aufbereitete Daten aus der FS-Studie für Deutschland [Kruse et al., 2001] verwendet werden konnten, andererseits ist hier die Kunststofffracht in entsorgten Baurestmassen höher angenommen worden.

### **Textil- und Möbel-Abfälle**

In der Schweiz wurden 1998 31'000 t Textilien separat gesammelt (1991: 12'000 t). Das entspricht ca. 40 % der 1998 total angefallenen Menge von ca. 78'000 t [BUWAL, 1999a]. Bei einer gleich hoch angenommenen totalen Menge für das Jahr 1991 entspricht das 15 %. Der restliche Anteil dürfte zu 80 % (1998: ca. 38'000 t, 1991: ca. 53'000 t) in Kehrichtverbrennungsanlagen verbrannt und zu 20 % (1998: 9'000 t, 1991: 14'000 t) deponiert worden sein.

Angaben über den jährlichen Anfall von zu entsorgenden Möbeln in der Schweiz sind nicht vorhanden [BUWAL, 1999b]. Die Entsorgung erfolgt üblicherweise über die Sperrgutsammlung, deren Abfälle wie bei der normalen öffentlichen Sammlung zu 80 % über die KVA und zu 20 % über die Deponie laufen.

Für Dänemark wird ein Stofffluss von 2.6 t PBDEs und 0 t TBBPA aus dem Textil- und Möbelabfällen angenommen [Danish EPA, 1999]. Umgerechnet auf die Schweiz ergibt das die folgenden Mengen: PBDEs: 3.5 t und TBBPA: 0 t.

Da keine Angaben über den BFS-Gehalt von Textilien- und Möbelabfällen vorliegen, muss von den Produktkennzahlen ausgegangen werden. Aus der Literatur wird einzig ersichtlich, dass bei den Textilienabfällen kein TBBPA anfällt [Danish EPA, 1999]. Für die Schweiz konnten für den Prozess „Verkehr mit Produkten“ die Stoffflüsse und Lager der Möbel und Textilien nicht bestimmt werden. Daher wurden hier die Flüsse in diesen Abfallfraktionen nicht berücksichtigt.

### **Verkehrsmittel-Abfälle**

Über die genauen Mengen an Eisenbahn-, Schiff- und Flugzeugabfällen ist aus der Literatur nichts bekannt. Vermutlich sind diese Mengen in den Industrieabfall-Mengen enthalten. Sie werden im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ geschätzt.

Bei den Automobilen ist die Datenlage besser. Von den jährlich anfallenden ca. 150'000 Altautos (1991 und 1998) fallen rund 26 % oder 1998 52'000 t als RESH an (1991 50'000 t) [IGEA, 2001a, b]. 1998 wurden davon 38'200 t in der Schweiz entsorgt. Davon wurden 32'200 t in KVA verbrannt und 6'000 t deponiert. Die restlichen 13'800 t RESH wurden exportiert [IGEA, 1998]. 1991 wurden 100 % oder 50'000 t RESH deponiert. Es fand kein Export statt [IGEA, 2001b].

RESH besteht aus folgenden Materialgruppen [IGEA, 1995]:

Holzfaser , Pappe	4%
Textilien, Leder	6%
Lackstaub, Rost etc.	11%
Metalle	1%
Glas, Sand	16%
Elastomere	29%
Kunststoffe	33%

Da davon ausgegangen werden kann, dass sämtliche BFS in der RESH-Fraktion anfallen, kann der durchschnittliche Gehalt an BFS in RESH über den Gesamtgehalt an BFS in einem Automobil berechnet werden. In einer dänischen Studie wurden TBBPA-Gehalte für Autos mit 179 g/Auto angegeben. Für die anderen in dieser Studie betrachteten BFS wurde nur die Summe angegeben: 193 g PBDEs [Danish EPA, 1999]. Über die Verkehrsmittelabfälle fallen gemäss diesen Annahmen rund 29 t an PBDPEs an. Wieviel davon auf die drei untersuchten PBDPEs fallen, kann aus diesen Zahlen nicht bestimmt werden. Gemäss den Annahmen aus der dänischen Studie kann mit einem TBBPA-Fluss über die Verkehrsabfälle von 27 t/a Ende der 90er Jahre gerechnet werden.

Im Gegensatz zu der Studie für Dänemark wurde für die Schweiz mit höheren FS-Gehalten gerechnet (siehe Kapitel 5.1.4.1), da eine grössere Masse an Kunststoffkleinteilen (für Elektrik, Beleuchtung und unter der Motorhaube) herangezogen wurde.

Die Untersuchungen im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ ergaben für die Schweiz folgende BFS-Flüsse über die Verkehrsmittelabfälle: 2 t/a PentaBDPE, 9 t/a OctaBDPE, 106 t/a DecaBDPE und 66 t/a TBBPA.

### Biogene Abfälle

In der Schweiz wurde 1998 503'000 t Kompost separat gesammelt (1991: 300'000 t) [BUWAL, 1999a].

Wie Nahrungsmitteluntersuchungen in Finnland gezeigt haben, weisen pflanzliche Nahrungsmittel BFS-Gehalte (Summe von BDE 47, 99, 100, 153, 154) von 0.0013 µg/kg (Kartoffeln) bis 0.016 µg/kg (Getreideprodukte) auf. Sie liegen damit gegenüber Fisch mit 0.850 µg/kg rund um den Faktor 50 bis 500 tiefer [Kiviranta, 2001]. Als Durchschnitt für die Grüngutabfuhr werden die Durchschnitts-Werte der Kartoffeln und des Gemüses angenommen. Damit werden die tatsächlichen Werte sicher überschätzt, da die Grüngutabfuhr zu einem grossen Teil aus unbelastetem Häckselgut besteht. Die Gehalte für die einzelnen BFS sind in Tabelle 5-26 aufgeführt. Es werden jeweils die Summen der einzelnen Kongenere angegeben.

Tabelle 5-26: Nahrungsmittel-Gehalte einzelner BFS in Finnland [Kiviranta, 2001]

MATERIAL	KONZENTRATIONEN [1997-1999]
	[mg/kg]
PentaBDPE (BDE 47, 99, 100)	0.0079
OctaBDPE (BDE 153, 154)	0.0010
DecaBDPE (BDE 209)	Keine Angaben
TBBPA	Keine Angaben

Umgerechnet auf die separat gesammelten Kompostmengen ergibt sich folgende jährlichen BFS-Mengen, die über den Kompost in den Boden gelangen können: Für PentaBDPE (BDE 47, 99, 100):  $4 \cdot 10^{-6}$  t/a, für OctaBDPE (BDE 153, 154):  $5 \cdot 10^{-7}$  t/a, für DecaBDPE (BDE 209) und für TBBPA sind keine Angaben möglich. Im Rahmen dieser Studie werden diese Flüsse in erster Näherung nicht berücksichtigt.

### Kunststoffabfälle

Insgesamt wurden 1998 in der Schweiz 47'000 t Kunststoffe verwertet und wieder in den Industrie- und Gewerbelauf eingespielen. 1998 rund 14'000 t kunststoffummantelte Kabelabfälle (davon ca. 7'000 t Kunststoff) verwertet (inkl. der von der SWICO verwerteten Menge). Es wird davon ausgegangen, dass diese Abfälle keine relevanten Mengen an BFS enthalten. Inwiefern diese Annahme zutrifft, ist schwierig zu prüfen, da über die Zusammensetzung dieser separat gesammelten Kunststoffabfälle aus Industrie und Gewerbe keine Angaben vorliegen.

PBDEs-haltige Thermoplaste sind nicht recyclingfähig [Leisewitz & Schwarz, 2000] (S.257). Bei Kunststoffen für Gehäuse aus EE-Geräten kommt ein Recycling nur sehr selten vor [Leisewitz & Schwarz, 2000] (S.260), da die Kunststoffe nicht<sup>1</sup> in PBDEs-haltige und PBDEs-freie getrennt werden können. Daher wurde angenommen, dass stofflich verwertete Kunststoffe keine bromierten Flammschutzmittel enthalten. Diese Annahme ist jedoch für weitere Studien noch im Detail zu prüfen.

### Leiterplatten-Produktionsabfälle

Die Produktionsabfälle werden im Kapitel 5.1.6.2 (Prozess „Produktion“) behandelt.

## 5.2.2 Wiederaufbereitung

Stoffliche Verwertung von Kunststoffen, welche BFS enthalten, ist in der Praxis mit gravierenden Problemen verbunden, da einerseits die Gefahr der Bildung von Dioxinen und Furanen besteht und andererseits der Markt für die rezyklierten Rohstoffe nicht vorhanden ist [Leisewitz et al., 2000].

In der Schweiz werden keine mit BFS behandelten Kunststoffe aus der Elektro- und Elektronik-Separatsammlung (weder SWICO noch S.EN.S) wiederaufbereitet (ca. 25 % thermisch verwertet). Die Wiederaufbereitung betrifft den Metallanteil, Bildröhrenglas, und z.T. Schaumglas (<sup>2</sup>/<sub>3</sub>

<sup>1</sup> Eine Ausnahme bilden geringe Mengen industriell recycelte Gehäusekunststoffe. Hierbei wird von den Herstellern der EE-Geräte nur hauseigene Ware zurückgenommen.

der Gesamtmenge) [SWICO, 2000], [S.EN.S, 1999]. Ca. 10 % gehen noch auf die Deponie (nicht verwertbares Bildröhrenglas, sowie Rückstände aus Verbrennungs- und Aufbereitungsanlagen).

Ob aus der Textil-Verwertung BFS-haltige Gewebe wieder in Umlauf gelangen (z.B. durch Flickentepiche, Putzlappen etc.) ist nicht bekannt.

Insgesamt wurden 1998 in der Schweiz 47'000 t Kunststoffe verwertet und wieder in den Industrie- und Gewerbekreislauf eingespielen. 1998 rund 14'000 t kunststoffummantelte Kabelabfälle (davon ca. 7'000 t Kunststoff) verwertet (inkl. der von der SWICO verwerteten Menge). Die dabei anfallenden Kunststoffe wurden alle der thermischen Entsorgung zugeführt. [BUWAL, 1999a; BUWAL, 2001].

Da sämtliche Kunststoffanteile der thermischen Entsorgung zugeführt wurden, gelangen solche höchstens über die Textilverwertung BFS wieder in den Produktezyklus.

Für brennbare Bauabfälle wird definiert, dass diese direkt dem Prozess Verbrennung (80 %) und Deponie (20 %) zugeführt werden.

Über die Wiederaufbereitung laufen die in Tabelle 5-27 zusammengestellten BFS-relevanten Abfall-Mengen.

*Tabelle 5-27: Die einer Verwertung zugeführten für die BFS relevanten Abfallmengen (t/a) für Ende der 90er Jahre*

<b>Abfallart</b>	<b>Abfallfracht t/a</b>	<b>Anteil der Gesamtmenge (Rest im Siedlungsabfall)</b>
Elektro- und Elektronik-Abfälle	53'500	52 %
Textilabfälle	31'000	40 %
Verkehrsmittel (RESH)	52'000	100 %

Von den 53'500 t/a separat gesammelten EE-Abfällen, werden im Prozess Verwertung ca. 35'000 t/a wiederverwertete Abfälle (Altmetall, Glas) produziert und an das Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ zurückgegeben (Annahme: ohne relevante Anteile an BFS). 7'000 t/a Kunststoffe werden der Verbrennung zugeführt, 4'000 t/a Glas werden deponiert (ohne relevante Mengen an BFS), und ca. 4'000 t/a Leiterplattenreste werden exportiert.

Von den Textilabfällen werden (eigene Annahme) 100 % wieder an das Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ zurückgegeben.

Von der verwerteten Verkehrsmittelabfallmenge (53'500 t/a) werden 32'200 t/a der Verbrennung, 6'000 t/a der Deponie zugeführt und 13'800 t/a exportiert.

Aus den in Kombination mit Tabelle 5-27 und den im Kapitel „Verkehr mit Produkten“ geschätzten BFS-Mengen für die Abfallarten in der Schweiz können die Gesamtmengen an BFS in den Prozess „Verwertung“ geschätzt werden. Wird zusätzlich die Verteilung des Inputs auf die Outputgüter des Prozesses „Verwertung“ berücksichtigt (siehe oben), dann können die Outputmengen an BFS aus der „Verwertung“ bestimmt werden.

Tabelle 5-28: In- und Outputmengen der BFS im Prozess „Verwertung“ Ende der 90er Jahre [t].

	Input in die Verwertung	Output aus der Verwertung in den Zielprozess		
		Verbrennung	Deponie	Export
PentaBDPE	2.5	1.2	0.25	1
OctaBDPE	33	31	1.1	2.3
DecaBDPE	190	146	13	32
TBBPA	200	109	8	83

Wichtige Annahmen:

- Für PentaBDPE: Für EE-Abfälle: alles in Leiterplatten (geht 100 % in Export); für Verkehrsmittelabfälle: alles in Resh (geht zu 100 % Verbrennung)
- Für OctaBDPE: Alles in Kunststoff: Aus EE-Abfällen: zu 100 % in Verbrennung, aus RESH: 62 % in Verbrennung, 12 % in Deponie, 27 % in Export.
- Für DecaBDPE: Von Verkehr (RESH) 62 % in Verbrennung, 112 % in Deponie, 27 % in Export; Von EE-Abfällen: 4 % in Leiterplatten (zu 100 % in Export), Rest in Kunststoffen (100 % in Verbrennung)
- Für TBBPA: Von RESH: 62 % in Verbrennung, 12 % in Deponie, 27 % in Export; Von EE-Abfällen: 49 % in Leiterplatten (100 % in Export), Rest in Kunststoffen (100 % in Verbrennung).

### 5.2.3 Abwasserreinigungsanlage (ARA)

1998 fielen 4.4 Mio. t nasser Klärschlamm (Wassergehalt 94%) aus ca. 1.3 Mia. m<sup>3</sup> Abwasser an [BUWAL, 1999a], [AWEL, 1998]. Daraus fielen ca. 200'000 t Trockensubstanz (TS) gefault zur Entsorgung an. 1998 wurden 42 % oder 84'500 t TS in der Landwirtschaft ausgebracht, und 58 % oder 116'000 t wurden entwässert und verbrannt oder deponiert. 1998 wurden 7 % oder 13'200 t auf Deponien abgelagert und 51 % oder 102'100 t verbrannt [BUWAL, 1999a]. Im Jahr 1988 fielen in der Schweiz 260'000 t TS Klärschlamm an [BUWAL, 1991]. Umgerechnet aus den Zahlen von 1998 entspricht das ca. 1.7 Mia. m<sup>3</sup>. Davon wurden 64'000 t oder ca. 25 % verbrannt, ca. 45 % in der Landwirtschaft ausgebracht (ca. 120'000 t) und der Rest (30 %) oder 76'000 t deponiert [BUWAL, 1991].

In der Literatur konnten keine Analyse-Resultate über BFS im gereinigten Abwasser gefunden werden. Infolge der geringen Wasserlöslichkeit der BFS und ihrer sonstigen physikalischen und chemischen Eigenschaften verbleibt der überwiegende Anteil der BFS bei der Abwasserreinigung im Klärschlamm. Aufgrund von Untersuchungen von anderen Substanzen wie z.B. PCB, kann davon ausgegangen werden, dass weniger als 10 % der BFS ins gereinigte Abwasser gelangen.

Die Wasserlöslichkeit für die vier betrachteten BFS ist in folgender Tabelle 5-29 zusammengestellt:

Tabelle 5-29: Wasserlöslichkeit von Deca-, Octa-, Pentabromdiphenylether sowie Tetrabrombisphenol A [Ra, 2000a], [Kruse et al., 2001], [Human Health Assessment, 2000]

MATERIAL	LÖSLICHKEIT
PentaBDPE	2.4 µg/l
OctaBDPE	< 0.5µg/l
DecaBDPE	< 1µg/l / 20-30µg/l (20°C)
TBBPA	0.72 mg/l (15°C) / 0.08 mg/l (21°C) / 4.16 mg/l (25°C) *

\* Trotz der rund tausend mal grösseren Wasserlöslichkeit von TBBPA ist der Gehalt an TBBPA in Gewässern nicht höher als der anderer betrachteten BFS [Kruse et al., 2001], [Yokoyama, 2000].

Zum BFS-Gehalt von Klärschlamm sind in der Literatur Angaben zu finden. Einige (aus der Sicht der Autoren) relevante Werte, die gefunden wurden, sind in der Tabelle 5-30 zusammengestellt. In der Schweiz sind bis heute keine Messungen durchgeführt worden.

Umgerechnet auf den jährlichen Klärschlammfall, ergeben sich anhand der in Tabelle 5-30 angegebenen Konzentrationsbereiche folgende möglichst realitätsnah geschätzten Mengen an BFS im Schweizer Klärschlamm: PentaBDPE: 0.04 t/a; OctaBDPE: keine Angaben; DecaBDPE: 0.05 t/a; TBBPA: 0.02 t/a. Diese Angaben sind für die gesamte Schweiz wahrscheinlich zu hoch, da die Klärschlammgehalte wie in Tabelle 5-30 beschrieben aus rein städtischen Gebieten stammen.

Tabelle 5-30: Klärschlammgehalte von Deca-, Octa-, Pentabromdiphenylether sowie Tetrabrombisphenol A [Leisewitz et al., 2001] und [Kruse et al., 2001], [Hakk, 2001], [Hale, 2001], [Wit, 2001],[Hagemaijer et al.,1992]

MATERIAL	KONZENTRATION
PentaBDPE	Vier Regionen in den USA: 1'100 – 2'290 µg/kg TS (in Europa sollen die Werte zehnmal geringer sein, d.h. 110–230 µg/kg TS ) Klärschlammproben aus Stockholm (1998): 60- 150 ng/g TS (Summe aus BDE-99 und BDE-100) In Deutschland (13 Proben): Kongenere von PentaBDE: 0.00022-0.0075 mg/kgTS
OctaBDPE	Keine Angaben
DecaBDPE	3 ARA in Stockholm: 160 – 260 µg/kg TS Schweden: 56 ng/g TS (Plastikindustrie oberhalb ARA) Schweden: 31 ng/g TS (ohne Plastikindustrie oberhalb ARA) Schweden: Stockholm: 2.9-76 ng/g TS
TBBPA	ARA Stockholm: bis 76 µg/kg TS ARA im Einzugsgebiet von Plastik-Fabrik, in der aber keine TBBPA verwendet werden: 31 – 56 µg/kg TS

Nach Schätzungen von Syracuse Research Corporation Epiwin Software, 1999, kann davon ausgegangen werden, dass nur unbedeutende Anteile des DeBDE in ARAs abgebaut werden und ca. 90 % des DeBDE an Klärschlamm gebunden zurückgehalten werden können. Diese Abscheidung dürfte mit höherem Bromierungsgrad zunehmen. Ausgehend von der Annahme, dass weniger als 10 % der BFS nicht zurückgehalten werden, werden demnach für das gereinigte Abwasser folgende BFS-Mengen geschätzt: PentaBDPE: 0.004 t/a; OctaBDPE: keine Angaben; DecaBDPE: 0.005 t/a; TBBPA: 0.002 t/a.

Andererseits ergaben eigene Schätzungen des Staubpartikeleintrages aus der Atmosphäre (Annahme: 10 % des durch die im Prozess „Verkehr mit Produkten“ emittierten BFS werden in Siedlungen gleich wieder auf dem Boden abgelagert und gelangen mit dem kommunalen Abwasser in die Abwasserreinigungsanlage) folgende Einträge ins kommunale Abwasser: PentaBDPE: 0.19 t/a; OctaBDPE: 0.04 t/a; DecaBDPE: 0.21 t/a; TBBPA: 0.03 t/a). Sickerwassereinträge aus Deponien werden mit PentaBDPE: 0.005 t/a; OctaBDPE: 0.006 t/a; DecaBDPE: 0.044 t/a; TBBPA: 0.134 t/a) geschätzt (siehe Kapitel 5.2.5).

Falls kein Abbau der Substanzen stattfindet, werden diese Mengen im Worst-case Fall in etwa wieder im Klärschlamm vorgefunden. In diesem Fall wären die oben zusammengestellten BFS-Mengen im Klärschlamm eher Werte im untersten vorstellbaren Bereich. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass vom BFS-Input (im Abwasser) in die ARA ein vernachlässigender Teil (<<1%) in die Abluft transferiert wird. Dazu sind in der Literatur keine Daten zu finden. Die Flüsse werden hier in erster Näherung vernachlässigt.

## 5.2.4 Kehrichtverbrennungsanlage (KVA)

In der Schweiz werden die in Tabelle 5-31 aufgeführten BFS-relevanten Mengen verbrannt. Diese setzen sich aus den direkt in die KVA gelangenden sowie aus den über die Wiederverwertung zur KVA gelangenden Abfällen zusammen. Gesamthaft wurden in der Schweiz 1998 1.99 Mio. t, resp. 1992 2.14 Mio. t Siedlungsabfälle verbrannt [BUWAL, 1999a].

Tabelle 5-31: In den KVA verbrannte BFS-relevante Mengen in der Schweiz 1998

MATERIAL	MENGEN in [t]
Elektro- und Elektronik-Schrott	40'000
Bauabfälle	120'000
Textil- und Kunststoffmöbel-Abfälle	38'000
Verkehrsmittel-Abfälle	31'000
Leiterplatten-Produktionsabfälle	150-750
Abfälle aus Wiederverwertung	20'000
Klärschlamm	102'000 <sup>1</sup>
Total (gerundet)	350'000

Quellen: [S.EN.S, 1999], [SWICO, 2000], [BUWAL, 1991, 1999a], [IGEA, 1998, 2001a, b], [Kiviranta, 2001], [Grangier, 2001], [Gallana, 2001], [Danish EPA, 1999]

Anhand der in dieser Studie durchgeführten Untersuchungen werden aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ Ende der 90er Jahre 5.8 t/a PentaBDPE, 22 t/a OctaBDPE, 143 t/a DecaBDPE und 152 t/a TBBPA in den Prozess „Verbrennung“ geliefert. Über den Prozess „Verwertung“ gelangen 1.2 t/a PentaBDPE, 30 t/a OctaBDPE, 146 t/a DecaBDPE und 109 t/a TBBPA in den Prozess „Verbrennung“. Unbedeutende Flüsse gelangen aus der ARA in die Verbrennung. Dies bedeutet, dass über den Prozess „Verbrennung“ gesamthaft 7 t/a PentaBDPE, 52 t/a OctaBDPE, 290 t/a DecaBDPE und 261 t/a TBBPA thermisch entsorgt werden. Die damit verbundene Bromfracht beträgt total ca. 450 t/a.

<sup>1</sup> Von den 102'100 t wurden 1998 nur 18'400 t in KVA verbrannt. Der Rest ging in Zementwerke (20'500 t) und in spezielle Öfen (63'200 t)

In Tange [Tange et al., 2001] werden Bromkonzentrationen in Siedungsabfällen von 30 - 100 mg/kg angegeben. Neuere Messungen auf zwei KVA in der Schweiz [Morf, 2000] ergaben für verschiedene Versuchszeiträume im Jahre 2000 Bromkonzentrationen im Schweizer Siedlungsabfall (inkl. max. 10 % RESH-Anteil) von 50 - 280 mg/kg (KVA St. Gallen) bzw. 180 - 300 mg/kg (KVA Weinfelden). Für die mittlere gemessene Bromkonzentration von ca. 230 mg/kg FS resultiert für die in der Schweiz in KVA thermisch behandelte Siedlungsabfallmenge ein Bromfluss von ca. 460 t/a. Im Minimum wird der Fluss anhand dieser Punktmessung 100 t/a, im Maximum 600 t/a betragen. Falls man, wie in [Danish EPA, 1999] ausgeführt, annimmt, dass der Bromanteil im Siedlungsabfall auf Flammschutzanwendungen basierend ca. die Hälfte ausmacht, resultiert eine damit verbundene Brommenge von 50 - 300 t Brom pro Jahr (Mittel: 230 t/a).

Ein Vergleich dieser Schätzungen zeigt, dass die ermittelte Bromfracht als Input in den Prozess „Verbrennung“ grösser ist, als die aktuelle Punktmessung auf KVA mit der Annahme, dass 50 % des Broms aus Flammschutzanwendungen resultiert. Diese Differenz kann mehrere Ursachen haben. Eine Ursache liegt in der Lagerschätzung der Konsumgüter im Prozess „Verkehr mit Produkten“ die auf der durchschnittlichen Nutzungsdauer der Konsumgüter im Haushalt basiert. Je größer der Unterschied zwischen der Nutzungsdauer und der Verweildauer dieser Güter im Haushalt ist (beispielsweise durch Lagerung der ausgedienten Konsumgüter im Keller), desto grösser wird das Lager im Haushalt und desto kleiner wird der Fluss in die abfallwirtschaftlichen Prozesse. Die genaue Klärung dieser Differenz kann nur durch konkrete Messungen der Güter- und Stoffflüsse unter Betrachtung von Zeitreihen bringen. Weitere mögliche Ursachen sind die getroffenen Annahmen des Bromanteils aus Flammschutzanwendungen in den Konsumprodukten, Annahmen bezüglich der Entsorgungswege der Bauabfälle, Berücksichtigung von Schwankungen des Bromgehaltes zwischen verschiedenen KVA-Einzugsgebieten etc.. Für diese Studie werden die in Kapitel 5.1 bestimmten und oben genannten BFS-Mengen als Basis für die weiteren Untersuchungen gewählt.

Gemäss einer schwedischen Studie kann davon ausgegangen werden, dass sämtliche BFS bei der normalen Verbrennung in einer KVA zerstört werden [Söderström, 2001]. [Sakai et al., 2001] zeigen in Stockholm Messresultate aus Japan. Für PBDEs wurden im Versuch von 2'900 g PBDPEs/t Abfall noch 1.7 g/t Abfall (0.058 %) in festen Reststoffen (Schlacke plus Aschen) und 0.00097 g/t Abfall ( $3.3 \times 10^{-8}$  %) im Reingas wiedergefunden. Für TBBPA von 3'400 g/t Abfall (2.3 %) (78 g/t Abfall) in den festen Reststoffen sowie 0.034 g/t Abfall ( $1 \times 10^{-6}$  %) ins gereinigte Abgas. [Söderström & Marklund, 2001] schliessen aus eigenen Untersuchungen, dass nach der Verbrennung von Abfall in Abfallverbrennungsanlagen keine polybrominierten Flammschutzmittel (DecaBDPE und TBBPA) mehr im gereinigten Abgas gefunden werden können.

Tabelle 5-32: Geschätzte Transferkoeffizienten für PBDEs und TBBPA für Schweizer KVAs anhand Quellen [Sakai et al., 2001].

MATERIAL	Transferkoeffizient [-]			
	Schlacke	Asche	Abwasser	Abgas
PentaBDPE	0.00029	0.00029	0	$3.3 \times 10^{-10}$
OctaBDPE	0.00029	0.00029	0	$3.3 \times 10^{-10}$
DecaBDPE	0.00029	0.00029	0	$3.3 \times 10^{-10}$
PBDPEs	0.00029	0.00029	0	$3.3 \times 10^{-10}$
Tetrabrombisphenol A TBBPA	0.0115	0.0115	0	$1 \times 10^{-6}$

Für die Schweiz liegen keine Untersuchungen zum Verhalten der PBDPEs und TBBPA bei der thermischen Behandlung in KVAs vor. Aus den oben zitierten Untersuchungen werden in Tabelle 5-32 für diese Studie Transferkoeffizienten festgelegt. Dabei werden folgende Vereinfachungen getroffen. Für PentaBDPE, OctaBDPE, DecaBDPE werden analoge Verteilungen wie für die Summe PBDPEs angenommen. Neutralisationsschlamm wird als Produkt der KVA vernachlässigt, der Transfer ins Abwasser als Null angenommen und die Aufteilung in die beiden Reststoffe Schlacke und Asche zu gleichen Teilen angenommen. In Tabelle 5-33 sind die aus den Transferkoeffizienten berechneten Outputmengen dargestellt.

Tabelle 5-33: Geschätzte Stoffflüsse in den KVA Produkten der Schweiz (in t/Jahr) anhand der Abfallinputflüsse und Transferkoeffizienten.

Stoff	INPUT	BFM-Flüsse in Produkte			
		Schlacke	Asche	Abwasser	Abgas
PentaBDPE	7	0.002	0.002	0	2.3E-9
OctaBDPE	54	0.02	0.02	0	1.8E-8
DecaBDPE	289	0.08	0.08	0	9.6E-9
TBBPA	275	3.1	3.1	0	1E-5

Anhand der Literatur (BUWAL, 1998a, 1998b) wird für die 90er Jahre vereinfachend angenommen, dass Produkte der KVA wie folgt entsorgt werden: Schlacke in der Schweiz zu 100 % in Schlackedeponiekompartmenten; Aschen und Stäube: 75 % werden exportiert (Salzstöcke), 25 % in der Schweiz deponiert (davon geschätzt: ca.  $\frac{1}{5}$  mit Schlacke in Schlackekompartmenten,  $\frac{4}{5}$  unverfestigt/verfestigt in Reststoffdeponien). Tabelle 5-34 zeigt die den Zielprozessen aus dem Prozess „Verbrennung“ zugeordneten BFS-Flüsse:

Tabelle 5-34: In- und Outputmengen der BFS im Prozess „Verbrennung“ Ende der 90er Jahre [t/a].

Stoff	INPUT	Zielprozesse		
		Deponie	Export	Emission
PentaBDPE	7	0.003	0.002	2.3E-9
OctaBDPE	54	0.02	0.01	1.8E-8
DecaBDPE	289	0.1	0.06	9.6E-9
TBBPA	275	3.8	2.4	1E-5

## 5.2.5 Deponie

Aus den in den Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.3 gemachten Angaben können die in der Schweiz deponierten BFS-relevanten Mengen wie in Tabelle 5-35 angegeben werden:

Anhand der in dieser Studie durchgeführten Untersuchungen werden aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ Ende der 90er Jahre 22 t/a PentaBDPE, 6 t/a OctaBDPE, 36 t/a DecaBDPE und 38 t/a TBBPA direkt in den Prozess „Deponie“ geliefert. Aus dem Prozess „Verbrennung“ gelangen relativ unbedeutende Mengen von 0.009 t/a PentaBDPE, 0.019 t/a OctaBDPE, 0.07 t/a DecaBDPE und 3.8 t/a TBBPA in die Deponie. Über den Prozess „Verwertung“ sind es 0.25 t/a PentaBDPE, 1.1 t/a OctaBDPE, 13 t/a DecaBDPE und 8 t/a TBBPA. Der gesamte jährliche Input in die Deponie beträgt demnach Ende der 90er Jahre 5.5 t/a PentaBDPE, 7.1 t/a OctaBDPE, und je 50 t/a für DecaBDPE und TBBPA.

Tabelle 5-35: Deponierte BFS-relevante Mengen

MATERIAL	MENGEN
	1998 [t]
Elektro- und Elektronik-Schrott	10'000
Bauabfälle	30'000
Textil- und Kunststoffmöbel-Abfälle	9'000
Verkehrsmittel-Abfälle	21'000
Leiterplatten-Produktionsabfälle	40 – 180
Abfälle aus Wiederverwertung	0
Klärschlamm	13'200
Total (gerundet)	83'000

Das Lager der untersuchten FS in der Deponie wurde durch eine Zeitreihe der deponierten FS in festen Abfällen berechnet. Hierbei wurde grob geschätzt, dass etwa Anfang der 70er Jahre die ersten BFS-haltigen Produkte in den Markt gelangten, dass im Jahr 1975 die ersten BFS-haltigen Abfälle zu entsorgen waren, und dass die zu entsorgenden Abfälle seit 1975 zu rund 20 % deponiert wurden. Für Abfälle mit PentaBDPE-haltigen PUR-Montageschaum wird angenommen, dass seit 1975 etwa 80 % deponiert wurden.

Für die Schätzung der Deponie-Emissionen in die Luft und ins Sickerwasser liegen praktisch keine Messungen bzw. Literaturdaten vor.

Direkte Untersuchungen zum Verhalten der PBDPEs und des TBBPA in Deponien liegen nicht vor [Leisewitz et al., 2001] und [Kruse et al., 2001]. Obwohl die BFS eine geringe Wasserlöslichkeit (vgl. Tabelle 5-29, Kapitel 5.2.3) aufweisen, müssen die Deponiesickerwässer überwacht werden. Die Löslichkeit der BFS steigt in anderen Medien nämlich rapide an. Die Löslichkeit von PentaBDPE in Methanol beträgt beispielsweise 1 g/100 g [RA, 2000a], diejenige von TBBPA wird für Ethanol mit 98.4 % und für Aceton mit 240 g/100 g angegeben. Durch Erhöhung der Temperatur wurde die Löslichkeit noch erhöht [Kruse et al., 2001]. Die Mobilisierbarkeit in reinem Wasser (Ausschütteln bei 23°C) lag bei 0.3 % des TBBPA-Ausganggehaltes [Riess, 1999]. Für den Flammschutzmittelanteil aus Hi-Polystyrol, welcher mit Wasser mobilisiert werden konnte, gibt [Riess, 1999] 0.03 % an, wobei bei steigender Lipophilie des umgebenden Mediums der mobilisierte Anteil des DecaBDPE auf 3.4 % anstieg.

TBBPA-Ausgasungen konnte bei einem Versuch zur biologischen Abbaubarkeit bei drei unterschiedlichen Bodenarten sowohl unter aeroben wie auch unter anaeroben Verhältnissen nachgewiesen werden [BFRIP, 1989]. Weiter können bei einem Deponiebrand sämtliche BFS und ihre Abbau resp. Umwandlungsprodukte wie z.B. polybromierte Dibenzodioxine und -furane entstehen [Kruse et al., 2001].

Während DecaBDPE, PentaBDPE und OctaBDPE als ausgesprochen persistent gelten [Leisewitz et al., 2001] und [Kruse et al., 2001], [Dungey, 2001], ist TBBPA sowohl unter aeroben wie auch unter anaeroben Verhältnissen abbaubar [BFRIP, 1989].

Als Worst-Case wird an dieser Stelle angenommen, dass für PBDPEs 0.1 %, bzw. für TBBPA 0.3 % der Inputmenge ins Sickerwasser gelangt. Es wird davon ausgegangen, dass über 90 % des Sickerwassers gesamtschweizerisch Kläranlagen zugeführt wird. In Tabelle 5-36 sind die aus den verschiedenen Datenquellen geschätzten In- und Outputflüsse dargestellt.

Tabelle 5-36: BFS-Mengen im Input und Output der Deponie

MATERIAL	INPUT [t]	MENGEN	
		Sickerwasser zur ARA [t]	Emission aus Deponie [t]
PentaBDPE	21.7	0.022	0.002
OctaBDPE	7.1	0.007	0.0007
DecaBDPE	50	0.05	0.005
TBBPA	50	0.15	0.015

## 5.2.6 Teilsystem Umwelt

Das Subsystem „Umwelt“ besteht aus den vier Teilprozessen „Atmosphäre“, Hydrosphäre“, „Pedo-/Lithosphäre“ und „Biota“. Im Teilsystem „Umwelt“ bestimmen die Güter Luft, Wasser sowie feste Güter bei Ablagerungsprozessen (Klärschlamm und Kompost, Sedimentation, Deposition) oder bei Abbauprozessen (Erosion) und Biomasse den Stoffumsatz. Aus dem Subsystem „Abfallwirtschaft“ stammen Abgase und Abwasserreinigungsprodukte bzw. Emissionen aus Deponien (Sickerwasser), und aus dem Prozess „Verkehr mit Produkten“ stammen Abgase aus der Nutzung der Produkte.

Zu BFS-Konzentrationen in Gütern in den Umweltkompartimenten gibt es schon Messungen. Einen guten Überblick dazu bieten die Abstracts des zweiten internationalen Workshops über brominierte Flammenschutzmittel [BFR, 2001] und [Wit, 2000], [Kruse et al., 2001]. Auch in den verschiedenen Risk Assessments sind Daten dazu zu finden. Bis heute sind die meisten der Messungen örtlich punktuell, nicht für alle Substanzen und erst in wenigen Fällen zur Anwendung in Stoffflussanalysen geeignet. In den folgenden Abschnitten sind für die einzelnen Umweltkompartimente Daten aus der Literatur zusammengefasst. Für die Schweiz stehen bis heute keine aktuellen Messresultate zur Verfügung.

Ein Lagerzuwachs im Teilsystem erfolgt als Sedimentierung (in der Hydrosphäre), Bodenlagerzuwachs und Biotalagerzuwachs. Schätzungen zu den Lagern in den verschiedenen Kompartimenten erfolgten anhand von Literaturangaben zu Konzentrationen in den einzelnen Kompartimenten sowie eigenen Annahmen. Aus modellhaften Berechnungen wird angenommen, dass

die Verteilung der BFS in der Umwelt wie in Tabelle 5-37 angegeben vorliegt [Leisewitz et al., 2001] und [Kruse et al., 2001]:

Tabelle 5-37: Verteilung der BFS in der Umwelt

STOFF	SEDIMENT	BODEN	WASSER	LUFT
TBBPA	54%	45%	1%	$4 \cdot 10^{-7}\%$
DecaBDPE	52.1%	46%	1.8%	0.132%
PentaBDPE	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben
OctaBDPE	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben	Keine Angaben

## 5.2.7 Atmosphäre

BFS, die in die Atmosphäre gelangen, werden transportiert und feucht oder trocken deponiert. Es wird angenommen, dass in der Atmosphäre keine oder nur eine vernachlässigbare Lagerbildung stattfindet.

PentaBDPE:

Die PentaBDPE-Konzentrationen in der Atmosphäre werden als sehr tief angenommen [RA, 2000a]. In Schweden wurden in abgelegenen Gebieten Werte von  $4.4 \text{ pg/m}^3$  gemessen (Summe 2,2'4,4'-TetraBDPE, 2,2'4,4',5-PentaBDPE, 2,2'4,4',6-PentaBDPE). Die zwei Konzentrationen werden mit  $100 - 270 \text{ pg/m}^3$  angegeben [RA, 2000a]. Auch für PentaBDPE weist die Innenluft bei Elektronik-Recycling-Betrieben mit  $8 - 64 \text{ ng/m}^3$  (Summe BDE-47, 85, 99, 100, 153, 154, 183) die höchsten Konzentrationen an Arbeitsplätzen auf [Sjodin et al., 1999]. In Peltola & Ylä-Mononen, 2001] wird zusammenfassend festgestellt, dass die PBDPEs-Konzentrationen in der Luft in einem Bereich von  $1$  und  $10 \text{ pgm}^{-3}$  liegen.

OctaBDPE:

Für OctaBDPE konnten nur Angaben zur Innenluft bei Elektronik-Recycling-Betrieben gefunden werden. Die Werte betragen  $7 - 56 \text{ ng/m}^3$  (Summe BDE-153, 154, 183) [Sjodin et al., 1999]. Geschätzte regionale Luft-Konzentrationen von  $1.1 \text{ E-7 mg/m}^3$  werden in [Human health assessment, 2000] angegeben .

DecaBDPE:

Im Risk Assessment [RA, 1998] werden für die voraussichtliche Umweltkonzentration von DecaBDPE in der Aussenluft Werte im unteren Nanogramm-Bereich angegeben, sie gelten aber aufgrund einiger Datenunsicherheiten nur als grobe Anhaltspunkte [Kruse et al., 2001]. In Luftproben aus dem Berliner Raum wurde kein DecaBDPE nachgewiesen (Nachweisgrenze  $0.9 \text{ pg/m}^3$ ) (Kemmlin, 2000). In der Nachbarschaft von Verarbeitungsbetrieben wurden Aussenluftkonzentrationen von bis zu  $25 \text{ } \mu\text{g DecaBDPE/m}^3$  gemessen [Zweidinger et al., 1979]. Die Innenluft bei Elektronik-Recycling-Betrieben weisen mit  $12 - 70 \text{ ng/m}^3$  die höchsten DecaBDPE-Konzentrationen an Arbeitsplätzen auf [Sjodin et al., 1999]. Eine photolytische reduzierende Debromierung von DecaBDPE in der Atmosphäre ist möglich. Aufgrund der langen Halbwertszeit von 94 Tagen wird jedoch angenommen, dass DecaBDPE deponiert wird, bevor es abgebaut wird.

Es existieren lediglich grobe Schätzungen zur Freisetzung von DecaBDPE während der Herstellung und des Gebrauches DecaBDPE-haltiger Produkte. Im Risk Assessment [RA, 1998] werden die EU weiten Emissionen in die Luft mit 26 t/Jahr geschätzt.

#### TBBPA:

Die Flüchtigkeit von TBBPA ist gering und ein Übergang vom Boden in die Luft wird als vernachlässigbar angenommen [Leisewitz et al., 2001] und [Kruse et al., 2001]. Die Halbwertszeit von TBBPA unter Einfluss von UV-Licht und Hydroxylradikalen wird mit 5 – 6 Tagen angegeben [Eriksson & Jakobsson, 1998]. In der Nähe von TBBPA-Produktionsstätten wurden Gehalte von  $1.8 \mu\text{g TBBPA}/\text{m}^3$  gemessen [Zweiginger et al., 1979]. Ansonsten wurde in der Aussenluft kein TBBPA nachgewiesen [Bergmann et al., 1999].

Zur Deposition von PBDEs und TBBPA gibt es praktisch keine Messungen. [Schure & Larsson, 2001] bestimmten die atmosphärische Deposition für die Summe von PBDEs in Schweden. Sie massen während 14 Tagen eine Depositionsrate von  $5.2 \text{ ng}/\text{m}^2$  (partikelgebunden),  $2.8 \text{ ng}/\text{m}^2$  (in gelöster Phase). Sie zeigten, dass die Deposition vor allem partikelgebunden bedingt ist. Das geometrische Mittel der Regenwasserkonzentration von der Summe der PBDEs wurde mit  $127 \pm 57 \text{ pg}/\text{l}$  angegeben. Bei einer mittleren Regenmenge pro Jahr von 600 – 1'000 mm ergibt sich pro Jahr für die Schweiz eine Deposition von  $40 - 200 \text{ ng}/\text{m}^2$ ; entsprechend auf die gesamte Fläche der Schweiz 2 – 8 kg PBDPEs. Berücksichtigt man in der Schätzung noch die partikelgebundenen PBDEs, dann kommen pro  $\text{m}^2$  zusätzlich ca. 200 ng dazu. Dies ergibt in einer groben Schätzung für die Summe der PBDEs rund 4 - 0 kg Deposition.

Für diese Studie wurde anhand der im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ geschätzten diffusen Emissionen die Deposition a) als Staubpartikelniederschlag (10 % des Eintrages) in Siedlungsgebieten mit Zielprozess kommunale Abwasserentsorgung (ARA), sowie als atmosphärische Deposition (90 % der Emissionen) mit dem Zielprozess Boden bestimmt. Diese Werte 1.9 t/a für PentaBDPE, 0.37 t/a für OctaBDPE, 2.1 t/a für DEecaBDPE und 0.3 t/a TBBPA sind deutlich grösser als die oben genannte Zahlen aus anderen Literaturquellen, wenn man von worst-case Betrachtungen für die Emissionen während des Konsums ausgeht.

Eine ganz grobe Lagerschätzung geht von mittleren Stoffkonzentrationen, angewandt über die gesamte Kompartimentsmasse, aus (Tabelle 5-38).

Tabelle 5-38: Lagerschätzung für die Atmosphäre

Stoff	Konzentration	Lager (g)
PentaBDPE	$4.4\text{E-}3 \text{ ng}/\text{m}^3$	90
OctaBDPE	$1.1\text{E-}4 \text{ ng}/\text{m}^3$	2
DecaBDPE	$0.9\text{E-}3 \text{ ng}/\text{m}^3$	20
TBBPA	n.b.	n.b.

Annahmen für Atmosphäre: Mittlere Dichte 1.5, erste 500 m über der Schweiz.

## 5.2.8 Hydrosphäre

#### PentaBDPE:

Es wurden bisher keine Werte für PentaBDPE im Wasser angegeben. Die einzigen relevanten

Analysen stammen von Hexabromdiphenyl, welches zu 4 – 8 % in kommerziellem PentaBDPE enthalten ist. Dieser Stoff wurde in umfangreichen Wasseruntersuchungen in Japan 1987-88 in keiner der 225 untersuchten Proben gefunden [RA, 2000a].

#### OctaDPE:

Infolge der geringen Wasserlöslichkeit (vgl. Tabelle 5-29) kann auch für OctaBDPE von geringen Konzentrationen in den Gewässern ausgegangen werden. Wie bei PentaBDPE können auch hier die erwähnten japanischen Studien [RA, 2000a] als Anhaltswerte herbeigezogen werden.

#### DecaBDPE:

Die Halbwertszeit von DecaBDPE in Wasser durch Photodegeneration wird mit >90 Tagen angegeben [Norris et al., 1973, Norris et al., 1975], wobei keine niedrigbromierten Diphenylether nachgewiesen wurden [IPCS, 1994b]. In Japanischen Gewässern konnten bei einer Nachweisgrenze von 60 ng/l keine DecaBDPE nachgewiesen werden [RA, 2000b]. Anhand von Modellen wurden für Oberflächengewässer DecaBDPE-Konzentrationen von 0.0023 µg/l (kontinental) und 0.081 µg/l (regional) berechnet. Diese Angaben sind aber mit grossen Unsicherheiten behaftet [RA, 1998].

#### TBBPA:

Aufgrund seines adsorptiven Verhaltens und der geringen Wasserlöslichkeit (vgl. Tabelle 5-29) kann angenommen werden, dass TBBPA in der Umwelt stark an Partikel gebunden ist [IPCS, 1995]. 1988-89 wurden in Japan in 150 Wasserproben kein TBBPA gefunden (Nachweisgrenze 0.04 µg/l) [Environmental Agency Japan, 1989, 1991]. 1995 wurde in einer von 75 Wasserproben 0.05 µg/l TBBPA gefunden [IUCLID, 1995].

Sedimentation bzw. Erosion (von Hydrosphäre in die Pedo-/Lithosphäre bzw. umgekehrt) und Aufnahme durch die Biota konnten auf Grund Datenmangels nicht geschätzt werden. Der atmosphärische Eintrag wird im Teilprozess „Atmosphäre“ behandelt. Ein Export über die Hydrosphäre wurde anhand von Literaturdaten geschätzt. Er beträgt grob geschätzt für PentaBDPE 0.012 t/a, für OctaBDPE 0.33 t/a, für DecaBDPE 0.03 t/a und für TBBPA rund 0.004 t/a.

Eine ganz grobe Lagerschätzung geht von mittleren Stoffkonzentrationen, angewandt über die gesamte Kompartimentsmasse, aus (Tabelle 5-39):

*Tabelle 5-39: Lagerschätzung für die Hydrosphäre*

Stoff	Konzentration (ng/l)	Lager (t)
PentaBDPE	40	3
OctaBDPE	n.b.	n.b.
DecaBDPE	80	7
TBBPA	50	4

Annahmen für Gewässermasse (nur Oberflächengewässer): mittlere Dichte 1 kg/l, Mittlere Tiefe: 50m.

## 5.2.9 Pedo- bzw. Lithosphäre

### a) Sediment

#### PentaBDPE

Infolge seiner Persistenz akkumuliert PentaBDPE in Sedimenten [RA, 2000a]. Im Rhein-Sediment wurden  $2.7 \mu\text{g}$  PentaBDPE/kg Trockengewicht gemessen und auch Tetrabromdiphenylether nachgewiesen [RA, 2000a]. Flussabwärts bei einer schwedischen Fabrik wurden Werte von  $840 - 1'200 \mu\text{g}$  PentaBDPE/kg Trockengewicht [RA, 2000a] gemessen. Im Risk Assessment wird von einer regionalen Konzentration von  $32 \mu\text{g}$  PentaBDPE/kg Feuchtgewicht ausgegangen [RA, 2000a]. In [Wit, 2000] sind Werte für England zusammengefasst. Die Werte variieren für DE-71 (PentaBDPE) zwischen  $<0.38$  und  $366 \text{ ng/g TS}$  mit der Mehrheit der Werte unter  $7 \text{ ng/gTS}$ .

#### OctaBDPE

Witt [Wit, 2000] fasst Daten aus [Allchin et al., 1999] zusammen. Dort wird OctaBDPE (als DE-79) in 13 verschiedenen englischen Flüssen mit Werten zwischen  $<0.44$  und  $1'405 \text{ ng/gTS}$  angegeben. Die meisten Werte liegen unter  $400 \text{ ng/gTS}$ .

#### DecaBDPE

Infolge seiner Persistenz akkumuliert DecaBDPE in Sedimenten [Leisewitz et al., 2001] und [Kruse et al., 2001]. In städtischen Sedimentproben von hauptsächlich durch ARA belasteten Gewässern wurden bis zu  $200 \mu\text{g}$  DecaBDPE/kg gemessen; mit steigender Tendenz [Kemmlein, 2000]. Die Konzentration von Rhein-Sediment lag bei  $16 \mu\text{g}$  DecaBDPE/kg Trockengewicht [Sellström et al., 1999]. Für DE-83 (DecaBDPE) werden in [Allchin, 1999] aus Messungen in 13 englischen Flüssen Werte zwischen  $<0.6$  und  $3'190 \text{ ng/g TS}$  angegeben, wobei die Mehrheit der Werte unter  $20 \text{ ng/g TS}$  liegen. Nach [KEMI, 1996] traten innerhalb von 4 Monaten weder Abbau noch Transformation von DecaBDPE in inkubierten Sedimentproben auf. Es wird daher angenommen, dass alles bis heute akkumulierte DecaBDPE noch im Sedimentlager vorhanden ist (worst case).

#### TBBPA

In der Nähe von TBBPA-Produktionsstätten (Arkansas) wurden  $330 \text{ mg}$  TBBPA/kg in Sedimenten gemessen [IUCLID, 1995]. In Schweden wurde stromaufwärts einer TBBPA-Produktionsstätte  $50 \mu\text{g}$  TBBPA/kg Sediment gemessen, während unterhalb der selben Fabrik  $430 \mu\text{g}$  TBBPA/kg gemessen wurden [Sellström et al., 1990]. In städtischen Sedimentproben von hauptsächlich durch ARA belasteten Gewässern wurden  $0.13 - 1'868 \mu\text{g}$  TBBPA/kg gemessen. Und ein ausschliesslich durch urbanen atmosphärischen Eintrag belasteter See enthielt  $2.41 \mu\text{g}$  TBBPA/kg im Sediment [Kemmlein, 2000].

Eine ganz grobe Lagerschätzung geht von mittleren Konzentrationen, angewandt über die gesamte Kompartimentsmasse, aus (Tabelle 5-40).

Tabelle 5-40: Lagerschätzung für Sediment

Stoff	Konzentration ( $\mu\text{g}/\text{kgTS}$ )	Lager (kg)
PentaBDPE	2.7	140
OctaBDPE	0.44	20
DecaBDPE	20	1'000
TBBPA	2.4	120

Annahmen für Sedimentmasse: Mittlere Dichte  $1.5 \text{ t}/\text{m}^3$ , erste 2 cm im Sediment.

## b) Boden

### PentaBDPE

Im Risk Assessment werden regionale Werte für Ackerböden von  $130 \mu\text{g}$  PentaBDPE/kg Feuchtgewicht und für natürliche und industriell/urbane Böden von  $160 \mu\text{g}$  PentaBDPE/kg Feuchtgewicht angegeben. Da es sich bei PentaBDPE um einen persistenten Stoff handelt, können sich diese Werte mit der Zeit auch erhöhen [RA, 2000a].

### OctaBDPE

Für OctaBDPE konnten keine Boden-Werte gefunden werden.

### DecaBDPE

Infolge seiner Persistenz akkumuliert DecaBDPE auch in Böden. Es liegen keine Messwerte vor über DecaBDPE-Gehalte in Böden [Leisewitz et al., 2001] und [Kruse et al., 2001]. Mittels Modellen grob geschätzte (regionale) Werte aus dem Risk Assessment [RA, 1998] geben Werte an für Ackerboden:  $27.1 \text{ mg}$  DecaBDPE/kg Feuchtgewicht, natürlicher Boden:  $0.08 \text{ mg}$  DecaBDPE/kg Feuchtgewicht, Porenwasser:  $0.97 \mu\text{g}$  DecaBDPE/l. Diese Werte werden als sehr hoch bezeichnet und sind nur mit grossem Vorbehalt zu betrachten [Leisewitz et al., 2001] und [Kruse et al., 2001].

### TBBPA

Das TBBPA ist sehr fest an organische Partikeln des Bodens gebunden, so dass eine geringe Mobilität zu erwarten ist [Larsen, 2001]. In der Nähe von TBBPA-Produktionsstätten wurden  $0.222 \mu\text{g}$  TBBPA/kg im Boden gemessen [IUCLID, 1995].

Bezüglich der Aufnahme der Biota von PBDPEs und TBBPA aus dem Boden ist praktisch nichts bekannt. Für DecaBDPE und wahrscheinlich auch für OctaBDPE ist auf Grund des vermutlich niedrigen Bioakkumulations- und Biokonzentrationspotentials keine relevante Aufnahme zu erwarten. Diesbezüglich wird auf die grössere Bedeutung von niedriger bromierten DPEs hingewiesen, die auch durch den Abbau von DecaBDPE in der Umwelt entstehen können [RA, 1998]. Messungen fehlen für alle PBDPEs. Auch für TBBPA liegen keine Informationen dazu vor.

Eine ganz grobe Lagerschätzung geht von mittleren Stoffkonzentrationen angewandt über die gesamte Kompartimentsmasse aus (Tabelle 5-41):

Tabelle 5-41: Lagerschätzung für den Boden

Stoff	Konzentration (mg/kgTS)	Lager (t)
PentaBDPE	0.13	37
OctaBDPE	n.b.	n.b.
DecaBDPE	0.08	23
TBBPA	0.22	62

Annahmen für Boden: Mittlere Dichte 1.5, Volumen: 1'300 km<sup>3</sup> (erste 30 cm).

## 5.2.10 Biota

### PentaBDPE:

Für PentaBDPE sind viele Messdaten für Pflanzen und Tiere erhoben worden. Diese sind z.B. in [RA, 2000a] zusammengefasst. Dabei werden z.B. für Schweden typische Werte für Säugertiere (0.04 - 0.24 µg/kg Fettgewicht), für Muskeln von Süßwasserfischen (10 - 50 aber auch bis 1'000 µg/kg Fettgewicht) angegeben. Für Kuhmilch aus Deutschland werden in Witt [Wit, 1999] 0.0025 - 0.0045 mg/kg Fettgewicht und für Süßwasserfische 0.018 - 0.94 mg/kg Fettgewicht angegeben.

### OctaBDPE:

In [Human Health Assessment, 2000] sind verschiedene Konzentrationen mittels eines Modells geschätzt worden. Fisch: 2.9E-4 mg/kg; Wurzelgewebe von Pflanzen: 1.82 mg/kg; Blätter von Pflanzen: 0.023 mg/kg; Fleisch: 0.11 mg/kg; Milch: 0.034 mg/kg). [Allichin et al., 1999] haben DE-79 (OctaBDPE) in Fischen in Englischen Flüssen gefunden (50 - 1'200 ng/g Fettgewicht). Literaturdaten sind sehr spärlich.

### DecaBDPE:

Im Widerspruch zur Behauptung von Hardy [Hardy, 1993], dass DecaBDPE nicht in Fisch bio-konzentriert wird, stehen die Ergebnisse einer 8-wöchigen Studie mit einer Mischung aus DecaBDPE an Karpfen, in denen der Hinweis auf Bioakkumulation (BCF<4) festgestellt wurde [CBC, 1982]. Eine japanische Studie an Karpfen ergab ebenfalls einen Biokonzentrationsfaktor (BCF) von <5 bei einer Dosierung von 60 µg/l über 42 Tage (CITI,1992). Die gemessenen DecaBDPE-Werte in Fischen und Muscheln lagen mit einer Ausnahme (1.4 µg/kg Feuchtgewicht) alle (ca. 250 Proben) unterhalb der Nachweisgrenze von 1.2 µg/kg. Ein Grossteil der Proben wurde in Gebieten mit potentiellen DecaBDPE-Quellen gezogen. Im Risk Assessment wird daraus geschlossen, dass das Potenzial als die Biokonzentration gering und somit eine Akkumulation in der Nahrungskette unwahrscheinlich ist. In der EU konnte DecaBDPE in verschiedenen Meerestieren nicht nachgewiesen (allerdings wurde die Nachweisgrenze nicht angegeben) [Hardy, 2000]. Bei einer Nachweisgrenze von 0.1 µg/kg Fett wiesen Kuhmilchproben aus Deutschland keine DecaBDPE-Spuren auf [Kemmlin, 2000]. Auch in Fettproben wurde bis zur Nachweisgrenze von 10 µg/kg Fett kein DecaBDPE nachgewiesen.

### TBBPA:

Studien und Daten zu TBBPA-Konzentrationen in der Biota sind kaum vorhanden. TBBPA wurde in unteren ppb-Levels (in Fettgewebe) detektiert [Hakk, 2001]. In Japan konnten zwischen 1987 und 1988 bis zur Detektionslimite von 1 µg/kg Feuchtgewicht keine TBBPA Konzentrationen nachgewiesen werden [Environment Agency Japan, 1989], [Environment Agency Japan, 1991].

Für die Biota wird keine Lagerschätzung vorgenommen.

## 6 Resultate

*Der Abschnitt behandelt die tabellarische und grafische Darstellung der Resultate der Stoffflussanalyse (Güterflüsse, Stoffflüsse und Lager) und die sich daraus ergebenden Interpretationen. Die Berechnung der Ergebnisse befindet sich in Kapitel 5.*

*Zu Beginn werden die drei Teilsysteme behandelt und im Anschluss daran das Gesamtsystem mit jeweils grafischen Darstellungen der Bilanzen der vier Stoffe in Stoffflussdiagrammen und eine tabellarische Darstellung, um übersichtlich und vollständig auf die Lücken und Unsicherheiten eingehen zu können.*

### 6.1 Datenqualität

#### 6.1.1 Datenlücken und Unsicherheiten im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“

Die grundlegenden Daten und Berechnungsschritte der Stoffflüsse dieses Teilsystems befinden sich in Kapitel 5.1. Auf die Berechnung der Bandbreiten der Stoffflüsse wird im Kapitel 5.1.6.1 eingegangen.

##### **Genauigkeit der Daten, Datenlücken**

Die Produktionsprozesse in der Schweiz, in denen FS oder FS-haltige Kunststoffbauteile verarbeitet werden, konnten aufgrund fehlender Informationen nicht lückenlos bestimmt werden. Die FS-Frachten in produzierten und exportierten Halbprodukten und in Produktionsabgasen und –abwässer konnten nicht bestimmt werden. Bezüglich Produktionsabfällen wurde lediglich die Bestückung von Leiterplatten untersucht, wobei angenommen werden kann, dass dieser Bereich für die TBBPA-Fracht in Produktionsabfällen der bedeutendste ist.

Auf der Ebene der Fertigprodukte konnten die Resultate des wichtigsten Anwendungsgebiets für die Summe der untersuchten FS-Frachten, nämlich EE-Produkte, durch eine Vielzahl von Literaturangaben bestimmt werden. Für die weiteren Einsatzgebiete, das sind Verkehrsmittel, Baumaterialien und Textilien war die Datenlage lückenhaft. Es waren äusserst wenig Informationen bezüglich des Einsatzes von FS in Textilien, Polsterungen und Einrichtungsgegenständen vorhanden, und daher konnte dieser Bereich nicht bestimmt werden. Geschätzt werden konnte lediglich die FS-Fracht in den jährlich konsumierten Produkten dieses Bereichs und die durch das Waschen von FS-haltigen Textilien ins kommunale Abwasser gelangende FS-Fracht.

##### **Bandbreiten**

Die in dieser Studie angegebenen Daten sind möglichst realitätsnahe Mittelwerte. Die Unsicherheit der Daten wurde durch Variation der Güterfrachten, Konzentrationen, Marktanteile, Bauteilgewichte und Lebenszeiten bestimmt und beträgt etwa den Faktor zwei, unter der Annahme, dass sich alle Parameter innerhalb eines realitätsnahen Minimums beziehungsweise eines realitätsnahen Maximum befinden.

Die Bandbreiten der Resultate wurden mittels den Bandbreiten der Rohdaten und eigener Annahmen berechnet. Da bei einigen Produkten (Textilien, Polsterungen, Einrichtungsgegenständen und Förderbändern) Datenlücken bezüglich dem Einsatz der untersuchten FS bestehen, sind die tatsächlichen Bandbreiten möglicherweise grösser.

Generell macht die Unsicherheit der berechneten Stoffflüsse etwa den Faktor zwei bis drei aus, bezogen auf den Mittelwert; im Detail sind diese Bandbreiten für die einzelnen BFS und die einzelnen Güter jedoch unterschiedlich hoch (siehe Tabelle 6-1, Tabelle 6-2 und Tabelle 6-3).

Die relative Bandbreite (siehe Tabelle 6-4) der TBBPA-Stoffflüsse ist aufgrund der besseren Datenlage etwas geringer als die der OctaBDPE- und DecaBDPE-Flüsse. Die berechnete relative Bandbreite der PentaBDPE-Flüsse ist ebenfalls geringer, jedoch muss davon ausgegangen werden, dass die tatsächliche Bandbreite grösser ist, da für einige Hauptanwendungsbereiche Textilien, Polsterungen und Förderbänder Datenlücken vorhanden sind.

Bei einem Vergleich der Bandbreiten der Güterflüsse liegen zumeist die Bandbreiten der Importe und Exporte von Fertigprodukten etwas niedriger als diejenigen der anderen Flüsse. Die Bandbreiten von Siedlungsabfällen, Lager im Konsumprozess und gasförmigen Emissionen liegen etwas höher als die der konsumierten Fertigprodukte, da hier die Unsicherheit bei den Lebenszeiten noch hinzukommt.

Die folgenden drei Tabellen zeigen die Bandbreiten und Mittelwerte (fett gedruckt) aller Stoffflüsse in den drei Prozessen des Teilsystems „Verkehr mit Produkten“:

Tabelle 6-1: Bandbreite und Mittelwerte der Stoffflüsse im Prozess „Produktion“

GÜTER im PROZESS PRODUKTION		PentaBDPE [t/a]	OctaBDPE [t/a]	DecaBDPE [t/a]	TBBPA [t/a]	
I N	Import Halbprodukte	Min	0	1.4	75	292
		<b>Mittel</b>	<b>0</b>	<b>5.2</b>	<b>128</b>	<b>435</b>
		Max	0	14.9	375	806
O U T	Fertigprodukte	Min	0	1.4	75	292
		<b>Mittel</b>	<b>0</b>	<b>5.2</b>	<b>128</b>	<b>435</b>
		Max	0	14.9	375	806
P U T	Export Halbprodukte	<b>Mittel</b>	<b>0</b>	n.b.	n.b.	n.b.
P R O D U K T I O N S A B F Ä L L E	Produktionsabfälle	Min	0		0.03	5
		<b>Mittel</b>	<b>0</b>	n.b.	<b>0.09</b>	<b>14</b>
		Max	0		0.15	24
	Produktionsabwasser	<b>Mittel</b>	<b>0</b>	n.b.	n.b.	n.b.
	Produktionsabgas	<b>Mittel</b>	<b>0</b>	n.b.	n.b.	n.b.

Anmerkung: n.b.: nicht bestimmt.

Tabelle 6-2: Bandbreite und Mittelwerte der Stoffflüsse im Prozess „Handel“

GÜTER im PROZESS HANDEL			PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA
			[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
I N P U T	Import Fertigprodukte	Min	1.0	12	228	469
		<b>Mittel</b>	<b>1.9</b>	<b>36</b>	<b>423</b>	<b>692</b>
		Max	3.5	68	784	1'150
	Fertigprodukte	Min	0.00	1.4	75	292
		<b>Mittel</b>	<b>0.00</b>	<b>5.2</b>	<b>128</b>	<b>435</b>
		Max	0.00	15	375	806
O U T P U T	Export Fertigprodukte	Min	0.24	7	130	387
		<b>Mittel</b>	<b>0.41</b>	<b>19</b>	<b>230</b>	<b>554</b>
		Max	0.62	37	396	824
	Konsumierte Produkte	Min	0.8	7	172	374
		<b>Mittel</b>	<b>1.5</b>	<b>22</b>	<b>322</b>	<b>573</b>
		Max	2.9	46	763	1'133

Anmerkung: n.b.: nicht bestimmt.; Annahme: kein Lager.

Tabelle 6-3: Bandbreite und Mittelwerte der Stoffflüsse im Prozess „Konsum“

GÜTER im PROZESS KONSUM			PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA
			[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
I N T R A K O N S U M	Konsumierte Produkte	Min	0.77	7	172	374
		<b>Mittel</b>	<b>1.5</b>	<b>22</b>	<b>322</b>	<b>573</b>
		Max	2.9	46	763	1'133
O U T P U T	Feste Abfälle	Min	8	23	122	173
		<b>Mittel</b>	<b>30</b>	<b>62</b>	<b>369</b>	<b>389</b>
		Max	50	142	894	772
	Kommunales Abwasser	Min			0.45	
		<b>Mittel</b>	n.b.	n.b.	<b>0.55</b>	n.b.
		Max			0.65	
	Gasförmige Emissionen	Min	0.87	0.14	1.0	0.14
		<b>Mittel</b>	<b>1.9</b>	<b>0.37</b>	<b>2.1</b>	<b>0.28</b>
		Max	4.0	0.92	6.0	0.63
L A G E R	Lagerzuwachs	Min	0.77	7	172	374
		<b>Mittel</b>	<b>1.5</b>	<b>22</b>	<b>322</b>	<b>573</b>
		Max	2.9	46	763	1'133
	Lagerabnahme	Min	9	23	124	173
		<b>Mittel</b>	<b>32</b>	<b>62</b>	<b>372</b>	<b>389</b>
		Max	54	143	900	772
	<i>Lagerbestand</i>	Min	224	254	2'575	2'862
		<b>Mittel</b>	<b>498</b>	<b>678</b>	<b>5'601</b>	<b>5'561</b>
		Max	1'038	1'706	15'907	12'597

Anmerkung: n.b.: nicht bestimmt. Der Lagerbestand (kursiv gedruckt) hat die Einheit [t].

Bei einem Vergleich der Bandbreiten der Resultate für die einzelnen Produktgruppen (siehe Tabelle 6-4) zeigt es sich, dass diese etwa in derselben Grössenordnung liegen. Dies bedeutet, dass trotz des umfangreichen Rohdatenmaterials für EE-Produkte die Sicherheit der Resultate für diesen Anwendungsbereich etwa gleich hoch liegt, wie für die Anwendungsbereiche Verkehrsmittel und Baumaterialien. Signifikanter ist der Unterschied der Bandbreiten, wenn Güter oder Stoffe verglichen werden.

Die Resultate für Fertigprodukte bewegen sich innerhalb einer Bandbreite, welche zum Grossteil durch Unsicherheiten bezüglich der Anteile des Einsatzes der FS in den jeweiligen Produkten verursacht wird. Das heisst, den Herstellern von Fertigprodukten, im Besonderen von EE-Geräten, ist meist nicht bekannt, welche FS und in welcher Konzentration diese in den verkauften Produkten enthalten sind. Als Information ist meist lediglich die erfüllte Brandschutzanforderung verfügbar oder manchmal auch die Angabe, dass beispielsweise PBDEs nicht eingesetzt wurden.

Tabelle 6-4: Relative Bandbreite der Stoffflüsse aufgeteilt auf Produktgruppen

GÜTER UND LAGER	STOFFE	±	Computer	EE-Produkte	Verkehrsmittel	Baumaterialien	Gesamt
Konsumierte Produkte	Penta-BDPE	-% +%			-50% +95%		-50% +95%
	Octa-BDPE	-% +%	-45% +160%	-65% +150%	-70% +45%		-70% +110%
	Deca-BDPE	-% +%	-40% +100%	-50% +200%	-55% +110%	-35% +50%	-45% +140%
	TBBPA	-% +%	-30% +60%	-30% +95%	-50% +120%	-60% +35%	-35% +100%
Lager im Konsum und gasförmige Emissionen	Penta-BDPE	-% +%		-55% +1'100%	-55% +150%	-55% +90%	-55% +110%
	Octa-BDPE	-% +%	-55% +270%	-70% +150%	-65% +220%	-25% +40%	-65% +150%
	Deca-BDPE	-% +%	-50% +180%	-65% +270%	-60% +140%	-35% +110%	-55% +180%
	TBBPA	-% +%	-35% +100%	-45% +130%	-55% +140%	-50% +110%	-50% +130%
Siedlungsabfälle	Penta-BDPE	-% +%		-45% +850%	-70% +110%	-75% +40%	-75% +65%
	Octa-BDPE	-% +%	-75% +190%	-65% +120%	-70% +250%	-60% +5%	-65% +130%
	Deca-BDPE	-% +%	-75% +230%	-65% +210%	-70% +120%	-65% +60%	-65% +140%
	TBBPA	-% +%	-60% +100%	-50% +100%	-65% +130%	-70% +60%	-55% +100%

Anmerkung: Die Prozentangaben beziehen sich auf die Mittelwerte (siehe Stoffflussdiagramme). Leere Felder bedeuten, dass der Stoff in der jeweiligen Produktgruppe nicht eingesetzt wird

Es konnten daher keine exakten Angaben gemacht werden, zu welchem Anteil ein Produkt (EE-Gerät, KFZ, Baumaterial) mit TBBPA, DecaBDPE oder anderen BFS behandelt wurde. Um

dennoch die eingesetzten Mengen der untersuchten FS zu berechnen, mussten eigene Annahmen getroffen werden, die zum Teil auf Analysen von EE-Alt- und Neuprodukten basieren. Diese FS-Anteile sind daher sowohl für Neuprodukte, aber besonders für Altprodukte mit einer höheren Unsicherheit behaftet, als die anderen Ausgangsdaten (FS-Konzentration und Bauteilmassen).

Die Tabelle 6-4 zeigt eine detaillierte Übersicht über die Bandbreiten der wichtigsten Stoffflüsse (und Lager), aufgeteilt auf die einzelnen Produktgruppen. Die Prozentangaben beziehen sich auf die Mittelwerte, welche in den vorhergehenden Tabellen und den folgenden Stoffflussdiagrammen dargestellt sind.

### 6.1.2 Datenlücken und Unsicherheiten im Teilsystem „Abfallwirtschaft“

#### Datenlücken

In der Abfallwirtschaft ist – wenn auch sehr wenig - Information über das Verhalten der untersuchten Stoffe in der „Verbrennung“ (KVA) vorhanden (Versuchsmessungen aus Japan). Über die Verteilung der Stoffe auf die Produkte der restlichen Prozesse ist nichts bekannt, daher wurden eigene Annahmen getroffen. Dazu liegen nur einzelne Messungen von Stoffkonzentrationen in einigen wenigen Produkten vor (z.B. Klärschlamm). Über Frachten aus den Prozessen „Abwasserreinigung“, „Verwertung“ und „Deponie“ in die Umwelt ist bis auf grobe Schätzungen so gut wie nichts bekannt. Diese wurden im Rahmen dieser Arbeit geschätzt.

#### Unsicherheiten (Bandbreiten)

Wie oben schon erläutert, macht die Unsicherheit der Stoffflüsse im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ etwa den Faktor 2-3 aus, bezogen auf den Mittelwert. Diese Verhältnisse wurden bis auf wenige Ausnahmen auch auf die Flüsse der Abfallwirtschaft übertragen. Zusätzliche Fehler im System der „Abfallwirtschaft“ aufgrund z.B. unsicherer Transferkoeffizienten wurden nicht weiter berücksichtigt. Angegebene Minima und Maxima basieren demnach nicht auf statistischen Aussagen sondern sind grobe Schätzungen. Dies trifft verstärkt auch auf Flüsse (wie z.B. „Sickerwasser in ARA“, „Deposition kommunales Abwasser“, welche nur grob geschätzt werden konnten, zu. Erst Messungen in den einzelnen Güterflüssen werden die Angabe statistisch abgesicherter Fehlerbreiten erlauben.

Die folgenden vier Tabellen zeigen die Bandbreiten und Mittelwerte (fett gedruckt) aller Stoffflüsse in den vier Prozessen des Teilsystems „Abfallwirtschaft“:

Tabelle 6-5: Bandbreite und Mittelwerte der Stoffflüsse im Prozess „Verwertung“

GÜTER im PROZESS VERWERTUNG		PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA	
		[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	
I N	Separat gesammelte Abfälle	Min	1	17	95	100
		<b>Mittel</b>	<b>2.5</b>	<b>33</b>	<b>190</b>	<b>200</b>
		Max	5	66	380	400

GÜTER im PROZESS VERWERTUNG			PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA
			[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
O U T	Reststoffe zur Verbrennung	Min	0.6	15	73	55
		<b>Mittel</b>	<b>1.2</b>	<b>30</b>	<b>146</b>	<b>109</b>
		Max	2.4	60	292	218
P U T	Export aus Verwertung	Min	0.5	1.2	16	42
		<b>Mittel</b>	<b>1</b>	<b>2.3</b>	<b>32</b>	<b>83</b>
		Max	2	4.6	64	166
	Deponiegut aus Verwertung	Min	0.12	0.6	7	4
		<b>Mittel</b>	<b>0.24</b>	<b>1.1</b>	<b>13</b>	<b>8</b>
		Max	<b>0.5</b>	<b>2.2</b>	<b>26</b>	<b>16</b>
Emission aus Verwertung			n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Anmerkungen: n.b.: nicht bestimmt.

Folgende Flüsse bzw. Lager sind nicht bestimmt: Input: Import in Verwertung, Verbrennungsrückstände zur Verwertung, Output: wiederverwertete Abfälle

Tabelle 6-6: Bandbreite und Mittelwerte der Stoffflüsse im Prozess „Abwasserreinigung“

GÜTER im PROZESS ARA			PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA
			[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
I N P U T	Abwasser	Min	0.0	0.0	0.3	0.0
		<b>Mittel</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.6</b>	<b>0.0</b>
		Max	0.0	0.0	1.1	0.0
	Deposition kommunales Abwasser	Min	0.0	0.0	0.0	0.0
		<b>Mittel</b>	<b>0.19</b>	<b>0.04</b>	<b>0.21</b>	<b>0.03</b>
		Max	0.38	0.07	0.42	0.06
	Sickerwasser zur ARA	Min	0.011	0.004	0.025	0.075
		<b>Mittel</b>	<b>0.022</b>	<b>0.007</b>	<b>0.05</b>	<b>0.15</b>
		Max	0.044	0.014	0.10	0.30
O U T P U T	ARA Rückstände zur Verbrennung	Min	0.01		0.01	0.005
		<b>Mittel</b>	<b>0.02</b>	n.b.	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>
		Max	0.08		0.08	0.04
	Gereinigtes Abwasser	Min	0.002		0.003	0.001
		<b>Mittel</b>	<b>0.004</b>	n.b.	<b>0.005</b>	<b>0.002</b>
		Max	0.008		0.010	0.004
	Klärschlamm in Landwirtschaft	Min	0.018		0.023	0.009
		<b>Mittel</b>	<b>0.036</b>	n.b.	<b>0.045</b>	<b>0.018</b>
		Max	0.14		0.18	0.07
	Deponiegut aus ARA	Min	0.002		0.002	0.001
		<b>Mittel</b>	<b>0.003</b>	n.b.	<b>0.003</b>	<b>0.001</b>
		Max	0.012		0.012	0.004

Anmerkungen: n.b.: nicht bestimmt; Fehlerbereich für Klärschlamm in Landwirtschaft, ARA-Rückstände in Verbrennung, und Deponiegut aus ARA für obere Grenze (Max.) Faktor 4 vom MW statt nur Faktor 2 (Aufgrund grosser Schwankungsbreiten publizierter Daten).

Tabelle 6-7: Bandbreite und Mittelwerte der Stoffflüsse im Prozess „Verbrennung“

GÜTER im PROZESS VERBRENNUNG			PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA
			[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
I N P U T	Thermisch behandelte Abfälle	Min	2.9	11	72	84
		<b>Mittel</b>	<b>5.8</b>	<b>22</b>	<b>143</b>	<b>166</b>
		Max	12	44	287	332
	Reststoffe zur Verbrennung	Min	0.6	15	73	55
		<b>Mittel</b>	<b>1.2</b>	<b>31</b>	<b>146</b>	<b>109</b>
		Max	2.4	62	292	218
	ARA Rückstände zur Verbrennung	Min	0.01		0.01	0.005
		<b>Mittel</b>	<b>0.02</b>	n.b.	<b>0.02</b>	<b>0.01</b>
		Max	0.08		0.08	0.08
O U T	Verbrennungsrückstände zur Deponie	Min	0.001	0.01	0.05	2
		<b>Mittel</b>	<b>0.003</b>	<b>0.02</b>	<b>0.1</b>	<b>4</b>
		Max	0.006	0.04	0.2	8
	Emission aus Verbrennung	Min	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00
		<b>Mittel</b>	<b>2.3E-09</b>	<b>1.8E-08</b>	<b>9.5E-08</b>	<b>1E-05</b>
		Max	4.6E-09	3.7E-08	1.9E-07	2E-05
	Export aus Verbrennung	Min	0.001	0.005	0.03	1.1
		<b>Mittel</b>	<b>0.002</b>	<b>0.01</b>	<b>0.06</b>	<b>2.4</b>
		Max	0.004	0.02	0.12	4.5

Anmerkungen: n.b.: nicht bestimmt; folgende Flüsse bzw. Lager sind nicht bestimmt: Import in die Verbrennung (Input), Verbrennungsrückstände zur Verwertung (Output)

Tabelle 6-8: Bandbreite und Mittelwerte der Stoffflüsse im Prozess „Deponie“

GÜTER im PROZESS DEPONIE			PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA
			[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
I N P U T	Deponierte Abfälle	Min	11	2.8	18	19
		<b>Mittel</b>	<b>22</b>	<b>5.5</b>	<b>36</b>	<b>38</b>
		Max	44	11	72	76
	Deponiegut aus Verwertung	Min	0.0	0.6	7	4
		<b>Mittel</b>	<b>0.0</b>	<b>1.1</b>	<b>13</b>	<b>8</b>
		Max	<b>0.0</b>	<b>2.2</b>	<b>26</b>	<b>16</b>
	Deponiegut aus ARA	Min	0.002		0.002	0.001
		<b>Mittel</b>	<b>0.003</b>	n.b.	<b>0.003</b>	<b>0.001</b>
		Max	0.012		0.012	0.004
Verbrennungsrückstände zur Deponie	Min	0.0015	0.01	0.05	2	
	<b>Mittel</b>	<b>0.003</b>	<b>0.02</b>	<b>0.1</b>	<b>4</b>	
	Max	0.006	0.04	0.2	8	

GÜTER im PROZESS DEPONIE			PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA
			[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
O U T	Sickerwasser zur ARA	Min	0.011	0.004	0.025	0.075
		<b>Mittel</b>	<b>0.022</b>	<b>0.007</b>	<b>0.05</b>	<b>0.15</b>
		Max	0.044	0.014	0.10	0.30
P U T	Emissionen aus Deponie	Min	0.001	0.0004	0.003	0.008
		<b>Mittel</b>	<b>0.002</b>	<b>0.0007</b>	<b>0.005</b>	<b>0.015</b>
		Max	0.004	0.0014	0.010	0.030
L A G E R	Lagerzuwachs	Min	8.8	2.84	20	20
		<b>Mittel</b>	<b>22</b>	<b>7.1</b>	<b>50</b>	<b>50</b>
		Max	55	18	125	125
	Lagerabnahme	Min	0.01	0.003	0.02	0.07
		<b>Mittel</b>	<b>0.02</b>	<b>0.008</b>	<b>0.06</b>	<b>0.17</b>
		Max	0.06	0.02	0.15	0.43
	<i>Lagerbestand</i>	<i>Min</i>	<i>43</i>	<i>43</i>	<i>207</i>	<i>237</i>
		<b>Mittel</b>	<b>130</b>	<b>130</b>	<b>620</b>	<b>710</b>
		<i>Max</i>	<i>325</i>	<i>325</i>	<i>1'550</i>	<i>1'775</i>

Anmerkungen: n.b.: nicht bestimmt; der Lagerbestand (kursiv gedruckt) hat die Einheit [t].

### 6.1.3 Datenlücken und Unsicherheiten im Teilsystem „Umwelt“

#### Datenlücken

Im Prozess „Umwelt“ ist es mit Ausnahme der berechneten Inputflüsse aus den Teilsystemen „Verkehr mit Produkten“ und „Abfallwirtschaft“ praktisch unmöglich, Flüsse zu bestimmen. Für die Schweiz liegen keine Messungen vor. Daten, die vorliegen, betreffen meist Konzentrationsmessungen nur in einzelnen Gütern aus einem Umweltkompartiment (Gewässer-Sedimente unterhalb Industrie-einleiter, diverse Fisch- und Pflanzenarten etc.). Depositionsraten sind als sehr unsicher zu betrachten.

#### Unsicherheiten (Bandbreiten)

Wie oben schon erläutert, beträgt, die Unsicherheit der Stoffflüsse im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ etwa den Faktor 2-3, bezogen auf den Mittelwert. Diese Fehlerbereiche sowie analog die angenommen Fehlerbreiten bei Stoffflüssen aus der Abfallwirtschaft wurden bei den Inputflüssen auf die Umwelt übernommen. Die Fehlerschätzung für Flüsse und Lager im Teilsystem und für Exporte sind grobe Schätzungen und erst mittels fundierten Messungen besser schätzbar.

Die folgenden drei Tabellen zeigen die Bandbreiten und Mittelwerte (fett gedruckt) aller Stoffflüsse in den drei Prozessen des Teilsystems „Umwelt“.

Tabelle 6-9: Bandbreite und Mittelwerte der Stoffflüsse im Prozess „Atmosphäre“

GÜTER im PROZESS ATMOSPHERE			PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA	
			[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	
I N P U T	Emission PHK (Produktion, Handel, Verkehr)	Min	0.9	0.1	1.0	0.1	
		<b>Mittel</b>	<b>1.9</b>	<b>0.4</b>	<b>2.1</b>	<b>0.3</b>	
		Max	4.1	0.9	6.0	0.6	
	Emission aus Abfallwirtschaft	Min	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	
		<b>Mittel</b>	<b>2.3E-09</b>	<b>1.8E-08</b>	<b>9.5E-08</b>	<b>1E-05</b>	
		Max	4.6E-09	3.7E-08	1.9E-07	2E-05	
O U T	Deposition Hydrosphäre	Min	0.0001	0.0001	0.0008	0.0002	
		<b>Mittel</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.0013</b>	<b>0.0006</b>	
		Max	0.0002	0.0002	0.0017	0.0010	
	Deposition Biota		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
	Deposition Pedo-/Lithosphäre	Min	1.20	0.23	1.32	0.18	
		<b>Mittel</b>	<b>1.71</b>	<b>0.33</b>	<b>1.89</b>	<b>0.25</b>	
		Max	2.22	0.43	2.46	0.33	
	Deposition kommunales Abwasser	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	
		<b>Mittel</b>	<b>0.19</b>	<b>0.04</b>	<b>0.21</b>	<b>0.03</b>	
		Max	0.38	0.07	0.42	0.06	
	L A G E R	Lagerzuwachs	Min	0	0	0	0
			<b>Mittel</b>	<b>1.9</b>	<b>0.37</b>	<b>2.1</b>	<b>0.28</b>
Max			5.7	1.11	6.3	0.84	
Lagerabnahme		Min	0	0	0	0	
		<b>Mittel</b>	<b>1.9</b>	<b>0.37</b>	<b>2.1</b>	<b>0.28</b>	
		Max	5.7	1.11	6.3	0.84	
<i>Lagerbestand</i>		<i>Min</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	
		<b><i>Mittel</i></b>	<b><i>0.00005</i></b>	<b><i>0.00005</i></b>	<b><i>0.00005</i></b>	<b><i>0.00005</i></b>	
		<b><i>Max</i></b>	<b><i>0.00010</i></b>	<b><i>0.00010</i></b>	<b><i>0.00010</i></b>	<b><i>0.00010</i></b>	

Anmerkungen: n.b.: nicht bestimmt; Der Lagerbestand (kursiv gedruckt) hat die Einheit [t]. Der Mittelwert des Lagers entspricht dem halben geschätzten Maximum (Annahme)  
 Folgende Flüsse bzw. Lager sind nicht bestimmt: Import Luft, Export Luft.

Tabelle 6-10: Bandbreite und Mittelwerte der Stoffflüsse im Prozess „Pedo-/Lithosphäre“

GÜTER im PROZESS PEDO- /LITHOSPHERE			PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA
			[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
I N P U T	Klärschlamm in Landwirtschaft	Min	0.009	n.b.	0.011	0.005
		<b>Mittel</b>	<b>0.036</b>	<b>n.b.</b>	<b>0.045</b>	<b>0.018</b>
		Max	0.144	n.b.	0.180	0.072
	Deposition Pedo-/Lithosphäre	Min	1.2	0.2	1.3	0.2
		<b>Mittel</b>	<b>1.7</b>	<b>0.3</b>	<b>1.9</b>	<b>0.3</b>
		Max	2.2	0.4	2.5	0.3
Sedimentation		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	

GÜTER im PROZESS PEDO- /LITHOSPHERE		PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA	
		[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	
O	Aufnahme Biota	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
	Erosion	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
L	<i>Lagerbestand</i>	<i>Min</i>	20	n.b.	10	30
		<i>Mittel</i>	40	n.b.	20	60
		<i>Max</i>	80	n.b.	40	120

Anmerkungen: n.b.: nicht bestimmt; der Lagerbestand (kursiv gedruckt) hat die Einheit [t].

Tabelle 6-11: Bandbreite und Mittelwerte der Stoffflüsse im Prozess „Hydrosphäre“

GÜTER im PROZESS HYDROSPHERE		PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	TBBPA		
		[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]		
I N P U T	Abwasser Abfallwirtschaft	Min	0.002		0.003	0.004	
		<b>Mittel</b>	<b>0.006</b>	n.b.	<b>0.010</b>	<b>0.017</b>	
		Max	0.024		0.040	0.068	
	Deposition Hydrosphäre	Min	0.00009	0.00006	0.0008	0.0002	
		<b>Mittel</b>	<b>0.00012</b>	<b>0.00013</b>	<b>0.0013</b>	<b>0.0006</b>	
		Max	0.00016	0.00019	0.0017	0.0010	
	Erosion		n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
	O U T	Export Hydrosphäre	Min	0.01	0.17	0.02	0.00
			<b>Mittel</b>	<b>0.012</b>	<b>0.33</b>	<b>0.03</b>	<b>0.004</b>
Max			0.02	0.66	0.06	0.01	
Aufnahme Biota			n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
Sedimentation			n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	
L A G E R	Lagerzuwachs	Min	0.003	0.00005	0.005	0.01	
		<b>Mittel</b>	<b>0.006</b>	<b>0.0001</b>	<b>0.01</b>	<b>0.02</b>	
		Max	0.012	0.0002	0.02	0.04	
	Lagerabnahme	Min	0.006	0.02	0.015	0.002	
		<b>Mittel</b>	<b>0.012</b>	<b>0.33</b>	<b>0.03</b>	<b>0.004</b>	
		Max	0.024	0.66	0.06	0.008	
	<i>Lagerbestand</i>	<i>Min</i>	1		2	1	
		<i>Mittel</i>	<b>3</b>	n.b.	<b>7</b>	<b>4</b>	
		<i>Max</i>	9		21	12	

Anmerkungen: n.b.: nicht bestimmt; der Lagerbestand (kursiv gedruckt) hat die Einheit [t].

Für den Prozess „Biota“ konnten keine Flüsse und Lager bestimmt werden.

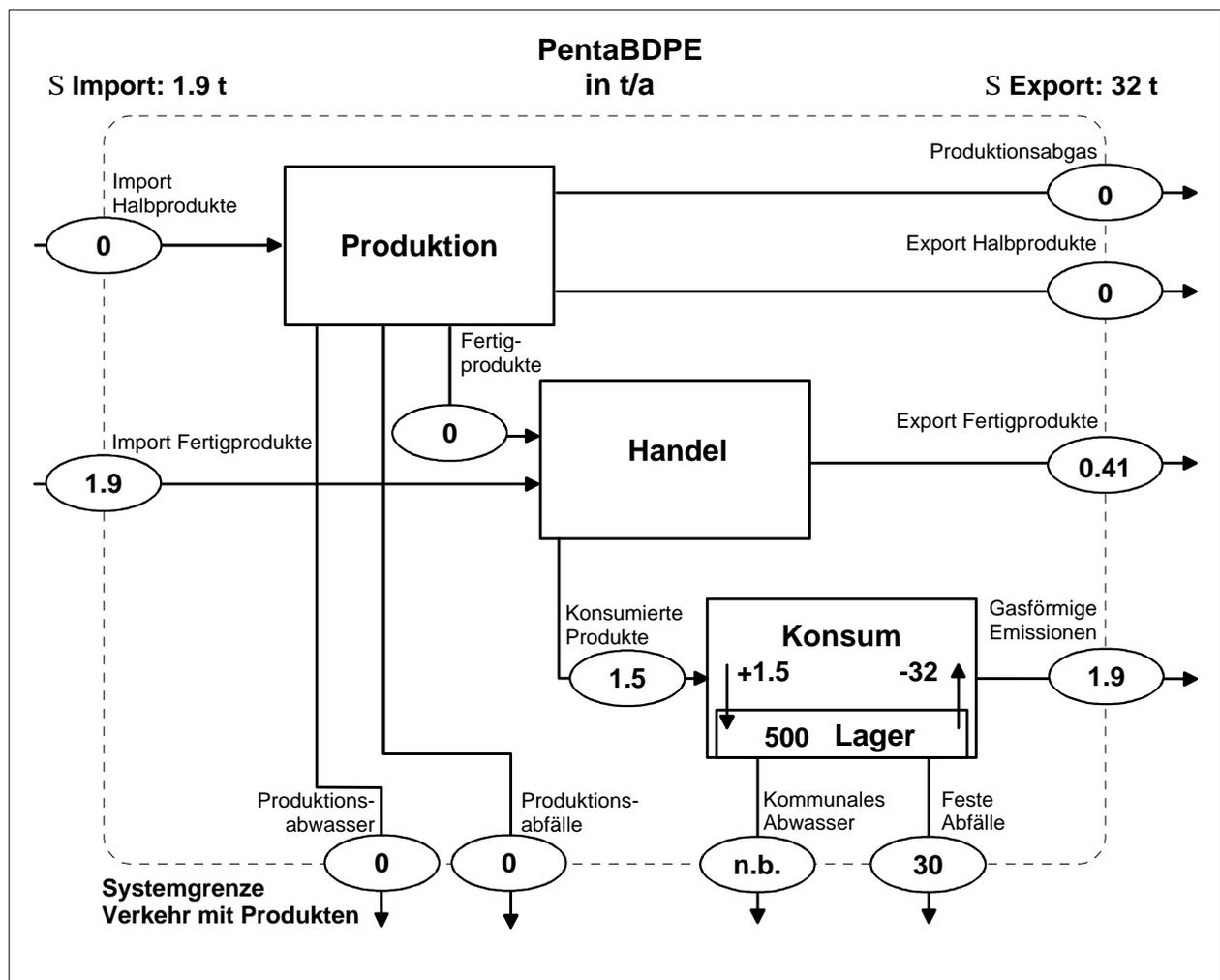
## 6.2 Stoffflüsse in den Teilsystemen

### 6.2.1 Teilsystem „Verkehr mit Produkten“

Das Teilsystem umfasst die Bereiche Produktion, Handel und den Konsum in der Schweiz und wird mit drei gleichnamigen Prozessen dargestellt. Der Konsum umfasst sowohl den privaten als auch den betrieblichen.

#### 6.2.1.1 PentaBDPE (Pentabromdiphenyl Ether)

Abbildung 6-1: PentaBDPE-Flüsse im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“



Der weltweite Verbrauch von PentaBDPE-Flammschutz ist im letzten Jahrzehnt von 4'000 t im Jahr 1991 auf 8'500 t im Jahr 1999 stark gestiegen. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Verbrauch von PentaBDPE-haltigen Produkten auf dem europäischen Markt aufgrund nationaler Beschränkungen (freiwillige Selbstbeschränkung bestimmter Industriebranchen) gefallen ist. Bezogen auf alle 1999 verarbeiteten PBDPEs (PentaBDPE, OctaBDPE und DecaBDPE) lag der Anteil von PentaBDPE-Flammschutz weltweit bei etwa 13 %, demgegenüber in Europa nur bei 2,5 % (210 t/a). Die weltweiten und europäischen Verbrauchszahlen von

PentaBDPE-Flammschutz beziehen sich auf die kommerziellen Flammschutzprodukte, welche einen mittleren Gehalt von rund 59 % der reinen Substanz PentaBDPE enthalten.

Ende der 90er Jahre (1998) betrug der jährliche Import von PentaBDPE über Fertigprodukte in das Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ etwa 1.9 t/a, wovon etwa 22 % in Fertigprodukten wieder exportiert wurden. In der Schweiz werden gegenwärtig keine PentaBDPE-haltigen Halb- und Fertigprodukte hergestellt oder verarbeitet, daher sind aus dem Produktionssektor keine Produktions-Emissionen von PentaBDPE in die Umwelt zu erwarten. Der Import von PentaBDPE-Flammschutz in Fertigprodukten wird Ende der 90er Jahre vollständig durch Kraftfahrzeuge bestimmt. Dabei dominieren flammgeschützte Polsterungen (flexibler PUR-Schaum), Textilien und Kunststoffe in diesen Fahrzeugen und die Fracht an PentaBDPE. In Kraftfahrzeugen werden generell PBDEs eingesetzt, und es wurde angenommen, dass ein geringer Teil (etwa 10 %) dieser PBDEs von PentaBDPE abgedeckt.

Durch den Einsatz von PentaBDPE-haltigen Produkten hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten im Konsum der Schweiz ein Lager von rund 500 t PentaBDPE aufgebaut. Dieses Lager setzt sich vor allem aus den in die Infrastruktur eingebauten PentaBDPE-haltigen Baumaterialien und in den Privathaushalten benutzten PentaBDPE-haltigen Konsumgütern (Unterhaltungselektronik, KFZ) zusammen.

Trotz der Unsicherheiten über die Einsatzmenge von PentaBDPE in den Baumaterialien und den Konsumprodukten, kann als gesichert angesehen werden, dass dieses Lager derzeit stark abgebaut wird. Im Vergleich zum jährlichen Input in das Lager (1.9 t/a) beläuft sich der Lagerabbau auf jährlich rund 32 t/a. Das heisst, obwohl PentaBDPE in neuen Produkten derzeit nur mehr geringfügig eingesetzt wird, gelangt es durch den Abbau des Lagers in grosser Menge in die Abfallwirtschaft. Unter der Annahme, dass dieser Trend anhält, würde dies bedeuten, dass es mindestens weitere 16 Jahre dauert, bis das Lager an PentaBDPE-haltigen Produkten im Konsum abgebaut ist.

Die für Lager und Emissionen an PentaBDPE wichtigsten Produkte sind:

- rund 86 % PentaBDPE in PUR-Montageschäumen
- rund 5 % PentaBDPE in PVC-Belägen
- rund 7 % PentaBDPE in Polsterungen und Textilien in KFZ
- rund 2 % PentaBDPE in Leiterplatten (FR2) von Unterhaltungselektronikgeräten

In den jährlich etwa 30 t/a über die Abfälle entsorgten PentaBDPE bestimmen die Baurestmassen (PUR-Montageschäume 25 t/a PentaBDPE und PVC-Beläge 2 t/a PentaBDPE) die Fracht an PentaBDPE. Dies entspricht einem Anteil von etwa 90 % der Gesamtfracht in die Abfallwirtschaft. Da PUR-Montageschäume nur zu einem sehr geringen Anteil aus den Baurestmassen separiert werden können, wird angenommen, dass diese zum Grossteil in Deponien (80 %) gelagert bzw. mit brennbarem Bauabfall in Verbrennungsanlagen (20 %) entsorgt werden. Inwiefern diese Annahmen wirklich zutreffen, werden genauere Untersuchungen zeigen müssen. Mit Alt-KFZs werden jährlich etwa 2,4 t PentaBDPE entsorgt. Im Elektronikschrott befinden sich weitere rund 0,7 t PentaBDPE in FR2-Leiterplatten.

Eine wichtige ökologische Bedeutung haben die aus der Nutzung der PentaBDPE-haltigen Produkte resultierenden diffusen Emissionen mit jährlich rund 1,9 t/a. Diese Emissionen stammen zu rund 86 % aus den in den Gebäuden eingesetzten PUR-Montageschäumen. Da bei der Berechnung der Emissionen Worst-Case Emissionsraten zugrundegelegt wurden und sowohl die

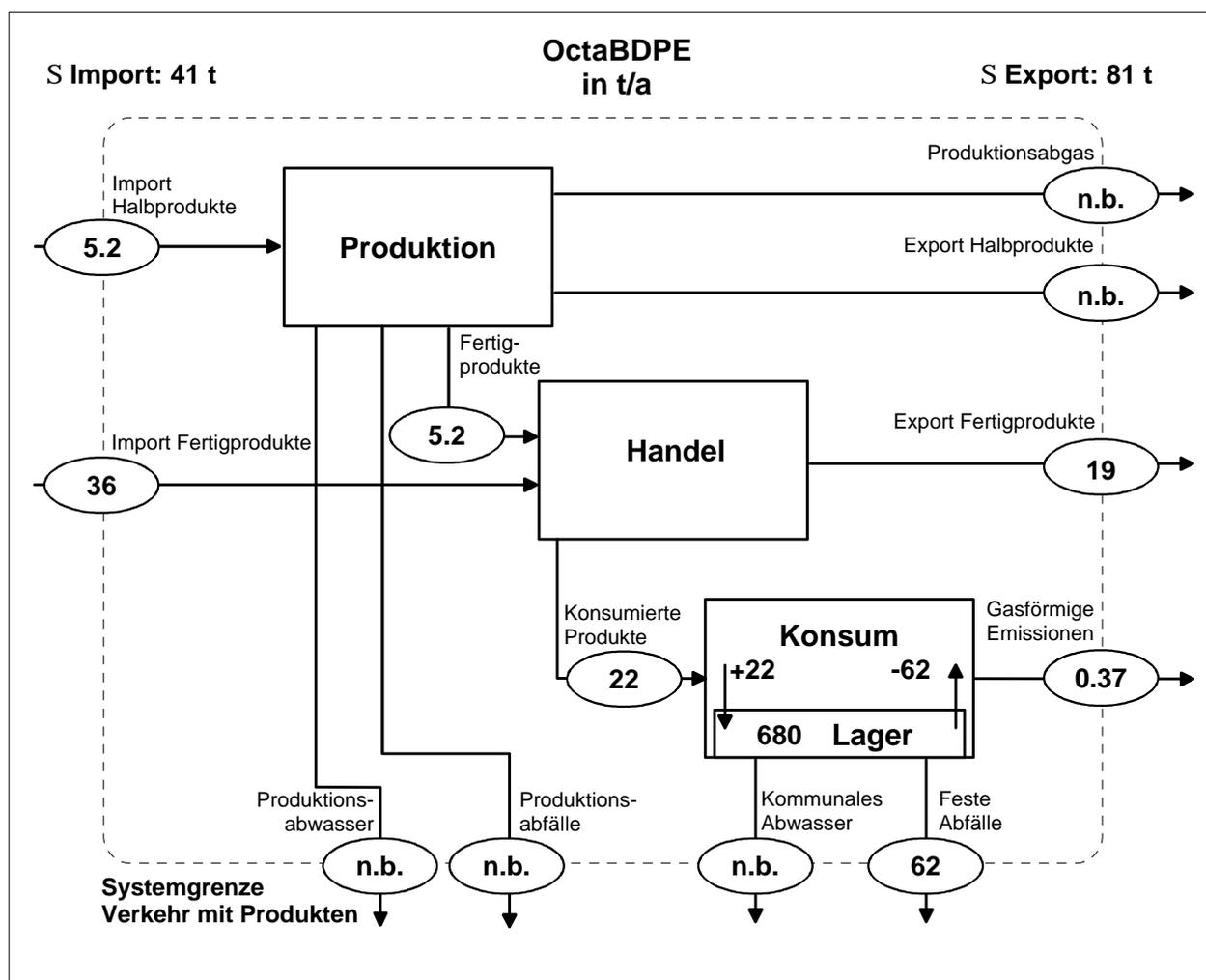
Verarbeitungsform als auch die Einsatzweise von PUR-Schaum nicht näher berücksichtigt worden sind, kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächlichen Emissionen tiefer liegen. Um die grösstmögliche Belastung schätzen zu können wird angenommen, dass die Emissionen ganz in die Atmosphäre gelangen.

**Datenlücken und Unsicherheiten**

Für die Anwendungsgebiete Flammenschutz von flexiblen PUR-Schäumen (z.B. Polstermöblie- rung), von Textilien und von Gummi (z.B. Förderbänder) lagen keine ausreichenden Daten vor; daher konnten für diese Bereiche der Konsum, das Lager und die Abfälle nicht quantifiziert werden. Ein relevanter Einsatzbereich von PentaBDPE in flexiblen PUR-Schäumen, nämlich in KFZ, konnte jedoch geschätzt werden.

**6.2.1.2 OctaBDPE (Octabromdiphenyl Ether)**

Abbildung 6-2: OctaBDPE-Flüsse im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“



Weltweit ist der Verbrauch von OctaBDPE-Flammenschutz im letzten Jahrzehnt von 6'000 t im Jahr 1991 auf 3'800 t im Jahr 1999 um 38 % stark gefallen. Das grösste Einsatzgebiet von OctaBDPE waren ABS-Kunststoffe für EE-Geräte (Elektro-Elektronik) mit einem Anteil von 85 %. Deren Marktanteil ist jedoch durch die Entwicklung von ABS-Blends mit alternativen Flamm- schutzmitteln stark zurückgegangen. Bezogen auf alle 1999 verarbeiteten PBDEs (PentaBDPE,

OctaBDPE und DecaBDPE) lag der Anteil von OctaBDPE-Flammschutz weltweit bei etwa 5,7 % und in Europa mit etwa 5,5 % (450 t/a) etwa in derselben Grösse. Die weltweiten und europäischen Verbrauchszahlen von OctaBDPE-Flammschutz beziehen sich auf die kommerziellen Flammschutzprodukte, welche einen mittleren Gehalt von rund 34 % der reinen Substanz OctaBDPE enthalten.

Ende der 90er Jahre betrug der jährliche Import von OctaBDPE über Halb- und Fertigprodukte in das Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ etwa 41 t/a, wovon etwa 46 % in Fertigprodukten wieder exportiert wurden. Bezogen auf den Import ist der gegenwärtig in der Schweiz hergestellte Anteil an OctaBDPE-haltigen Fertigprodukten mit rund 14 % sehr gering.

Der Import von OctaBDPE-Flammschutz in Fertigprodukten erfolgt zum Grossteil (rund 67 %) durch EE-Geräte, wobei EDV- und Bürogeräte die Fracht an OctaBDPE dominieren. Einen weiteren relevanten Anteil (rund 33 %) am Import haben flammgeschützte Polsterungen (flexibler PUR-Schaum), Textilien und Kunststoffe in Kraftfahrzeugen. Hierfür werden generell PBDEs eingesetzt, und es wurde angenommen, dass ein geringer Teil (etwa 8 %) dieser PBDEs von OctaBDPE abgedeckt werden.

Die OctaBDPE-Fracht von inländisch produzierten Fertigprodukten ist vollumfänglich in EE-Geräten zu finden, welche aus importierten OctaBDPE-haltigen Halbprodukten zusammengesetzt werden. OctaBDPE-haltige Chemikalien werden in der Schweiz nicht verarbeitet.

Die inländische Produktion, vor allem die Assemblierung von Geräten, setzt im Vergleich zum Handel nur eine geringe OctaBDPE-Fracht (rund 13 %) von rund 5.2 t/a in produzierten Fertigprodukten um. Der Export von OctaBDPE-haltigen Halbprodukten konnte nicht bestimmt werden; daher kann der Umsatz im Produktionssektor höher sein als die ermittelte Fracht von jährlich 5.2 t/a OctaBDPE. Diese Erhöhung könnte auf OctaBDPE-haltige Halbprodukte zurückzuführen sein, welche in der Schweiz nur gehandelt aber nicht verarbeitet oder konsumiert werden.

Die OctaBDPE-Fracht in den in den Konsum gelangenden Fertigprodukten (rund 22 t/a) ist etwa gleich hoch wie jene in den exportierten Fertigprodukten (rund 19 t/a). Der grösste Anteil (rund 59 %) der OctaBDPE-Fracht in konsumierten Fertigprodukten befindet sich in den EE-Geräten. Die EDV-Geräte enthalten rund 22 % und die grossen Haushaltsgeräte rund 13 % an der Gesamtfracht. Neben EE-Geräten bilden Kunststoffteile von KFZ ein wichtiges Einsatzgebiet von OctaBDPE. Rund 41 % der OctaBDPE-Fracht in den jährlich konsumierten Fertigprodukten befinden sich in den Kraftfahrzeugen. Die Ende der 90er Jahre in den Konsum gelangten Baumaterialien enthielten keinen OctaBDPE Flammschutz mehr.

Das durch den Einsatz von OctaBDPE-haltigen Produkten in den letzten zwei Jahrzehnten im Konsum der Schweiz aufgebaute Lager beträgt rund 680 t OctaBDPE. Dieses Lager setzt sich vor allem aus den in den Privathaushalten benutzten OctaBDPE-haltigen Konsumgütern (EE-Geräte, Kraftfahrzeuge) und den in die Infrastruktur eingebauten OctaBDPE-haltigen Baumaterialien zusammen.

Obwohl jährlich rund 22 t/a OctaBDPE-haltige Produkte in das Lager im Konsum eingebracht werden, verlässt annähernd die dreifache Fracht (rund 62 t/a) dieses Lager, d.h. es wird derzeit stark abgebaut. Obwohl der Einsatz von OctaBDPE-Flammschutz in der Schweiz derzeit rückläufig ist, gelangen jährlich noch grössere Mengen (62 t/a) durch den Abbau dieses Lagers in die Abfallwirtschaft. Unter der Annahme, dass der Trend des abnehmenden Einsatzes von Oc-

taBDPE in Neuprodukten anhält, würde dies bedeuten, dass es mindestens weitere 17 Jahre lang dauert, bis das Lager an OctaBDPE-haltigen Produkten im Konsum abgebaut ist.

Die für Lager und Emissionen an OctaBDPE wichtigsten Produkte sind mit einem Anteil von rund 69 % vor allem die EE-Geräte und mit einem Beitrag von 21 % die KFZ. Im Detail betrachtet, setzt sich das Lager zusammen aus:

- rund 42 % OctaBDPE in TV-Geräten
- rund 21 % OctaBDPE in KFZ
- rund 10 % OctaBDPE in Baumaterialien (Kunststofffolien)
- rund 9 % OctaBDPE in Elektro-Kleinteilen (Stecker und Schalter)
- rund 7 % OctaBDPE in kleinen und grossen EE-Haushaltsgeräten
- rund 6 % OctaBDPE in EDV+Bürogeräten
- rund 5 % OctaBDPE in anderen EE-Geräten (Unterhaltungselektronik, Industrie-Elektrogeräte)

In den jährlich etwa 62 t/a über die Abfälle entsorgten OctaBDPE bestimmen die Elektronikgeräte (rund 77 % Anteil) die Fracht an OctaBDPE, wobei hier TV-Geräte einen Anteil von rund 36 % und EDV+Bürogeräte einen Beitrag von rund 26 % ausmachen. Mit Alt-KFZs werden jährlich etwa 9 t OctaBDPE entsorgt, und in Baurestmassen befinden sich weitere rund 5.2 t OctaBDPE in PE-Folien.

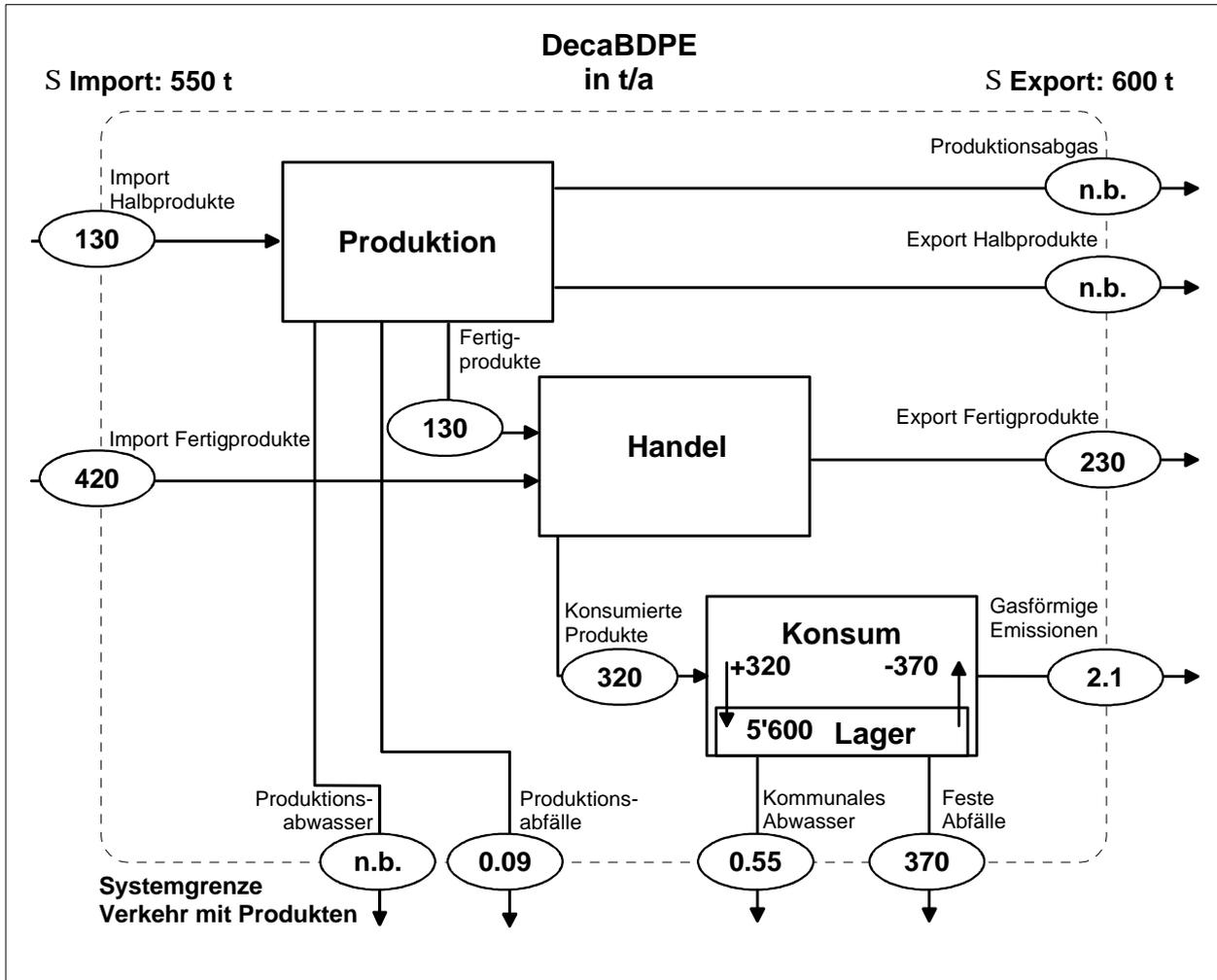
Eine ökologische Bedeutung haben die aus der Nutzung der OctaBDPE-haltigen Produkte resultierenden diffusen Emissionen mit jährlich rund 0,37 t/a. Diese Emissionen stammen zu 69 % aus den in den Privathaushalten stehenden EE-Geräten. Da bei der Berechnung der Emissionen Worst-Case Emissionsraten zugrundegelegt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächlichen Emissionen etwas tiefer liegen. Um die grösstmögliche Belastung schätzen zu können, wird angenommen, dass die Emissionen vollständig in die Atmosphäre gehen. Im Vergleich zu den anderen zwei PBDEs (PentaBDPE und DecaBDPE) liegen die diffusen Emissionen von OctaBDPE ungefähr bei einem Fünftel. Dies liegt daran, dass die Emissionsrate von OctaBDPE im Vergleich zu PentaBDPE ungefähr eine Grössenordnung tiefer liegt und dass das Lager von OctaBDPE-haltigen Produkten etwa ein Achtel des Lagers der DecaBDPE-haltigen Produkten beträgt.

#### **Datenlücken und Unsicherheiten**

Für den relevantesten Einsatzbereich von OctaBDPE (ABS-Kunststoffe) konnten realistische Schätzungen aufgrund von Kunststoffrezepturen der FS-Hersteller getroffen werden. Es mussten jedoch Annahmen bezüglich der Marktanteile des Flammenschutzmittels beim Einsatz in ABS-Kunststoffen und des Anteils des Kunststoffes in den Produkten getroffen werden.

### 6.2.1.3 DecaBDPE (Decabromdiphenyl Ether)

Abbildung 6-3: DecaBDPE-Flüsse im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“



Der weltweite Verbrauch von DecaBDPE-Flammschutz ist im letzten Jahrzehnt von 30'000 t im Jahr 1991 auf 54'800 t im Jahr 1999 stark angestiegen. Das grösste (laut Schätzungen 30 - 85 %) Einsatzgebiet von DecaBDPE waren und sind immer noch HIPS-Kunststoffe für Gehäuse von EE-Geräten. Weitere bedeutende Einsatzgebiete sind thermoplastische Polyester, Polyamide und Textilbeschichtungen aus Latex. Bezogen auf alle 1999 verarbeiteten PBDEs (PentaBDPE, DecaBDPE und DecaBDPE) lag der Anteil von DecaBDPE-Flammschutz weltweit bei etwa 82 % und in Europa bei etwa 92 % (7'500 t/a). Die weltweiten und europäischen Verbrauchszahlen von DecaBDPE-Flammschutz beziehen sich auf die kommerziellen Flammschutzprodukte, welche einen mittleren Gehalt von rund 98 % der reinen Substanz DecaBDPE enthalten.

Ende der 90er Jahre beträgt der jährliche Import von DecaBDPE über Halb- und Fertigprodukte in das Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ etwa 550 t/a, wovon etwa 42 % in Fertigprodukten wieder exportiert werden. Bezogen auf den Import, ist der gegenwärtig in der Schweiz hergestellte Anteil an DecaBDPE-haltigen Fertigprodukten mit rund einem Drittel als gering einzustufen.

Der Import von DecaBDPE-haltigen Fertigprodukten wird zum Grossteil (rund 69 %) durch EE-Geräte bestimmt, wobei EDV- und Bürogeräte die Fracht an DecaBDPE dominieren. Einen weiteren relevanten Anteil (rund 30 %) am Import haben flammgeschützte Polsterungen (flexibler PUR-Schaum), Textilien und Kunststoffe in Kraftfahrzeugen. Da für Importe und Exporte von Baumaterialien keine Daten vorlagen, wurde angenommen, dass der schweizerische Bedarf im Inland produziert wird.

Die inländische Produktion, zu der auch die Assemblierung von Geräten gezählt wird, setzt im Vergleich zum Handel (oder Konsum) nur eine geringe (rund 23 %) DecaBDPE-Fracht von rund 130 t/a in produzierten Fertigprodukten um. Der Export von DecaBDPE-haltigen Halbprodukten konnte nicht bestimmt werden, und daher kann der Umsatz im Bereich Produktion höher als 130 t/a DecaBDPE liegen. Diese mögliche Erhöhung würde aus DecaBDPE-haltigen Halbprodukten resultieren, welche in der Schweiz nur gehandelt aber nicht verarbeitet oder konsumiert werden.

Die DecaBDPE-Fracht von inländisch produzierten Fertigprodukten ist zu annähernd gleichen Teilen in Kunststofffolien für Bauzwecke (rund 56 %) und EE-Geräten (rund 43 % Anteil) enthalten. Generell werden nicht alle Kunststofffolien für den Einsatz im Hoch- und Tiefbau flammgeschützt, und es werden neben DecaBDPE auch andere Flammenschutzmittel eingesetzt. Da keine Literaturdaten zu Verfügung standen, wurde angenommen, dass 10 % aller PE-Folien für den Baubereich mit DecaBDPE flammgeschützt werden.

Der grösste Anteil (rund 45 %) der DecaBDPE-Fracht in konsumierten Fertigprodukten (rund 320 t/a) ist in EE-Geräten zu finden, wobei allein EDV-Geräte rund 17 % und Elektrohaushaltsgeräte rund 11 % Anteil an der Gesamtfracht haben. Neben EE-Geräten sind Kunststoffteile von KFZ und Baumaterialien wichtige Einsatzgebiete von DecaBDPE. Rund 30 % der DecaBDPE-Fracht in konsumierten Fertigprodukten befinden sich in PKW und LKW und rund 25 % in Baumaterialien (PE-Folien).

Durch den Einsatz von DecaBDPE-haltigen Produkten hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten im Konsum der Schweiz ein Lager von rund 5'600 t DecaBDPE aufgebaut. Dieses Lager setzt sich vor allem aus den in den Privathaushalten benutzten DecaBDPE-haltigen Konsumgütern (EE-Geräte, KFZ) und den in die Infrastruktur eingebauten DecaBDPE-haltigen Baumaterialien zusammen.

Trotz dem jährlichen Input an DecaBDPE-haltigen Neuprodukten in das Lager (rund 320 t/a), wird dieses derzeit durch die jährlich entsorgten DecaBDPE-haltigen Abfälle (rund 370 t/a) leicht abgebaut (rund 50 t/a). Ein gleichbleibend hoher Input bedeutet, dass das Lager in absehbarer Zeit nicht abgebaut werden wird.

Die für Lager und Emissionen an DecaBDPE wichtigsten Produkte sind EE-Geräte (rund 40 % Anteil), Baumaterialien und KFZ. Im Detail betrachtet, setzt sich das Lager zusammen aus:

- rund 30 % DecaBDPE in Baumaterialien (Kunststofffolien, Dämmschäume)
- rund 30 % DecaBDPE in KFZ
- rund 14 % DecaBDPE in Elektrokleinteilen (Stecker und Schalter)
- rund 13 % DecaBDPE Unterhaltungselektronikgeräte
- rund 7 % DecaBDPE in kleinen und grossen EE-Haushaltsgeräten
- rund 4 % DecaBDPE in EDV+Bürogeräten
- rund 2 % DecaBDPE in anderen EE-Geräten

In den jährlich etwa 370 t/a über die Abfälle entsorgten DecaBDPE bestimmen die Elektronikgeräte (rund 44 % Anteil) die Fracht an DecaBDPE. Mit Alt-KFZs werden jährlich etwa 110 t DecaBDPE entsorgt, und in Baurestmassen befinden sich weitere rund 100 t DecaBDPE in PE-Folien und XPS-Dämmplatten.

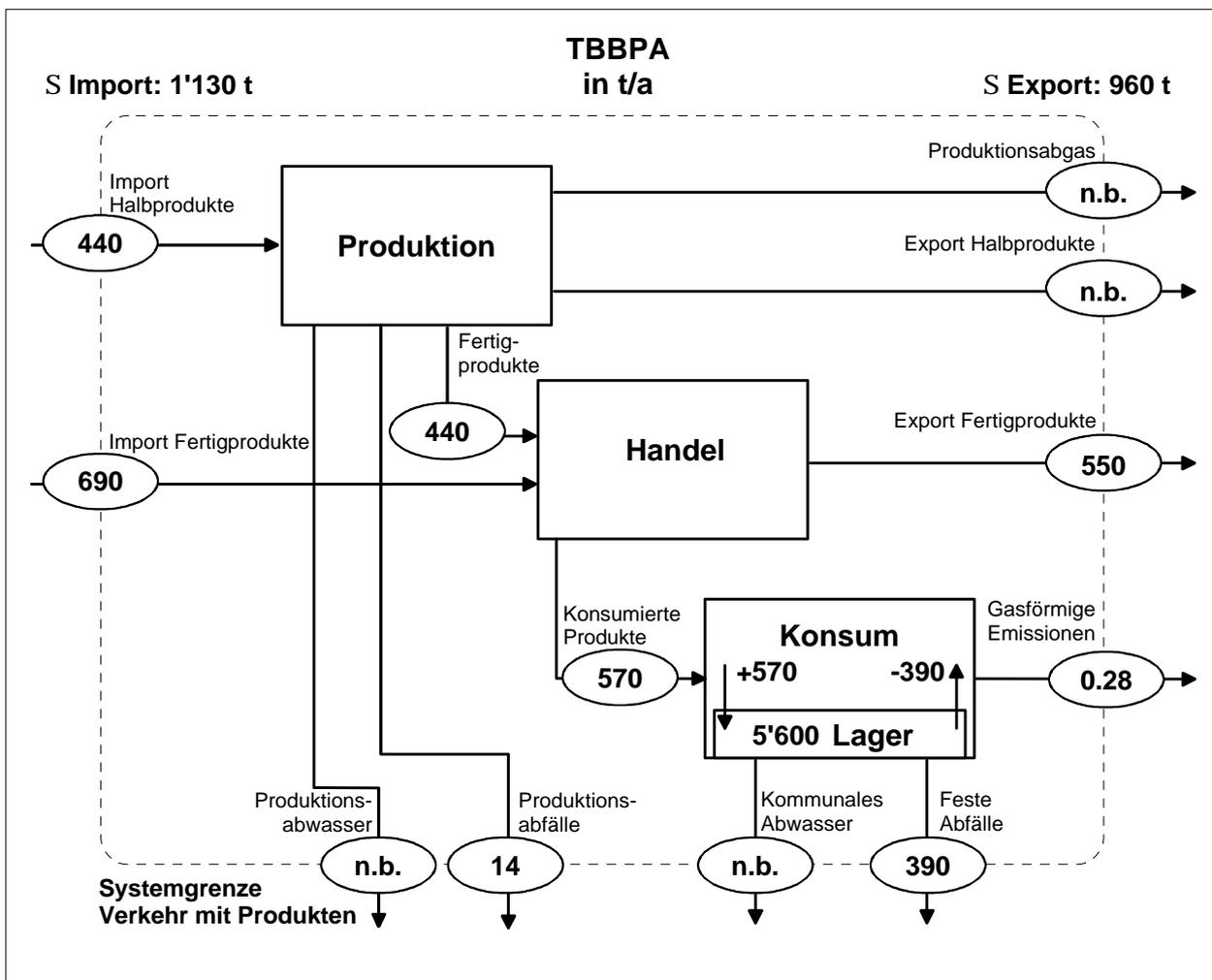
Eine wichtige ökologische Bedeutung haben die aus der Nutzung der DecaBDPE-haltigen Produkte resultierenden diffusen Emissionen mit jährlich rund 2.1 t/a. Diese Emissionen stammen zu rund 40 % aus den in den Privathaushalten stehenden EE-Geräten. Da hier Worst-Case Emissionsraten zugrundegelegt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächlichen Emissionen etwas tiefer liegen. Um die grösstmögliche Belastung schätzen zu können, wird angenommen, dass die Emissionen vollständig in die Atmosphäre gehen.

**Datenlücken und Unsicherheiten**

Für die relevantesten Einsatzbereiche von DecaBDPE (Kunststoffe für EE-Geräte) konnten realistische Schätzungen aufgrund von Kunststoffrezepturen der FS-Hersteller getroffen werden. Es mussten jedoch Annahmen zu den Marktanteilen des Flammschutzmittels am Einsatz in den Kunststoffsorten und des Kunststoffes am Einsatz bei den Produkten gesetzt werden.

**6.2.1.4 TBBPA (Tetrabrombisphenol A)**

Abbildung 6-4: TBBPA-Flüsse im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“



Der weltweite Verbrauch von TBBPA-Flammschutz ist im letzten Jahrzehnt von 100'000 t im Jahr 1991 auf 121'000 t im Jahr 1999 leicht angestiegen. Das grösste (rund 70 %) Einsatzgebiet von TBBPA waren und sind immer noch Epoxidharze für Leiterplatten. Weitere bedeutende Einsatzgebiete sind Kunststoffe (ABS, HIPS) für Gehäuse von EE-Geräten, wo TBBPA im Laufe der Jahre zum Teil PBDEs substituiert hat. Etwa 10 % der weltweiten Jahresproduktion an TBBPA wird für die Produktion von TBBPA-Derivaten benötigt.

In Europa wurden im Jahr 1999 rund 13'800 t/a TBBPA-Flammschutz verarbeitet. Die weltweiten und europäischen Verbrauchszahlen von TBBPA-Flammschutz beziehen sich auf die kommerziellen Flammschutzprodukte, welche einen mittleren Gehalt von rund 98,5 % der reinen Substanz TBBPA enthalten.

Ende der 90er Jahre wurden jährliche etwa 1'130 t/a TBBPA über Halb- und Fertigprodukte in das Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ importiert, wovon etwa die Hälfte in Fertigprodukten wieder exportiert werden. Bezogen auf den Import, liegt die TBBPA-Fracht von gegenwärtig in der Schweiz hergestellten Fertigprodukten geringfügig tiefer (rund zwei Drittel des Imports).

Der Import von TBBPA-haltigen Fertigprodukten wird zum Grossteil (rund 85 %) durch EE-Geräte bestimmt, wobei EDV- und Bürogeräte die Fracht an TBBPA dominieren. Einen geringen Anteil (rund 15 %) am Import haben flammgeschützte Textilien und Kunststoffe in Kraftfahrzeugen. Da für Importe und Exporte von Baumaterialien keine Daten vorlagen, wurde angenommen, dass der schweizerische Bedarf im Inland produziert wird.

Die TBBPA-Fracht von inländisch produzierten Fertigprodukten ist nahezu vollständig (rund 96 % Anteil) in EE-Geräten enthalten.

Der überwiegende Teil (rund 83 %) der TBBPA-Fracht in konsumierten Fertigprodukten (rund 570 t/a) ist ebenfalls in EE-Geräten zu finden, wobei allein Computer rund 43 % und Unterhaltungselektronik-Geräte rund 11 % Anteil an der Gesamtfracht haben.

Durch den Einsatz von TBBPA-haltigen Produkten hat sich in den letzten zwei Jahrzehnten im Konsum der Schweiz ein Lager von rund 5'600 t TBBPA aufgebaut. Dieses Lager setzt sich vor allem aus den in den Privathaushalten benutzten TBBPA-haltigen Konsumgütern (EE-Geräte, KFZ) und den in die Infrastruktur eingebauten TBBPA-haltigen Baumaterialien zusammen.

Das Lager wächst, da derzeit etwa 50 % mehr TBBPA durch Neuprodukte in das Lager eingebracht (rund 570 t/a) werden, als durch Abfälle ausgetragen werden (rund 390 t/a). Gleichbleibend hoher Input bedeutet, dass das Lager in absehbarer Zeit nicht abgebaut werden wird. Im Gegenteil, unter der Annahme, dass der Trend des zunehmenden Einsatzes von TBBPA in Neuprodukten anhält, würde dies bedeuten, dass sich das Lager in ungefähr drei Jahrzehnten verdoppeln würde.

Die für Lager und Emissionen an TBBPA wichtigsten Produkte sind EE-Geräte (rund 59 % Anteil), Baumaterialien und KFZ. Im Detail betrachtet, setzt sich das Lager zusammen aus:

- rund 21 % TBBPA in Baumaterialien (PUR-Schaum und Epoxidharz)
- rund 20 % TBBPA in KFZ (Kunststoffteilen und Leiterplatten)
- rund 18 % TBBPA in EDV-Geräten
- rund 14 % TBBPA in Industriegeräten (Messgeräten, Prozesskontrollgeräten)
- rund 13 % TBBPA in Unterhaltungselektronik-Geräten (TV-Geräten)

- rund 6 % TBBPA in Elektrokleinteilen (Stecker und Schaltern)
- rund 8 % TBBPA in anderen EE-Geräten

In den jährlich etwa 390 t/a über die Abfälle entsorgten TBBPA bestimmen die Elektronikgeräte (rund 66 % Anteil) die Fracht an TBBPA. Mit Alt-KFZs werden jährlich etwa 66 t TBBPA entsorgt; in Baurestmassen befinden sich weitere rund 66 t TBBPA.

Ökologische Bedeutung haben die aus der Nutzung der TBBPA-haltigen Produkte resultierenden diffusen Emissionen mit jährlich rund 0.28 t/a. Diese Emissionen stammen zu rund 60 % aus den in den Privathaushalten stehenden EE-Geräten. Dieser Stofffluss ist im Vergleich zur Lagergrösse und auch im Vergleich zu den anderen betrachteten Flüssen gering, da der Grossteil des TBBPA-Flammschutzes reaktiv im Kunststoff gebunden ist und daher nicht diffundieren kann.

Es kann davon ausgegangen werden, dass die tatsächlichen Emissionen etwas tiefer liegen, da hier Worst-Case Emissionsraten zugrundegelegt wurden. Um die grösstmögliche Belastung schätzen zu können, wird angenommen, dass die Emissionen ganz in die Atmosphäre gehen.

### **Datenlücken und Unsicherheiten**

Für die relevantesten Einsatzbereiche von TBBPA (Leiterplatten) konnten realistische Schätzungen aufgrund von zahlreichen Literaturdaten getroffen werden. Eine gewisse Unsicherheit bleibt bei den Leiterplattenflächen pro Gerät, die von Dänemark übernommen wurden und beim Einsatz in Gehäusekunststoffen und Baumaterialien, wo Annahmen zu den Marktanteilen des Flammschutzmittels am Einsatz in den Kunststoffsorten und des Kunststoffes am Einsatz bei den Produkten gesetzt werden.

## **6.2.2 Teilsystem „Abfallwirtschaft“**

Das Teilsystem umfasst die abfallwirtschaftlichen Prozesse „Verwertung“, „Verbrennung“ und die „Deponie“ für feste Abfälle sowie die „Abwasserreinigung“ für die Behandlung der häuslichen und betrieblichen Abwässer in der Schweiz.

### **6.2.2.1 PentaBDPE (Pentabromdiphenyl Ether)**

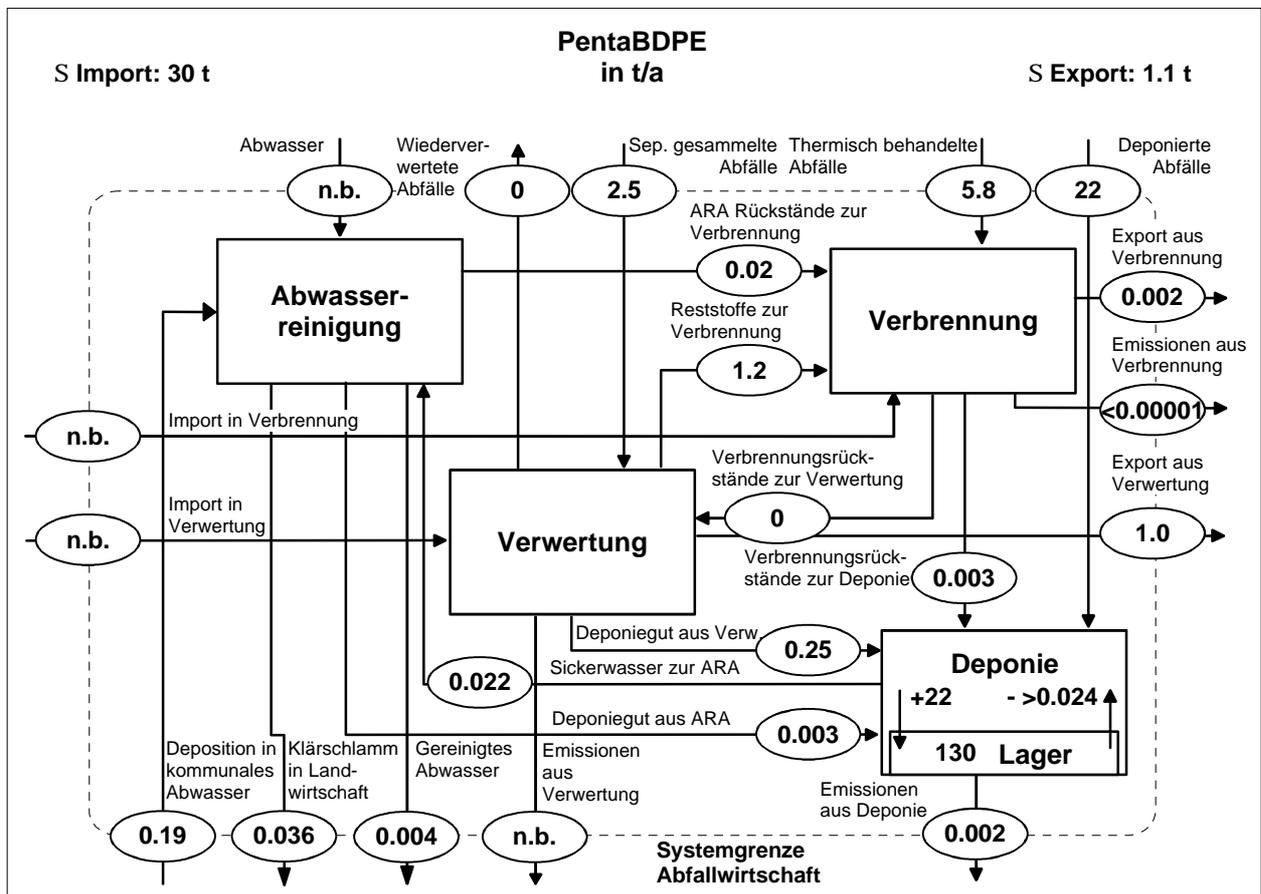
Von den jährlich 2.5 t/a PentaBDPE in den separat gesammelten Abfällen, die einer Verwertung zugeführt werden, gelangt etwa die Hälfte als Reststoffe in die Verbrennung, weitere 40 % werden ins Ausland exportiert und etwa 10 % werden deponiert. Daten über Emissionen aus der „Verwertung“ liegen gegenwärtig keine vor, diese könnten jedoch umweltrelevant sein.

Die im Prozess „*Verbrennung*“ total thermisch behandelte Menge an PentaBDPE von 5.8 t/a wird zu >99.9% zerstört. Aus der Verbrennung resultiert daher ein Output von insgesamt 0.0056 t/a. Davon werden jährlich 0.002 t/a Aschen ins Ausland exportiert und 0.003 t/a Verbrennungsrückstände (Schlacke und Aschen) deponiert. Die Emissionen in die Umwelt (Abgas und Abwasser) werden kleiner als 0.00001 t/a geschätzt.

Bei Messungen im Klärschlamm in Schweden und Deutschland wurde PentaBDPE festgestellt. Werden diese Messergebnisse auf die Schweiz umgelegt, ergibt sich ein PentaBDPE-Fluss von

0.036 t/a im Klärschlamm der Schweiz. Unter der Annahme, dass ca. 10 % des ARA-Inputs im gereinigten Abwasser verbleiben, würde dies zu einem PentaBDPE-Fluss von 0.004 t/a in die Umwelt führen. Der bedeutendste Inputfluss in die ARA ist der Eintrag über Staubpartikeln aus der Atmosphäre in das Kanalsystem (Deposition in kommunales Abwasser). Dieser Fluss wird mit jährlich 0.19 t/a geschätzt. Der Eintrag aus der Atmosphäre in die Kanalisation basiert auf der Annahme, dass etwa 10 % der diffusen gasförmigen Konsum-Emissionen an Staubpartikeln anhaften und schliesslich in die Kanalisation gelangen. Die Sickerwassereinträge aus Deponien werden auf 0.022 t/a geschätzt. Unter der Annahme, dass ca. 10 % des ARA-Inputs im gereinigten Abwasser verbleiben, würde dies zu einem PentaBDPE-Fluss von 0.004 t/a in die Umwelt führen. Einem ARA-Input von 0.2 t/a steht demnach ein Output von 0.04 t/a gegenüber. Diese grosse Differenz für die im Prozess „Abwasserreinigung“ umgesetzten PentaBDPEs kann z.Z. nicht erklärt werden. Erst Messungen auf Schweizer ARA werden neue Erkenntnisse liefern können. Dies ist deshalb wichtig, weil die Emissionen über das Abwassersystem vermutlich den grössten Fluss in die Umwelt darstellen.

Abbildung 6-5: PentaBDPE-Flüsse im Teilsystem „Abfallwirtschaft“



Die gesamte Ende der 90er Jahre in der Schweiz *deponierte Menge* an PentaBDPE beträgt rund 22 t/a. Die Emissionen aus der Deponie werden mit 0.002 t/a (durch Sickerwasser) geschätzt. Es wird für alle vier untersuchten Flammschutzmittel angenommen, dass 10 % davon in die Umwelt entweichen und 90 % zur Abwasserreinigung geleitet werden. Das Lager an PentaBDPE in der Deponie wird auf rund 130 t geschätzt.

Das Teilsystem „Abfallwirtschaft“ verlassen jährlich etwa 1.1 t. Dieser Output entspricht etwa 3 % des Inputs. Der grösste Teil des Inputs (77 %) wird durch thermische Behandlung praktisch

vollständig zerstört. Ca. 20 % des gesamten Inputs werden innerhalb des Teilsystems in der Deponie gelagert. Es wird davon ausgegangen, dass kein PentaBDPE in wiederverwerteten Produkten in das Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ zurückfliesst. Inwiefern diese Annahme zutrifft, konnte nicht überprüft werden. Aus der Abfallwirtschaft werden durch Abgase, Sickerwasser, Klärschlamm und Abwasser (ohne Berücksichtigung allfälliger Emissionen aus dem „Prozess Verwertung“) diffuse Emissionen von jährlich etwa 40 kg/a (< 0.1 %) in die *Umwelt* geschätzt.

### 6.2.2.2 OctaBDPE (Octabromdiphenyl Ether)

Für Ende der 90er Jahre wurde der Eintrag aus dem Konsum in die Schweizer Abfallwirtschaft mit total 62 t/a OctaBDPE geschätzt. Dabei befindet sich die gesamte Menge wie bei den anderen BFS in den festen Abfällen. Die Menge an OctaBDPE verteilt sich zu 53 % auf separat gesammelte Abfällen, zu 37 % auf thermisch behandelte Abfälle und zu 10 % auf deponierte Abfälle. Anhand der Schätzungen im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ wird ein Eintrag über das Abwasser als unwahrscheinlich betrachtet.

In den einer Verwertung zugeführten, separat gesammelten Abfällen befinden sich 33 t OctaBDPE. Davon werden 2.3 t/a ins Ausland exportiert, rund 31 t/a werden als Reststoffe in die Verbrennung gebracht, und die restlichen 1.1 t/a werden deponiert. Daten über Emissionen aus der „Verwertung“ liegen gegenwärtig keine vor. Auch diese könnten jedoch umweltrelevant sein.

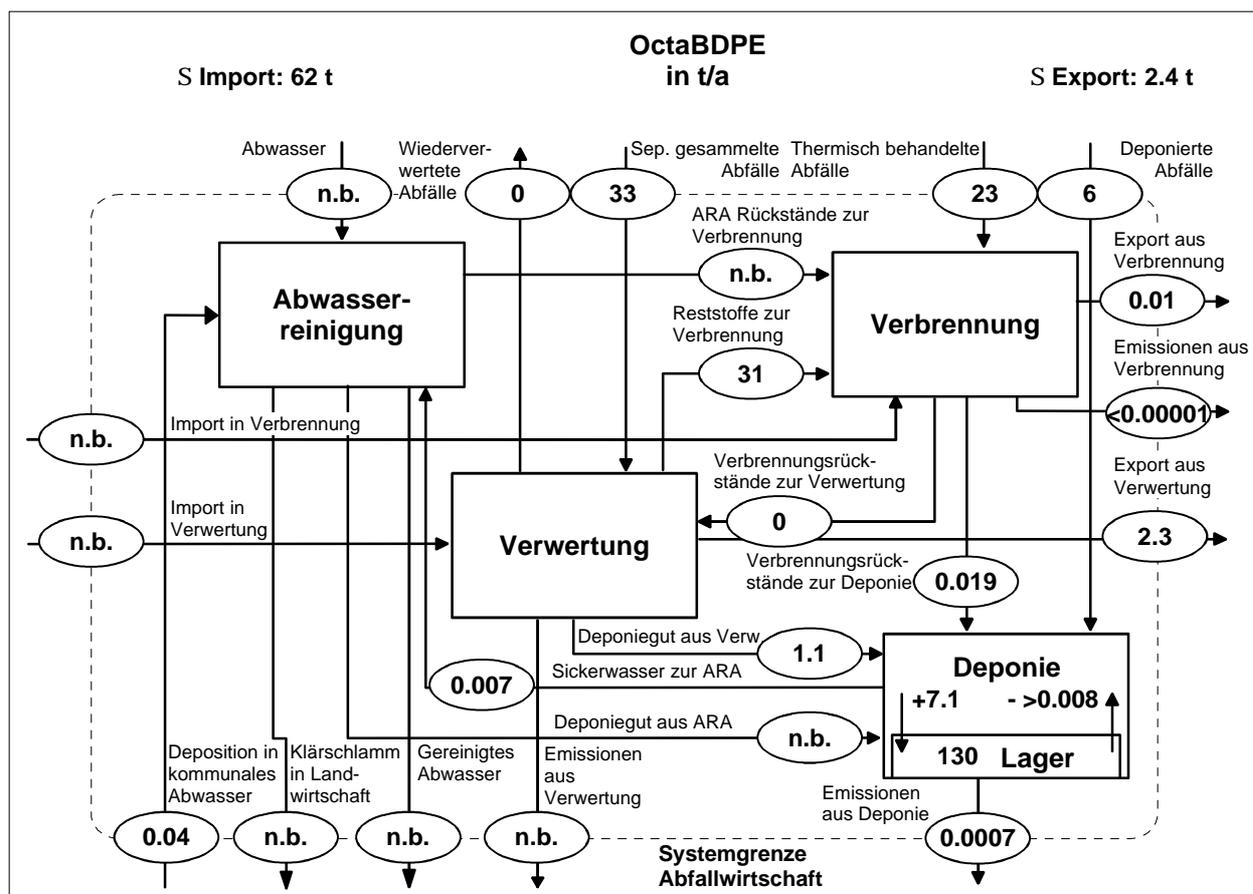
Die im Prozess „*Verbrennung*“ total thermisch behandelte Menge an OctaBDPE von 54 t/a wird zu >99.9 % zerstört. Der gesamte Output aus der Verbrennung beträgt gesamthaft 0.029 t/a. Davon belaufen sich die Exporte ins Ausland auf 0.01 t/a (Aschen) und die Verbrennungsrückstände in die Deponie auf 0.019 t/a (Schlacke und Aschen). Die Emissionen in die Umwelt (Abgas und Abwasser) werden auch für OctaBDPE kleiner als 0.00001 t/a geschätzt.

Für OctaBDPE liegen keine Messungen von Klärschlamm vor. Deshalb wurden die Flüsse über den Klärschlamm und das gereinigte Abwasser nicht geschätzt. Der Eintrag aus der Atmosphäre (durch Staubpartikeleintrag) ins Kanalsystem wird mit jährlich 0.04 t/a geschätzt, das sind 10 % der emittierten Schweizer Konsumemissionen. An Sickerwassereinträgen in das Abwassersystem werden etwa 0.007 t/a zu erwarten sein.

Gesamthaft werden Ende der 90er Jahre jährlich etwa 7.1 t/a OctaBDPE deponiert (1.1 t/a kommen aus dem Prozess „Verwertung“; 6 t/a fallen direkt als Abfall aus dem Prozess „Verkehr mit Produkten an). Die Emissionen aus der Deponie werden mit jährlich 0.0007 t/a beziffert. Es wird angenommen, dass 10 % der Emissionen im Sickerwasser direkt in die Umwelt gelangen, der Rest fließt in die Abwasserreinigung. Gasförmige Emissionen werden vernachlässigt. Das Lager der Deponie wird mit rund 130 t geschätzt.

Der *gesamte Outputfluss* aus dem Teilsystem „Abfallwirtschaft“ beträgt für OctaBDPE jährlich 2.4 t. Dies sind nur 4 % des Inputs, aber die Fracht ist doppelt so gross wie diejenige von PentaBDPE. Ca. 10 % (7.1 t/a) des gesamten Input werden innerhalb des Teilsystems in der Deponie gelagert, 86 % werden durch thermische Behandlung praktisch vollständig zerstört. Es wird davon ausgegangen, dass kein DecaBDPE in wiederverwerteten Produkten in das Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ zurückfliesst. Inwiefern diese Annahme zutrifft, konnte nicht überprüft werden. Die diffusen Emissionen in die *Umwelt* (ohne Berücksichtigung allfälliger Emissionen aus dem „Prozess Verwertung“ des Abwasserteils) werden mit ca. 6 kg/a (< 0.01 %) geschätzt.

Abbildung 6-6: OctaBDPE-Flüsse im Teilsystem „Abfallwirtschaft“



### 6.2.2.3 DecaBDPE (Decabromdiphenyl Ether)

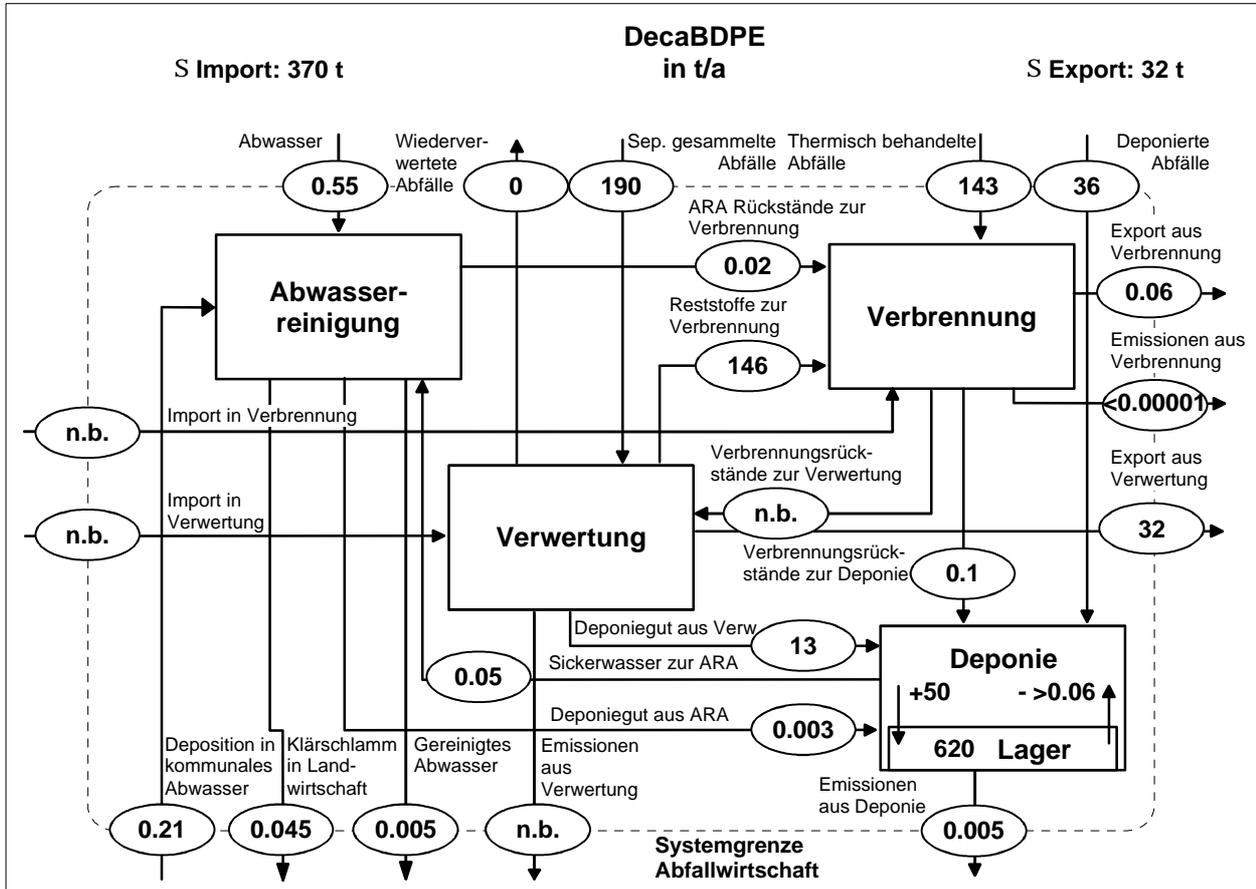
Der Input von DecaBDPE aus dem Konsum in die Abfallwirtschaft betrug Ende der 90er Jahre etwa 370 t/a. Diese Fracht ist im Unterschied zu Penta- und OctaBDPE 12 - bzw. 7 mal grösser. Nur geschätzte 0.55 t/a werden jährlich über das Abwasser ins Teilsystem „Abfallwirtschaft“ eingebracht. Über die festen Abfälle werden demnach praktisch 100 % vom Konsum in die Abfallwirtschaft transferiert. Rund 51 % davon entfallen auf die separat gesammelten Abfälle (190 t/a). Weitere 39 % (143 t/a) befinden sich in den thermisch behandelten Abfällen und 10 % werden deponiert.

Von der Menge an DecaBDPE in den separat gesammelten Abfällen wird geschätzt, dass aus dem Prozess „Verwertung“ 32 t/a ins Ausland exportiert werden. Rund 146 t/a DecaBDPE werden pro Jahr in den Reststoffen zur Verbrennung gebracht. Diese Menge entspricht annähernd jener Fracht, die aus dem Konsum direkt der „Verbrennung“ zugeführt wird. Etwa 13 t/a wurden aus dem Prozess „Verwertung“ in der Schweiz Ende der 90er Jahre deponiert. Bezüglich Emissionen aus dem Prozess „Verwertung“ konnten für DecaBDPE keine Schätzungen vorgenommen werden. Diese könnten jedoch für Mensch und Umwelt, vor allem nach einem vermuteten Abbau in der Umwelt (Debromierung in niedrigbromierte Verbindungen), von Relevanz sein.

DecaBDPE wird im Prozess „Verbrennung“ ebenfalls zu >99.9 % zerstört. Vom Gesamtinput an DecaBDPE von jährlich 289 t/a in die Verbrennung verbleibt ein geschätzter Output von total

0.16 t/a. Davon betragen die Exporte ins Ausland 0.06 t/a (Aschen) und die Verbrennungsrückstände auf Deponien belaufen sich auf 0.1 t/a (Schlacke und Aschen). Emissionen in die Umwelt (Abgas und Abwasser) werden kleiner als 0.00001 t/a geschätzt.

Abbildung 6-7: DecaBDPE-Flüsse im Teilsystem „Abfallwirtschaft“



Werden die Messungen im Klärschlamm in Schweden und Deutschland auf Schweizer Verhältnisse angewandt, ergibt sich ein jährlicher DecaBDPE-Fluss im Klärschlamm von 0.045 t. Es wird angenommen, dass 10 % des ARA-Inputs im gereinigten Abwasser verbleiben (0.005 t/a). Ein Eintrag aus der Atmosphäre (durch Staubpartikeleintrag) ins Abwasserkanalsystem beträgt nach eigenen Schätzungen 0.21 t/a (10 % der emittierten Schweizer Konsumemission). Die Sickerwassereinträge aus Deponien werden mit 0.05 t/a geschätzt. Einem ARA-Input von 0.76 t/a steht demnach ein Outputfluss von 0.05 t/a gegenüber. Diese grosse Differenz für die im Prozess „Abwasserreinigung“ umgesetzten DecaBDPEs kann z.Z. nicht erklärt werden. Auch hier werden erst Messungen auf Schweizer Abwasserreinigungsanlagen neue Erkenntnisse liefern können.

Die total in der Schweiz jährlich *deponierte Menge* an DecaBDPE betrug Ende der 90er Jahre rund 50 t/a. Dies ist rund 10 mal mehr als die deponierten Mengen an PentaBDPE bzw. OctaBDPE. Der Output über das Sickerwasser wird mit 0.005 t/a geschätzt. Im Lager der Deponie befanden sich Ende 90er Jahre rund 620 t.

Der *gesamte Outputfluss* aus dem Teilsystem „Abfallwirtschaft“ beträgt für DecaBDPE jährlich mehr als 30 t. Dies sind 8 % des Inputs. Ca. 14 % des Inputs werden im Teilsystem in der Deponie gelagert, 78 % werden durch thermische Behandlung praktisch vollständig zerstört. Es

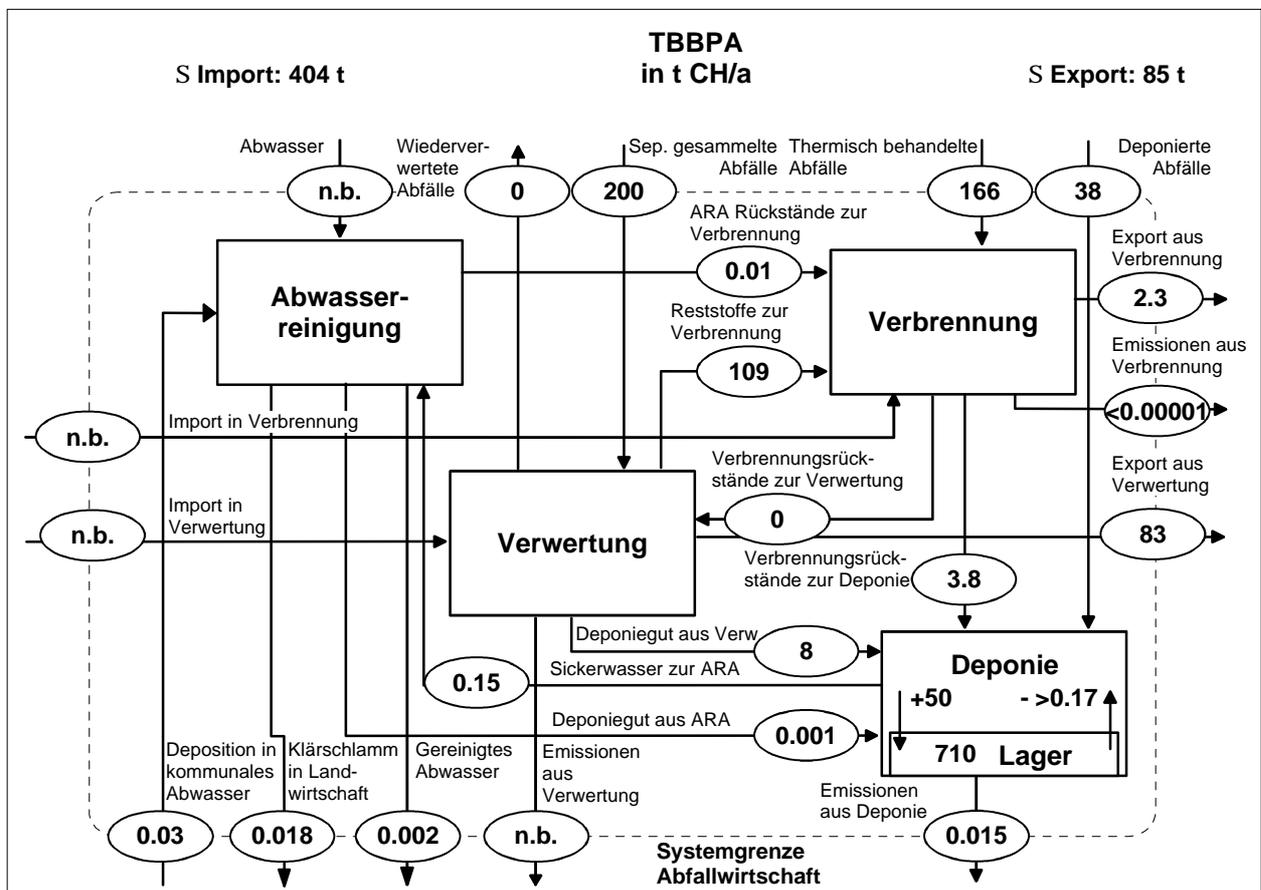
wird davon ausgegangen, dass auch kein DecaBDPE in wiederverwerteten Produkten in das Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ zurückfließt. Inwiefern diese Annahme zutrifft, konnte nicht überprüft werden. In die Umwelt gelangen diffuse Emissionen von ca. 55 kg/a (< 0.1 %) durch Abgase, Sickerwasser, Klärschlamm und Abwasser.

### 6.2.2.4 TBBPA (Tetrabrombisphenol A)

Der jährliche Fluss von TBBPA aus dem Konsum *in die Abfallwirtschaft* betrug Ende der 90er Jahre rund 390 t/a und lag damit in der gleichen Größenordnung wie derjenige von DecaBDPE. Es wird davon ausgegangen, dass keine relevanten Mengen an TBBPA direkt vom Prozess „Verkehr mit Produkten“ über das Abwasser in das Teilsystem „Abfallwirtschaft“ eingebracht werden. Von der Gesamtmenge der festen Abfälle entfallen rund 51 % auf separat gesammelte Abfälle und 39 % befinden sich in den thermisch behandelten Abfällen. Etwa 10 % des Inputs in die Abfallwirtschaft wird Ende der 90er Jahre direkt deponiert.

Von den jährlich 200 t TBBPA in den separat gesammelten Abfällen, die einer Verwertung zugeführt werden, werden 83 t/a ins Ausland exportiert. Rund 109 t/a werden in den Reststoffen zur Verbrennung gebracht. Diese Fracht entspricht  $\frac{2}{3}$  der direkt verbrannten Menge. Aus dem Prozess „Verwertung“ gingen Ende der 90er Jahre etwa 8 t/a auf die Schweizer Deponien. Daten über Emissionen aus der „Verwertung“ liegen gegenwärtig keine vor, sie sind infolge des mehrheitlich reaktiven Einbaus der Verbindung jedoch eher unwahrscheinlich; sie sind aber durch Produktunreinheiten sowie bei additiver Anwendung der Substanz nicht auszuschliessen.

Abbildung 6-8: TBBPA-Flüsse im Teilsystem „Abfallwirtschaft“



TBBPA wird im Prozess „Verbrennung“ mehrheitlich zerstört. Vom Gesamtinput an TBBPA in den Prozess „Verbrennung“ von 261 t/a resultiert ein gesamter Output von 6.1 t/a. Diese Outputfracht ist deutlich höher als jene der einzelnen PBDEs. Inwiefern die Literaturangaben zur thermischen Behandlung von Kunststoffen mit eingebauten PBDEs und TBBPA richtig sind, werden weitere Messungen zeigen. Vom gesamten Output werden 2.3 t/a exportiert (Aschen), und 3.9 t/a TBBPA werden in Verbrennungsrückständen auf Deponien in der Schweiz eingebaut (Schlacke und Aschen). Die Emissionen in die Umwelt (Abgas und Abwasser) werden kleiner als 0.00001 t/a geschätzt.

Werden Messungen im Klärschlamm in Schweden und Deutschland auf Schweizer Verhältnisse umgelegt, resultiert im Klärschlamm ein TBBPA-Fluss von 0.018 t/a. Es wird angenommen, dass 10 % des ARA-Inputs im gereinigten Abwasser verbleiben (0.002 t/a). Ein Eintrag aus der Atmosphäre (durch Staubpartikeleintrag) ins Abwassersystem beträgt nach eigenen Schätzungen 0.03 t/a (10% der emittierten Schweizer Konsumemission). Sickerwassereinträge aus Deponien werden auf 0.15 t/a geschätzt. Einem ARA-Input von 0.18 t/a steht demnach ein Output von 0.02 t/a gegenüber. Die Differenz zwischen In- und Output der ARA beträgt für TBBPA ca. 0.16 t/a. Auch hier liegt der Eintrag in die ARA deutlich über dem erwarteten Ausstrom.

Die total Ende der 90er Jahre *deponierte Menge* an TBBPA betrug, wie für DecaBDPE, rund 50 t/a. Der Output durch Emissionen (Sickerwasser) wurde mit 0.015 t/a relativ hoch geschätzt. Im Lager der Deponie befanden sich Ende 90er Jahre rund 710 t.

Der *gesamte jährliche Outputfluss* aus dem Teilsystem „Abfallwirtschaft“ beträgt für TBBPA mehr als 85 t/a. Dies sind 22 % des Inputs. Etwa 13 % des gesamten Inputs werden innerhalb des Teilsystems in der Deponie abgelagert, der Rest von 65 % wird durch die thermische Behandlung mehrheitlich zerstört. Es wird davon ausgegangen, dass auch kein TBBPA in wiederverwerteten Produkten in das Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ zurückfliesst. Inwiefern diese Annahme zutrifft, konnte nicht überprüft werden. In die Umwelt gelangen jährlich diffuse Emissionen von ca. 34 kg/a (< 0.1 %) durch Abgase, Sickerwasser, Klärschlamm und Abwasser.

### 6.2.3 Teilsystem Umwelt

Das Teilsystem umfasst die Prozesse „Atmosphäre“, „Hydrosphäre“, „Pedo-/Lithosphäre“ und „Biota“.

Flüsse in und aus dem Prozess „Biota“ konnten anhand der Literaturdaten nicht verlässlich geschätzt werden. Auch Flüsse innerhalb des Teilsystems „Umwelt“ konnten nur sehr grob geschätzt, oder sie konnten noch nicht quantifiziert werden. Auch wenn die Flüsse nur sehr klein erscheinen, sind sie infolge des relativ grossen Umweltgefährdungspotentials von grosser Bedeutung. Erst genauere Daten zu diffusen Emissionen aus Konsum und Abfallwirtschaft sowie Staubeintrag ins Abwassersystem, Deposition auf Pedo-/Lithosphäre und ev. aktuelle Messungen in den einzelnen Kompartimenten in der Schweiz werden genauere Schätzungen erlauben.

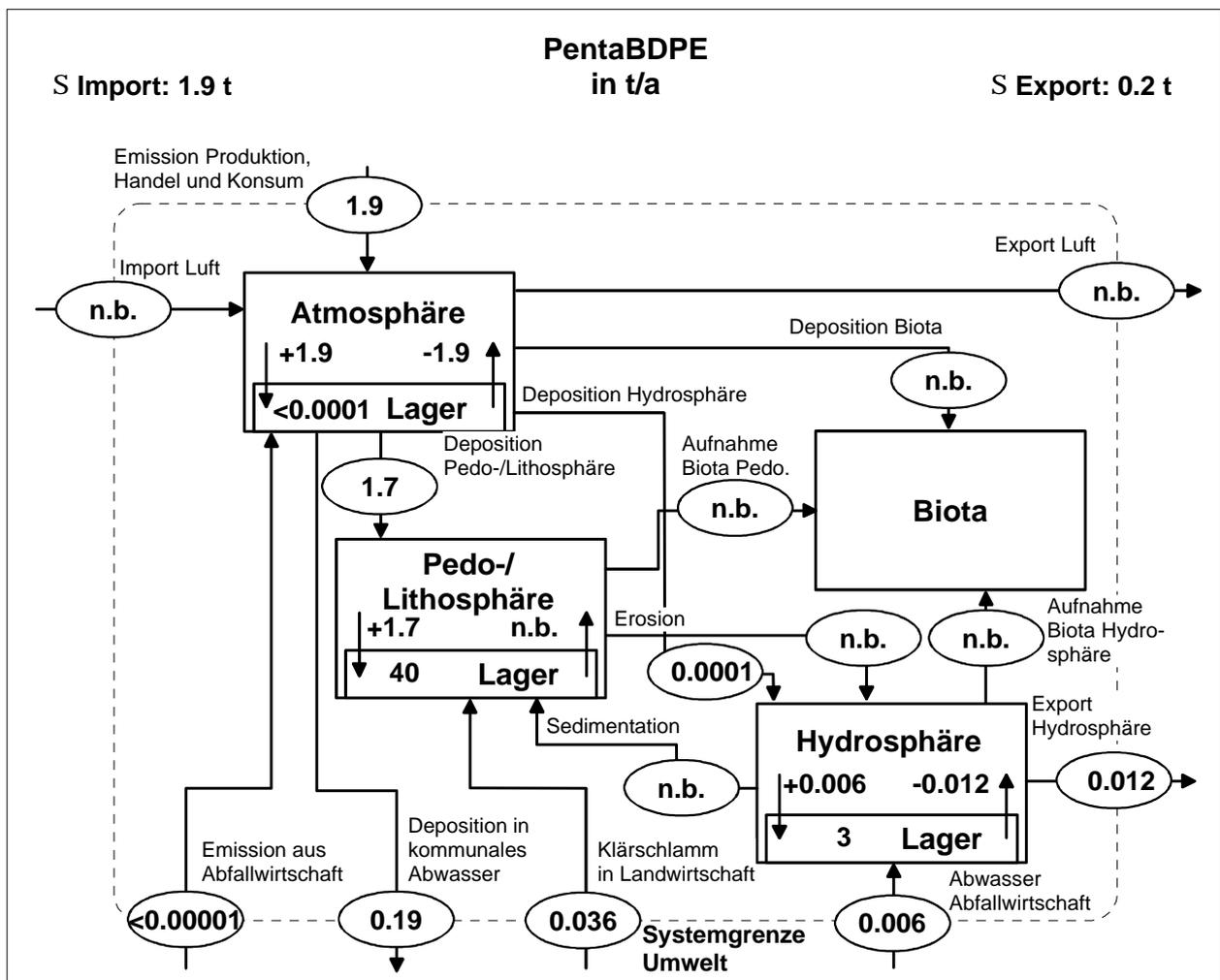
### 6.2.3.1 PentaBDPE (Pentabromdiphenyl Ether)

Der *Input in die Umwelt* wird für Ende der 90er Jahre jährlich auf total 1.9 t geschätzt, wobei die Emissionen in die Atmosphäre aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ mit jährlich 1.9 t nahezu die gesamte Fracht liefern. Emissionen aus der „Abfallwirtschaft“ in die Atmosphäre spielen (ohne Berücksichtigung der Verwertungsprozesse) mit <0.00001 t/a eine untergeordnete Rolle. Der Eintrag der „Abfallwirtschaft“ in die Pedo-/Lithosphäre wird mit 0.036 t geschätzt (Klärschlamm), jener in die Hydrosphäre mit jährlich 0.006 t/a (Abwasser).

Die geschätzte Deposition in kommunales Abwasser (durch Staubdeposition) aus der Atmosphäre von jährlich 0.19 t (=10 % der Emission aus dem Prozess „Verkehr mit Produkten“) liefert den bedeutendsten Output aus dem Teilsystem „Umwelt“ in das Teilsystem „Abfallwirtschaft“. Der Export über die Gewässer wird auf 0.012 t/a geschätzt. Export und Import über die Atmosphäre werden vernachlässigt.

Eine grobe Schätzung des Lagers von PentaBDPE in der Umwelt wurde anhand von in der Literatur gefundenen Konzentrationen für die Umweltkompartimente, sowie geschätzten Kompartimentmassen für die Atmosphäre, die Pedo-/Lithosphäre und Hydrosphäre durchgeführt. Die grobe Schätzung ergibt, dass sich in der Atmosphäre <0.0001 t PentaBDPE befinden, in der Hydrosphäre rund 3 t PentaBDPE, in der Pedo-/Lithosphäre 40 t PentaBDPE.

Abbildung 6-9: PentaBDPE-Flüsse im Teilsystem „Umwelt“



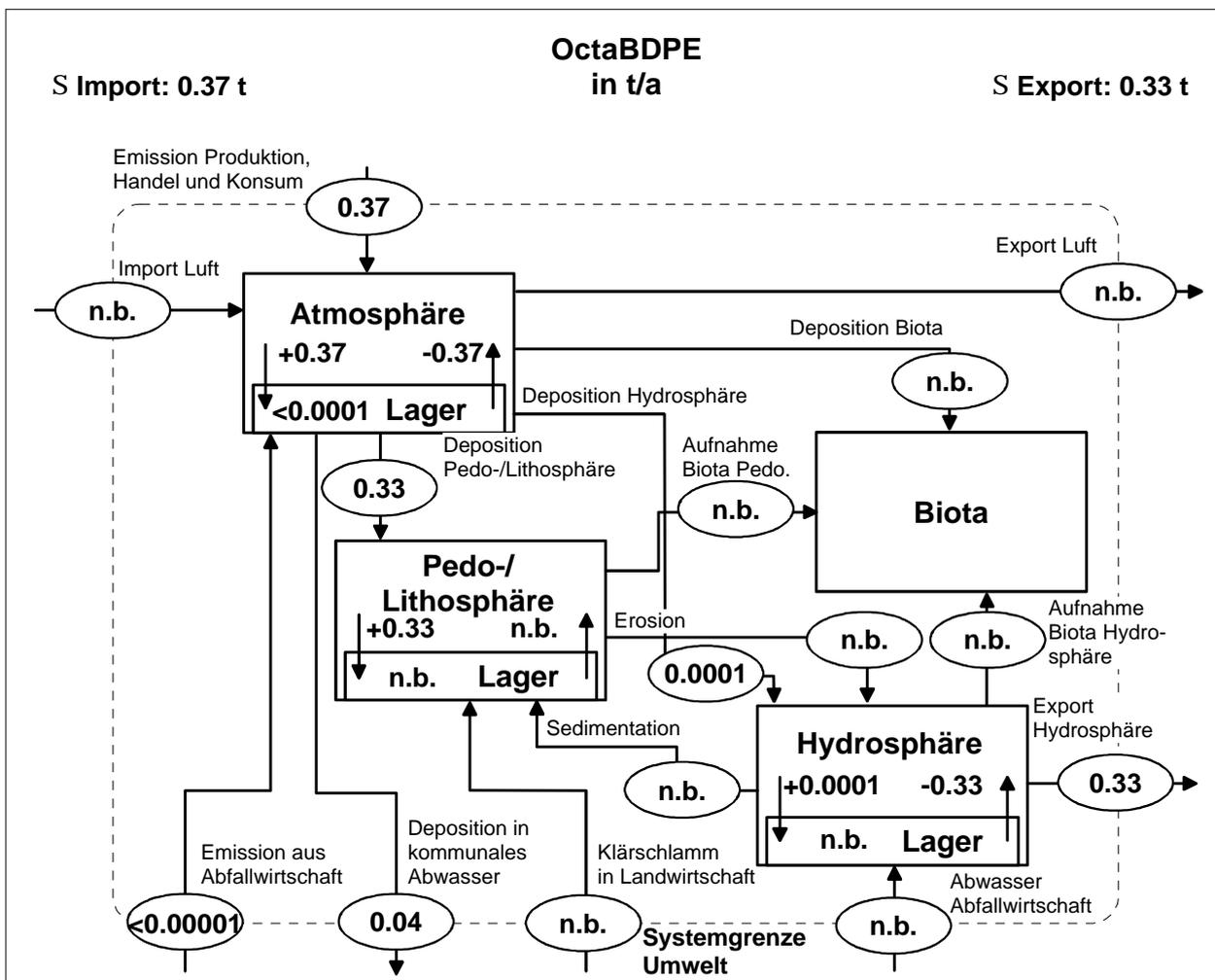
### 6.2.3.2 OctaBDPE (Octabromdiphenyl Ether)

Der OctaBDPE-Input in die Umwelt wurde für Ende der 90er Jahre auf total 0.37 t/a geschätzt. Dieser Input besteht im wesentlichen aus den Emissionen in die Atmosphäre aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“. Emissionen aus der „Abfallwirtschaft“ in die Atmosphäre spielen (ohne Berücksichtigung der Verwertungsprozesse) mit  $<0.00001$  t/a eine untergeordnete Rolle. Für OctaBDPE konnten keine Schätzungen für den Eintrag in die Umwelt durch Klärschlamm/Kompost sowie für das Abwasser aus der Abfallwirtschaft vorgenommen werden.

Der mit 0.33 t/a geschätzte Export über die Hydrosphäre (Rhein und Rhone) liefert den bedeutendsten Output aus dem Teilsystem „Umwelt“. Die geschätzte Deposition in kommunales Abwasser (durch Staubdeposition) aus der Atmosphäre von 0.04 t/a (=10 % der Emission aus dem Prozess „Verkehr mit Produkten“) in das Teilsystem „Abfallwirtschaft“ liegt eine Größenordnung darunter. Die Ex- und Importe über die Atmosphäre werden vernachlässigt.

Eine grobe Schätzung des Lagers von OctaBDPE in der Umwelt wurde anhand von in der Literatur gefundenen Konzentrationen für die Umweltkompartimente sowie geschätzten Kompartimentmassen für die Atmosphäre, die Pedo-/Lithosphäre und Hydrosphäre durchgeführt. In der Atmosphäre befinden sich demnach  $<0.0001$  t OctaBDPE, in der Hydrosphäre und der Pedo-/Lithosphäre konnte keine Lagerschätzung vorgenommen werden.

Abbildung 6-10: OctaBDPE-Flüsse im Teilsystem „Umwelt“

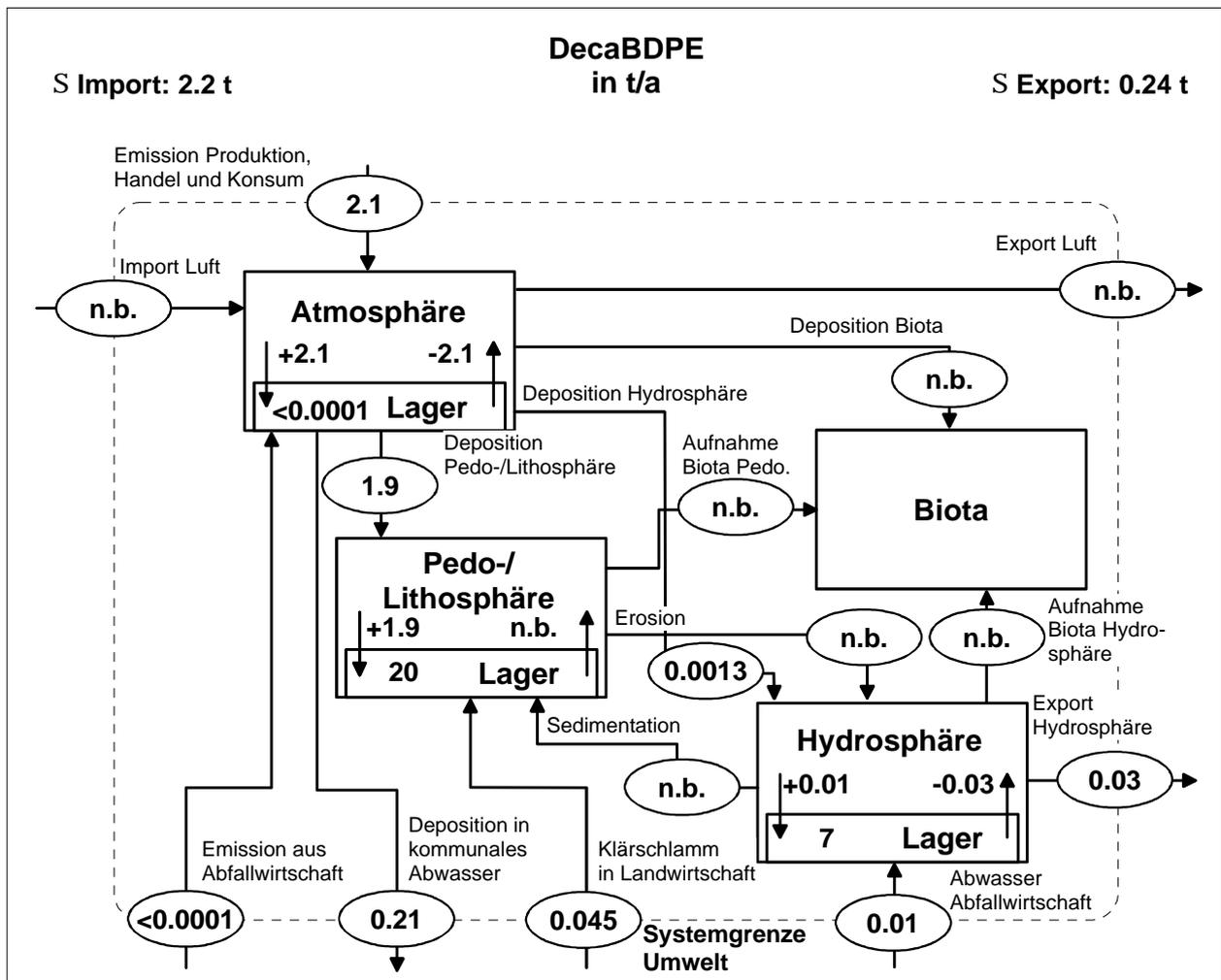


### 6.2.3.3 DecaBDPE (Decabromdiphenyl Ether)

Für Ende der 90er Jahre wurde der DecaBDPE-Input in die Umwelt auf total 2.2 t/a geschätzt; er liegt damit in der Größenordnung von PentaBDPE. Der Input besteht nahezu vollständig aus den Emissionen in die Atmosphäre aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“. Emissionen aus der „Abfallwirtschaft“ in die Atmosphäre spielen (ohne Berücksichtigung der Verwertungsprozesse) mit <0.00001 t/a eine untergeordnete Rolle. Über den Klärschlamm wird ein Eintrag von DecaBDPE in die Umwelt (Pedosphäre) von ca. 0.045 t/a geschätzt. Durch das Abwasser aus der Abfallwirtschaft fließt eine Menge von rund 0.01 t/a in die Hydrosphäre.

Der mit 0.03 t/a geschätzte Export über die Hydrosphäre (Rhein und Rhone) aus dem Teilsystem „Umwelt“ liegt rund ein Größenordnung unter der geschätzten Deposition in kommunales Abwasser (durch Staubdeposition) aus der Atmosphäre von 0.21 t/a (=10% der Emission aus dem Prozess „Verkehr mit Produkten“) in das Teilsystem „Abfallwirtschaft“. Exporte, wie auch Importe über die Atmosphäre werden vernachlässigt.

Abbildung 6-11: DecaBDPE-Flüsse im Teilsystem „Umwelt“



Eine grobe Lagerschätzung wurde auch für DecaBDPE anhand von in der Literatur gefundenen Konzentrationen für die Umweltkompartimente sowie geschätzten Kompartimentmassen für die Atmosphäre, die Pedo-/Lithosphäre und Hydrosphäre durchgeführt. In der Atmosphäre befinden

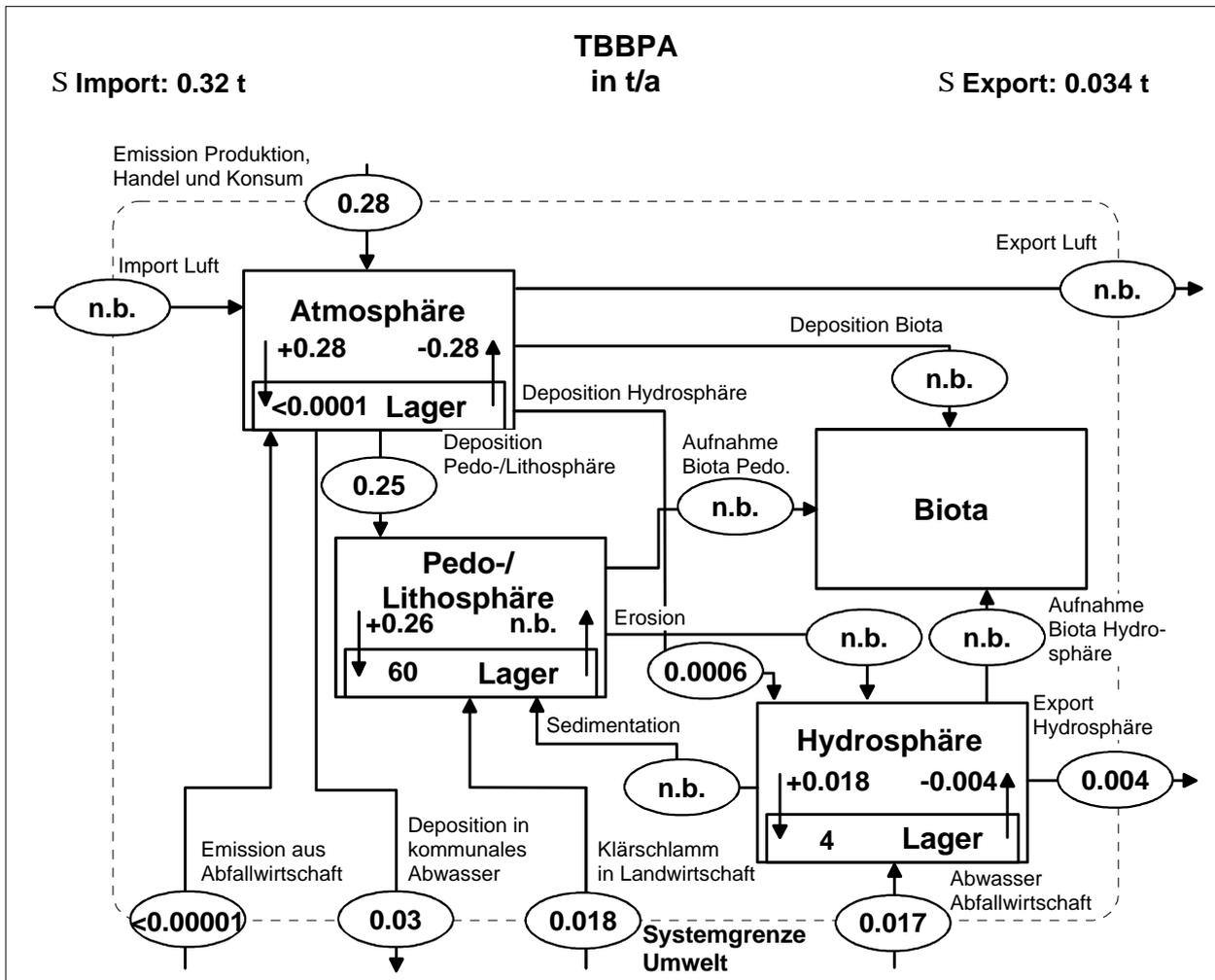
sich  $<0.0001$  t DecaBDPE, in der Hydrosphäre etwa 7 t DecaBDPE und der Pedo-/Lithosphäre rund 20 t DecaBDPE.

### 6.2.3.4 TBBPA (Tetrabrombisphenol A)

Der TBBPA-Input in die Umwelt wurde für Ende der 90er Jahre auf jährlich total 0.32 t geschätzt. Dieser Input liegt in der Größenordnung des Inputs von OctaBDPE. Der Input besteht im wesentlichen aus den Emissionen in die Atmosphäre aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ von jährlich 0.28 t/a. Emissionen aus der „Abfallwirtschaft“ in die Atmosphäre spielen (ohne Berücksichtigung der Verwertungsprozesse) mit  $<0.00001$  t/a eine untergeordnete Rolle. Im Klärschlamm wird ein Eintrag in die Umwelt (Pedosphäre) von ca. 0.018 t/a geschätzt. Durch das Abwasser aus der Abfallwirtschaft gelangt eine Menge von rund 0.017 t/a TBBPA in die Hydrosphäre.

Der mit 0.004 t/a geschätzte Export über die Hydrosphäre (Rhein und Rhone) aus dem Teilsystem „Umwelt“ liegt rund ein Größenordnung unter der geschätzten Deposition in kommunales Abwasser (durch Staubdeposition) aus der Atmosphäre von 0.03 t/a (=10% der Emission aus dem Prozess „Verkehr mit Produkten“) in das Teilsystem „Abfallwirtschaft“. Exporte und Importe über die Atmosphäre werden vernachlässigt.

Abbildung 6-12: TBBPA-Flüsse im Teilsystem „Umwelt“



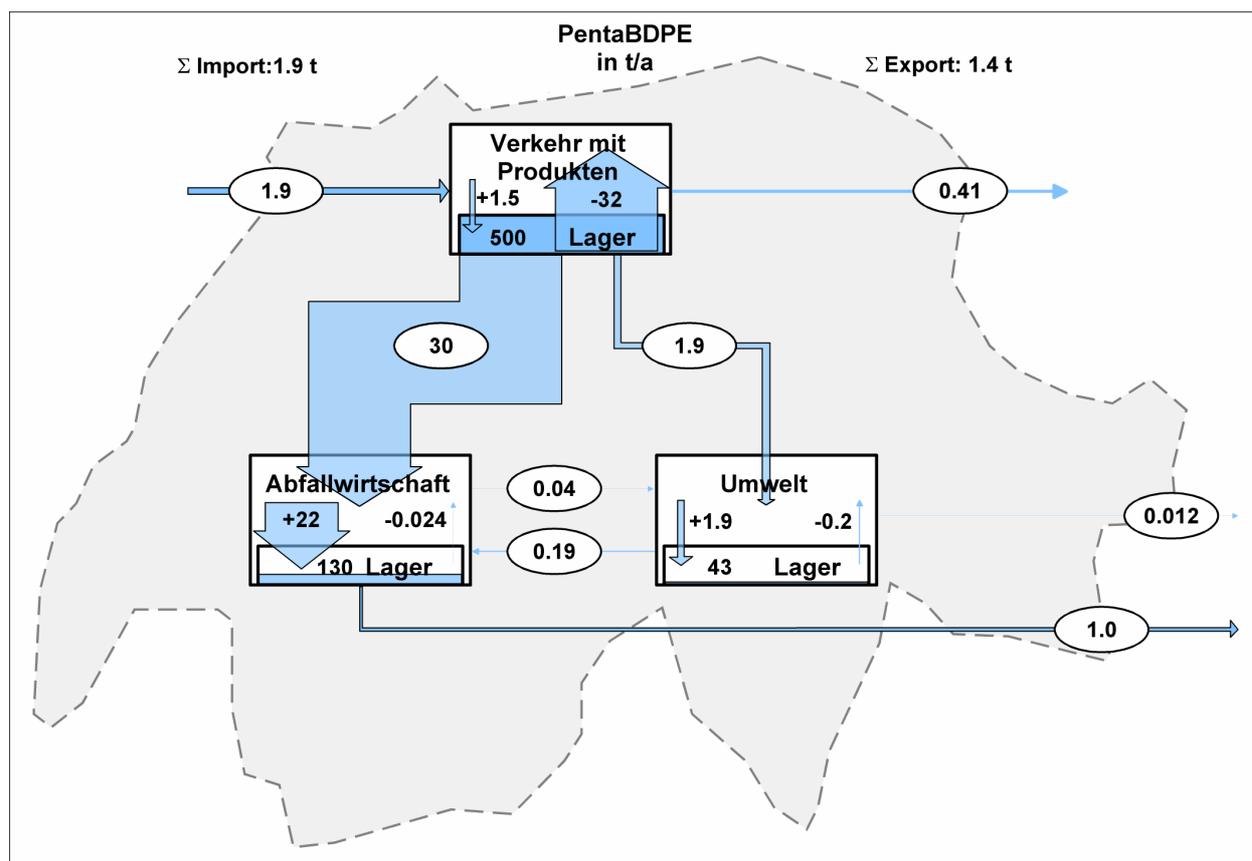
Eine grobe Lagerschätzung von TBBPA wurde anhand von in der Literatur gefunden Konzentrationen für die Umweltkompartimente sowie geschätzten Kompartimentmassen für die Atmosphäre, die Pedo-/Lithosphäre und Hydrosphäre durchgeführt. In der Atmosphäre befinden sich demnach grob geschätzt <0.0001 t TBBPA, in der Hydrosphäre und der Pedo-/Lithosphäre war keine Bestimmung möglich.

### 6.3 Stoffflüsse im Gesamtsystem

#### 6.3.1 PentaBDPE (Pentabromdiphenyl Ether) – Gesamtbilanz Schweiz

Im Vergleich zu anderen Flammschutzmitteln wurden Ende der 90er Jahre nur mehr geringe Mengen an PentaBDPE flammgeschützten Produkten (Gütern) in der Schweiz eingesetzt. Jährlich werden noch etwa 1.9 t/a PentaBDPE in Fertigprodukten importiert, etwa 22 % (0.41 t/a) davon werden wieder exportiert. Die importierten PentaBDPE befinden sich vollständig in Kraftfahrzeugen.

Abbildung 6-13: PentaBDPE-Flüsse in der Schweiz; Ende der 90er Jahre



In den letzten beiden Jahrzehnten wurde PentaBDPE jedoch vielfältig eingesetzt, so dass ein Lager von 500 t PentaBDPE im Konsum (Verkehr mit Produkten) aufgebaut wurde. Dieses Lager befindet sich zu 91 % in den PentaBDPE-haltigen Baumaterialien, die langfristig eingebaut sind und zu 9 % in Konsumgütern (v.a. Textilien und Leiterplatten) mit einer kürzeren Aufent-

haltszeit in der Anthroposphäre. Eine Untersuchung des Lagers weist eindeutig darauf hin, dass dieses gegenwärtig um etwa 30 t/a abgebaut wird.

Von den jährlich in die Abfallwirtschaft gelangenden 30 t PentaBDPE wurde Ende der 90er Jahre nur ein kleiner Teil (ca. 20 %) thermisch behandelt und damit grösstenteils zerstört. Der überwiegende Teil (72 %) landete auf den Deponien in der Schweiz.

Eine nicht vernachlässigbare Fracht von jährlich 1.9 t diffundiert aus dem Lager der Anthroposphäre in die Umwelt. Diese Fracht wird zum Grossteil (1.7 t/a) in das Lager der Pedo-/Lithosphäre eingebracht. Eine sehr grobe Schätzung des Lagers an PentaBDPE in der Pedo-/Lithosphäre zeigt, dass sich in diesem Prozess etwa 40 t PentaBDPE befinden. Damit ist der Anteil der Pedo-/Lithosphäre mit über 90 % am gesamten Lager von PentaBDPE in der Umwelt (43 t) sehr gross. Die restlichen 10 % befinden sich in der Hydrosphäre.

Ein Vergleich der drei Lager im Konsum (Verkehr mit Produkten), in der Abfallwirtschaft und in der Umwelt zeigt, dass sich Ende der 90er Jahre mit etwa 500 t das grösste Lager an PentaBDPE im Konsum befunden hat. Dieses Lager wird gegenwärtig mit 31 t PentaBDPE jährlich stark abgebaut. Knapp 70 % davon gelangen auf die Deponien in der Abfallwirtschaft. Setzt sich dieser Trend in den nächsten Jahren fort, so wird in etwa 7 bis 10 Jahren das Lager in der Abfallwirtschaft mit rund 280 t das bedeutendste anthropogene Lager darstellen.

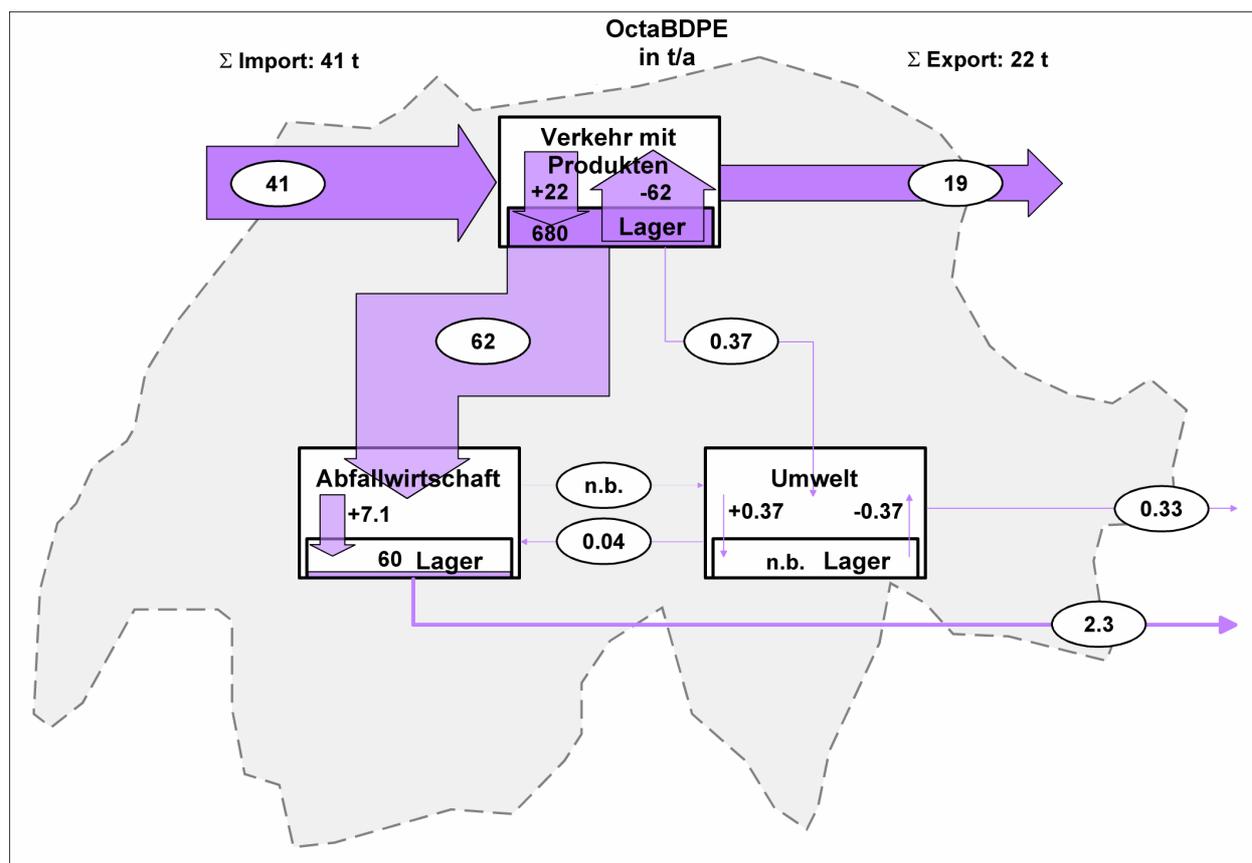
### 6.3.2 OctaBDPE (Octabromdiphenyl Ether) – Gesamtbilanz Schweiz

Der Verbrauch von OctaBDPE-Flammschutz ging weltweit in den letzten zehn Jahren um knapp 40 % zurück. In der Schweiz werden Ende der 90er Jahre jährlich etwa 41 t OctaBDPE als Flammschutz in Produkten importiert. Ein gewichtiger Teil (46 %) der importierten Produkte wird wieder exportiert. Die importierten OctaBDPE befinden sich in EE-Geräten (67 %) und in Polsterungen, in Textilien und Kunststoffen in Kraftfahrzeugen (33 %).

Wie auch bei PentaBDPE wurde in den letzten beiden Jahrzehnten ein Lager von 680 t OctaBDPE im Konsum (Verkehr mit Produkten) aufgebaut. Dieses Lager befindet sich zu 69 % in den EE-Geräten und zu 21 % in den Kraftfahrzeugen. Die restlichen 10 % des Lagers bilden OctaBDPE-haltige Baumaterialien, die Ende der 90er Jahre in Neuprodukten nicht mehr eingesetzt werden. Das OctaBDPE Lager in der Anthroposphäre wird wie dasjenige von PentaBDPE Ende der 90er Jahre bereits abgebaut. Während jährlich 22 t OctaBDPE in das Lager eingebaut werden, gelangen gleichzeitig etwa 62 t in die Abfallwirtschaft.

Von den jährlich in die Abfallwirtschaft gelangenden 62 t OctaBDPE befanden sich Ende der 90er Jahre etwa 53 % in den separat gesammelten Abfällen, wovon schliesslich etwa 94 % in den Reststoffen thermisch behandelt werden. Gemeinsam mit den direkt einer thermischen Behandlung zugeführten Abfällen (23 t) werden insgesamt etwa 87 % der OctaBDPE in den festen Abfälle thermisch behandelt und damit grösstenteils zerstört. Etwa 10 % der OctaBDPE landen auf den Deponien in der Schweiz. Der Rest (3-4%) wird exportiert.

Abbildung 6-14: OctaBDPE-Flüsse in der Schweiz; Ende der 90er Jahre



Aus dem Lager im Konsum diffundieren jährlich 0.4 t/a OctaBDPE in die Umwelt. Im Vergleich zu den anderen zwei PBDEs (PentaBDPE und DecaBDPE) liegen die diffusen Emissionen von OctaBDPE ungefähr bei einem Fünftel. Diese Fracht wird zum Grossteil (0.3 t/a) in das Lager der Pedo-/Lithosphäre eingebracht. Das Lager an OctaBDPE in der Umwelt konnte nicht bestimmt werden.

Ein Vergleich des Lagers im Konsum (Verkehr mit Produkten) mit jenem in der Abfallwirtschaft zeigt, dass sich Ende der 90er Jahre mit etwa 680 t das grösste Lager an OctaBDPE im Konsum befindet. Dieses Lager wird gegenwärtig mit jährlich 40 t OctaBDPE abgebaut. Etwa 11 % der relevanten Abfälle gelangen auf die Deponien in der Abfallwirtschaft. Unter der Annahme, dass sich dieser Trend in den nächsten Jahren fortsetzt, würde es im Vergleich zur Lagerveränderung bei PentaBDPE etwa die doppelte Anzahl Jahre (13-18 Jahre) dauern, bis das Lager in der Abfallwirtschaft mit etwa 160 t das bedeutendste anthropogene Lager darstellen würde.

### 6.3.3 DecaBDPE (Decabromdiphenyl Ether) – Gesamtbilanz Schweiz

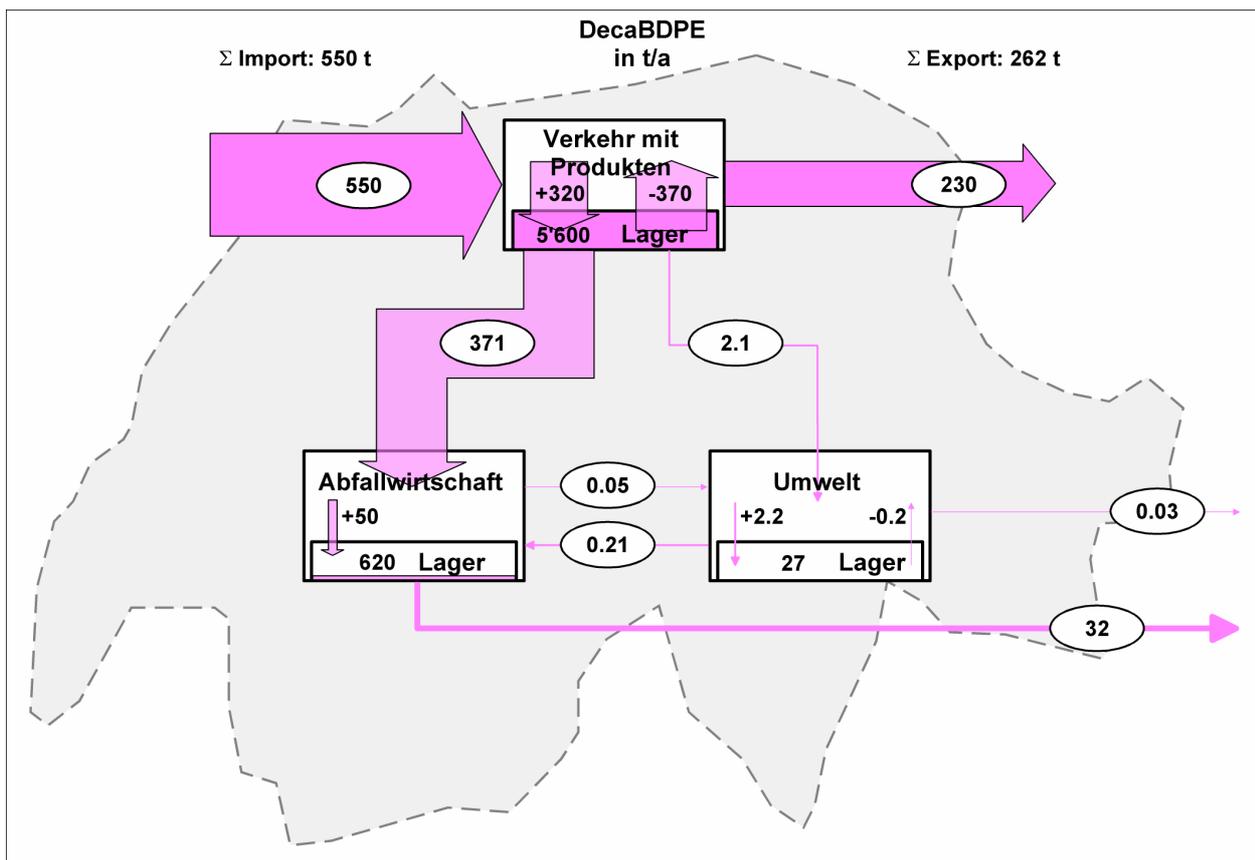
Ende der 90er Jahre wurden 550 t DecaBDPE-Flammschutz in Produkten (Gütern) in die Schweiz importiert, wovon sich 24 % in Halberzeugnissen und der Rest in Fertigprodukten befinden. Etwa 42 % der importierten DecaBDPE wurden wieder exportiert. Etwa 45 % der in der Schweiz konsumierten DecaBDPE befinden sich in EE-Geräten (EDV- und Bürogeräte) und rund 30 % stecken in den importierten Kraftfahrzeugen und etwa 25 % in Baumaterialien (PE-Folien).

Das in den letzten Jahrzehnten im Konsum (Verkehr mit Produkten) der Schweiz aufgebaute Lager ist mit 5'600 t DecaBDPE sehr gross. Dieses Lager befindet sich zu 40 % in den PentaBDPE-haltigen EE-Geräten und zu jeweils 30 % in Baumaterialien und Kraftfahrzeugen. Im Gegensatz zu PentaBDPE und OctaBDPE befindet sich das Lager von DecaBDPE im Gleichgewicht, d.h. der jährliche In- und Output aus dem Lager gleicht sich aus.

Von den jährlich in die Abfallwirtschaft gelangenden 371 t DecaBDPE befanden sich Ende der 90er Jahre etwa 51 % in den separat gesammelten Abfällen, wovon schliesslich etwa 77 % in den Reststoffen thermisch behandelt wurden. Gemeinsam mit den direkt einer thermischen Behandlung zugeführten Abfällen (143 t) werden insgesamt etwa 77 % der DecaBDPE in den festen Abfälle thermisch behandelt und damit grösstenteils zerstört. Etwa 20 % der DecaBDPE gelangen auf die Deponien in der Schweiz.

Pro Jahr diffundieren etwa 2.1 t/a DecaBDPE aus dem Lager im Konsum (Verkehr mit Produkten) in die Umwelt. Diese Fracht wird zum Grossteil (1.9 t/a) in das Lager der Pedo-/Lithosphäre eingebracht. Das PentaBDPE Lager in der Pedo-/Lithosphäre wird mit 20 t geschätzt.

Abbildung 6-15: DecaBDPE-Flüsse in der Schweiz; Ende der 90er Jahre



Das Lager von DecaBDPE im Konsum übersteigt mit 5'600 t jenes von PentaBDPE um das 10fache, trotzdem sind die jährlichen diffusen Emissionen in die Umwelt mit jährlich etwa 2.1 t in etwa gleich gross.

Ein Vergleich der drei Lager im Konsum, in der Abfallwirtschaft und in der Umwelt zeigt, dass sich Ende der 90er Jahre mit etwa 5'600 t das grösste Lager an DecaBDPE im Konsum befand.

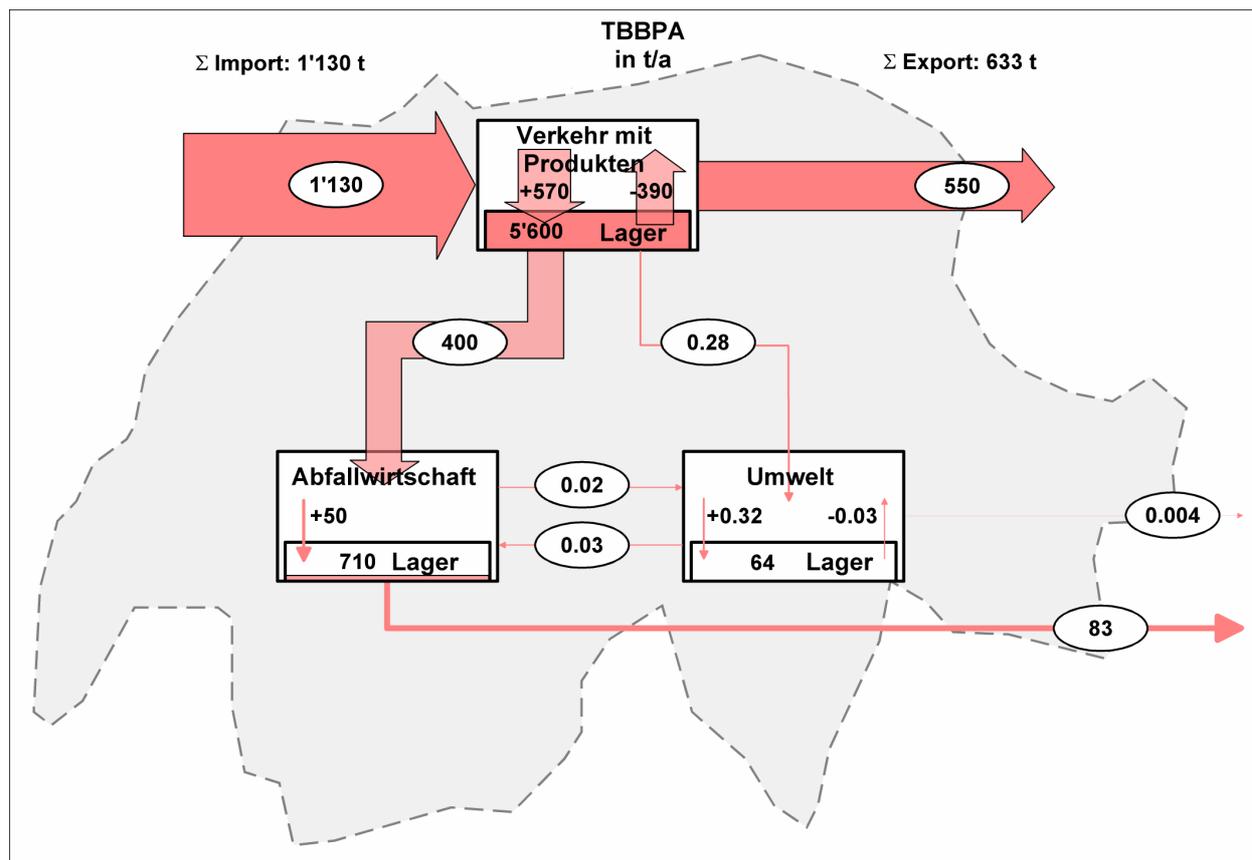
Dieses Lager befand sich annähernd im Fließgleichgewicht. Setzt sich dieser Trend fort, so bleibt das Lager im Konsum in den nächsten 20 Jahren mit etwa 4'500 t – 5'000 t das bedeutendste anthropogene Lager.

### 6.3.4 TBBPA (Tetrabrombisphenol A) – Gesamtbilanz Schweiz

Ende der 90er Jahre wurden 1'130 t TBBPA-Flammschutz in Produkten (Gütern) in die Schweiz importiert, wovon sich 40 % in Halberzeugnissen und der Rest in Fertigprodukten befinden. Etwa 48 % der importierten TBBPA wurden wieder exportiert. Etwa 83 % der in der Schweiz konsumierten TBBPA befinden sich in Computern und rund 11 % in den importierten Unterhaltungselektronikgeräten.

Das in den letzten Jahrzehnten im Konsum (Verkehr mit Produkten) der Schweiz aufgebaute Lager wird mit 5'600 t TBBPA gleich hoch geschätzt wie jenes von DecaBDPE. Dieses Lager befindet sich zu 59 % in den PentaBDPE-haltigen EE-Geräten, und zu jeweils etwa 20 % in Baumaterialien und Kraftfahrzeugen. Im Gegensatz zu DecaBDPE befindet sich das Lager von TBBPA nicht im Gleichgewicht, sondern wächst jährlich um etwa 180 t.

Abbildung 6-16: TBBPA-Flüsse in der Schweiz; Ende der 90er Jahre



Von den jährlich in die Abfallwirtschaft gelangenden 400 t TBBPA befanden sich Ende der 90er Jahre etwa 50 % in den separat gesammelten Abfällen, wovon schliesslich etwa 55 % in den Reststoffen thermisch behandelt wurden. Gemeinsam mit den direkt einer thermischen Behandlung zugeführten Abfällen (166 t) werden insgesamt etwa 68 % der TBBPA in den festen Abfäl-

len thermisch behandelt und damit grösstenteils zerstört. Etwa 22 % der TBBPA in den festen Abfällen gelangen auf die Schweizer Deponien.

Pro Jahr diffundieren etwa 0.3 t/a TBBPA aus dem Lager im Konsum in die Umwelt. Im Vergleich aller vier untersuchten Flammschutzmittel ist dies die geringste diffuse Emission. Diese Fracht wird zum Grossteil in das Lager der Pedo-/Lithosphäre eingebracht. Das TBBPA Lager in der Pedo-/Lithosphäre wird auf 60 t geschätzt.

Ein Vergleich der drei Lager im Konsum (Verkehr mit Produkten), in der Abfallwirtschaft und in der Umwelt zeigt, dass sich Ende der 90er Jahre mit etwa 5'600 t das grösste Lager an TBBPA im Konsum befand. Dieses Lager wächst jährlich um etwa 180 t. Setzt sich dieser Trend fort, so bleibt das Lager im Konsum in den nächsten 20 Jahren mit etwa 9'000 t das bedeutendste anthropogene Lager.

## 7 Schlussfolgerungen

### 7.1 Einleitung

Von den vier untersuchten bromierten Flammschutzmitteln (PentaBDPE, OctaBDPE, DecaBDPE und TBBPA) nahm der weltweite Verbrauch von OctaBDPE innerhalb der letzten zehn Jahre stark ab, jener von PentaBDPE, DecaBDPE und TBBPA stieg hingegen stark an. Gesamthaft hat sich der weltweite Verbrauch aller vier Flammschutzmittel somit in diesem Zeitraum nahezu verdoppelt.

Bromierte Flammschutzmittel werden seit mehr als 15 Jahren kontrovers diskutiert. Heute weiss man mehr über **Verhalten und Bedrohungspotential** der bromierten Flammschutzmittel **für Mensch und Umwelt** als man beispielsweise seinerzeit über PCB beim Inkrafttreten von Anwendungs- und Produktionsverboten für diesen Stoff wusste. Das Bedrohungspotential der untersuchten Flammschutzmittel besteht vor allem darin, dass sie persistent sind und sich in der Nahrungskette anreichern können (z.B. PentaBDPE, TBBPA), dass es in thermischen Prozessen zur Bildung von bromierten Dioxinen und Furanen kommen kann (z.B. DecaBDPE), und dass es Hinweise auf ein kanzerogenes Potential (z.B. DecaBDPE) und östrogene Wirkung (PentaBDPE) gibt.

Gegenwärtig wird in Europa, vor allem in Skandinavien, über ein Verbot oder zumindest einen Verzicht der Anwendung von einzelnen bromierten Flammschutzmitteln diskutiert. Die von der japanischen Industrie 1995 im Rahmen des OECD ‚Risk Reduction Programs‘ eingegangene freiwillige Verpflichtung zum Verzicht der Produktion und des Imports von PentaBDPE hatte keine Auswirkung auf den globalen Verbrauch. Der weltweite Verbrauch von PentaBDPE hat sich in den letzten zehn Jahren verdoppelt. Die **Globalisierung der Märkte** (vor allem im Elektronik- und Elektrogerätebereich) macht es sehr schwierig, den Fluss der bromierten Flammschutzmittel in den Halberzeugnissen auf ihrem Weg in die Fertigerzeugnisse über den Konsum in die Entsorgung zu verfolgen. Dieser Weg führt die Flammschutzmittel über den ganzen Globus. Daher sind die EU oder die OECD gefordert, entsprechende wirkungsvollere Massnahmen zu setzen. Diese Massnahmen sollten jedoch auch andere bromierte Flammschutzmittel miteinbeziehen.

Die Industrie versprach zudem in der 1995 getroffenen freiwilligen Vereinbarung (voluntary commitment) die best verfügbare Technologie einzusetzen, um die Produktionsemissionen zu minimieren. Global gesehen, scheinen aber schon heute für die als problematisch erkannten Substanzen nicht mehr die punktförmigen Produktionsemissionen, sondern die **diffusen Emissionen** während des Konsums, der Entsorgung oder des Recyclings der flammgeschützten Produkte die Hauptursache der immer deutlicher werdenden Umweltbelastung darzustellen.

### 7.2 Metabolismus der untersuchten Flammschutzmittel in der Schweiz

Die vier untersuchten bromierten Flammschutzmittel (BFS) gelangen über importierte Halb- und Fertigprodukte mit einer jährlichen Fracht von etwa 1'700 t in die Schweiz. Etwa 46 % davon werden in Fertigprodukten wieder exportiert, der Rest gelangt in das Lager der Anthroposphäre.

Haupteinträge in die Anthroposphäre der Schweiz sind für PentaBDPE: Kraftfahrzeuge (Polsterungen, Textilien), für OctaBDPE: Elektro-Elektronikgeräte und Kraftfahrzeuge, für DecaBDPE: EE-Geräte (EDV- und Bürogeräte), Kraftfahrzeuge und Baumaterialien (PE-Folien) und für TBBPA: EE-Geräte (Computer) und EE-Geräte.

Da in der Schweiz keine BFS hergestellt werden, können **punktförmige Schadstoffemissionen ausgeschlossen werden**.

Ende der 90er Jahre ist der zentrale Prozess „Verkehr mit Produkten“ dominierend und hier vor allem das Lager im Konsum (genutzte Konsumgüter und Gebäude). Durch den **Konsum von flammgeschützten Produkten** in den letzten 20 Jahren wurde in der Schweiz ein **Lager** von etwa **12'000 t BFS**, möglicherweise aber deutlich mehr, akkumuliert. Gegenwärtig werden die Lager von PentaBDPE und OctaBDPE abgebaut, jene von TBBPA wachsen, und jene von DecaBDPE sind nahezu im Fliessgleichgewicht. Im Gegensatz zu den neu importierten Produkten setzt sich das Lager von PentaBDPE vorwiegend aus Baumaterialien, jenes von OctaBDPE aus EE-Geräte und Kraftfahrzeugen, jene von DecaBDPE und TBBPA jeweils aus EE-Geräten und Baumaterialien zusammen. Jährlich verlassen etwa 900 t flammgeschützte Produkte das Lager im Konsum. Nahezu die gesamte Menge geht über die festen Abfälle in die Abfallwirtschaft.

In der **Abfallwirtschaft** werden die in den festen Abfällen befindlichen BFS schliesslich zum grössten Teil (65 – 85 %, je nach Substanz) durch **thermische Behandlung** in kontrollierten Verbrennungsprozessen entsorgt. Obwohl es erst wenige Messungen in Verbrennungsprozessen gibt, kann davon ausgegangen werden, dass in kontrollierten Feuerungen wie die KVA bromierte Flammenschutzmittel praktisch vollständig zerstört werden. Wie gross die Restmengen in den Produkten der Verbrennung der Schweiz sind, wurde in dieser Studie geschätzt. Über die Umweltrelevanz dieser Mengen konnten keine Informationen gefunden werden.

Über die Höhe und Bedeutung von Emissionen während der **Verwertung** von flammenschutzmittelhaltigen Abfällen liegen gegenwärtig keine Angaben vor. Es ist bekannt, dass die Verwertungsprozesse ein Problem bzgl. Arbeitsschutz darstellen können (es wurden deutlich erhöhte BFS-Mengen im menschlichen Körper festgestellt). Diesem Aspekt ist in Zukunft verstärkte Aufmerksamkeit zu schenken. Stoffliche Verwertung von Kunststoffen, welche BFS enthalten, ist in der Praxis mit gravierenden Problemen verbunden, da einerseits die Gefahr der Bildung von Dioxinen und Furanen besteht und andererseits der Markt für die rezyklierten Rohstoffe nicht vorhanden ist.

Neben dem Lager im Konsum wurde in den letzten Jahrzehnten ein zehnmal kleineres Lager von 1'500 t BFS in Schweizer **Deponien** aufgebaut. Dieses Lager wächst jährlich um etwa 130 t. Auch dieses Lager stellt bei unsachgerechtem Management eine potentielle zukünftige Gefahr für Mensch und Umwelt dar. Über Emissionen aus **unkontrollierter Verbrennung** (Bauabfälle, Kunststoffe), über Deponiegase und über diffuse Emissionen im Zusammenhang mit der Rückführung in die Produktion bzw. dem Export von **wiederverwerteten Gütern** ist heute wenig bzw. nichts bekannt. In dieser Studie nicht behandelt, aber von grosser Bedeutung bei der Diskussion von bromhaltigen Flammenschutzmitteln ist die Thematik der **bromierten Dioxine bzw. Furane**. Über Entstehung und Bedeutung dieser Verbindungen, welche im Zusammenhang mit BFS bei erhöhten Temperaturen während der Entsorgungs- aber auch der Nutzungsphase entstehen können, ist ebenfalls noch nicht allzu viel bekannt.

Die Schätzung der Flüsse sowohl aus der Anthroposphäre als auch aus der Abfallwirtschaft in die **Umwelt** ist zur Zeit ohne aktuelle Messungen für die Schweiz nur sehr grob möglich. Bereits

eine kleine Abweichung der getroffenen Annahmen (z.B. Ausgasungsrate von BFS aus Produkten) verändert die im Vergleich zu den in der Anthroposphäre umgesetzten Frachten, die sehr kleinen Stoffflüsse um Faktoren. Trotzdem wurden erste Schätzungen vor allem in Zusammenhang mit Literaturdaten für andere Länder vorgenommen. Da die untersuchten Substanzen vor allem partikulär gebunden transportiert werden und lithophil sind, stellen Emissionen in die Atmosphäre und die Deposition der staubgebundene BFS auf den Oberflächen eine Haupteintragsquelle in die Umwelt dar. Der Anteil des über Staubpartikeleintrag in die kommunale Abwasserentsorgung an der Gesamtemission in die Atmosphäre wurde im Rahmen dieser Studie geschätzt. Erst Messungen können die Verhältnisse klären.

### 7.3 Unsicherheit der Daten

Die Flüsse und Lager in der Anthroposphäre der Schweiz konnten grob geschätzt werden. Die angegebenen Daten sind realitätsnahe Mittelwerte. Die Unsicherheit der Daten im **Teilsystem „Verkehr mit Produkten“** wurde durch Variation der Güterfrachten, Konzentrationen, Marktanteile, Bauteilgewichte und Lebenszeiten bestimmt; beträgt für die meisten Frachten etwa den Faktor zwei, wenn alle Parameter ein Maximum annehmen und etwa den Faktor drei bei minimalen Parametern. Für den Lagerbestand und die daraus resultierenden Emissionen gilt nach oben und nach unten der Faktor 2.5. Erst die koordinierte und gut vorbereitete Planung von Analysen in Konsumprodukten (Berücksichtigung des Produktionsjahres, Marktanteil etc.) sowie eine verstärkte Zusammenarbeit mit Produzenten der Grundstoffe und/oder Kunststoffe bzw. mit Herstellern von Konsumprodukten erlaubt es, Statistiken zu erstellen. Erst mit Hilfe solcher Statistiken könnten mit einer Wahrscheinlichkeit versehene Fehlerbreiten bestimmt werden.

Die Abschätzung des in Haushalten vorhandenen Lagers an elektrischen und elektronischen Geräten basiert auf der Annahme einer durchschnittlichen Nutzungsdauer der Konsumgüter. Je grösser der Unterschied zwischen der Nutzungsdauer und der tatsächlichen Verweildauer dieser Güter im Haushalt ist (beispielsweise durch Lagerung der ausgedienten Konsumgüter im Keller), desto grösser wird die Unsicherheit der Grösse des Lagers.

Die Unsicherheit in den **Teilsystemen „Abfallwirtschaft“ und „Umwelt“** sind schwierig zu quantifizieren. Weil keine direkten Messungen für die Schweiz vorlagen, konnten daher keine Unsicherheiten berechnet werden. Entweder konnten die Bandbreiten der Stoffflüsse aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ direkt übernommen, oder sie mussten mit zusätzlichen Unsicherheiten erweitert werden (z.B. in Folge von Unsicherheiten bei Transferkoeffizienten). Die für diese beiden Teilsysteme angegebenen Unsicherheiten sind geschätzte Bereiche für die zu erwartenden Stoffflüsse (in der Regel Faktor 2 bis 3). Wie wahrscheinlich die Annahme dieser Bereiche ist, kann z.Z. nicht gesagt werden. Erst Messungen in der Schweiz werden es erlauben, die Unsicherheiten besser einzugrenzen.

### 7.4 Datenlücken, Handlungs- und Forschungsbedarf

Die Unsicherheit der Daten im **Teilsystem „Verkehr mit Produkten“** basiert im Wesentlichen auf der Menge an konsumierten Produkten und der Art und Konzentration des jeweils eingesetzten Flammschutzmittels.

Die Erstellung von nationalen Stoffflussanalysen erfordert eine ausreichend genaue Datenbasis. Aus der Schweizer Zollstatistik sind die Produktmassenflüsse (Import, Export) nicht mit ausreichender Genauigkeit verfügbar. Strukturen als Basis zur Erstellung von Stoffflussanalysen fehlen noch mehrheitlich. Diese sind zur Zeit schon auf Güterebene nicht im befriedigenden Masse vorhanden. **Die Zolldirektion sowie auch das Bundesamt für Statistik der Schweiz sind gefordert, zukünftig eine entsprechende Datenbasis zur Verfügung zu stellen.**

Stichprobenartige Befragungen von Unternehmen im Elektro-Elektronikbereich ergaben, dass Unternehmen kaum bzw. keine Informationen über die in ihren Produkten eingesetzten Flammenschutzmittel verfügen. **Aus der Sicht eines vorsorgenden Umweltschutzes müssen die Unternehmen über das Umwelt- und Gesundheitspotential der von ihnen in Verkehr gebrachten Produkte Bescheid wissen. Wenn dieses Wissen nicht vorhanden ist, müssen die Unternehmen dafür Sorge tragen, dass es erarbeitet wird. Eine Möglichkeit der Optimierung der betrieblichen Strukturen ist der Einsatz einer betrieblichen Stoffbuchhaltung.**

Es sollten auf globaler Ebene zusammen mit Produzenten der Grundstoffe, der Halb- und Fertigprodukte verstärkt die Wege der Produkte und damit auch der Stoffflüsse (from cradle to cradle) untersucht werden. **Fernziel ist über ein bereits vorhandenes Labeling der Konsumgüter hinaus Informationen über Massenflüsse von kritischen Substanzen entweder dem Produkt beizufügen oder zumindest verfügbar zu machen. Vielleicht sind auch die Anforderungen, welche die Vergabe von Gütezeichen an Produkte stellen, zu hinterfragen.**

Auf globaler Ebene sind auch die Zusammenhänge zwischen den Flüssen in der Anthroposphäre und der Wirkung in der Umwelt mehrheitlich noch nicht genau bekannt. Dies macht es sehr schwierig, eine Verknüpfung zwischen der Anthroposphäre und der Umwelt herzustellen. **Die Ermittlung eines globalen Überblicks über die Stoffflüsse als Grundlage für andere Untersuchungen (Risk assessment, nationale Studien etc.) wäre auch hier von grossem Vorteil.**

Informationen über das Lager an Flammenschutzmitteln in Konsumgütern liegen in bestehenden Untersuchungen nur geringfügig vor. Die Grösse und Zusammensetzung wurde durch eigene Berechnungen geschätzt, jedoch konnten einige Anwendungsbereiche (flammgeschützte Textilien, Polsterungen und Gummi) nicht bestimmt werden. Die Quantifizierung des gesamten Lagers ist jedoch für die Schätzung der diffusen Emissionen von grosser Bedeutung. Die diffusen Emissionen sind im Verhältnis zum gesamten Metabolismus nicht gross, sie sind jedoch umwelt- und vor allem gesundheitsrelevant. **Dieses Lager ist in seiner Dynamik zu erfassen und zu modellieren. Erst dann wird es möglich sein, dieses Lager aktiv zu bewirtschaften, die Emissionen zu schätzen, zukünftige Abfallflüsse vorherzusagen und schliesslich den Fluss in die Deponien und damit die diffusen Emissionen aus den Deponien zu steuern und zu minimieren und auch entsprechende Rückbaukonzepte zu entwickeln. Vor allem aber ist ein gezieltes Monitoring und Management der anthropogenen Lager von flammgeschützten Produkten und deren Entsorgungs- und Recyclingpfade notwendig. Gleichzeitig sind Substitute von bromhaltigen Flammenschutzmitteln in das Monitoring aufzunehmen, um ein potentiell Gefährdungspotential bereits zeitgerecht erkennen zu können.**

Das Wissen über den Ab- und Umbau von Substanzen während der Nutzung und in der Umwelt ist zur Zeit noch schwach und ungenügend. **Deshalb sind weitere Untersuchungen zur**

**Debromierung, Dioxin- bzw. Furanbildung etc. notwendig, um Stoffflüsse in die und innerhalb der Umwelt genauer zu quantifizieren.**

Ebenso ist das Wissen über diffuse Emissionen aus dem Konsum von BFS-haltigen Produkten in die Umwelt sehr rar. Aussagen sind z.Z. noch sehr widersprüchlich. Da schon ein geringer Teil der weltweit produzierten Mengen ausreicht, um als diffuser Eintrag in die Umwelt ein potenzielles Problem darzustellen, ist dieser Tatsache ein besonderes Augenmerk zu schenken. Untersuchungen befassten sich bis heute lediglich mit Messungen im menschlichen Körper ohne eine Korrelation mit BFS-Gehalten in Produkten zu berücksichtigen. **Zukünftig ist das Emissionsverhalten von Flammenschutzmitteln in Konsumprodukten verstärkt zu untersuchen. Dies soll in der Weise geschehen, dass auch Rückschlüsse auf Mengenflüsse möglich sind.**

Da die Prozesse der Abfallwirtschaft grosse Flüsse aus dem Konsum aufnehmen, ist die fachgerechte Behandlung der Substanzen von grosser Bedeutung. Eine nicht vernachlässigbare Menge an BFS in den Abfällen gelangt immer noch unbehandelt in die Deponie. Folgeerscheinungen sind ebenfalls diffuse Emissionen in die Umwelt. Welche Mengen an Emissionen aus den abfallwirtschaftlichen Prozessen resultieren, ist bis heute wenig (Verbrennung) bis gar nicht (Verwertung, Deponie, unkontrollierte Entsorgung) bekannt. Dieses Wissen ist aber eine Grundvoraussetzung, um ein optimales Management auch in der Entsorgungs- und Wiederverwertungsphase zu gewährleisten. **Daher sind Messungen in den wichtigsten abfallwirtschaftlichen Prozessen (KVA, Deponie, Wiederverwertung, ARA) notwendig.**



## 8 Literatur

- Achternbosch, M.; Brune, D. (1996) "Stoffströme bei der Herstellung von Leiterplatten", Bericht Nr. 5854. FZKA. Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt, Institut für Technologiefolgeabschätzungen und Systemanalyse. Karlsruhe.
- Albemarle (2001) "Technical Papers - Flame Retardants", 17.07.2001.  
<http://www.albemarle.com/saytextechpaperf.htm>.
- Allchin, C. R., Law, R.J., and Morris, S. (1999) "Polybrominated diphenyl ethers in sediments and biota downstream of potential sources in the UK", *Environ. Poll.* 105: 197-207.
- ALTEC (2000) "Flammschutzmittel in Kunststoffen – Grundlagenstudie", Endbericht, ALTEC AG, Glattbrugg.
- APME (1995) "Plastics a material of choice for the electrical and electronic industry - Plastic consumption and recovery in Western Europe 1995", Association of plastics manufacturers in Europe (APME). Brüssel.
- APME (1999) "Plastics a material of choice for the automotive industry - Insight into consumption and recovery in Western Europe 2000", Bericht Nr. 2008. Association of plastics manufacturers in Europe (APME). Brüssel.
- APME (2001) "Plastics a material of innovation for the electrical and electronic industry - Insight into consumption and recovery in Western Europe 2000", Association of plastics manufacturers in Europe (APME). Brüssel.
- Arias, P. A. (2001) Copy of Presentation Slides. BFR 2001. Stockholm.
- Arx, U. v. (1995) "Bauprodukte und Zusatzstoffe in der Schweiz", Bericht Nr. 245. Schifftenreihe Umwelt - Umweltgefährdende Stoffe. BUWAL. Bern.
- Atlantic Consulting (2000) "PC Ecolabel Project - Schedule and Status", 30.10.2000.  
<http://www.ecosite.co.uk/eef/schedule.htm>.
- AWEL (1998) "Oberflächengewässer und Abwasserreinigungsanlagen", Ausgabe 1998" Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL), Zürich.
- Bergmann, A. et al. (1999) „Polybrominated environmental pollutants: Human and wildlife exposures", *Organohalogen Compounds*, 43, 89-92.
- Behrendt, S.; Kreibich, R.; Lundie, S.; Pfitzner, R.; Scharp, M. (1998) "Ökobilanzierung komplexer Elektronikprodukte. Innovationen und Umweltentlastungspotentiale durch Lebenszyklusanalysen", Berlin. Springer-Verlag.
- BFR (2001) "The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants- Abstracts", at Stockholm University, Sweden.

- BFRIP (Brominated Flame Retardant Industry Panel) (1989) "TBBPA Aquatic toxicity and environmental fate studies" in IUCLID (1995).
- BFS (1995) "Verbrauchserhebung 1990/92. Detaillierte Auswertungen und retrospektive Vergleiche", Bundesamt für Statistik, Bern.
- BFS (1999) "Statistisches Jahrbuch der Schweiz 2000", NZZ Verlag, Bundesamt für Statistik (Hrsg.), Zürich.
- BFS (2000) "Provisorische Verbrauchserhebung 1998", Bundesamt für Statistik, Neuchâtel.
- Borms, R. (1993) „The Use of Antimony Oxide in Flame Retardancy“ OECD Workshop on brominated flame retardants, Neuchâtel, Schweiz.
- BSEF (1999) "BSEF Statement on Keml Report" Bromine Science and Environmental Forum, Brussels 8 April 1999.
- BSEF (2000) "Bromine Science and Environmental Forum – Detection of polybrominated diphenyl ethers in the environment" <http://205.232.112.21/bsef/science/detection.htm>.
- BUWAL (1991) "Klärschlamm-Verbrennung" , Schriftenreihe Umwelt Nr. 156, Bern.
- BUWAL (1996) „Stoffflussanalyse Schweiz“, Schriftenreihe Umwelt Nr. 251, Bern.
- BUWAL (1998a) "Abfallstatistik 1996, Umweltmaterialien Nr. 90, Abfälle, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landwirtschaft (BUWAL).
- BUWAL (1998b) "Sonderabfallstatistik 1998" (im Internet).
- BUWAL (1999a) "Abfallstatistik 1998", Umwelt-Materialien Nr. 119, Bern.
- BUWAL (1999b) „Separatsammlungen von Abfällen. Stand, Handlungsbedarf und Szenarien“ Vollzug Umwelt, Bern.
- BUWAL (1999c) „ Dioxine und Furane, Stoffflussanalyse“, Schriftenreihe Umwelt Nr. 312, Bern.
- BUWAL (2001) mündliche Auskunft von Dr. Rolf Kettler, BUWAL, Abteilung Abfall.
- CBC (1982) "The bioakkumulation of compound S-511 by carp", Tokio, Chemical Inspection and Testing Institut, Chemical Biotesting Centre (unpublished report), In IPCS, 1994.
- CITI (Chemical Inspection & Testing Institute Japan) (1992) "Data of existing chemical based on the CSCL Japan", In: IUCLID, 1995.
- Consultic (2000) "Produktions- und Verbrauchsdaten für Kunststoffe in Deutschland unter Einbeziehung der Verwertung 1999 - Ergebnisse einer Umfrage", Verband Kunststoffherstellende Industrie e.V. Frankfurt.
- Danish EPA (1999) "Brominated Flame Retardants. Substance Flow Analysis and Assessment of Alternatives", June 1999.

- Davenport, B.; Fink, U.; Ishikawa, Y. (1999) "Flame Retardants". <http://scup.sric.sri.com/Public/Reports/Flame000/Abstract.html>.
- Dead Sea Bromine (2001) "Flame Retardants". 17.07.2001. <http://www.deadseabromine.com>.
- Draft Directive 2001/0018(COD) (2001) Vorschlag für eine Europäische Richtlinie zur Angleichung der Rechts und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten für Beschränkungen des Inverkehrbringens und der Verwendung gewisser gefährlicher Stoffe und Zubereitungen (Pentabromdiphenylether).
- Drohmann, D. (2000) Decabromodiphenyl ether (DecaBDE) and Hexabromocyclododecane (HBCD) - An Update on current Regulatory Activities with Relevance for FR Textiles. The European Flame Retardants Association (EFRA). 17.07. <http://efra.cefic.org/docs/Technical/FR-Textiles-Conf-workpaper-final.html>.
- Dungey, S. (2001) "Environmental Risk Assessment of Octa- and Decabromo-diphenyl ether" at The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants, Stockholm.
- Environmental Agency Japan (1989) "Chemicals in the environment Report on environmental survey and wildlife monitoring of chemicals in F.Y." in IPCS, 1995.
- Environmental Agency Japan (1991) "Chemicals in the environment Report on environmental survey and wildlife monitoring of chemicals in F.Y." in IPCS, 1995.
- Eriksson, J., Jakobsson, E. "Decomposition of tetrabromobisphenol A in the presence of UV-light and hydroxylradikals" in *Organohalogen Compounds*, 35,419-422, 1998.
- European Commission (1996) "Techno-economic study on the reduction of industrial emissions to air, discharges to water and the generation of the wastes from the production, processing and destruction (by incineration) of brominated flame retardants", Bericht Nr. CR-92-95-926-EN-C. ECSC-EC-EAEC. Brüssel.
- EZV (2000) schriftliche Auskünfte aus der Schweizerischen Aussenhandelsstatistik, Eidg. Zollverwaltung, Bern.
- Fischer (2000) "Fischer Weltalmanach".
- Frey, Th. (1999) "Nachweis und Quantifizierung von bromierten Flammschutzmitteln in Kunststoffen" Diplomarbeit, Fachhochschule beider Basel, Kantonales Laboratorium Aargau, Abt. Chemie.
- Frost & Sullivan (1997) „European flame-retardant chemicals markets – Market Consulting Report“ Frost & Sullivan, Mountain View.
- Gächter, R.; Müller, H., Hrsg. (1987) "Plastic Additives Handbook. Stabilizers, Processing Aids, Plasticizers, Fillers, Reinforcements, Colorants for Thermoplastics", Hanser. München.
- Gallana, M. (2001) schriftliche Mitteilung von M. Gallana (Wachendorf AG), Basel.
- Grangier, M. (2001) schriftliche Mitteilung von M. Grangier (PHOTOCHEMIE AG), Unterägeri.

- Grote, Andreas (1999) "Flammschutzmittel in der Nahrungskette" Neue Zürcher Zeitung, 14.4.99.
- Guvenius, D. M. and K. Norén (2001) "Polybrominated diphenyl ethers in Swedish human milk. The follow-up study" BFR 2001-Konferenz, KEMI, Stockholm.
- Hagemaijer, H., She, J., Benz, T., Dawidowskiy, N., Dusterhoft L. and Lindig, C. (1992) "Analysis of sewage sludge for polyhalogenated dibenzo-p-dioxins, dibenzofurans and diphenyl ethers", *Chemosphere*, 25, 1457-1462.
- Hakk, H. (2001) „A Survey of Tetrabromobisphenol A“ at The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants, Stockholm.
- Hale, R. (2001) „Brominated diphenyl ethers in land-applied sewage sludges in the US“ at The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants, Stockholm.
- Hardy, M.L., Eldan, M., Biesemeier, J. (1993) "Toxicology and risk assessment of selected brominated flame retardants: brominated diphenyl oxides".
- Hardy, M. L. (2000) schriftliche Mitteilung zum Stoffprofil DecaBDPE vom 18.07.00 (siehe Anlage in [Leizewitz & Schwarz, 2001]).
- Human Health Assessment (2000) Existing Substances Regulation 793/93/EEC. Octabromobiphenyl ether“ Draft of 29 August 2001, Paris.
- IAL (1998) „The european flame retardant chemical industry 1998“ IAL Consultants, London.
- IGEA (1995) "Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse über die Miterbrennung von RESH in Kehrlichtverbrennungsanlagen", Zürich.
- IGEA (1998) "Jahresbericht 1998" Stiftung für umweltgerechte Entsorgung von Motorfahrzeugen", Bern.
- IGEA (2001a) "Jahresbericht 2000" Stiftung für umweltgerechte Entsorgung von Motorfahrzeugen", Bern.
- IGEA (2001b) schriftliche Angaben von Hr. D. Christen, Geschäftsführer IGEA.
- IPCS (1994a) "Polybrominated Biphenyls" WHO, Environmental Health Criteria 152, Genf.
- IPCS (1994b) "Brominated diphenyl ethers" WHO, Environmental Health Criteria 162, Genf.
- IPCS (1995) "Tetrabromobisphenol A and derivatives" WHO, Environmental Health Criteria 172, Genf.
- IPCS (1997) „Flame retardants: A general introduction“ WHO, Environmental Health Criteria 192, Genf.
- IPCS (1998) "Polybrominated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans" WHO, Environmental Health Criteria 205, Genf.

- IUCLID (1995) "IUCLID Data Sheet, TBBPA, CAS-Nr. 79-94-7". European Commission, European Chemicals Bureau
- KEMI (1996) "The flame retardants project. Final report" The Swedish National Chemicals Inspectorate. Solna, Sweden.
- KEMI (1999) "Phase-out of PBDEs and PBBs" Swedish National Chemicals Inspectorate, March 1999
- Kemmlin, S. (2000) "Polybromierte Flammschutzmittel: Entwicklung eines Analyseverfahrens und Untersuchung und Bewertung der Belastungssituation ausgewählter Umweltkompartimente" Dissertation der TU Berlin
- Kierkegaard, A., L. Balk, et al. (1999). "Dietary uptake and biological effects of decabromodiphenyl ether in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)." *Environmental Science Technology* 33(10): 1612-1617.
- Kiviranta, H. "Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in Finnish Food Items" at The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants, Stockholm
- Kruse, H., Paulsen, O., Schau, C., Wieben, M., Böhde, U. (2000) "Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel. Toxikologisch-ökotoxikologische Stoffprofile ausgewählter Flammschutzmittel." Bericht Nr. 01/27. UBA-Texte. 000171/3. UBA-FB. Umweltbundesamt Berlin. Berlin.
- Kunststoffverband Schweiz (1998) "Kunststoffstatistik 1998", Aarau.
- Kuhn, Elmar (1998) "Bromierte Flammschutzmittel – Kampagne 1999", Kantonales Laboratorium Aargau, Jahresaussprache BUWAL, Sept 1998.
- Kuhn, Elmar (1999) "Bromierte Flammschutzmittel in Kunststoffen – Stand der Schwerpunktaktion" Kantonales Laboratorium Aargau, Sept. 1999.
- Kuhn, Elmar (2000) "Bromierte Flammschutzmittel in Kunststoffen – Stand der Schwerpunktaktion" Kantonales Laboratorium Aargau, Jahresaussprache BUWAL und persönliche Mitteilungen
- Larsen, G. et al. „Mobility, Sorption and Fate of Tetrabromobisphenol A (TBBPA) in loam soil and sand“, at The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants, Stockholm.
- Lind Y., Atuma, M., Bjerselius, A. R., Darnerud, P.O., Cnattingius, S., Glynn, A. (2001) „Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in breast milk from Uppsala women – extension and up-dating of data“, at The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants, Stockholm.
- Leisewitz, A.; Kruse, H.; Schramm, E. (2000) "Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel. Ergebnisse und zusammenfassende Übersicht", Bericht Nr. 01/27. UBA-Texte. 000171/1. UBA-FB. Umweltbundesamt Berlin. Berlin.

- Leisewitz, A.; Schwarz, W. (2000) "Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel. Flammhemmende Ausrüstung ausgewählter Produkte - anwendungsbezogene Betrachtung: Stand der Technik, Trend, Alternativen", Bericht Nr. 01/27. UBA-Texte. 000171/2. UBA-FB. Umweltbundesamt Berlin. Berlin.
- Meerts I.A.T.M., Van Zanden J.J., Luijckx E.A.C., Van Leeuwen-Bol I., Marsh G., Jakobsson E., Bergmann A., Brouwer A. (2000) „Potent competitive interactions of some brominated flame retardants and related compounds with human transthyretin in Vitro” *Toxicological Science*, Vol. 56, Issue 1, p. 95-104, Elsevier Science.
- Morf, L. (2000), “Die KVA als Instrument der Erfolgskontrolle in der Abfallwirtschaft der Schweiz”, interner Zwischenbericht BUWAL, Bern.
- Müller, M.; Huber, D. (2000) “Einfluss der Verwertungsprozesse auf die Dynamik der Abfallwirtschaft. Eine Übersicht über Umfeld, Rahmenbedingungen und Einflussfaktoren”, SPPU Ergänzungsstudie: IP Abfall.
- Norris, J. et al. (1973) „Toxicological and environmental factors involved in the selection of decabromodiphenyl oxide as a fire retardant chemical“, Applied Polymer Symposium, 22, 195-219.
- Norris, J. et al. (1975) „Evaluation of decabromodiphenyl oxide as a flame-retardant chemical“, *Chem. Hum. Health Environ.*, 1, 100-116.
- OECD (1994) "Risk Reduction Monograph No. 3: Selected Brominated Flame Retardants, Background and national Experience with Reducing Risk", Bericht Nr. 102. OECD Environment Monograph Series. Organisation for Economic Co-Operation and Development, Environmental Directorate. Paris.
- OECD (1995a) Voluntary commitment by major global producers of selected brominated flame retardants covered under OECD's risk reduction programme, April 15, 1995, Organisation for Economic Co-Operation and Development, Environmental Directorate. Paris.
- OECD (1995b) Voluntary plan in Japan concerning the risk management of selected brominated flame retardants, 14 July 1995, OECD Environment Monograph Series. Organisation for Economic Co-Operation and Development, Environmental Directorate. Paris.
- OECD (2000) "Industry Report on BFR Voluntary Industry Commitment", CMA (Chemical Manufacturers Association), Paris.
- Peltola, J., Ylä-Mononen, L., (2001) "The commercial pentabromodiphenyl ether as a global POP" at The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants.
- RA (1998) “Bis(pentabromobiphenyl)ether, CAS-Nr. 1163-19-5” Human Health Assessment, Entwurf 1998.
- RA (2000a) “European Union Risk Assessment of Diphenyl Ether, Pentabromo Derivative (Pentabromodiphenyl Ether), CAS Number: 32534-81-9” Final Report, August 2000, European Communities, Luxembourg.

- RA (2000b) "Bis(pentabromobiphenyl)ether, CAS-Nr. 1163-19-5" Human Health Assessment, Draft of 31 August 2000, Last update in May 2001.
- RA (2000c) "Octabromobiphenyl ether, CAS No. 32536-52-0" Human Health Assessment, Draft of 12 May 2000
- RAL (2000) Hr. Sang, Persönl. Mitteilungen .
- Ramböll et al. (1995) "Elektrise og elektroniske produkter. Indsamling og bortskaffelse", Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen 53, Danish EPA, Copenhagen.
- Renner, R. (2000). "Increasing levels of flame retardants found in North American Environment", *Environmental Science And Technology* 34(21).
- REPRA (1988) "Use Category Document. Plastic Additives" REPRA und Building Research Establishment for Department of the Environment (UK)", Revised Draft of June 1988,
- Riess (1999) "Entwicklung chromatographisch-spektroskopischer Methoden zur Bewertung flammgeschützter Kunststoffe", Dissertation an der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Erlangen – Nürnberg, 1999.
- Ryan, J.J, Patry B. (2001) „ Body burdens and exposure from food for poly-brominated diphenyl ethers (BDEs) in Canada“, at The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants.
- Sakai, S.; Watanabe, J.; Takatsuki, H.; Kimura, T.; Inoue, S. (2001) Presence of PBDDs/DFs in Flame Retardant Materials and their Behavior in High-Temperature Melting Processes. BFR 2001", At The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants.
- Saechtling, H. (1986) „Kunststoff-Taschenbuch“, 23. Ausgabe, Carl Hanser Verlag, München.
- SBB (2001) "Zahlen 2000", Kommunikation SBB (Schweizer Bahn), 13.7.01. [www.sbb.ch](http://www.sbb.ch).
- Schramm, E., Buchert, M., Bunke, D., Lehmann, S., Reifenhäuser, I., Steinfeldt, M., Strubel, V., Weller, I., Zundel, St. (1996) "Stoffflüsse ausgewählter umweltrelevanter chemischer Stoffe: beispiele für ein Produktlinienkontrolling" UBA-Berlin Texte 80/96, Forschungsbericht 104 08 509, UBA-FB 96-098.
- Schureter, A.F.H., Larsson, P. (2001) " Atmospheric deposition of polybrominated diphenylethers (PBDEs)" , at The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants, Stockholm.
- Schütte, G. (1997) "Leiterplattendemontage für verwertungsorientierte Recycling-kreisläufe", Bericht Nr. 660. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8: Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik. TU Braunschweig, Institut für Automatisierungstechnik. Düsseldorf.
- Sellström, U. et al. (1990) „Anthropogenic brominated aromatics in the swedish environment“; in IUCLID, 1995.

- Sellström, U. et al. (1999) „Brominated flame retardants in sediments from european estuaries, the baltic sea and sewage sludge“, *Organohalogen Compounds*, 40, 383-386.
- S.EN.S (1999) „Fachbericht der S.EN.S zur Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte bei den offiziellen Entsorgungsbetrieben der S.EN.S“ Stiftung Entsorgung Schweiz S.EN.S , Zürich. <http://www.sens.ch>.
- SEPA (1998) „Press Release: 17th August 1998 – New findings on environmental pollutants – Halogenated Environmental Organic Pollutants, Dioxin '98“ Swedish Environmental Protection Agency, <http://www.internat.environ.se/documents/press/1998/ep980817.htm>.
- SEPA, Johansson, Niklas et al. (2000) “Brominated Flame Retardants” Report 5065.
- Sjördin, A. et al. “Flame Retardants in Indoor Air at Electronics Recycling Plant and Other Work Environments” Department of Environment Chemistry and Analytical Chemistry, Stockholm.
- Sjördin, A., Carlsson, H., Thuresson, K., Sjörlin, S., Bergman, A., Östman, C. (2001), "Flame retardants in indoor air at an electronics recycling plant and at other work environments", *Environ. Sci. & Technol.*, 2001, 35, 448-454.
- Söderström, G., Marklund, S. (2001) “Combustion of brominated flame retardants” at The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants, Stockholm.
- Standly, S.J., Cramer, P.H., Thornburg, K.R., Remmers, J.C., Breen, J.J., and Schwenberger, J. (1991) “Mass spectral confirmation of chlorinated and brominated diphenylethers in human adipose tissues”, *Chemosphere*, 23, 1185-1195.
- Statistik Österreich (1999) "Statistisches Jahrbuch für die Republik Österreich 1999: 2000. 50. Jahrgang", Kommissionsverlag, Verlag Österreich, Wien.
- Stumpf, Karin (1994) “Kunststoffrecycling in der Schweiz”, Dissertation, Uni-Zürich.
- SWICO (2000) „Tätigkeitsbericht 2000. SWICO Kommission Umwelt“, Schweizerischer Wirtschaftsverband der Informations-, Kommunikations- und Organisationstechnik (SWICO), Zürich. <http://www.swico.ch>.
- Tabenman, S-O (1995) „Environmental consequences of incineration and landfilling of waste from electr(on)ic equipment“, TemaNord 555. Nordic Council of Ministers.
- Tange, L., Vehlow, J., Drohmann, D. (2001) „ Bromine recovery in incinerators and alternative thermal processes from plastics of E&E equipment containing brominated flame retardants as sustainable solution“, at The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants, Stockholm.
- Tittlemier, S. A.; Tomy, G. T. (2000) "Vapor Pressures of six environmentally relevant brominated diphenyl ether congeners", 2nd Annual Workshop on Brominated Flame Retardants in the Environment. Burlington, Ontario, Canada.
- Troitzsch, D. H. J. (1993). "Flame Retardants. Plastics additives handbook" Munich, Hanser.

- Tysklind, M., U. Sellström, et al. (2001). "Abiotic transformation of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs): Photolytic debromination of decabromo diphenyl ether" BFR 2001 - Konferenz, KEMI, Stockholm.
- UN (2000) "Directory of Chemicals and Suppliers in Europe 2000", UN, Genf.
- Viberg, H., A. Frederiksson, et al. (2001) "Brominated Flame Retardant: Uptake, retention and developmental neurotoxic effects of decabromodiphenyl ether (PBDE 209) in the neonatal mouse" BFR 2001 - Konferenz, KEMI, Stockholm.
- VKE (1999) "Verbrauch von Kunststoffen im Bau in Westeuropa 1998" 13.7.2001. [www.vke.de](http://www.vke.de).
- VKE (2000) "Wirtschaftsdaten und Grafiken zu Kunststoffen", 13.7.2001. [www.vke.de](http://www.vke.de).
- VKE (2001) Verband kunststofferzeugenden Industrie e.V. <http://www.vke.de>.
- Wegmann, L.; Werfeli, M.; Bachmann, R.; Tremp, J.; Vigueiredo, V. (1999) "Bromierte Flamm-schutzmittel in Kunststoffen"; Eine orientierende Markt-untersuchung als Grundlage für eine gesamtschweizerische Schwer-punktaktion, Amt für Umweltschutz und Energie, Kanton Basel-Landschaft, Bau- und Umweltschutzdirektion, Liestal.
- Weiss, R. (2000) "Weissbuch 99", Schweizer PC-Marktreport 1999.
- Wit de, C.A. (1999) "Brominated flame retardants in the environment –an overview", Dioxin 99, 19 th International Symposium on halogenated environmental organic pollutants and POPs, September 12-17, 1999, Venedig.
- Wit de, C.A. (2000) "Brominated flame retardants", Swedish Environmental Protection Agency, Report 5065.
- Wit de, C.A. (2001) "Levels and Trends of BFRs in the European Environment", at The Second International Workshop on Brominated Flame Retardants, Stockholm.
- Yokoyama, Y. (2000) "The risk management of selected Bromidated Flame Retardants" 30<sup>th</sup> Joint Meeting, Paris.
- Zweidinger, R.A. et al. (1979) "Sampling and analysis for semi volatile brominated organics in ambient air" in IPCS, 1995.



## 9 Anhang

### 9.1 Anhang 1 – Verkehr mit Produkten

Dieser Anhang befasst sich mit der Berechnung der in Kapitel 5.1 zusammengefassten Flamm-  
schutzmittelfrachten. Die Struktur dieses Anhangs entspricht der Struktur des Kapitels 5.1.

#### 9.1.1 Nationale und weltweite Vergleiche

Dieser Anhang befasst sich mit der Berechnung der in Kapitel 5.1.6.4.2 zusammengefassten  
Flammschutzmittelfrachten.

##### 9.1.1.1 Grundlagen

Grundlagen der Vergleiche zwischen europäischen Nationen sind die Bevölkerungszahlen,  
wenn nicht anderes angegeben.

Tabelle 9-1: Einwohnerzahlen [Statistik Österreich, 1999]

EINWOHNER 1999	Mio EW	Faktor für CH
Industrieländer <sup>1)</sup>	1'185.00	0.00603
Europa (incl. Russ)	729.00	0.00979
Europa (excl. Russ)	582.00	0.01227
Westeuropa	183.00	0.03902
<b>Deutschland</b>	<b>82.09</b>	<b>0.08698</b>
<b>Dänemark</b>	<b>5.33</b>	<b>1.34034</b>
Frankreich	59.10	0.12081
Österreich	8.09	0.88224
Schweden	8.86	0.80614
<b>Schweiz</b>	<b>7.14</b>	<b>1.00000</b>

Quelle: www.statistik.at: Statistisches Jahrbuch 2001: Tabellen 37.01 (Weltbevölkerung 1950 bis 2050  
nach Weltregionen) und 37.03 (Fläche, Bevölkerung und Bevölkerungsdichte)

1) Nordamerika, Japan, Westasien, Europa, Australien, Neuseeland

### 9.1.1.2 Kunststoffe

Tabelle 9-2: Konsum von EE-Produkten und darin enthaltenen Kunststoffen in Westeuropa 2000 und 1998 (Berechnet aus [APME, 2001] und [APME, 1995])

KONSUM VON EE-PRODUKTEN IN WESTEUROPA	2000		Wachstum 2000/1998		1998		1998	
	Geräte	Kunst- stoffe	Geräte	Kunst- stoffe	Geräte	Kunst- stoffe	Kunst- stoffe	Kunst- stoffkonz.
	kt	kt	%	%	kt	kt	%	%
Unterhaltungselektronik	916	217	0.70%	-2.86%	910	223	9.1%	24.6%
EDV-Geräte (o. Drucker)	1'647	431	29.26%	41.89%	1'274	304	12.3%	23.9%
Telekommunikation	124	74	5.79%	7.13%	117	69	2.8%	59.2%
EE-Bürogeräte	508	89	12.40%	29.07%	452	69	2.8%	15.3%
Kleine Haushaltsgeräte	312	151	0.91%	13.19%	309	133	5.4%	43.1%
Grosse Haushaltsgeräte	2'826	481	4.27%	-3.76%	2'710	500	20.3%	18.4%
Kabel	3'969	995	5.28%	5.29%	3'770	945	38.4%	25.1%
EE-Kleinteile	2'892	192	3.92%	4.12%	2'783	184	7.5%	6.6%
E-Werkzeuge	97	11	0.91%	13.19%	96	10	0.4%	10.1%
Ausgabeautomaten	49	10	0.91%	13.19%	49	9	0.4%	18.2%
Spielzeug	11	8	0.91%	13.19%	11	7	0.3%	64.8%
Medizinische Geräte	125	4	0.00%	0.00%	125	4	0.2%	3.2%
Beleuchtung	93	3	0.91%	13.19%	92	3	0.1%	2.9%
Überwachungs- und Kon- trollinstrumente	5	3	0.91%	13.19%	5	3	0.1%	53.5%
Subtotal IT+Telekomm.	2'279	595	23.63%	34.43%	1'843	443	18.0%	24.0%
Subtotal EE-Geräte	6'713	1'483	10.95%	11.99%	6'150	1'334	54.2%	21.7%
<b>TOTAL EE-Sektor</b>	<b>13'574</b>	<b>2'670</b>	<b>7.70%</b>	<b>8.82%</b>	<b>12'703</b>	<b>2'464</b>	<b>100.0%</b>	<b>19.4%</b>

Anmerkung: Die Produktfrachten sind immer ohne Stecker, Unterbrecher und Kabel angegeben. Subtotal IT+Telekommunikation umfasst neben Telekommunikation auch EDV-Geräte und EE-Bürogeräte. Subtotal EE-Geräte umfasst alles ausser Kabel und EE-Kleinteile. Die jährlichen Wachstumsraten wurden aufgrund des Wachstums von 1995 bis 2000 ermittelt (lineares Wachstum angenommen). Da die Statistik 1995 E-Werkzeuge, Ausgabeautomaten, Beleuchtung und Überwachungsinstrumente nicht separat anführt wurde, nahm man für diese Gruppen eine Wachstumsrate wie für kleine Haushaltsgeräte an.

Der Anteil an konsumierten Kunststoffen in EE-Produkten in Westeuropa 2000 von Deutschland und Frankreich ist 27 % bzw. 19 % [APME, 2001]. Vom Konsum in Deutschland wurde aufgrund Bevölkerungszahlen auf die Schweiz rückgerechnet (siehe folgende Tabelle). Die selbe Berechnung über den Konsum in Frankreich ergab das gleiche Ergebnis. Laut der dänischen Studie [Danish EPA, 1999] ist der Anteil von TBBPA und PBDEs bezogen auf alle eingesetzten BFS in Leiterplatten etwa 100 % in Gehäusen etwa 70 % und in sonstigen Bauteilen etwa ein Drittel.

Tabelle 9-3: Konsum von EE-Produkten und darin enthaltenen Kunststoffen und Flammschutzmitteln in der Schweiz 1998

KONSUM VON EE-PRODUKTEN	Geräte	Kunststoffe	Flammgeschützte Kunststoffe		Kunststoffe mit Bromierten Flammschutzmitteln	
	kt	kt	%	t	%	t
Unterhaltungselektronik	21.36	5.247	34% <sup>1)</sup>	1'789	83%	1'485
EDV-Geräte (o. Drucker)	29.92	7.140	65%	4'641	83%	3'852
Telekommunikation	2.75	1.630	0% <sup>2)</sup>	0	0%	0
EE-Bürogeräte	10,62	1.624	20%	325	83% <sup>5)</sup>	270
Kleine Haushaltsgeräte	7.26	3.133	2%	63	50% <sup>6)</sup>	31
Grosse Haushaltsgeräte	63.65	11.738	1%	117	50% <sup>6)</sup>	59
Kabel	88.53	22.193	k.A.		k.A.	
EE-Kleinteile	65.35	4.331	20% <sup>2)</sup>	866	54%	468
E-Werkzeuge	2.26	0.228	2% <sup>3)</sup>	5	50% <sup>6)</sup>	2
Ausgabeautomaten	1.14	0.207	20% <sup>4)</sup>	41	50% <sup>6)</sup>	21
Spielzeug	0.26	0.166	2% <sup>3)</sup>	3	50% <sup>6)</sup>	2
Medizinische Geräte	2.94	0.094	20% <sup>4)</sup>	19	50% <sup>6)</sup>	9
Beleuchtung	2.16	0.062	20% <sup>4)</sup>	12	50% <sup>6)</sup>	6
Überwachungs- und Kontrollinstrumente	0.12	0.062	20% <sup>4)</sup>	12	50%	6
Subtotal IT+Telekomm.	43.3	10.4		4'966		4'122
Subtotal EE-Geräte	144.4	31.3		6'077		5'743
<b>TOTAL EE-Sektor</b>	<b>298.3</b>	<b>57.9</b>	<b>12%</b>	<b>6'943</b>		<b>6'211</b>

Anmerkung: siehe Anmerkung Tabelle 9-2.

Quellen: Vorige Tabelle, Anteil FS-Kunststoffe aus [APME, 2001] und Anteil bromierte FS aus [APME, 1995]

k.A.: keine Angabe

1) Für TV und einige wenige Audiovisuelle-Geräte: 55%. Rest: fast nichts. Unterhaltungselektronik gesamt: 34% (berechnet).

2) [APME, 1995]

3) Annahme: wie kleine Haushaltsgeräte

4) Annahme: wie Bürogeräte

5) Annahme: wie EDV-Geräte und Unterhaltungselektronik

6) Eigene Annahme

Der Anteil der Kunststoffe in EE-Produkten am westeuropäischen Markt für 1995 und 2000 ist besonders für PVC und PE sehr unterschiedlich gross (siehe Tabelle 9-4), da im Jahre 2000 die Stecker, Unterbrecher und Kabel der EE-Geräte nicht mitbetrachtet wurden. PVC wurde hauptsächlich für Kabelumhüllungen verwendet.

Tabelle 9-4: Kunststoffarten im EE-Sektor in Westeuropa 1995/2000 und grobe Schätzung für die Schweiz 1998 [APME, 2001]

KUNSTSTOFFE IN EE-GERÄTEN	West-EU 1995 mit Kabeln u.ä. <sup>1)</sup>	West-EU 2000 ohne Kabeln u.ä. <sup>1)</sup>	West-EU 1995 mit Kabeln u.ä. <sup>1)</sup>	West-EU 2000 ohne Kabeln u.ä. <sup>1)</sup>	Schweiz 1998 ohne Kabeln u.ä. <sup>2)</sup>
	[%]	[%]	[kt]	[kt]	[t]
PE	18.9%	0.5%	403	8	169
PBT_PET	1.1%	1.3%	24	19	401
POM	0.4%	1.8%	8	26	549
PA	5.5%	3.0%	117	45	951
UP	0.8%	3.3%	16	49	1'035
PC	1.9%	3.6%	41	53	1'120
PVC	25.4%	3.6%	541	54	1'141
EP	0.9%	3.7%	19	55	1'162
PUR	6.7%	8.4%	142	125	2'641
PP	11.6%	17.9%	247	266	5'620
PS	13.3%	19.4%	283	287	6'064
ABS-ASA-SAN	13.5%	33.4%	288	496	10'479
<b>Gesamt EE-Geräte</b>	<b>100.0%</b>	<b>100.0%</b>	<b>2'129</b>	<b>1'483</b>	<b>31'332</b>

1) Die Statistik 2000 umfasste EE-Geräte ohne Stecker, Unterbrecher und Kabel, im Gegensatz zur Statistik 1995.

2) Kunststoffzusammensetzung von Westeuropa 2000 zugrundegelegt.

### 9.1.1.3 Flammenschutzmittel

Tabelle 9-5: Absatzmärkte für Flammenschutzmittel [t/a]

Region	Jahr	Einheiten	PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	Summe PBDEs	TBBPA
Asien <sup>1)</sup>	1999	t/a	0	2'000	23'000	25'000	85'900
Amerika <sup>1)</sup>	1999	t/a	8'290	1'375	24'300	33'965	21'600
Europa <sup>1)</sup>	1999	t/a	210	450	7'500	8'160	13'800
Erde <sup>1)</sup>	1999	t/a	8'500	3'825	54'800	67'125	121'300
Erde <sup>2)</sup>	1998	t/a	<10'000	<20'000	>50'000	80'000	>50'000
Erde <sup>3)</sup>	1990/91	t/a	4'000	6'000	30'000	40'000	60'000
Erde <sup>4)</sup>	(1993)	t/a	-	-	-	-	41'000

1) Angaben des BSEF (Bromine Science and Environmental Forum) [Leisewitz et al., 2000] (Bd.I, S.20)

2) Schätzung des BFS-Produzenten „Great Lakes“ zitiert in [Kuhn, 1999]

3) Daten für TBBPA aus [OECD, 1994] (S.125). Alle anderen aus [European Commission, 1996] S.15

4) [IPCS, 1995, S. 35]

Die zukünftige Entwicklung des weltweiten BFS-Marktes laut einem Hersteller (Great Lakes Chemical [Kuhn, 1999]) ist für

- DecaBDPE und TBBPA steigend

- OctaBDPE stark rückgängig
- PentaBDPE konstant

Tabelle 9-6: Anteile von PentaBDPE, OctaBDPE und DecaBDPE an Absatzmärkten aller PBDEs

Region	Jahr	PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	PBDEs
Asien <sup>1)</sup>	1999	0.0%	8.0%	92.0%	100%
Amerika <sup>1)</sup>	1999	24.4%	4.0%	71.5%	100%
Europa <sup>1)</sup>	1999	2.6%	5.5%	91.9%	100%
Erde <sup>1)</sup>	1999	12.7%	5.7%	81.6%	100%
Erde <sup>2)</sup>	1998	12.5%	25.0%	62.5%	100%
Erde <sup>3)</sup>	1991	10.0%	15.0%	75.0%	100%

1) Angaben des BSEF (Bromine Science and Environmental Forum) [Leisewitz et al., 2000] (Bd.I, S.20)

2) Schätzung des BFS-Produzenten „Great Lakes“ zitiert in [Kuhn, 1999]

3) [IPCS, 1994b, S. 34]

Tabelle 9-7: Schätzung der Flammschutzmittelfracht in konsumierten Endprodukten aufgrund der Jahresproduktion von Flammschutzmitteln

Flammschutzmittel und Kunststoffe 1999	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA	Kunststoffe <sup>2)</sup>	
	t/a	t/a	t/a	t/a	Mio t/a	%
Produktion und Gehalt in Endprodukten						
Produktion weltweit 1999 <sup>1)</sup>	8'500	3'825	54'800	121'300	168.000	100%
Konsumierte Endprodukte in Deutschland	448	202	2'890	6'397	8.860	5.27%
Konsumierte Endprodukte in Dänemark	29.1	13.1	188	415	0.575	0.34%
Konsumierte Endprodukte in der Schweiz	39.0	17.5	251	556	0.771	0.46%

Anm.: Die Umrechnung der weltweiten FS-Produktion auf die FS-Fracht in Endprodukten in Deutschland 1999 erfolgte aufgrund des Verhältnisses weltweiter Kunststoffproduktion zu Kunststofffracht in konsumierten Endprodukten in Deutschland.

1) Angaben des BSEF (Bromine Science and Environmental Forum) [Leisewitz et al., 2000] (Bd.I, S.20)

2) Produktion weltweit aus [VKE, 2000] und konsumierte Endprodukte in Deutschland aus [Consultic, 2000]

In Deutschland 1999 wurden etwa 10.2 Mio. t Kunststoffe zu Endprodukten verarbeitet [Consultic, 2000]. Diese in Deutschland produzierten Endprodukte enthielten laut einer Studie des UBA Berlin [Leisewitz et al., 2000] (Bd.I, S.27+31) etwa 1'000 t DecaBDPE und etwa 3'800 t TBBPA.

Im Gegensatz zu den produzierten Endprodukten ist der Kunststoffgehalt in den in Deutschland 1999 konsumierten Endprodukten um etwa 13 % niedriger (etwa 8.9 Mio. t [Consultic, 2000]). Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Flammschutzmittelfracht in den konsumierten Endprodukten höher liegt, als die in den produzierten Endprodukten [Leisewitz et al., 2000] (Bd.I, S.17, 2.Fussnote), da

- die Waren, welche die FS-Fracht dominieren, einen hohen Importanteil (z.B. EE-Geräte, TVs, Automobile) aufweisen,
- und da angenommen werden kann, dass importierte Waren (z.B. aus Asien oder Amerika) im Vergleich zu heimischen Waren im Allgemeinen einen höheren FS-Gehalt haben.

Um eine grobe Schätzung durchzuführen, wird angenommen, dass die Flammenschutzmittelfracht in konsumierten Endprodukten ungefähr gleich hoch ist wie in produzierten Endprodukten. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass bei dieser Annahme die Frachten höchstwahrscheinlich unterschätzt wurden.

Tabelle 9-8: Kunststoffe und BFS in konsumierten Endprodukten in Deutschland ([Consultic, 2000], [Leisewitz et al., 2000] (Bd.I, S.27+31) und umgelegt auf die Schweiz

Kunststoffe und BFS [t/a]	Kunststoffe	DecaBDPE	TBBPA
Deutschland, 1999	8'860'000	1'000	3'800
Umrechnung auf Schweiz, 1999	771'000	87	331

Anm.: Keine Angaben für PentaBDPE und OctaBDPE

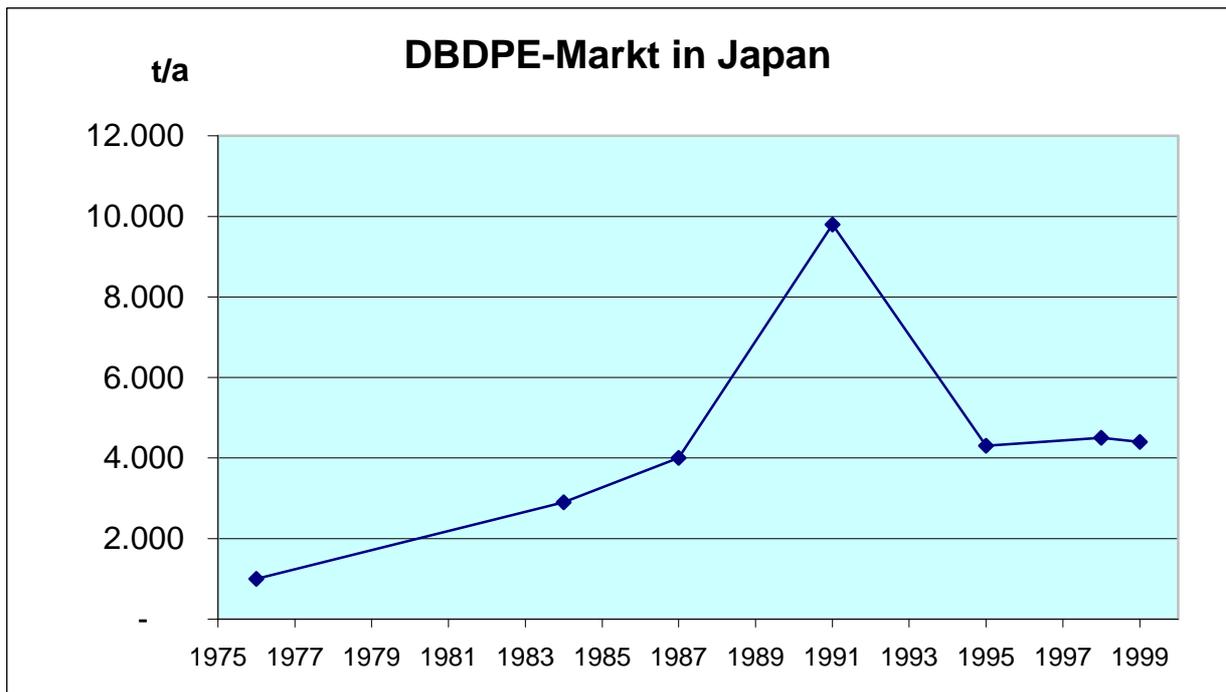
Tabelle 9-9: Flammenschutzmittel in konsumierten Endprodukten in Dänemark ([Danish EPA, 2000, S.88]) und umgelegt auf die Schweiz

FS in konsumierten Endprodukten	PentaBDPE	OctaBDPE	DecaBDPE	PBDEs	TBBPA
	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
Dänemark, 1997, Minimum	3.8	1.7	24	30	180
Dänemark, 1997, Mittelwert	9.5	4.3	61	75	270
Dänemark, 1997, Maximum	15.2	6.8	98	120	360
Schweiz, 1997, Minimum	5.1	2.3	33	40	241
Schweiz, 1997, Mittelwert	12.7	5.7	82	101	362
Schweiz, 1997, Maximum	20.4	9.2	131	161	483

Annahme: Aufteilung der PBDEs in PentaBDPE, OctaBDPE und DecaBDPE aufgrund der Anteile an der Weltproduktion 1999 (siehe Tabelle 9-6)

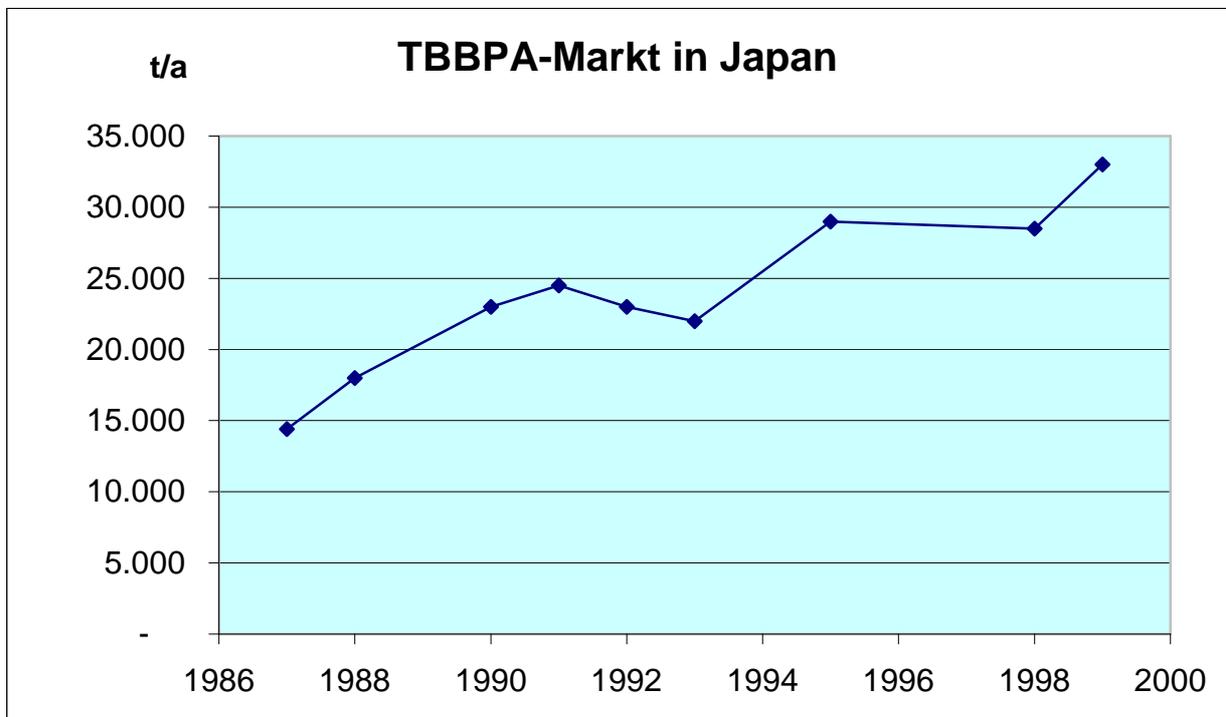
Laut Marktanalysen ist der Weltmarkt für FS generell (jährlich 3.5 – 4.0 % [Davenport, 1999], und für speziell für BFS (jährlich 8.0 % [Danish EPA, 1999]) im Wachsen. Zur Schätzung der bisherigen Entwicklung des Weltmarktes für PentaBDPE, OctaBDPE, DecaBDPE und TBBPA liegen extrem wenig Daten vor, jedoch können aufgrund von Entwicklungen des Marktes in Japan einige Rückschlüsse gezogen werden.

Abbildung 9-1: DecaBDPE-Markt in Japan laut FS-Herstellern und –Händlern



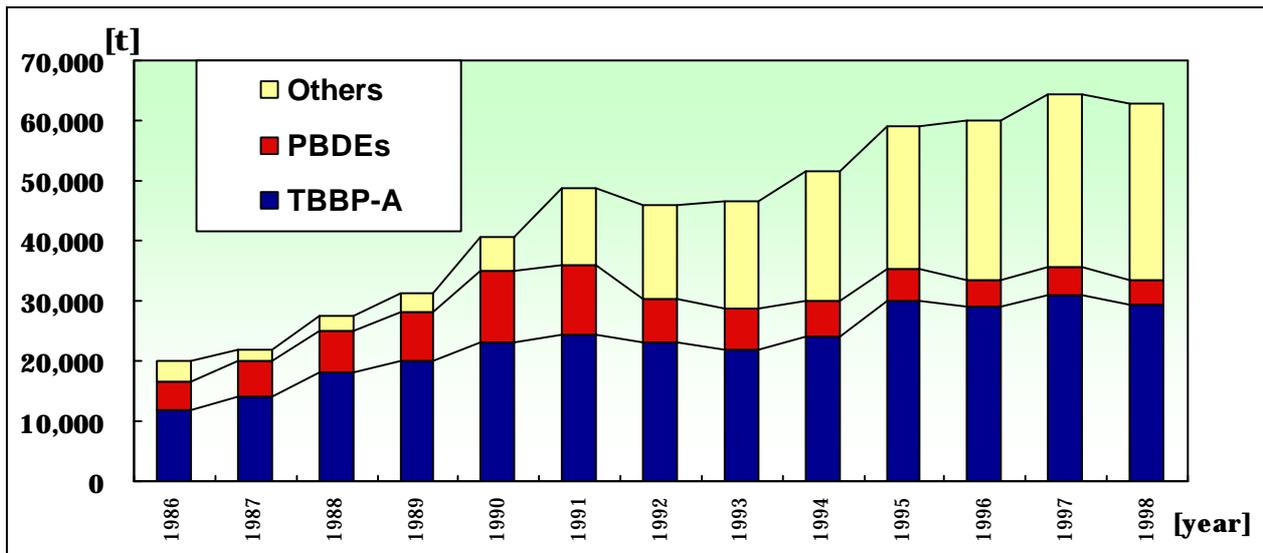
Datenquellen: 1976-1991 [IPCS, 1994b, S.71], 1995-1999 Firma TOSOH [Kuhn, 1999]

Abbildung 9-2: TBBPA-Markt in Japan laut FS-Herstellern und –Händlern



Datenquellen: 1976-1993 [IPCS, 1995, S.35], 1995-1999 Firma TOSOH [Kuhn, 1999]

Abbildung 9-3: Bedarf an organischen bromierten FS in Japan [Sakai et al., 2001]



Die zukünftige Entwicklung des weltweiten BFS-Marktes laut einem Hersteller (Great Lakes Chemical [Kuhn, 1999]) ist für:

- DecaBDPE und TBBPA steigend
- OctaBDPE stark rückgängig
- PentaBDPE konstant

## 9.1.2 Kunststoffrezepturen

Tabelle 9-10: Flammenschutzmittelkonzentrationen in Kunststoffen

	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA	Andere FS	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Quelle
HDPE V2		5.0%			1.6%	3.5%	1
HDPE V0			10.0%			10.0%	1
LDPE V2					6.0%	3.5%	1
LDPE V2		4.9%			1.6%	3.6%	1
PE (Kabel, Baustoff)			20-24%			meist	2
PP					3.5%	2.0%	1
PP V1					27.0%	13.0%	1
PP V2			4.8%			1.6%	2
PP V2				5.2%		1.7%	2
PP V0			24.0%			12.0%	2
PP V1			21.7%			10.9%	2
PP			23.0%			8.0%	4
PVC	4.9%				13.2%		1
PVC			möglich				2
HIPS V1					15.0%	5.0%	1
Impact PS V0		15.0%				5.0%	1
Crystal PS V2					3.0%		1

	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA	Andere FS	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Quelle
PS Schaum V0			13.0%			5.0%	1
PS			12.0%			4.0%	4
PS				15.0%		4.0%	4
HIPS V0			11.0%			4.4%	2
HIPS V0			12.0%			4.0%	3
HIPS V0				17.0%		4.0%	3
HIPS alt			10-12%			3-4%	5
HIPS alt				12-15%		3-4%	5
HIPS V0 neu				17.0%			5
ABS V1					17.0%	5.0%	1
ABS V0		13.0%				5.0%	1
ABS V0		15.4%				5.6%	2
ABS V0				17.0%		6.0%	2
ABS				20.4%		4.0%	3
ABS		20.0%				6.0%	4
ABS				20.0%		4.0%	4
ABS alt		18-22%				4-8%	5
ABS alt				18-22%		4-8%	5
ABS V0 neu		15.4%				0.5-2%	5
ABS V0 neu				19.0%		0.5-2%	5
PC/ABS				selten	meist		5
PPE/HIPS					immer		5
PA6 V0-V1			10.0%			6.0%	1
PA16 V0			10.0%			5.0%	1
Textilbeschichtung			10.0%			5.0%	2
Nylon6 V0			17.5%			6.7%	2
Gesättigter Polyester V0		8.0%				4.0%	1
Ungesättigter Polyester					möglich		2
Polyester + Glasfaser V0			9.0%			4.0%	1
PC V0			5.0%			1.9%	1
PUR Schaum					möglich		2
Polyterephthalate			12.0%			4.0%	4

Anmerkungen: V0, V1, V2 sind Flammschutzklassen nach UL-Tests.

Quellen:

- 1) Kunststoffhandbuch [Gächter & Müller, 1987]
- 2) FS-Hersteller [Dead Sea Bromine, 2001]
- 3) FS-Hersteller [Albemarle, 2001]
- 4) FS-Hersteller [OECD, 1994]
- 5) FS-Hersteller [Leisewitz & Schwarz, 2000]

### 9.1.3 Elektro- und Elektronikgeräte (EE-Geräte)

#### 9.1.3.1 Marktanalysen von EE-Geräten

Anfang 1999 befanden sich in der Schweiz rund 3.8 Mio. Stück Computer, wovon etwa 1.8 Mio. Stück am Arbeitsplatz standen, etwa 0.55 Mio. Stück mobile Geräte waren und der Rest (1.8 Mio. Stück) im Haushalt installiert war [Weiss, 2000].

Abbildung 9-4: Stückzahlen abgesetzter Computer in der Schweiz [Weiss, 2000]

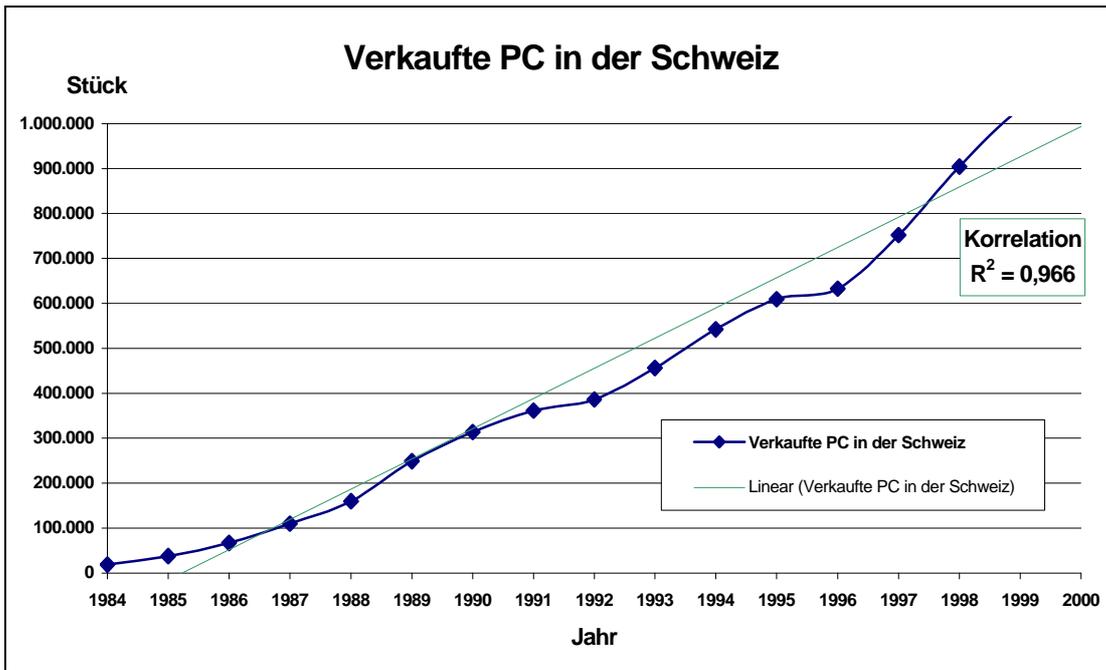
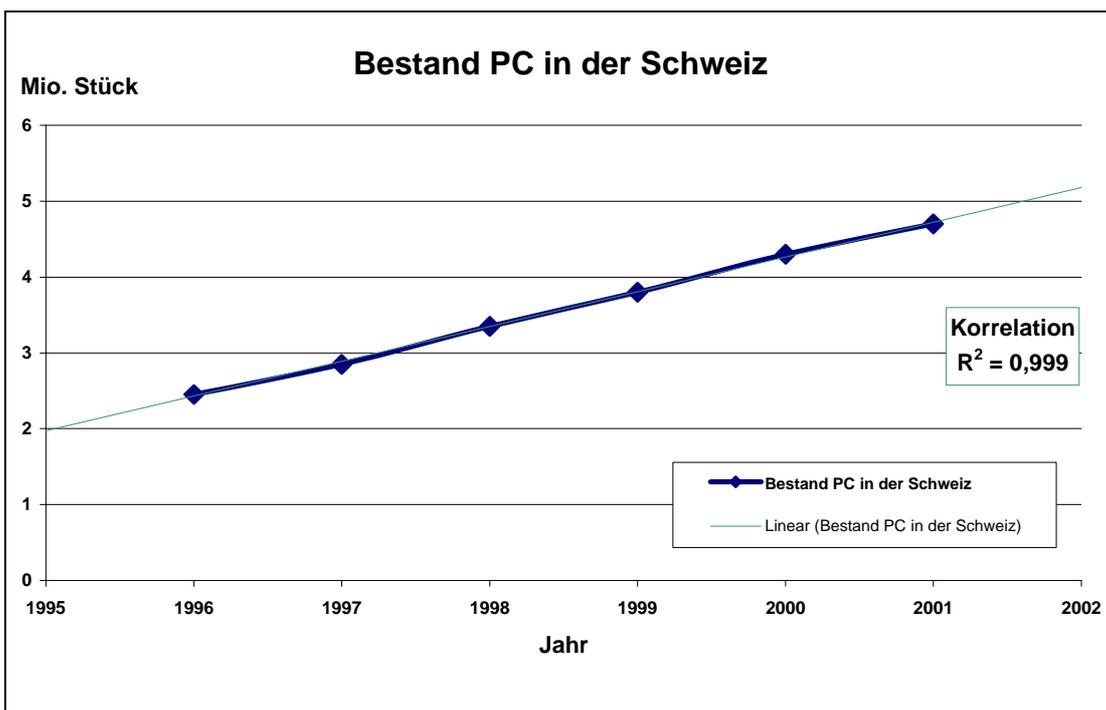


Abbildung 9-5: Stückzahlen abgesetzter Computer in der Schweiz [Weiss, 2000]



Wie die vorigen zwei Abbildungen zeigen, stiegen sowohl Verkaufszahlen wie auch Bestandszahlen von Computern in der Schweiz ungefähr linear an. Die auf den Zeitreihen basierenden Berechnungen ergaben eine Lebenszeit von Computern von etwa 5.9 Jahren, eine gemittelte Verbrauchserhöhung 1997/98 von 10.5 %, eine Entsorgungsmenge 1998 von etwa 390'000 Stück und einen Lagerzuwachs von etwa 510'000 Stück.

Laut Weissbuch [Weiss, 2000] wurden 1998 folgende Stückzahlen an Computer in der Schweiz abgesetzt:

904'000 Total

724'500 Desktop

30'500 Server

149'000 Mobil (Notebooks)

188'500 Heimgeräte

536'000 Bürogeräte

Assemblerer in der Schweiz bauten 1998 rund 0.171 Mio. Stück Computer zusammen.

Tabelle 9-11: Konsumierte EDV-Geräte in der Schweiz 1998

Abgesetzte Geräte [Stück]	Konsum	Konsum	Unterschied
	Schweiz '98	Schweiz '98	
	Dänische Studie [Danish EPA, 1999]	Weissbuch '99 [Weiss, 2000]	[%]
Heimgeräte	166'480	188'500	113.2%
Bürogeräte	403'561	536'000	132.8%
Server	31'452	30'500	97.0%
Notebooks	85'156	149'000	175.0%
Total	686'649	904'000	131.7%

Die Anzahl abgesetzter EE-Geräte in der Schweiz wurde aufgrund Marktanalysen für Dänemark abgeleitet, da entsprechende Daten für die Schweiz nicht vorlagen. Für Computer sind jedoch Schweizer Marktanalysen vorhanden. Diese zeigen, dass die Zahlen von Dänemark für den Schweizer Markt in diesem Bereich um etwa 30 % niedriger liegen, aber die selbe Grössenordnung darstellen. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden die dänischen Werte für EDV-, Telekommunikation-, Büro- und Unterhaltungselektronikgeräte um 30 % erhöht.

Tabelle 9-12: Verbrauchsentwicklung von Produkten in Westeuropa [APME, 1995], [APME, 2001]

Abgesetzte Geräte in Westeuropa [1000 t/a]	1980	1992	1995	1998	2000
Unterhaltungselektronik	428	861	900	<b>910</b>	916
EDV-Geräte (o. Drucker)	27	<b>537</b>	715	<b>1'274</b>	1'647
Kommunikationstechnik	55	98	107	<b>117</b>	124
Bürogeräte	37	327	368	<b>452</b>	508
Kleine Haushaltsgeräte	201	287	305	<b>309</b>	312
Grosse Haushaltsgeräte	1'970	2'426	2'537	<b>2'710</b>	2'826
Kabel	<b>1'607</b>	2'753	3'471	<b>3'770</b>	3'969
EE-Kleinteile	<b>1'374</b>	2'468	2'619	<b>2'783</b>	2'892
Medizinische Geräte	70	125	125	<b>125</b>	125
Subtotal IT+Telekomm.	119	962	1'190	<b>1'843</b>	2'279
Subtotal EE-Geräte	2'788	4'661	5'057	<b>5'898</b>	6'458
<b>TOTAL EE-Sektor</b>	<b>5'769</b>	<b>9'882</b>	<b>11'147</b>	<b>12'450</b>	<b>13'319</b>

Anmerkung: Die Werte des Jahres 1998 wurden berechnet unter Annahme eines linearen Verbrauchsanstieges.

Tabelle 9-13: Lebenszeit von Produkten [APME, 1995]

Lebenszeiten Jahre	Anteile Lebenszeitspannen					Lebenszeit	
	2-5	5-10	10-20	20-40	40-	Mittelwert	Quelle
Unterhaltungselektronik	5%	15%	<b>70%</b>	10%	0%	14.8	berechnet
EDV-Geräte (o. Drucker)	<b>40%</b>	<b>40%</b>	20%	0%	0%	(7.4) <b>5.9</b>	1
Kommunikationstechnik	20%	<b>70%</b>	10%	0%	0%	7.5	berechnet
Bürogeräte	<b>40%</b>	<b>40%</b>	20%	0%	0%	7.4	berechnet
Kleine Haushaltsgeräte	20%	<b>70%</b>	10%	0%	0%	7.5	berechnet
Grosse Haushaltsgeräte	5%	15%	70%	10%	0%	14.8	berechnet
Kabel	5%	20%	<b>50%</b>	20%	5%	17.7	berechnet
EE-Kleinteile	0%	10%	<b>40%</b>	<b>40%</b>	10%	23.8	berechnet
Medizinische Geräte	10%	30%	<b>50%</b>	10%	0%	13.1	berechnet
Baumaterialien						40	2
PKW						13	3
Schienenfahrzeug						35	4

Anmerkung: Berechnete Zellen wurden aufgrund der Anteile an Lebenszeitspannen und dem Mittelwert der Zeitspanne bestimmt. Für die Zeitspanne „40-“ wurde als Mittelwert 50 Jahre angenommen. Datenquellen:

- 1) Aus den Lebenszeitspannen wurden 7.4 Jahre berechnet. Für die weitere Untersuchung wurde jedoch der aus einer Schweizer Marktanalyse [Weiss, 2000] berechnete Wert von 5.9 Jahren verwendet.
- 2) [Arx, 1995]
- 3) [APME, 1999]
- 4) [SBB, 2001]

Tabelle 9-14: Schätzung der Kunststoffe und FS in EE-Produkten bezogen auf Kunststoffmasse

	Kunststoffe <sup>1)</sup>	Flammgeschützte Kunststoffe <sup>2)</sup>	BFS-haltige Kunststoffe <sup>3)</sup>	TBBPA- oder PBDEs-haltige Kunststoffe <sup>4)</sup>	Masse TBBPA+ PBDEs <sup>5)</sup>
<b>Duroplaste</b>	7.70%	6.93%	6.72%	6.72%	1.28%
Thermoplaste	92.30%	15.41%	6.17%	4.62%	0.32%
<b>Summe</b>	<b>100%</b>	<b>22.34%</b>	<b>13.10%</b>	<b>11.35%</b>	<b>1.60%</b>

Anmerkung: Alle Prozentangaben beziehen sich auf die gesamte Kunststoffmasse in EE-Geräten.

- 1) [Leisewitz & Schwarz, 2000] S.120
- 2) Fast Alle Duroplaste (Annahme: 90 %) und ein Sechstel aller Thermoplaste werden flammgeschützt [Leisewitz & Schwarz, 2000] S.121
- 3) Bromierte Kunststoffe: Duroplaste aufgrund Tabellen im Anhang Leiterplatten berechnet (97 % BFS). Thermoplaste (40 %) [Leisewitz & Schwarz, 2000] S.120
- 4) Etwa 75 % aller BFS in Gehäusen sind TBBPA oder PBDEs. Siehe Schätzungen im Anhang Aussengehäuse von EE-Geräten
- 5) Duroplaste: unteren Wert für die meistgebrauchten Lamine (FR4) verwendet (19 %). Thermoplaste (7 %) [Leisewitz & Schwarz, 2000] S.121

### 9.1.3.2 Leiterplatten

Tabelle 9-15: Internationaler Laminatmarkt 1998 (Rohdaten aus [Leisewitz &amp; Schwarz, 2000] S. 145)

Laminatmarkt 1998 Flächen und Massen	FR4	High-Perform	FR2	Composites	Summe
<b>USA [Mio. m<sup>2</sup>]</b>	31	3.4	0.0	3.1	38
<b>SO-Asien [Mio. m<sup>2</sup>]</b>	46	0.2	50	4.7	101
<b>Japan [Mio. m<sup>2</sup>]</b>	19	2.3	11	8.1	41
<b>EU (+ UdSSR) [Mio. m<sup>2</sup>]</b>	25	0.6	6.9	3.3	35
<b>Summe [Mio. m<sup>2</sup>]</b>	121	6.5	68	19	215
<b>Flächenanteile [%]</b>	56%	3.0%	32%	9.0%	100%
Flächengewicht [kg/m <sup>2</sup> ]	3.0	2.0	2.0	2.0	-
<b>Gewicht [Mio. t]</b>	<b>362</b>	<b>13</b>	<b>136</b>	<b>38</b>	<b>550</b>
Gewicht [%]	66%	2.4%	25%	7.0%	100%

In SO-Asien werden etwa 50 % aller FR4-Lamine und über 70 % aller FR2-Lamine hergestellt.

### 9.1.3.3 Aussengehäuse von EE-Geräten

Bei Gehäusewerkstoffen herrschen laut vorliegenden Publikationen die grössten Unsicherheiten, welche Geräte (oder Anteil der Geräte) mit Flammenschutz ausgestattet sind und welche Flammenschutzmittel eingesetzt werden.

Die fundiertesten Informationen betreffen Geräte, deren Gehäuse nicht flammgeschützt wird (Kommunikationstechnik, EE-Haushaltsgeräte). Jedoch ist auch hier eine gewisse Unsicherheit

für Importgeräte aus dem aussereuropäischen Raum vorhanden und ebenfalls können für Altgeräte nur wenig gesicherte Aussagen getroffen werden.

Die Gewichtsanteile der Gehäuse am Gesamtgewicht des EE-Gerätes sind in der Literatur z.T. recht unterschiedlich dokumentiert. Die deutsche Studie [Leisewitz & Schwarz, 2000] geht für Computer (Rechner+Monitor+Tastatur) von einem Gewichtsanteil des Gehäuses von 18 % und einem durchschnittlichen Gesamtgewicht von 30.5 kg aus. Also 5.5 kg Gehäusekunststoffe. Bei der Stoffflussanalyse für Dänemark [Danish EPA, 1999] werden jedoch lediglich 1.7 kg für ein Gehäuse in Rechnung gestellt.

Tabelle 9-16: Kunststoffgehäuse von EE-Geräten in der Schweiz 1999 aus [Leisewitz & Schwarz, 2000]

	Konsum DE	Konsum CH	Stück- gewicht	Kunststoff- anteil	Gehäuse- anteil	Kon- sum	Kunst- stoff	Ge- häuse
	Mio. Stk.	Mio. Stk.	kg/Stk.	%	%	t	t	t
Computer	7.5	0.65	13.5	22%	15%	<b>8'807</b>	1'937	1'321
Monitor	7.5	0.65	16	22%	20%	<b>10'438</b>	2'296	2'088
Tastatur	18.5	1.61	1 <sup>1)</sup>	70% <sup>1)</sup>	50% <sup>1)</sup>	<b>1'609</b>	1'126	805
Inkjet-Drucker	5.74	0.50	6.5	18.5%	15%	<b>3'245</b>	600	487
Laserdrucker	2.46	0.21	10	18.5%	15%	<b>2'140</b>	396	321
Scanner	1.9	0.17	5 <sup>1)</sup>	15% <sup>1)</sup>	12% <sup>1)</sup>	<b>826</b>	124	99
Kopierer	0.3	0.03	35	20%	15%	<b>913</b>	183	137
Fax	1.3	0.11	10 <sup>2)</sup>	18.5% <sup>2)</sup>	15% <sup>2)</sup>	<b>1'131</b>	209	170
TV	5.7	0.50	25	20%	15% <sup>3)</sup>	<b>12'395</b>	2'479	1'859 <sup>3)</sup>
EE-Bürogeräte <sup>4)</sup>	10.4	0.90	7.9	18.3%	14.7%	<b>7'125</b>	1'303	1'044
EE-Schrott				22%	15%			

Quellen:

- 1) Eigene Annahme
- 2) Annahme: Werte wie für Laserdrucker
- 3) Hiervon ist meist nur die Hälfte (Rückwand) flammgeschützt
- 4) Summe aus Drucker, Scanner und Kopierer

Ausgehend von der deutschen Studie [Leisewitz & Schwarz, 2000] wurden die Kunststoff- und FS-Frachten für die Schweiz berechnet (siehe Tabelle 9-17). Dass im Vergleich zum Jahr 1990 im Jahre 1999 nur mehr etwa die Hälfte der Gehäuse der betrachteten Geräte (EDV, Office, TV) mit bromierten Flammenschutzmitteln versehen wurden, ist ein wichtiges Ergebnis dieser Berechnungen.

Tabelle 9-17: Aussengehäuse mit bromiertem Flammenschutz von einigen EE-Geräten (abgeleitet aus [Leisewitz & Schwarz, 2000] S. 262)

Bromierte Flammenschutzmittel in Kunststoffgehäusen Schweiz 1999	Anteil bromierte Gehäuse 1990	Anteil bromierte Gehäuse 1999	Gehäuse 1999	Bromierte Gehäuse 1999	Abnahme des Anteils 1999/1990
	%	%	t	t	%
Monitore	50%	25%	2'088	522	50%
Tastatur	40% <sup>1)</sup>	10%	805	80	25%
Tintenstrahldrucker	33%	33%	487	161	100%
Laserdrucker	80%	50%	321	160	63%
Kopiergeräte	80%	50%	137	68	63%
TV-Geräte (Rückenwand)	50%	10%	930	93	20%
Summe			4'766	1'085	46%

1) Eigene Annahme

Tabelle 9-18: Schätzung des Marktanteils und der Konzentration der eingesetzten FS in Gehäusekunststoffen

	OctaBDPE				DecaBDPE				TBBPA			
	Neuprodukt		Altprodukt		Neuprodukt		Altprodukt		Neuprodukt		Altprodukt	
	[%]	[g/kg]										
ABS	10	154	50	200	0		0		10	190	20	200
PC/ABS	0		0		0		0		0		10	200
HIPS	0		0		10	115	30	110	10	170	10	135
PPE/HIPS	0		0		0		10	110	0		10	135

FS-Hersteller und deutsche Studie [Leisewitz & Schwarz, 2000]

Tabelle 9-19: Analysen von Elektro(nik)geräten [Leisewitz & Schwarz, 2000]

Anteile der Geräte [%]	Kunststoff				Flammenschutzmittel							
	ABS	HIPS	andere	Total	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA	BFS total	Andere FS	Ohne FS	Total	
PC-Monitor-Gehäuse 1990 (78 Stück)	44%	18%	38%	100%	10.3%	2.6%	12.8%	43.5%	34.6%	21.9% <sup>1)</sup>	100%	
TV-Gehäuse 1990 (108 Stück)	25%	69%	26%	100%	16.7%	17.6%	0%	48%	7.4%	44.4% <sup>1)</sup>	100%	

Anmerkung: OctaBDPE ist nur in ABS vorhanden, DecaBDPE ist meist nur in HIPS vorhanden.

1) Wert möglicherweise niedriger, da PPE/HIPS-Gehäuse nicht auf organischen Phosphorflammenschutz untersucht wurden.

### 9.1.4 Verkehrsmittel

Dieser Abschnitt enthält die Rohdaten zur Bestimmung der Frachten und Konzentrationen für diese Produktgruppe.

Tabelle 9-20: Bestand und Neuzulassungen fabriksneuer Fahrzeuge in Österreich [Statistik Österreich, 1999]

Stück Strassenfahrzeuge	Mofa/Moped	Motorrad	PKW	LKW
Bestand 1997	362'953	212'791	3'782'544	803'955
Zulassungen 1998	20'419	25'147	295'865	44'085

Anmerkung: Zulassungen betreffen nur fabriksneue Fahrzeuge. LKW-Kategorie umfasst auch Busse und sonstige Fahrzeuge. Die Umrechnung auf die Schweiz erfolgte mittels Faktor 0.882 aufgrund von Bevölkerungszahlen.

In Dänemark wurde über die Hälfte der 1997 konsumierten PKW ausserhalb Europas gefertigt [Danish EPA, 1999]. Es ist zu vermuten, dass durch diese Importfahrzeuge wesentlich mehr PBDEs in Verkehr gebracht werden als durch die in Europa hergestellten Fahrzeuge.

Der durchschnittliche Gewichtsanteil von Kunststoffen in PKW ist leicht steigend und liegt derzeit (1998) europaweit bei etwa 9.3 % des Gesamtgewichts. Etwas mehr als 10 % hiervon befindet sich in EE-Kleinteilen (elektrischen Komponenten und Beleuchtung) [APME, 1999].

Für LKW wurde dieselbe Kunststoffmasse wie für PKW angenommen. Für Motorräder und Mopeds wurde mit dem Kunststoffgewichtsanteil von PKW gerechnet.

Tabelle 9-21: Kunststoff- und FS-Gehalt von PKW [Danish EPA, 1999]

PKW	Einheit	Minimum	Mittel	Maximum
Kunststoff im Auto <sup>1)</sup>	[kg]	110	110	110
BFS im Auto <sup>2)</sup>	[kg]	0.175	0.275	0.375
BFS pro Kunststoff	[g/kg]	1.591	2.500	3.409

Anmerkung: Für Altfahrzeuge wurden die Flammschutzmittelgehalte doppelt so hoch angenommen.

BFS: Bromierte Flammschutzmittel

1) [APME, 1999] Kunststoffteile ohne EE-Kleinteile (Elektronik, Beleuchtung)

2) [Danish EPA, 1999] S.83+84

Für Dänemark wird, bezogen auf alle eingesetzten BFS, der Anteil für TBBPA und PBDEs mit jeweils etwa einem Viertel angegeben. Für die Schweiz wird mit ähnlichen Anteilen gerechnet. PBDEs werden aufgrund der weltweiten Jahresproduktion auf Penta-, Octa- und DecaBDPE aufgeteilt, wie folgende Tabelle zeigt.

Tabelle 9-22: Anteile der untersuchten BFS an allen eingesetzten BFS in PKW

Flammschutzmittel	Neufahrzeug	Altfahrzeug (1990)
PentaBDPE-FS	3%	3%
OctaBDPE-FS	2%	5%
DecaBDPE-FS	25%	35%
TBBPA	25%	15%
BFS gesamt	100%	100%

BFS: Bromierte Flammschutzmittel

Die Anteile der FS beziehen sich auf die Masse der kommerziellen FS-Produkte und nicht auf die Stoffe.

Die Schweizer Bahn (SBB) gibt eine durchschnittliche Lebenszeit von Schienenfahrzeugen von 20-50 Jahren an. Eine genaue Altersverteilung der in Verwendung stehenden Waggone befindet sich auf der Internetseite der SBB.

Tabelle 9-23: Bestand von Schienenfahrzeugen in der Schweiz [SBB, 2001]

Stück Schienenfahrzeuge	Triebfahrzeuge	P-Wagons
Bestand 1998	2'032	3'993

## 9.1.5 Baumaterialien und Textilien

Dieser Abschnitt enthält die Rohdaten zur Bestimmung der Frachten und Konzentrationen für diese Produktgruppe.

Tabelle 9-24: Verbrauch und Flammschutz von EPS und XPS in Dänemark [Danish EPA, 1999] (S.80)

Dänemark, 1997	Dichte	Verbrauch		Anteil flammgeschützt	Konzentration HBCD
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /a]	[t/a]		
EPS	18	250'000	4'500	5 %	0.75 %
XPS	40	40'000	1'600	80 %	1.5 %

Umgerechnet auf die Schweiz würde dies eine Verbrauchsmenge von etwa 8'200 t/a Polystyrolschaum (EPS und XPS) ergeben. Durch klimatische Unterschiede kann diese Menge jedoch weitaus höher angenommen werden.

Tabelle 9-25: EPS, XPS und PUR in Deutschland [Leisewitz et al., 2000] (S.93+96f)

Deutsch-land	Dichte	Verbrauch 1993		Verbrauch 1998		Verbrauchs- anstieg	Lager 1967-1997
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[Mio. m <sup>3</sup> /a]	[1'000 t/a]	[Mio. m <sup>3</sup> /a]	[1'000 t/a]	1993-98	[Mio. t]
EPS	15-30	7.354	165	9.5	214	129%	2.40
XPS	20-60	0.766	31	1.098	44	143%	0.46
PUR	15-100	1.134	68	1.5	90	132%	1.00

Anmerkungen: Ohne PUR-Montageschaum. Derzeitiger Anteil von PUR-Montageschaum am PUR-Gesamtverbrauch ist 20.9% [Leisewitz et al., 2000] (S.85): Anteile EPS, XPS und PUR am gewichtsbezogenen Verbrauch sind 1993 und 1998 etwa gleich hoch: EPS 62 %, XPS 12 % und PUR 26 % (ohne Montageschaum). Diese Verhältnisse wurden zur Bestimmung der EPS- und XPS-Lager herangezogen. Das PUR-Lager (ohne Montageschaum) beträgt etwa 1.0 Mio. t [Leisewitz et al., 2000] (S.93+96f).

Tabelle 9-26: Verbrauch von PE, PP und PVC für Bauprodukte in Deutschland 1999 [VKE, 1999]

Deutschland 1999	Verbrauch für Bau- produkte 1999	Verbrauch für Folien und Beläge 1999	Lager 1967-1997
	[1'000 t/a]	[1'000 t/a]	[1'000 t]
PE	352	70	780
PP	76	3.8	42
PVC	1'076	32	360

Anmerkungen: Verbrauch von Kunststoffen der kunststoffverarbeitenden Industrie für die Produktion von Baumaterialien. Da für den Baubereich etwa die selbe Menge Kunststoffe (von der Industrie) verarbeitet wie auch (vom Konsumenten) verbraucht wird, kann davon ausgegangen werden, dass obige Daten als grobe Näherung für die konsumierten Mengen verwendet werden können. Der Anteil Folien und Beläge an den Bauprodukten wurde aufgrund westeuropäischer Verhältnisse geschätzt [VKE, 1999]. Das Lager wurde aufgrund von Analogien im Bereich der Dämmstoffe (PUR) geschätzt (siehe Tabelle 9-25).

Folgende Tabelle zeigt die Berechnung des TBBPA-Verbrauchs für Epoxidharze und Polycarbonate. Die aufgrund mehrerer Annahmen berechneten Mengen erscheinen ungewöhnlich hoch. Daher werden die Zahlen im Bericht nicht verwendet, und es wird darauf hingewiesen, dass exakteres Datenmaterial notwendig ist, um diesen Bereich quantitativ abzuschätzen.

Tabelle 9-27: Epoxidharze und Polycarbonate im Baubereich

	Verbrauch Westeuropa 1990	Verbrauch Schweiz 1990	Verbrauch Schweiz 1998	TBBPA im Verbrauch CH 1998	Lager Epoxid- harze+ Polycar- bonate
	[1'000 t/a]	[1'000 t/a]	[1'000 t/a]	[t/a]	[1'000 t]
Epoxidharze	120	4.68	6.1	116	68
Polycarbonate	35	1.37	1.8	34	20
Total	155	6.05	7.9	150	88

Anmerkungen: Verbrauchsdaten Westeuropa [Arx, 1995] und Annahme, dass 10% aller Harze und PC mit 19 M% TBBPA versetzt werden (siehe auch Kapitel 5.1.5.3). Umrechnung Westeuropa auf Schweiz mittels Einwohnerzahlen. Umrechnung 1990 auf 1998 aufgrund der Erhöhung des gesamten Kunststoffverbrauchs im Bausektor um 31 % (bezogen auf 1990) [VKE, 1999]. Das Lager wurde aufgrund von Analogien im Bereich der Dämmstoffe (PUR) geschätzt (siehe Tabelle 9-25).

## 9.1.6 Zusammenfassung des Datenmaterials für Produkte

Tabelle 9-28: Stückgewicht, Bauteilgewicht und Leiterplattenfläche von Produkten

KENNZAHLEN VON PRODUKTEN	Stückgewicht		Leiterplatte		Gehäuse		Kleinteile <sup>9)</sup> [kg/Stk.]
	[kg/Stk.]	Quelle	[cm <sup>2</sup> /Stk.]	Quelle	[kg/Stk.]	Quelle	
<b>EDV- und Büroelektronik</b>							
Computer+Monitore (pHH)	30.5	3	2'700	2	5.49	3	0.92
Computer+Monitore (Büro)	30.5	3	2'700	2	5.49	3	0.92
Server	30.5	3	2'700	2	5.49	3	0.92
Notebook	3.5	1	1'000	2	0.63	3	0.11
Laserprinter	10.0	3	750	2	1.50	3	0.30
Tintenstrahldrucker	6.5	3	750	2	0.98	3	0.20
Kopiergeräte	35.0	3	1'000	2	5.25	3	1.05
Rechenmaschinen	0.3	1	100	2	0.09	7	0.01
<b>Kommunikationstechnik</b>							
Telefonapparate	1.0	1	100	2	0.44	4	0.03
Mobiltelefone	1.0	1	50	2	0.44	4	0.03
Faxgeräte	6.0	1	1'000	2	0.90	3	0.18
<b>Unterhaltungselektronik</b>							
CD-Player	2.0	1	650	2	0.36	4	0.06
Amplifier (Verstärker)	8.8	1	650	2	1.584	4	0.26
Receiver (Radiostandgeräte)	5.0	1	650	2	0.9	4	0.15
Tapedeck+Magnetbandgeräte	1.4	1	650	2	0.252	4	0.04
Plattenspieler	4.5	1	0	2	0.81	4	0.14
Portable Hifi-Geräte	0.5	1	300	2	0.09	4	0.02
TV - Bildschirmgeräte	25.0	3	1'200	2	4.5	6	0.75
Videorecorder	6.0	1	850	2	1.08	4	0.18
Videokameras	2.5	1	500	2	0.45	4	0.08
Fotokameras	0.7	1	35	2	0.126	4	0.02

KENNZAHLEN VON PRODUKTEN	Stückgewicht		Leiterplatte		Gehäuse		Kleinteile <sup>9)</sup> [kg/Stk.]
	[kg/Stk.]	Quelle	[cm <sup>2</sup> /Stk.]	Quelle	[kg/Stk.]	Quelle	
Elektrische Spielzeuge	1.0	7	150	2	0.49	4	0.03
Elektrische Musikinstrumente	4.0	1	900	2	0.72	4	0.12
<b>Haushaltgeräte - klein</b>							
Haushaltkleingeräte	4.5	1	0	2	1.44	4	0.14
Elektrowärmegeräte	5.0	1	0	2	1.6	4	0.15
Waagen	2.0	7	50	2	0.64	4	0.06
Uhren Wecker	0.2	1	6	2	0.064	4	0.01
<b>Haushaltgeräte - gross</b>							
Wäschetrockner	50.0	1	0	2	7	4	1.00
Haushaltkühlgeräte	40.0	1	0	2	5.6	4	0.80
Tiefkühlgeräte	74.3	1	0	2	10.402	4	1.49
Waschmaschinen	80.0	1	200	7	11.2	4	1.60
Nähmaschinen	8.0	1	50	2	1.12	4	0.16
Staubsauger	6.4	1	0	2	0.896	4	0.13
Geschirrspüler	47.0	1	200	7	6.58	4	0.94
Espressomaschinen	5.0	1	50	7	0.7	4	0.10
Mikrowellengeräte	18.0	1	50	2	2.52	4	0.36
Ofen, Kochherde, Kochplatten	55.0	1	0	2	7.7	4	1.10
Klimageräte, Ventilatoren	0.8	1	0	2	0.112	4	0.02
<b>Spezialgeräte</b>							
Prozesskontrollsysteme	1.0	7	1'000	2	0.4	4	0.02
Messgeräte (Analysegeräte)	1.5	1	1'500	2	0.036	4	0.03
Laboreinrichtungen	30.0	1	500	2	0.72	4	0.60
Lebensrettungseinrichtungen	5.0	7	1'000	2	0.12	4	0.10
Röntgeneinrichtungen	50.0	7	1'000	2	1.2	4	1.00
Optische Geräte	50.0	7	1'000	2	1.2	4	1.00
Elektronische Schliessfächer	50.0	7	75	2	1.2	7	1.00
Verkaufsautomaten	300.0	7	1'000	2	42	4	6.00
Elektrowerkzeuge	5.0	7	0	2	0.38	4	0.10
<b>Verkehrsmittel</b>							
PKW	1'200.0	1	500	2	111.6	5	11.16
Autoradios	1.8	1	200	2	0	7	0.00
LKW	3'500.0	1	400	7	111.6	8	11.16
Motorräder	150.0	1	300	7	13.95	8	1.40
Mofa/Moped	78.0	1	250	7	7.254	8	0.73
Eisenbahnen (Lokomotiven)	25'000	1	5'000	7	450	7	45.00
Eisenbahnen (Personenwagen)	10'000	1	500	7	450	3	45.00
Flugzeuge >15t	50'000	1	50'000	7	2'250	7	225.00
<b>EE-Kleinteile</b>					[g/kg]		
Stecker, Schalter, u.ä.			0	2	66	4	
Beleuchtung			0	2	32	4	
Kabel			0	2	251	4	

Quellen:

- 1) [EZV, 2000]
- 2) [Danish EPA, 1999]

- 3) [Leisewitz & Schwarz, 2000]
- 4) [APME, 1995], [APME, 2001]
- 5) [APME, 1999]
- 6) [Behrendt et al., 1998]
- 7) Eigene Annahme
- 8) Eigene Annahme: Anteil bzw. Fracht wie PKW
- 9) Siehe Kapitel 5.1.3.3: Anteil am Gehäusegewicht von 10 % für Verkehrsmittel und Ant. am Gesamtgew. von 2 % für gr. Haushalts- und Spezialgeräte und 3 % für den Rest. 10 % der „Gehäuse“-Masse

Tabelle 9-29: FS-Konzentrationen der Fertigprodukte

FLAMMSCHUTZMITTEL IN PRODUKTEN [g / kg]	PentaBDPE		OctaBDPE		DecaBDPE		TBBPA	
	Neu	Alt	Neu	Alt	Neu	Alt	Neu	Alt
	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
<b>EDV- und Büroelektronik</b>								
Computer+Monitore (pHH)	0.00	0.00	0.17	1.91	1.80	2.74	10.09	10.36
Computer+Monitore (Büro)	0.00	0.00	0.17	1.91	1.80	2.74	10.09	10.36
Server	0.00	0.00	0.17	1.91	1.80	2.74	10.09	10.36
Notebooks	0.00	0.00	0.08	1.91	0.96	2.94	23.57	20.42
Laserprinter	0.00	0.00	0.23	3.14	3.34	4.05	9.98	7.28
Tintenstrahldrucker	0.00	0.00	0.16	1.10	1.65	1.62	10.61	9.33
Kopiergeräte	0.00	0.00	0.23	3.14	3.29	4.00	7.61	4.91
Rechenmaschinen	0.00	0.18	0.08	0.48	1.71	2.45	4.74	4.38
<b>Kommunikationstechnik</b>								
Telefonapparate	0.00	0.00	0.077	0.077	0.775	0.775	5.550	5.550
Mobiltelefone	0.00	0.00	0.077	0.077	0.725	0.725	3.000	3.000
Faxgeräte	0.00	0.00	0.234	3.137	3.429	4.142	14.650	11.950
<b>Unterhaltungselektronik</b>								
CD-Player	0.00	0.173	0.086	0.260	1.45	1.96	4.59	4.03
Amplifier (Verstärker)	0.00	0.039	0.086	0.260	0.93	1.12	1.79	1.68
Receiver (Radiostandgeräte)	0.00	0.069	0.086	0.260	1.05	1.31	2.41	2.21
Tapedeck+Magnetbandgeräte	0.00	0.247	0.086	0.260	1.74	2.42	6.14	5.34
Plattenspieler	0.00	0.000	0.077	0.077	0.68	0.68	0.45	0.45
Portable Hifi-Geräte	0.00	0.319	0.086	0.260	2.03	2.88	7.66	6.61
TV - Bildschirmgeräte	0.00	0.025	0.077	2.525	1.34	4.80	2.57	2.11
Videorecorder	0.00	0.075	0.086	0.260	1.07	1.35	2.54	2.32
Videokameras	0.00	0.106	0.086	0.260	1.19	1.54	3.20	2.86
Fotokameras	0.00	0.027	0.086	0.077	0.88	0.84	1.52	0.92
Elektrische Spielzeuge	0.00	0.000	0.077	0.077	0.83	0.83	8.10	8.10
Elektrische Musikinstrumente	0.00	0.000	0.077	0.077	0.90	0.90	11.93	11.93
<b>Haushaltgeräte - klein</b>								
Haushaltkleingeräte	0.00	0.00	0.077	0.077	0.675	0.675	0.450	0.450
Elektrowärmegeräte	0.00	0.00	0.077	0.077	0.675	0.675	0.450	0.450
Waagen	0.00	0.00	0.077	0.077	0.700	0.700	1.725	1.725
Uhren Wecker	0.00	0.00	0.077	0.077	0.705	0.705	1.980	1.980
<b>Haushaltgeräte - gross</b>								
Wäschetrockner	0.000	0.0000	0.051	0.051	0.45	0.45	0.30	0.30
Haushaltkühlgeräte	0.000	0.0000	0.051	0.051	0.45	0.45	0.30	0.30

FLAMMSCHUTZMITTEL IN PRODUKTEN [g / kg]	PentaBDPE		OctaBDPE		DecaBDPE		TBBPA	
	Neu	Alt	Neu	Alt	Neu	Alt	Neu	Alt
	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
Tiefkühlgeräte	0.000	0.0000	0.051	0.051	0.45	0.45	0.30	0.30
Waschmaschinen	0.000	0.0013	0.051	0.051	0.46	0.46	0.33	0.32
Nähmaschinen	0.000	0.0033	0.051	0.051	0.46	0.47	0.37	0.36
Staubsauger	0.000	0.0000	0.051	0.051	0.45	0.45	0.30	0.30
Geschirrspüler	0.000	0.0023	0.051	0.051	0.46	0.46	0.35	0.34
Espressomaschinen	0.000	0.0053	0.051	0.051	0.47	0.48	0.41	0.39
Mikrowellengeräte	0.000	0.0015	0.051	0.051	0.46	0.46	0.33	0.33
Ofen, Kochherde, Kochplatten	0.000	0.0000	0.051	0.051	0.45	0.45	0.30	0.30
Klimageräte, Ventilatoren	0.000	0.0000	0.051	0.051	0.45	0.45	0.30	0.30
<b>Spezialgeräte</b>								
Prozesskontrollsysteme	0.00	0.00	0.051	0.051	1.45	1.45	51.30	51.30
Messgeräte (Analysegeräte)	0.00	0.00	0.051	0.051	1.45	1.45	51.30	51.30
Laboreinrichtungen	0.00	0.00	0.051	0.051	0.47	0.47	1.15	1.15
Lebensrettungseinrichtungen	0.00	0.00	0.051	0.051	0.65	0.65	10.50	10.50
Röntgeneinrichtungen	0.00	0.00	0.051	0.051	0.47	0.47	1.32	1.32
Optische Geräte	0.00	0.00	0.051	0.051	0.47	0.47	1.32	1.32
Elektronische Schliessfächer	0.00	0.00	0.051	0.051	0.45	0.45	0.38	0.38
Verkaufsautomaten	0.00	0.00	0.051	0.051	0.45	0.45	0.47	0.47
Elektrowerkzeuge	0.00	0.00	0.051	0.051	0.45	0.45	0.30	0.30
<b>EE-Kleinteile</b>								
Stecker, Schalter, u.ä.	0.00	0.00	0.018	0.101	0.20	1.29	0.20	0.50
Beleuchtung	0.00	0.00	0.009	0.049	0.15	0.62	0.10	0.24
Kabel	0.00	0.00	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>Verkehrsmittel</b>								
PKW	0.004	0.008	0.025	0.032	0.27	0.37	0.22	0.23
Autoradios	0.000	0.059	0.000	0.000	0.23	0.37	1.24	1.04
LKW	0.001	0.003	0.009	0.011	0.09	0.13	0.07	0.08
Motorräder	0.004	0.008	0.025	0.032	0.27	0.37	0.30	0.31
Mofa/Moped	0.004	0.008	0.025	0.032	0.27	0.38	0.36	0.37
Eisenbahnen (Lokomotiven)	0.000	0.027	0.005	0.005	0.12	0.81	0.05	0.08
Eisenbahnen (Personenwagen)	0.000	0.066	0.011	0.011	0.29	2.01	0.09	0.18
Flugzeuge >15 t	0.000	0.066	0.011	0.011	0.29	2.01	0.14	0.23
<b>Baumaterialien und Textilien</b>								
EPS-Schaum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	0.0
XPS-Schaum	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	16.0	0.0	0.0
PUR-Schaum	0.00	6.49	0.00	0.00	0.0	0.0	0.0	14.7
PE-Schaum	0.00	0.00	0.00	0.00	10.0	0.0	0.0	0.0
PE-Folie	0.00	0.00	0.00	1.70	10.0	20.0	0.0	0.0
PP-Folie	0.00	0.00	0.00	0.00	10.0	20.0	5.2	5.2
PVC-Folie	0.00	1.45	0.00	0.00	2.5	5.0	0.0	0.0
Epoxidharz	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	2.0	2.0
Polycarbonat	0.00	0.00	0.00	0.00	0.0	0.0	2.0	2.0
Textilien und Polsterungen	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

n.b. nicht bestimmt

## 9.1.7 Frachten und Lager im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“

Übersicht:

- Prozess „Produktion“: Frachten von Fertigprodukten
- Prozess „Handel“: Frachten von Import- und Export Fertigprodukten
- Prozess „Konsum“: Frachten von konsumierten Produkten und Siedlungsabfällen und Lager von Produkten.

### 9.1.7.1 Prozess „Produktion“

Tabelle 9-30: Güter- und Stofffrachten von produzierten Fertigprodukten - Detail (CH, 1998)

PRODUZIERTE PRODUKTE	Güterfracht	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA
Schweiz, 1998	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
<b>EDV- und Büroelektronik</b>	<b>38.3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>12</b>	<b>301</b>
Computer+Monitore (pHH)	1.2	0	0.0	0.2	11.9
Computer+Monitore (Büro)	3.5	0	0.1	0.6	35.7
Server	0.0	0	0.0	0.0	0.2
Notebooks	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Laserprinter	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Tintenstrahldrucker	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Kopiergeräte	32.8	0	0.8	10.8	249.8
Rechenmaschinen	0.8	0	0.0	0.1	3.7
<b>Kommunikationstechnik</b>	<b>2.5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>13</b>
Telefonapparate	2.2	0	0.0	0.2	12.2
Mobiltelefone	0.3	0	0.0	0.0	0.8
Faxgeräte	0.0	0	0.0	0.0	0.0
<b>Unterhaltungselektronik</b>	<b>4.6</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>15</b>
CD-Player	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Amplifier (Verstärker)	0.1	0	0.0	0.1	0.2
Receiver (Radiostandgeräte)	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Tapedeck+Magnetbandgeräte	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Plattenspieler	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Portable Hifi-Geräte	0.3	0	0.0	0.7	2.6
TV - Bildschirmgeräte	2.5	0	0.0	0.3	6.5
Videorecorder	1.4	0	0.1	1.5	3.6
Videokameras	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Fotokameras	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Elektrische Spielzeuge	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Elektrische Musikinstrumente	0.2	0	0.0	0.2	2.6
<b>Haushaltgeräte - klein</b>	<b>10.4</b>	<b>0</b>	<b>0.8</b>	<b>7.0</b>	<b>6.4</b>
Haushaltkleingeräte	9.1	0	0.7	6.2	4.1
Elektrowärmegeräte	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Waagen	0.7	0	0.1	0.5	1.1
Uhren Wecker	0.6	0	0.0	0.4	1.2

PRODUZIERTE PRODUKTE  Schweiz, 1998	Güterfracht	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
<b>Haushaltgeräte - gross</b>	<b>30.5</b>	<b>0</b>	<b>1.6</b>	<b>13.8</b>	<b>9.7</b>
Wäschetrockner	2.0	0	0.1	0.9	0.6
Haushaltkühlgeräte	5.9	0	0.3	2.7	1.8
Tiefkühlgeräte	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Waschmaschinen	14.4	0	0.7	6.6	4.7
Nähmaschinen	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Staubsauger	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Geschirrspüler	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Espressomaschinen	1.6	0	0.1	0.8	0.7
Mikrowellengeräte	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Ofen, Kochherde, Kochplatten	2.1	0	0.1	1.0	0.6
Klimageräte, Ventilatoren	4.4	0	0.2	2.0	1.3
<b>Spezialgeräte</b>	<b>11.7</b>	<b>0</b>	<b>0.6</b>	<b>6.3</b>	<b>58.0</b>
Prozesskontrollsysteme	0.5	0	0.0	0.8	28.2
Messgeräte (Analysegeräte)	0.5	0	0.0	0.7	24.3
Laboreinrichtungen	0.1	0	0.0	0.0	0.1
Lebensrettungseinrichtungen	0.0	0	0.0	0.0	0.1
Röntgeneinrichtungen	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Optische Geräte	1.3	0	0.1	0.6	1.7
Elektronische Schliessfächer	8.1	0	0.4	3.7	3.1
Verkaufsautomaten	1.0	0	0.0	0.4	0.4
Elektrowerkzeuge	0.2	0	0.0	0.1	0.1
<b>EE-Kleinteile</b>	<b>160.8</b>	<b>0</b>	<b>1.2</b>	<b>13.3</b>	<b>13.1</b>
Stecker, Schalter, u.ä.	65.4	0	1.2	12.9	12.9
Beleuchtung	2.2	0	0.0	0.3	0.2
Kabel	93.3	0	0.0	0.0	0.0
<b>Verkehrsmittel</b>	<b>3.8</b>	<b>0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.5</b>	<b>0.2</b>
PKW	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Autoradio	0.0	0	0.0	0.0	0.0
LKW	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Motorrad	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Mofa/Moped	0.0	0	0.0	0.0	0.0
Eisenbahnen (Lokomotive)	3.4	0	0.0	0.4	0.2
Eisenbahnen (Personenwagen)	0.5	0	0.0	0.1	0.0
Flugzeuge >15t	0.0	0	0.0	0.0	0.0
<b>Baumaterialien und Textilien</b>	<b>47.5</b>	<b>0</b>	<b>0.0</b>	<b>72.1</b>	<b>17.5</b>
EPS-Schaum	18.6	0	0.0	0.0	0.0
XPS-Schaum	3.8	0	0.0	0.0	0.0
PUR-Schaum	7.8	0	0.0	0.0	0.0
PE-Schaum	0.1	0	0.0	0.5	0.0
PE-Folie	6.1	0	0.0	61.2	0.0
PP-Folie	0.3	0	0.0	3.3	1.7
PVC-Folie	2.8	0	0.0	7.0	0.0
Epoxidharz	6.1	0	0.0	0.0	12.2

PRODUZIERTE PRODUKTE	Güterfracht	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA
Schweiz, 1998	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
Polycarbonat	1.8	0	0.0	0.0	3.6
Textilien und Polsterungen	n.b.	0	n.b.	n.b.	n.b.
<b>Total</b>	<b>310.1</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>128</b>	<b>435</b>

n.b. nicht bestimmt

### 9.1.7.2 Prozess „Handel“

Die Importe und Exporte von Fertigprodukten wurden durch Daten der eidgenössischen Zollverwaltung ermittelt. Für I+G-Geräte, Baumaterialien und Textilien konnten keine Aussenhandelszahlen erhoben werden. Es wurde angenommen, dass diese Produktgruppen in der Schweiz produziert werden und der Export vernachlässigbar ist.

Tabelle 9-31: Güter- und Stofffrachten von importierten Fertigprodukten - Detail (CH, 1998)

IMPORTIERTE PRODUKTE	Güterfracht	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA
Schweiz, 1998	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
<b>EDV- und Büroelektronik</b>	<b>46.6</b>	<b>0.00</b>	<b>16</b>	<b>204</b>	<b>476</b>
Computer+Monitore (pHH)	5.3	0.00	1.1	11.4	53.4
Computer+Monitore (Büro)	14.8	0.00	3.1	32.3	149.4
Server	1.1	0.00	0.2	1.9	10.7
Notebooks	0.6	0.00	0.0	0.6	13.7
Laserprinter	8.9	0.00	2.1	29.5	88.3
Tintenstrahldrucker	13.4	0.00	2.1	22.2	142.4
Kopiergeräte	2.0	0.00	7.4	103.8	15.0
Rechenmaschinen	0.6	0.00	0.1	2.3	3.0
<b>Kommunikationstechnik</b>	<b>3.1</b>	<b>0.00</b>	<b>0.5</b>	<b>5.1</b>	<b>17</b>
Telefonapparate	1.2	0.00	0.2	2.4	6.5
Mobiltelefone	1.5	0.00	0.1	1.2	4.4
Faxgeräte	0.4	0.00	0.1	1.4	6.1
<b>Unterhaltungselektronik</b>	<b>21.6</b>	<b>0.00</b>	<b>1.9</b>	<b>30</b>	<b>57</b>
CD-Player	0.4	0.00	0.0	0.6	1.8
Amplifier (Verstärker)	0.9	0.00	0.1	0.9	1.7
Receiver (Radiostandgeräte)	2.7	0.00	0.2	2.9	6.6
Tapedeck+Magnetbandgeräte	0.2	0.00	0.0	0.4	1.3
Plattenspieler	0.1	0.00	0.0	0.1	0.0
Portable Hifi-Geräte	0.1	0.00	0.0	0.3	0.9
TV - Bildschirmgeräte	14.9	0.00	1.3	23.0	38.2
Videorecorder	1.4	0.00	0.1	1.5	3.6
Videokameras	0.2	0.00	0.0	0.2	0.7
Fotokameras	0.4	0.00	0.0	0.3	0.5
Elektrische Spielzeuge	0.2	0.00	0.0	0.2	1.9
Elektrische Musikinstrumente	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

IMPORTIERTE PRODUKTE Schweiz, 1998	Güterfracht	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
<b>Haushaltgeräte - klein</b>	<b>14.2</b>	<b>0.00</b>	<b>1.1</b>	<b>9.7</b>	<b>9.6</b>
Haushaltkleingeräte	5.4	0.00	0.4	3.7	2.4
Elektrowärmgeräte	6.5	0.00	0.5	4.4	2.9
Waagen	1.4	0.00	0.1	1.0	2.4
Uhren Wecker	0.9	0.00	0.1	0.7	1.9
<b>Haushaltgeräte - gross</b>	<b>89.7</b>	<b>0.00</b>	<b>4.6</b>	<b>40.5</b>	<b>27.8</b>
Wäschetrockner	2.6	0.00	0.1	1.2	0.8
Haushaltkühlgeräte	11.1	0.00	0.6	5.0	3.3
Tiefkühlgeräte	8.2	0.00	0.4	3.7	2.5
Waschmaschinen	10.8	0.00	0.6	4.9	3.6
Nähmaschinen	0.3	0.00	0.0	0.2	0.1
Staubsauger	2.5	0.00	0.1	1.1	0.7
Geschirrspüler	5.2	0.00	0.3	2.4	1.8
Espressomaschinen	1.9	0.00	0.1	0.9	0.8
Mikrowellengeräte	2.0	0.00	0.1	0.9	0.7
Ofen, Kochherde, Kochplatten	5.5	0.00	0.3	2.5	1.6
<b>Klimageräte, Ventilatoren</b>	<b>39.5</b>	<b>0.00</b>	<b>2.0</b>	<b>17.8</b>	<b>11.8</b>
<b>Spezialgeräte</b>	<b>3.6</b>	<b>0.00</b>	<b>0.2</b>	<b>1.6</b>	<b>1.1</b>
Prozesskontrollsysteme	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Messgeräte (Analysegeräte)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Laboreinrichtungen	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Lebensrettungseinrichtungen	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Röntgeneinrichtungen	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Optische Geräte	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Elektronische Schliessfächer	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Verkaufsautomaten	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Elektrowerkzeuge	3.6	0.00	0.2	1.6	1.1
<b>EE-Kleinteile</b>	<b>33.2</b>	<b>0.00</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
Stecker, Schalter, u.ä.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Beleuchtung	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Kabel	33.2	0.00	0.0	0.0	0.0
<b>Verkehrsmittel</b>	<b>586.1</b>	<b>1.91</b>	<b>11.8</b>	<b>125.1</b>	<b>103.1</b>
PKW	398.2	1.64	10.1	106.6	87.2
Autoradios	0.7	0.00	0.0	0.2	0.9
LKW	<b>180.4</b>	0.25	1.6	16.6	13.3
Motorräder	3.6	0.02	0.1	1.0	1.1
Mofa/Moped	1.4	0.01	0.0	0.4	0.5
Eisenbahnen (Lokomotiven)	0.8	0.00	0.0	0.1	0.0
Eisenbahnen (Personenwagen)	0.3	0.00	0.0	0.1	0.0
Flugzeuge >15t	0.6	0.00	0.0	0.2	0.1
<b>Baumaterialien und Textilien</b>	<b>n.b.</b>	<b>n.b.</b>	<b>n.b.</b>	<b>n.b.</b>	<b>n.b.</b>
<b>Total</b>	<b>798.1</b>	<b>2</b>	<b>36</b>	<b>423</b>	<b>692</b>

n.b. nicht bestimmt

Tabelle 9-32: Güter- und Stofffrachten von exportierten Fertigprodukten - Detail (CH, 1998)

EXPORTIERTE PRODUKTE	Güterfracht	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
Schweiz, 1998	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
<b>EDV- und Büroelektronik</b>	<b>56.0</b>	<b>0.00</b>	<b>12</b>	<b>161</b>	<b>482</b>
Computer+Monitore (pHH)	0.7	0.00	0.1	1.3	7.2
Computer+Monitore (Büro)	2.0	0.00	0.3	3.6	20.1
Server	0.1	0.00	0.0	0.3	1.4
Notebooks	0.1	0.00	0.0	0.1	1.4
Laserprinter	7.3	0.00	1.7	24.4	72.9
Tintenstrahldrucker	11.1	0.00	1.7	18.3	117.6
Kopiergeräte	33.7	0.00	7.9	110.8	256.1
Rechenmaschinen	1.1	0.00	0.1	1.8	5.0
<b>Kommunikationstechnik</b>	<b>2.2</b>	<b>0.00</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>12</b>
Telefonapparate	2.1	0.00	0.2	1.6	11.4
Mobiltelefone	0.2	0.00	0.0	0.1	0.5
Faxgeräte	0.0	0.00	0.0	0.0	0.1
<b>Unterhaltungselektronik</b>	<b>3.8</b>	<b>0.00</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>10</b>
CD-Player	0.1	0.00	0.0	0.1	0.3
Amplifier (Verstärker)	0.7	0.00	0.1	0.6	1.2
Receiver (Radiostandgeräte)	0.2	0.00	0.0	0.2	0.4
Tapedeck+Magnetbandgeräte	0.2	0.00	0.0	0.3	1.0
Plattenspieler	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0
Portable Hifi-Geräte	0.0	0.00	0.0	0.0	0.2
TV - Bildschirmgeräte	2.4	0.00	0.2	3.2	6.1
Videorecorder	0.1	0.00	0.0	0.1	0.3
Videokameras	0.0	0.00	0.0	0.0	0.1
Fotokameras	0.1	0.00	0.0	0.1	0.2
Elektrische Spielzeuge	0.0	0.00	0.0	0.0	0.3
Elektrische Musikinstrumente	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
<b>Haushaltgeräte - klein</b>	<b>8.4</b>	<b>0.00</b>	<b>0.6</b>	<b>5.7</b>	<b>7.5</b>
Haushaltkleingeräte	1.5	0.00	0.1	1.0	0.7
Elektrowärmegeräte	4.2	0.00	0.3	2.8	1.9
Waagen	1.5	0.00	0.1	1.1	2.6
Uhren Wecker	1.2	0.00	0.1	0.8	2.3
<b>Haushaltgeräte - gross</b>	<b>64.8</b>	<b>0.00</b>	<b>3.3</b>	<b>29.3</b>	<b>20.1</b>
Wäschetrockner	0.1	0.00	0.0	0.1	0.0
Haushaltkühlgeräte	5.3	0.00	0.3	2.4	1.6
Tiefkühlgeräte	0.4	0.00	0.0	0.2	0.1
Waschmaschinen	10.0	0.00	0.5	4.5	3.3
Nähmaschinen	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0
Staubsauger	0.4	0.00	0.0	0.2	0.1
Geschirrspüler	0.6	0.00	0.0	0.3	0.2
Espressomaschinen	3.2	0.00	0.2	1.5	1.3
Mikrowellengeräte	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0
Ofen, Kochherde, Kochplatten	1.3	0.00	0.1	0.6	0.4
Klimageräte, Ventilatoren	43.5	0.00	2.2	19.6	13.0

EXPORTIERTE PRODUKTE	Güterfracht	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
Schweiz, 1998	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
<b>Spezialgeräte</b>	<b>0.2</b>	<b>0.00</b>	<b>0.0</b>	<b>0.1</b>	<b>0.1</b>
Prozesskontrollsysteme	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Messgeräte (Analysegeräte)	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Laboreinrichtungen	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Lebensrettungseinrichtungen	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Röntgeneinrichtungen	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Optische Geräte	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Elektronische Schliessfächer	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Verkaufsautomaten	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Elektrowerkzeuge	0.2	0.00	0.0	0.1	0.1
<b>EE-Kleinteile</b>	<b>38.0</b>	<b>0.00</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>
Stecker, Schalter, u.ä.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Beleuchtung	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Kabel	38.0	0.00	0.0	0.0	0.0
<b>Verkehrsmittel</b>	<b>134.7</b>	<b>0.41</b>	<b>2.6</b>	<b>27.7</b>	<b>22.4</b>
PKW	85.0	0.35	2.1	22.8	18.6
Autoradios	0.1	0.00	0.0	0.0	0.1
LKW	44.2	0.06	0.4	4.1	3.3
Motorräder	0.3	0.00	0.0	0.1	0.1
Mofa/Moped	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0
Eisenbahnen (Lokomotiven)	4.2	0.00	0.0	0.5	0.2
Eisenbahnen (Personenwagen)	0.2	0.00	0.0	0.1	0.0
Flugzeuge >15 t	0.6	0.00	0.0	0.2	0.1
<b>Baumaterialien und Textilien</b>	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
<b>Total</b>	<b>308.0</b>	<b>0.41</b>	<b>19</b>	<b>230</b>	<b>554</b>

n.b. nicht bestimmt

### 9.1.7.3 Prozess „Konsum“

Das Lager und die Siedlungsabfälle im Prozess Konsum wurden berechnet durch Verbrauchsentwicklungen (siehe Tabelle 9-12) und Lebenszeiten (siehe Tabelle 9-13) der Produkte und einer Schätzung der Altersstruktur der Produkte (siehe Tabelle 9-33).

Tabelle 9-33: Altersstruktur in Lager und Abfällen

Altersstruktur	Anteile Altprodukte (Baujahr 1990)	
	Im Lager (Konsum)	In Siedlungsabfällen
EDV-Geräte (o. Drucker)	10%	50%
Bürogeräte und Kommunikationstechnik	20%	70%
Unterhaltungselektronik	60%	100%
<b>Kleine Haushaltsgeräte</b>	20%	70%
Grosse Haushaltsgeräte, Spezialgeräte und EE-Kleinteile	60%	100%
Verkehrsmittel	60%	100%
Baumaterialien	60%	100%

Anmerkung: Der Altgeräteanteil wurde aufgrund *Tabelle 9-13* und eigenen Annahmen bestimmt.

Die folgenden drei Tabellen zeigen Güter- und Stofffrachten bzw. den Lagerbestand der einzelnen Produkte für die Güterflüsse und das Lager des Prozesses „Konsum“: „konsumierte Produkte“, „Siedlungsabfälle“ und „Lager im Konsumprozess“.

Tabelle 9-34: Güter- und Stofffrachten von konsumierten Produkten - Detail (CH, 1998)

KONSUMIERTE PRODUKTE	Güterfracht	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA
Schweiz, 1998	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
<b>EDV- und Büroelektronik</b>	<b>28,9</b>	<b>0,00</b>	<b>5,0</b>	<b>55</b>	<b>295</b>
Computer+Monitore (pHH)	5,7	0,00	1,0	10,3	58,0
Computer+Monitore (Büro)	16,3	0,00	2,8	29,4	165,0
Server	0,9	0,00	0,2	1,7	9,4
Notebooks	0,5	0,00	0,0	0,5	12,3
Laserprinter	1,5	0,00	0,4	5,1	15,4
Tintenstrahldrucker	2,3	0,00	0,4	3,9	24,8
Kopiergeräte	1,1	0,00	0,3	3,8	8,7
Rechenmaschinen	0,4	0,00	0,0	0,6	1,7
<b>Kommunikationstechnik</b>	<b>3,3</b>	<b>0,00</b>	<b>0,3</b>	<b>3,6</b>	<b>18,0</b>
Telefonapparate	1,3	0,00	0,1	1,0	7,3
Mobiltelefone	1,6	0,00	0,1	1,1	4,7
Faxgeräte	0,4	0,00	0,1	1,4	6,0
<b>Unterhaltungselektronik</b>	<b>22,4</b>	<b>0,00</b>	<b>1,8</b>	<b>28,5</b>	<b>62,7</b>
CD-Player	0,3	0,00	0,0	0,5	1,5
Amplifier (Verstärker)	0,4	0,00	0,0	0,4	0,7
Receiver (Radiostandgeräte)	2,6	0,00	0,2	2,7	6,2
Tapedeck+Magnetbandgeräte	0,0	0,00	0,0	0,1	0,3
Plattenspieler	0,1	0,00	0,0	0,0	0,0
Portable Hifi-Geräte	0,4	0,00	0,0	0,9	3,4
TV - Bildschirmgeräte	15,0	0,00	1,1	20,2	38,6
Videorecorder	2,7	0,00	0,2	2,9	6,9
Videokameras	0,2	0,00	0,0	0,2	0,6
Fotokameras	0,2	0,00	0,0	0,2	0,4
Elektrische Spielzeuge	0,2	0,00	0,0	0,2	1,7
Elektrische Musikinstrumente	0,2	0,00	0,0	0,2	2,6

KONSUMIERTE PRODUKTE  Schweiz, 1998	Güterfracht	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
<b>Haushaltgeräte - klein</b>	<b>16.2</b>	<b>0.00</b>	<b>1.2</b>	<b>11.0</b>	<b>8.5</b>
Haushaltkleingeräte	13.0	0.00	1.0	8.8	5.9
Elektrowärmgeräte	2.3	0.00	0.2	1.6	1.0
Waagen	0.5	0.00	0.0	0.4	0.9
Uhren Wecker	0.4	0.00	0.0	0.3	0.7
<b>Haushaltgeräte - gross</b>	<b>55.4</b>	<b>0.00</b>	<b>2.8</b>	<b>25.1</b>	<b>17.4</b>
Wäschetrockner	4.5	0.00	0.2	2.0	1.4
Haushaltkühlgeräte	11.7	0.00	0.6	5.3	3.5
Tiefkühlgeräte	7.9	0.00	0.4	3.5	2.4
Waschmaschinen	15.3	0.00	0.8	7.0	5.0
Nähmaschinen	0.4	0.00	0.0	0.2	0.1
Staubsauger	2.1	0.00	0.1	1.0	0.6
Geschirrspüler	4.5	0.00	0.2	2.1	1.6
Espressomaschinen	0.3	0.00	0.0	0.1	0.1
Mikrowellengeräte	2.0	0.00	0.1	0.9	0.7
Ofen, Kochherde, Kochplatten	6.3	0.00	0.3	2.8	1.9
Klimageräte, Ventilatoren	0.4	0.00	0.0	0.2	0.1
<b>Spezialgeräte</b>	<b>15.2</b>	<b>0.00</b>	<b>0.8</b>	<b>7.9</b>	<b>59.0</b>
Prozesskontrollsysteme	0.5	0.00	0.0	0.8	28.2
Messgeräte (Analysegeräte)	0.5	0.00	0.0	0.7	24.3
Laboreinrichtungen	0.1	0.00	0.0	0.0	0.1
Lebensrettungseinrichtungen	0.0	0.00	0.0	0.0	0.1
Röntgeneinrichtungen	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0
Optische Geräte	1.3	0.00	0.1	0.6	1.7
Elektronische Schliessfächer	8.1	0.00	0.4	3.7	3.1
Verkaufsautomaten	1.0	0.00	0.0	0.4	0.4
Elektrowerkzeuge	3.7	0.00	0.2	1.7	1.1
<b>EE-Kleinteile</b>	<b>156.0</b>	<b>0.00</b>	<b>1.2</b>	<b>13.3</b>	<b>13.1</b>
Stecker, Schalter, u.ä.	65.4	0.00	1.2	12.9	12.9
Beleuchtung	2.2	0.00	0.0	0.3	0.2
Kabel	88.5	0.00	0.0	0.0	0.0
<b>Verkehrsmittel</b>	<b>455.3</b>	<b>1.50</b>	<b>9.2</b>	<b>98.0</b>	<b>80.9</b>
PKW	313.2	1.29	7.9	83.9	68.6
Autoradio	0.6	0.00	0.0	0.1	0.8
LKW	136.1	0.19	1.2	12.5	10.0
Motorrad	3.3	0.01	0.1	0.9	1.0
Mofa/Moped	1.4	0.01	0.0	0.4	0.5
Eisenbahnen (Lokomotive)	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0
Eisenbahnen (Personenwagen)	0.5	0.00	0.0	0.2	0.1
Flugzeuge >15 t	0.0	0.00	0.0	0.0	0.0
<b>Baumaterialien und Textilien</b>	<b>47.5</b>	<b>0.00</b>	<b>0.0</b>	<b>79.1</b>	<b>17.5</b>
EPS-Schaum	18.6	0.00	0.0	0.0	0.0
XPS-Schaum	3.8	0.00	0.0	0.0	0.0
PUR-Schaum	7.8	0.00	0.0	0.0	0.0

KONSUMIERTE PRODUKTE  Schweiz, 1998	Güterfracht	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
PE-Schaum	0.1	0.00	0.0	0.5	0.0
PE-Folie	6.1	0.00	0.0	61.2	0.0
PP-Folie	0.3	0.00	0.0	3.3	1.7
PVC-Folie	2.8	0.00	0.0	7.0	0.0
Epoxidharz	6.1	0.00	0.0	0.0	12.2
Polycarbonat	1.8	0.00	0.0	0.0	3.6
Textilien und Polsterungen	n.b.	n.b.	n.b.	7.0	n.b.
<b>Total</b>	<b>800.2</b>	<b>1.50</b>	<b>22</b>	<b>322</b>	<b>573</b>

n.b. nicht bestimmt

Tabelle 9-35: Güter- und Stofffrachten von entsorgten Abfällen - Detail (CH, 1998)

ENTSORGTE ABFÄLLE  Schweiz, 1998	Güterfracht	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
<b>EDV- und Büroelektronik</b>	<b>13.7</b>	<b>0</b>	<b>16</b>	<b>33</b>	<b>134</b>
Computer+Monitore (pHH)	2.4	0.0	2.5	5.5	24.8
Computer+Monitore (Büro)	6.9	0.0	7.2	15.6	70.5
Server	0.4	0.0	0.4	0.9	4.0
Notebooks	0.2	0.0	0.2	0.4	4.8
Laserprinter	1.1	0.0	2.4	4.1	8.6
Tintenstrahldrucker	1.6	0.0	1.3	2.6	15.7
Kopiergeräte	0.8	0.0	1.8	3.0	4.5
Rechenmaschinen	0.3	0.0	0.1	0.6	1.1
<b>Kommunikationstechnik</b>	<b>2.7</b>	<b>0.0</b>	<b>0.9</b>	<b>3.1</b>	<b>14.0</b>
Telefonapparate	1.1	0.0	0.1	0.8	5.9
Mobiltelefone	1.3	0.0	0.1	0.9	3.8
Faxgeräte	0.3	0.0	0.7	1.3	4.2
<b>Unterhaltungselektronik</b>	<b>13.2</b>	<b>0.60</b>	<b>23.4</b>	<b>48.6</b>	<b>31.7</b>
CD-Player	0.2	0.0	0.0	0.4	0.8
Amplifier (Verstärker)	0.2	0.0	0.1	0.3	0.4
Receiver (Radiostandgeräte)	1.5	0.1	0.4	2.0	3.4
Tapedeck+Magnetbandgeräte	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2
Plattenspieler	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Portable Hifi-Geräte	0.3	0.1	0.1	0.7	1.7
TV - Bildschirmgeräte	8.9	0.2	22.3	42.4	18.7
Videorecorder	1.6	0.1	0.4	2.2	3.7
Videokameras	0.1	0.0	0.0	0.2	0.3
Fotokameras	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1
Elektrische Spielzeuge	0.1	0.0	0.0	0.1	1.0
Elektrische Musikinstrumente	0.1	0.0	0.0	0.1	1.5
<b>Haushaltgeräte - klein</b>	<b>14.8</b>	<b>0.00</b>	<b>1.1</b>	<b>10.0</b>	<b>7.8</b>
Haushaltkleingeräte	11.9	0.0	0.9	8.0	5.3
Elektrowärmegeräte	2.1	0.0	0.2	1.4	1.0

ENTSORGTE ABFÄLLE  Schweiz, 1998	Güterfracht	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
Waagen	0.5	0.0	0.0	0.3	0.8
Uhren Wecker	0.3	0.0	0.0	0.2	0.7
<b>Haushaltgeräte - gross</b>	<b>42.6</b>	<b>0.03</b>	<b>2.2</b>	<b>19.3</b>	<b>13.3</b>
Wäschetrockner	3.5	0.0	0.2	1.6	1.0
Haushaltkühlgeräte	9.0	0.0	0.5	4.1	2.7
Tiefkühlgeräte	6.0	0.0	0.3	2.7	1.8
Waschmaschinen	11.7	0.0	0.6	5.4	3.8
Nähmaschinen	0.3	0.0	0.0	0.1	0.1
Staubsauger	1.6	0.0	0.1	0.7	0.5
Geschirrspüler	3.5	0.0	0.2	1.6	1.2
Espressomaschine n	0.2	0.0	0.0	0.1	0.1
Mikrowellengeräte	1.5	0.0	0.1	0.7	0.5
Ofen, Kochherde, Kochplatten	4.8	0.0	0.2	2.2	1.4
Klimageräte, Ventilatoren	0.3	0.0	0.0	0.1	0.1
<b>Spezialgeräte</b>	<b>10.2</b>	<b>0.00</b>	<b>0.5</b>	<b>5.3</b>	<b>39.7</b>
Prozesskontrollsysteme	0.4	0.0	0.0	0.5	19.0
Messgeräte (Analysegeräte)	0.3	0.0	0.0	0.5	16.4
Laboreinrichtungen	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
Lebensrettungseinrichtungen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Röntgeneinrichtungen	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Optische Geräte	0.9	0.0	0.0	0.4	1.1
Elektronische Schliessfächer	5.4	0.0	0.3	2.5	2.1
Verkaufsautomaten	0.6	0.0	0.0	0.3	0.3
Elektrowerkzeuge	2.5	0.0	0.1	1.1	0.7
<b>EE-Kleinteile</b>	<b>71.1</b>	<b>0.00</b>	<b>3.3</b>	<b>42.2</b>	<b>16.2</b>
Stecker, Schalter, u.ä.	32.3	0.0	3.3	41.5	16.0
Beleuchtung	1.1	0.0	0.1	0.7	0.3
Kabel	37.7	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Verkehrsmittel</b>	<b>329.8</b>	<b>2.37</b>	<b>9.0</b>	<b>106.2</b>	<b>66.3</b>
PKW	258.8	2.1	8.2	96.4	59.7
Autoradios	0.5	0.0	0.0	0.2	0.5
LKW	68.1	0.2	0.7	8.7	5.3
Motorräder	1.7	0.0	0.1	0.6	0.5
Mofa/Moped	0.7	0.0	0.0	0.3	0.3
Eisenbahnen (Lokomotiven)		0.0	0.0	0.0	0.0
Eisenbahnen (Personenwagen)		0.0	0.0	0.0	0.0
Flugzeuge >15t	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
<b>Baumaterialien und Textilien</b>	<b>23.7</b>	<b>27.4</b>	<b>5.2</b>	<b>102.1</b>	<b>66.2</b>
EPS-Schaum	9.3	0.0	0.0	0.0	0.0
XPS-Schaum	1.9	0.0	0.0	30.6	0.0
PUR-Schaum	3.9	25.4	0.0	0.0	57.4
PE-Schaum	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
PE-Folie	3.1	0.0	5.2	61.2	0.0
PP-Folie	0.2	0.0	0.0	3.3	0.9

ENTSORGTE ABFÄLLE  Schweiz, 1998	Güterfracht	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
	[1'000 t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]	[t/a]
PVC-Folie	1.4	2.03	0.0	7.0	0.0
Epoxidharz	3.1	0.0	0.0	0.0	6.1
Polycarbonat	0.9	0.0	0.0	0.0	1.8
Textilien und Polsterungen	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
<b>Total</b>	<b>521.7</b>	<b>30</b>	<b>62</b>	<b>369</b>	<b>389</b>

n.b. nicht bestimmt

Tabelle 9-36: Güter- und Stofflager von genutzten Fertigprodukten - Detail (CH, 1998)

PRODUKTE in Nutzung  Schweiz, 1998	Güterlager	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
	[1000 t]	[t]	[t]	[t]	[t]
<b>EDV- und Büroelektronik</b>	<b>105</b>	<b>0.07</b>	<b>43</b>	<b>218</b>	<b>1'057</b>
Computer+Monitore (pHH)	19	0.00	6	35	188
Computer+Monitore (Büro)	53	0.00	18	100	536
Server	3	0.00	1	6	30
Notebooks	2	0.00	0	2	39
Laserprinter	8	0.00	7	29	79
Tintenstrahldrucker	13	0.00	4	21	131
Kopiergeräte	6	0.00	5	21	44
Rechenmaschinen	2	0.07	0	4	9
<b>Kommunikationstechnik</b>	<b>20</b>	<b>0.00</b>	<b>3</b>	<b>22</b>	<b>109</b>
Telefonapparate	8	0.00	1	6	45
Mobiltelefone	10	0.00	1	7	29
Faxgeräte	3	0.00	2	9	35
<b>Unterhaltungselektronik</b>	<b>278</b>	<b>7.53</b>	<b>304</b>	<b>753</b>	<b>711</b>
CD-Player	4	0.41	1	7	17
Amplifier (Verstärker)	5	0.11	1	5	8
Receiver (Radiostandgeräte)	32	1.32	6	39	73
Tapedeck+Magnetbandgeräte	1	0.09	0	1	3
Plattenspieler	1	0.00	0	1	0
Portable Hifi-Geräte	5	1.05	1	14	38
TV - Bildschirmgeräte	186	2.85	288	636	427
Videorecorder	34	1.52	6	42	81
Videokameras	2	0.14	0	3	6
Fotokameras	3	0.05	0	3	4
Elektrische Spielzeuge	3	0.00	0	2	20
Elektrische Musikinstrumente	3	0.00	0	2	32
<b>Haushaltgeräte - klein</b>	<b>109</b>	<b>0.00</b>	<b>8</b>	<b>73</b>	<b>57</b>
Haushaltkleingeräte	87	0.00	7	59	39
Elektrowärmgeräte	16	0.00	1	10	7
Waagen	3	0.00	0	2	6
Uhren Wecker	2	0.00	0	2	5
<b>Haushaltgeräte - gross</b>	<b>715</b>	<b>0.28</b>	<b>36</b>	<b>324</b>	<b>223</b>

PRODUKTE in Nutzung  Schweiz, 1998	Güterlager	Penta- BDPE	Octa- BDPE	Deca- BDPE	TBBPA
	[1000 t]	[t]	[t]	[t]	[t]
Wäschetrockner	58	0.00	3	26	17
Haushaltkühlgeräte	151	0.00	8	68	45
Tiefkühlgeräte	101	0.00	5	46	30
Waschmaschinen	197	0.16	10	90	64
Nähmaschinen	5	0.01	0	2	2
Staubsauger	27	0.00	1	12	8
Geschirrspüler	59	0.08	3	27	20
Espressomaschinen	4	0.01	0	2	2
Mikrowellengeräte	26	0.02	1	12	8
<b>Ofen, Kochherde, Kochplatten</b>	<b>81</b>	<b>0.00</b>	<b>4</b>	<b>36</b>	<b>24</b>
Klimageräte, Ventilatoren	5	0.00	0	2	2
<b>Spezialgeräte</b>	<b>200</b>	<b>0.00</b>	<b>10</b>	<b>104</b>	<b>779</b>
Prozesskontrollsysteme	7	0.00	0	11	372
Messgeräte (Analysegeräte)	6	0.00	0	9	321
Laboreinrichtungen	1	0.00	0	1	1
Lebensrettungseinrichtungen	0	0.00	0	0	1
Röntgeneinrichtungen	0	0.00	0	0	0
Optische Geräte	17	0.00	1	8	22
Elektronische Schliessfächer	107	0.00	5	48	40
Verkaufsautomaten	13	0.00	1	6	6
Elektrowerkzeuge	49	0.00	2	22	15
<b>EE-Kleinteile</b>	<b>1.944</b>	<b>0.00</b>	<b>60</b>	<b>760</b>	<b>335</b>
Stecker, Schalter, u.ä.	878	0.00	59	747	330
Beleuchtung	29	0.00	1	13	5
Kabel	1.038	0.00	0	0	0
<b>Verkehrsmittel</b>	<b>6.614</b>	<b>34</b>	<b>143</b>	<b>1.685</b>	<b>1.127</b>
PKW	4.005	26	116	1.324	904
Autoradio	8	0	0	2	9
LKW	2.482	6	25	281	189
Motorrad	28	0	1	9	9
Mofa/Moped	25	0	1	8	9
Eisenbahnen (Lokomotive)	34	1	0	18	2
Eisenbahnen (Personenwagen)	32	1	0	42	5
Flugzeuge >15 t	0	0	0	0	0
<b>Baumaterialien und Textilien</b>	<b>549</b>	<b>455</b>	<b>69</b>	<b>1.661</b>	<b>1.163</b>
EPS-Schaum	207	0	0	0	0
XPS-Schaum	40	0	0	385	0
PUR-Schaum	110	428	0	0	968
PE-Schaum	1	0	0	3	0
PE-Folie	68	0	69	1.089	0
PP-Folie	4	0	0	59	19
PVC-Folie	31	27	0	125	0
Epoxidharz	68	0	0	0	136
Polycarbonat	20	0	0	0	40

PRODUKTE in Nutzung	Güterlager	Penta-BDPE	Octa-BDPE	Deca-BDPE	TBBPA
<b>Schweiz, 1998</b>	[1000 t]	[t]	[t]	[t]	[t]
Textilien und Polsterungen	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
<b>Total</b>	<b>10'534</b>	<b>498</b>	<b>678</b>	<b>5'601</b>	<b>5'561</b>

n.b. nicht bestimmt

## 9.2 Anhang 2 – Abfallwirtschaft und Umwelt

### 9.2.1 Grundlagen und Annahmen

In diesem Abschnitt sind Grundlagen für die Bestimmung der Flüsse und Lager in die bzw. in den Umweltkompartimenten zusammenfassend dargestellt.

Wichtige Kenndaten für die Hochrechnungen:

Tabelle 9-37: Flächen der Schweiz

Fläche der Schweiz total	4'128'400 ha
Landwirtschaftliche Fläche 1990	945'760 ha
Siedlungsfläche	240'000 ha
Gewässerfläche	170'000 ha

Tabelle 9-38: Volumen/Massen der Umweltkompartimente

	Sediment oberste 2 cm	Boden oberste 2 cm	Hydro Mittel: 50 m	Luft Erste 500 m	Einheit
Fläche	170'000	945'760	170'000	4'128'400	ha
Volumen	34'000'000	189'152'000	85'000'000'000	2.0642E+13	m <sup>3</sup>
Masse	51'000'000	283'728'000	85'000'000'000		t

### 9.2.2 Flüsse im Teilsystem Abfall-/Abwasserwirtschaft

Die Daten in den folgende Tabelle 9-40 bis Tabelle 9-43 sind die Basis für den Resultatteil im Bericht (Kapitel 6). Daten entstammen in erster Linie den im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ für die Schweiz geschätzten Flüsse. Sie werden bei Bedarf durch Daten aus anderen Literaturquellen (z.B. [Danish EPA, 1999]) ergänzt.

In den Tabelle 9-40 bis Tabelle 9-43 sind neben dem im Resultatteil angegebenen Stoffflusswerte die geschätzten Bereiche angegeben. Da im Bereich Abfallwirtschaft keine direkten Messungen vorliegen, werden in der Regel die Unsicherheiten in der Grössenordnung von Faktor 2 (in etwa den worst-case Fehlerbreiten aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ entsprechend) übernommen und angewandt. Unsicherheiten durch die Berechnung mittels unsicheren Transferkoeffizienten sowie die Allokation von Flüssen innerhalb der Abfallwirtschaft auf verschiedene Prozesse werden dabei nicht mehr explizit bestimmt bzw. berücksichtigt.

Die Aufteilung der im Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ bestimmten Gesamtmengen an BFS auf die einzelnen abfallwirtschaftlichen Prozesse erfolgt mittels den in Tabelle 9-39 abgebildeten Verteilungskoeffizienten (Transferkoeffizienten).

Tabelle 9-39: Verteilung der BFS-Flüsse aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ auf die verschiedenen Prozesse der Abfallwirtschaft (Pe: PentaBDPE, O: OctaBDPE, D: DecaBDPE, TBBPA), Mengen in [t/a], Verteilung in [-].

	Entsorgte Kosumprodukte CH, 1998				Verteilung auf die AWS-Prozesse		
	Pe	O	D	TBBPA	Verbrennung	Wiederverwertung	Deponie
EE	1	47	161	257	0.384	0.519	0.096
Verkehr	2	9	106	66	0.000	1.000	0.000
Bau	27	5	102	66	0.8*	0.000	0.2*
Textil	0	0	0	0	0.000	0.000	0.000

\* Für PentaBDPE ist die Verteilung: 80 % in die Deponie, 20 % in die Verbrennung

Tabelle 9-40: Input-, Outputflüsse und Lager für den Prozess „Verwertung“

PROZESS		GÜTERBEZEICHNUNG		PentaBDPE-Fluss	OctaDBPE-Fluss	DecaDBPE-Fluss	TBBPA-Fluss	Bem.	
				t/a	t/a	t/a	t/a		
Verwertung	IN		Min.	1	17	95	100		
			MW	3	33	190	200	1	
			Max.	5	66	380	400		
			Min.	0	0	0	0		
			Import in Verwertung	MW	0	0	0	0	
			Max.	0	0	0	0		
			Min.	0	0	0	0		
			Verbrennungsrückstände zur Verwertung	MW	0	0	0	0	
			Max.	0	0	0	0		
			OUT						
				Min.	0	0	0	0	
				MW	0	0	0	0	2
				Max.	0	0	0	0	
				Min.	0.6	16	73	55	
		MW	1.2	31	146	109	3		
		Max.	2.4	62	292	218			
		Min.	0.5	1.2	16	42			
		MW	1.0	2.3	32	83	4		
		Max.	2.0	4.6	64	166			
		Min.	0.13	0.6	7	4			
		MW	0.25	1.1	13	8	5		
		Max.	0.50	2.2	26	16			
		Min.	?	?	?	?			
		MW	?	?	?	?	6		
		Max.	?	?	?	?			
	Lager								
				0	0	0	0		
		Lagerbestand		0	0	0	0		
				0	0	0	0		

- 1) in Kapitel „Verkehr mit Produkten“ bestimmt, Zuordnung auf den Prozess „Verwertung“ anhand von Tabelle 9-39.
- 2) Annahme: In den wiederverwerteten Kunststoffen (vor allem industrieinterne Wiederverwertung) befinden sich keine relevanten BFS- Mengen.
- 3) Anhand Ausführungen in Kapitel 5.2 „Teilsystem Abfallwirtschaft“
- 4) Anhand Ausführungen in Kapitel 5.2 „Teilsystem Abfallwirtschaft“
- 5) Anhand Ausführungen in Kapitel 5.2 „Teilsystem Abfallwirtschaft“
- 6) Keine Daten vorhanden, keine seriöse Schätzung möglich

Import in Verwertung, Verbrennungsrückstände zur Verwertung, sowie das Lager sind nicht bestimmt.

Tabelle 9-41: Input-, Outputflüsse und Lager für den Prozess „Abwasserreinigung“

PROZESS		GÜTERBEZEICHNUNG		PentaBDPE-Fluss	OctaDBPE-Fluss	DecaDBPE-Fluss	TBBPA-Fluss	Bem.	
				t/a	t/a	t/a	t/a		
ARA	IN								
Abwasser- reinigungs- anlage			Min.	0.0	0.0	0.3	0.0		
		Abwasser	MW	0.0	0.0	0.6	0.0	7	
			Max.	0.0	0.0	1.1	0.0		
			Min.	0.00	0.00	0.00	0.00		
		Deposition kommunales Abwasser	MW	0.19	0.04	0.21	0.03	8	
			Max.	0.38	0.07	0.42	0.06		
			Min.	0.011	0.004	0.025	0.075		
		Sickerwasser zur ARA	MW	0.022	0.007	0.050	0.150	9	
			Max.	0.044	0.014	0.100	0.300		
		OUT							
				Min.	0.010	?	0.010	0.005	
		ARA Rückstände zur Verbrennung	MW	0.020	?	0.020	0.010	10	
			Max.	0.080	?	0.080	0.040		
		Min.	0.002	?	0.003	0.001			
	Gereinigtes Abwasser	MW	0.004	?	0.005	0.002	11		
		Max.	0.008	?	0.010	0.004			
		Min.	0.018	?	0.023	0.009			
	Klärschlamm in Landwirtschaft	MW	0.036	?	0.045	0.018	12		
		Max.	0.140	?	0.180	0.070			
		Min.	0.002	?	0.002	0.001			
	Deponiegut aus ARA	MW	0.003	?	0.003	0.001	13		
		Max.	0.012	?	0.012	0.004			
	Lager								
			Min.	0	0	0	0		
	Lagerbestand	MW	0	0	0	0			
		Max.	0	0	0	0			

7) in Kapitel „Verkehr mit Produkten“ bestimmt.

8) Schätzung anhand der Annahme, dass 10 % der Emissionen aus „Verkehr mit Produkten über die Atmosphäre in Siedlungsgebieten via kommunale Abwasserentsorgung in die ARA gelangt.

9) Annahme: 90 % der Deponiesickerwasserflüsse gelangt in die ARA

10) Anhand Ausführungen in Kapitel 5.2 „Teilsystem Abfallwirtschaft“

11) Anhand Ausführungen in Kapitel 5.2 „Teilsystem Abfallwirtschaft“

12) Anhand Ausführungen in Kapitel 5.2 „Teilsystem Abfallwirtschaft“

13) Anhand Ausführungen in Kapitel 5.2 „Teilsystem Abfallwirtschaft“

Das Lager wird als Null angenommen.

Tabelle 9-42: Input-, Outputflüsse und Lager für den Prozess „Verbrennung“

PROZESS		GÜTERBEZEICHNUNG		PentaBDPE-Fluss	OctaDBPE-Fluss	DecaDBPE-Fluss	TBBPA-Fluss	Bem.		
				t/a	t/a	t/a	t/a			
Verbrennung	IN		Min.	2.9	11	72	83			
			Thermisch behandelte Abfälle	MW	5.8	22	143	166	14	
				Max.	12	44	287	332		
				Min.	0.6	16	73	55		
			Reststoffe zur Verbrennung	MW	1.2	31	146	109	15	
				Max.	2.4	62	292	218		
				Min.	0.01	?	0.01	0.005		
			ARA Rückstände zur Verbrennung	MW	0.02	?	0.02	0.010	16	
				Max.	0.08	?	0.08	0.040		
				Min.	0	0	0	0		
			Import in die Verbrennung	MW	0	0	0	0	17	
				Max.	0	0	0	0		
			OUT							
					Min.	0.0013	0.010	0.052	2.0	
				Verbrennungsrückstände zur Deponie	MW	0.0025	0.019	0.105	4.0	18
					Max.	0.0051	0.038	0.210	7.9	
					Min.	0	0	0	0	
		Verbrennungsrückstände zur Verwertung	MW	0	0	0	0	19		
			Max.	0	0	0	0			
			Min.	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00			
		Emission aus Verbrennung	MW	2.31E-09	1.75E-08	9.54E-08	1.00E-05	20		
			Max.	4.62E-09	3.50E-08	1.91E-07	5.20E-04			
			Min.	0.001	0.01	0.030	1.1			
		Export aus Verbrennung	MW	0.002	0.01	0.060	2.3	21		
			Max.	0.004	0.02	0.120	4.5			
	Lager									
			Min.	0	0	0	0			
		Lagerbestand	MW	0	0	0	0			
			Max.	0	0	0	0			

14) in Kapitel „Verkehr mit Produkten“ bestimmt, Zuordnung auf den Prozess „Verbrennung“ anhand von Tabelle 9-39.

15) Siehe Tabelle 9-40

16) Tabelle 9-41

17) Siehe Tabelle 9-43

18) Anhand Ausführungen in Kapitel 5.2 „Teilsystem Abfallwirtschaft“

19) Anhand Ausführungen in Kapitel 5.2 „Teilsystem Abfallwirtschaft“ (Flüsse sind Null)

20) Anhand Ausführungen in Kapitel 5.2 „Teilsystem Abfallwirtschaft“

21) Anhand Ausführungen in Kapitel 5.2 „Teilsystem Abfallwirtschaft“

Import in Verbrennung, Verbrennungsrückstände zur Verwertung, sowie das Lager werden als Null angenommen.

Tabelle 9-43: Input-, Outputflüsse und Lager für den Prozess „Deponie“

PROZESS		GÜTERBEZEICHNUNG		PentaDBPE-	OctaDBPE-	DecaDBPE-	TBBPA-Fluss	Bem.
				Fluss	Fluss	Fluss	t/a	
				t/a	t/a	t/a	t/a	
Deponie	IN							
			Min.	11	2.8	18	19	
		Deponierte Abfälle	MW	22	5.5	36	38	22
			Max.	43	11.0	72	76	
			Min.	0.13	0.6	7	4	
		Deponiegut aus Verwertung	MW	0.25	1.1	13	8	23
			Max.	0.50	2.2	26	16	
			Min.	0.002	?	0.002	0.001	
		Deponiegut aus ARA	MW	0.003	?	0.003	0.001	24
			Max.	0.012	?	0.012	0.004	
			Min.	0.001	0.010	0.052	2.0	
		Verbrennungsrückstände zur Deponie	MW	0.003	0.019	0.105	4.0	25
			Max.	0.005	0.038	0.210	7.9	
	OUT							
			Min.	0.011	0.004	0.025	0.075	
		Sickerwasser zur ARA	MW	0.022	0.007	0.050	0.150	26
			Max.	0.044	0.014	0.100	0.300	
			Min.	0.0010	0.0004	0.003	0.008	
		Emissionen aus Deponie	MW	0.0020	0.0007	0.005	0.015	27
			Max.	0.0040	0.0014	0.010	0.030	
	Lager							
			Min.	43	43	207	237	
		Lagerbestand	MW	130	130	620	710	28
			Max.	325	325	1'550	1'775	

22) in Kapitel „Verkehr mit Produkten“ bestimmt, Zuordnung zu Prozess „Deponie“ anhand Tabelle 9-39.

23) Siehe Tabelle 9-40

24) Tabelle 9-41

25) Siehe Tabelle 9-42

26) Anhand Ausführungen in Kapitel 5.2 „Teilsystem Abfallwirtschaft“

27) Anhand Ausführungen in Kapitel 5.2 „Teilsystem Abfallwirtschaft“

28) Anhand Ausführungen in Kapitel 5.2 „Teilsystem Abfallwirtschaft“

Das Lager wird anhand des Inputs aus dem Teilsystem „Verkehr mit Produkten“ geschätzt.

### 9.2.3 Flüsse im Teilsystem Umwelt

Die Daten in den folgenden Tabellen dieses Kapitels sind Basis für das Resultatkapitel für das Teilsystem „Umwelt“.

Tabelle 9-44: Input-, Outputflüsse und Lager für den Prozess „Atmosphäre“

PROZESS	GÜTERBEZEICHNUNG		Güter-	PentaBDPE-	OctaDBPE-	DecaDBPE-	TBBPA-Fluss	Bem.	
			Massen-						
			fluss	Fluss	Fluss	Fluss	Fluss		
			1000 t/a	t/a	t/a	t/a	t/a		
Atmosphäre	IN								
			Min.		0.9	0.1	1.0	0.1	
		Emission Prod., Handel und Konsum	MW		1.9	0.4	2.1	0.3	1
			Max.		4.1	0.9	6.0	0.6	
			Min.		0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0.0E+00	0
		Emission aus Abfallwirtschaft	MW		2.3E-09	1.7E-08	9.5E-08	2.8E-04	2
			Max.		4.6E-09	3.5E-08	1.9E-07	5.5E-04	
			Min.		0.00	0.00	0.00	0.00	
		Import Luft	MW		0.00	0.00	0.00	0.00	3
			Max.		0.00	0.00	0.00	0.00	
		OUT							
			Min.		0.00	0.00	0.00	0.00	
		Export Luft	MW		0.00	0.00	0.00	0.00	3
			Max.		0.00	0.00	0.00	0.00	
		Min.		?	?	?	?		
	Atmosphärischer Eintrag Biota	MW		?	?	?	?	4	
		Max.		?	?	?	?		
		Min.		0.0001	0.0001	0.0008	0.0002		
	Atmosphärischer Eintrag Hydrosphäre	MW		0.0001	0.0001	0.0013	0.0006	5	
		Max.		0.0002	0.0002	0.0017	0.0010		
		Min.		1.20	0.23	1.32	0.18		
	Atmosphärischer Eintrag Pedo-/Lithospäre	MW		1.71	0.33	1.89	0.25	6	
		Max.		2.22	0.43	2.46	0.33		
		Min.		0.00	0.00	0.00	0.00		
	Deposition kommunales Abwasser	MW		0.19	0.04	0.21	0.03	7	
		Max.		0.38	0.07	0.42	0.06		
	Lager								
		Min.		?	?	?	?		
	Lagerbestand	MW		<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001		
		Max.		?	?	?	?		

- 1) in Kapitel „Verkehr mit Produkten“ bestimmt
- 2) in Kapitel „Abfallwirtschaft“ bestimmt.
- 3) Annahme: Wird Null gesetzt.
- 4) Keine verlässliche bzw. brauchbaren Daten verfügbar.
- 5) Atmosphärischer Eintrag auf Fläche der Schweiz anteilmässig aufgeteilt.
- 6) Atmosphärischer Eintrag auf Fläche der Schweiz anteilmässig aufgeteilt.
- 7) Annahme: 10 % des atmosphärischen Eintrags auf die Schweizer Grundfläche (Emissionen aus „Verkehr mit Produkten“).

LagerSchätzung gemäss Kapitel „Teilsystem Umwelt“.

Tabelle 9-45: Input-, Outputflüsse und Lager für den Prozess „Hydrosphäre“

PROZESS		GÜTERBEZEICHNUNG		Güter-Massenfluss 1000 t/a	PentaBDPE-Fluss t/a	OctaDBPE-Fluss t/a	DecaDBPE-Fluss t/a	TBBPA-Fluss t/a	Bem.
<b>Hydrosphäre</b>	<b>IN</b>								
			Min.		0.003	?	0.005	0.009	
		Abwasser Abfallwirtschaft	MW		0.006	?	0.010	0.017	8
			Max.		0.012	?	0.020	0.034	
			Min.		0.00009	0.00006	0.0008	0.0002	
		Atmosphärischer Eintrag Hydrosphäre	MW		0.00012	0.00013	0.0013	0.0006	9
			Max.		0.00016	0.00019	0.0017	0.0010	
			Min.		?	?	?	?	
		Erosion	MW		?	?	?	?	
			Max.		?	?	?	?	
	<b>OUT</b>								
			Min.		0.01	0.17	0.02	0.00	
		Export Hydrosphäre	MW		0.012	0.33	0.03	0.004	10
			Max.		0.02	0.66	0.06	0.01	
			Min.		?	?	?	?	
		Aufnahme Biota	MW		?	?	?	?	
			Max.		?	?	?	?	
			Min.		?	?	?	?	
		Sedimentation	MW		?	?	?	?	
			Max.		?	?	?	?	
	<b>Lager</b>								
			Min.		?	?	?	?	
		Lagerbestand	MW		3	?	7	4	
			Max.		?	?	?	?	

8) in Kapitel „Abfallwirtschaft“ bestimmt.

9) Atmosphärischer Eintrag auf Fläche der Schweiz anteilmässig aufgeteilt.

10) Berechnet aus Sedimentgehalten und Austrag im Rhein und der Rhone.

Keine verlässliche bzw. brauchbare Daten verfügbar für Erosion, Aufnahme Biota, Sedimentation

Tabelle 9-46: Input-, Outputflüsse und Lager für den Prozess „Pedo-/Lithosphäre“

PROZESS		GÜTERBEZEICHNUNG		Güter-Massenfluss 1000 t/a	PentaBDPE-Fluss t/a	OctaDBPE-Fluss t/a	DecaDBPE-Fluss t/a	TBBPA-Fluss t/a	Bem.
<b>Pedo-/Lithosphäre</b>	<b>IN</b>								
			Min.		?	?	?	?	
		Ablagerungen Produktion, Handel und Konsum	MW		?	?	?	?	
			Max.		?	?	?	?	
			Min.		0.018	?	0.023	0.009	
		Klärschlamm in Landwirtschaft	MW		0.036	?	0.045	0.018	11
			Max.		0.140	?	0.180	0.070	
			Min.		1.2	0.2	1.3	0.2	
		Atmosphärischer Eintrag Pedo-/Lithosphäre	MW		1.7	0.3	1.9	0.3	12
			Max.		2.2	0.4	2.5	0.3	
			Min.		?	?	?	?	
		Sedimentation	MW		?	?	?	?	
			Max.		?	?	?	?	
	<b>OUT</b>								
			Min.		?	?	?	?	
		Aufnahme Biota	MW		?	?	?	?	
			Max.		?	?	?	?	
			Min.		?	?	?	?	
		Erosion	MW		?	?	?	?	
			Max.		?	?	?	?	
	<b>Lager</b>								
			Min.		?	?	?	?	
		Lagerbestand	MW		40	?	20	60	
			Max.		?	?	?	?	

11) in Kapitel „Abfallwirtschaft“ bestimmter Anteil des auf Landwirtschaftsflächen ausgebrachter Klärschlamm, verrechnet mit Klärschlammkonzentrationen aus der Literatur. Biogene Abfälle (Kompost):  
Es sind keine Literaturdaten vorhanden, Annahme: Kein Beitrag.

12) Siehe Tabelle 9-44.

Keine verlässlichen bzw. brauchbaren Daten verfügbar für Erosion, Aufnahme Biota, Sedimentation.

Tabelle 9-47: Input-, Outputflüsse und Lager für den Prozess „Biota“

PROZESS		GÜTERBEZEICHNUNG		Güter- Massen- fluss 1000 t/a	PentaBDPE- Fluss t/a	OctaDBPE- Fluss t/a	DecaDBPE- Fluss t/a	TBBPA-Fluss t/a	Bem.
Biota	IN		Min.		?	?	?	?	
		Atmosphärischer Eintrag Biota	MW		?	?	?	?	
			Max.		?	?	?	?	
		Aufnahme Bioto Hydrospäre	Min.		?	?	?	?	
			MW		?	?	?	?	
			Max.		?	?	?	?	
		Aufnahme Biota Pedo-/Lithosphäre	Min.		?	?	?	?	
			MW		?	?	?	?	
			Max.		?	?	?	?	
		OUT							
		Eintrag aus Biota in Prod. Und Konsum	Min.		?	?	?	?	
			MW		?	?	?	?	
			Max.		?	?	?	?	
		Lager							
		Lagerbestand	Min.		?	?	?	?	
	MW			?	?	?	?		
	Max.			?	?	?	?		

Für den Teilprozess Biota sind zur Zeit keine verlässlichen bzw. brauchbaren Daten verfügbar.

### 9.3 Anhang 3 – Stoffeigenschaften der untersuchten FS

Untenstehende Zusammenfassung zu den untersuchten Stoffen entstammt einer Zusammenstellung in [ALTEC, 2000] und basiert auf den zitierten Literaturstellen. Dazu wurden die untenstehenden Buchstabenkürzel verwendet:

- Schlussbericht des schwedischen FSM-Projekts [KEMI, 1996]
- IUCLID-Dataset (European Commission, European Chemicals Bureau)
- Dänische Stoffflussanalyse [Danish EPA, 1999]
- Studie zu Dampfdrücken [Tittlemier + Tomy, 2000]
- EU Risk Assessment [RA, 2000a]
- EU Risk Assessment [RA, 2000b]
- Environmental Health Criteria (EHC 192) [IPCS, 1997]
- Environmental Health Criteria (EHC 172) [IPCS, 1995]
- Bericht in „Environmental Science & Technology“ [Renner, 2000]
- Environmental Health Criteria (EHC 162) [IPCS, 1994b]

### 9.3.1 PentaBDPE

Tabelle 9-48: Wichtigste Eigenschaften von PentaBDPE

<b>Allg. Stoffinfo</b>	
Stoffname	Pentabromdiphenylether
Kommerzielle Namen	z.B.: DE-71
CAS-Nr.	32534-81-9
<b>Verwendung</b>	
Verwendung	Nur in PUR-Schaum (f) Textilien, PUR-Schaum (g)
additiv / reaktiv	additiv
Gehalte des Endprodukts	5-30% (a)
Verbrauchsmengen [t/Jahr]	8'500 (j). 5'000 im 1992 (a)
<b>Chemisch-Physikalische Stoffdaten</b>	
Molmasse [g/mol]	564.6
Siedepunkt [°C bei 101.3 kPa]	zersetzt (e)
Dampfdruck [mm Hg] oder [Pa]	4.69E-5 Pa bei 21°C, Sättigung bei 7E-4 (f); 10E-5.11 bis 10E-6.12 Pa bei 25°C (d); tief (a)
Wasserlöslichkeit	13.3 ug/l (f); tief (a)
log Kow	6.57 (f)
<b>Human-Toxizität</b>	
akute Tox (LD50) oral [mg/kg]	schwache akute Tox (f), (a)
akute Tox (LD50) dermal [mg/kg]	schwache akute Tox (f), (a)
akute Tox (LD50) inhalativ [mg/l]	schwache akute Tox (f), (a)
Reizend (Haut, Augen, Atemwege)	Haut und Augen negativ, inhalativ nur bei sehr hohen Dosen (f)
Sensibilisierend (dermal, inhalativ)	negativ (f)
subakute, subchronische bis chronische Tox	NOAEL 1 mg/kg/d, z.T. Hinweise auf Chlorakne (f)
Mutagenität (Ames-Test etc.)	negativ (a), (f)
Karzinogenität	nd (f), (a)
Reproduktionstox, Entwicklungstox, Teratogenität	keine Hinweise (f) Hinweise für estrogenen Wirkung (neue Untersuchung Meerts, Bergman et.al)
Toxikokinetik Mensch/Säuger	schnelle Aufnahme, wenig Metabolismus, potentiell bioakkum. (f), je nach Congener lange biologische Halbwertszeit 6-17 Woche in Ratten (a)
<b>Ökotoxizität</b>	
LC50 Fisch (96 h) [mg/l]	nd (j), (a)
EC50 Daphnia (48 h) [mg/l]	0.014 (f)
EC50 algae (72 h) [mg/l]	nd (j), (a)
EC50 Mikroorganismen (30 min.) [mg/l]	nd (j), (a), (f)
Langzeittox (NOEC 21-90 d) [mg/l]	Fisch 0.0089 mg/l, Daphnie 0.0053 mg/l, Sediment 15.5 mg/kg (f)
<b>Umweltverhalten</b>	
Biologischer Abbau	persistent (a), (f)
photolytischer Abbau	atmosphärische t1/2 12.6 d (f)
hydrolytischer Abbau	
Akkumulation (BCF)	14350 (f), >10'000 in Karpfen (a)

### 9.3.2 OctaBDPE

Tabelle 9-49: Wichtigste Eigenschaften von OctaBDPE

<b>Allg. Stoffinfo</b>	
Stoffname	Octabromdiphenylether
Kommerzielle Namen	z.B.: DE-79, Saytex 111
CAS-Nr.	32536-52-0
<b>Verwendung</b>	
Verwendung	ABS (g) oft mit SbO <sub>3</sub> (a)
additiv / reaktiv	additiv
Gehalte des Endprodukts	5-30% (a)
Verbrauchsmengen [t/Jahr]	3825 (i). 5'000 im 1992 (a)
<b>Chemisch-Physikalische Stoffdaten</b>	
Molmasse [g/mol]	801.4
Siedepunkt [°C bei 101.3 kPa]	zersetzt (f)
Dampfdruck [mm Hg] oder [Pa]	6.59E-6 Pa bei 21°C, Sättigung bei 30 µg/m <sup>3</sup> (e), tief (a)
Wasserlöslichkeit	<0.5 µg/l (e); tief (a)
log Kow	6.29 (e)
<b>Human-Toxizität</b>	
akute Tox (LD50) oral [mg/kg]	>5'000 (e); schwache akute Tox (a)
akute Tox (LD50) dermal [mg/kg]	>2000 (e)
akute Tox (LD50) inhalativ [mg/l]	>17-50 (e)
Reizend (Haut, Augen, Atemwege)	Haut und Augen negativ, inhalativ keine Hinweise (e)
Sensibilisierend (dermal, inhalativ)	dermal negativ (e)
subakute, subchronische bis chronische Tox	NOAEC 0.6 mg/m <sup>3</sup> , LOAEL 7-10 mg/kg/d
Mutagenität (Ames-Test etc.)	negativ (a), (e)
Karzinogenität	nd (a), (e)
Reproduktionstox, Entwicklungstox, Teratogenität	NOAEL 2mg/kg/d (e), keine klaren Hinweise (a)
Toxikokinetik Mensch/Säuger	je nach Congener lange biologische Halbwertszeit 6-17 Woche in Ratten (a)
<b>Ökotoxizität</b>	
LC50 Fisch (96 h) [mg/l]	nd (j), (a)
EC50 Daphnia (48 h) [mg/l]	nd (j), (a)
EC50 algae (72 h) [mg/l]	nd (j), (a)
EC50 Mikroorganismen (30 min.) [mg/l]	nd (j), (a)
Langzeittox (NOEC 21-90 d) [mg/l]	nd (j), (a)
<b>Umweltverhalten</b>	
Biologischer Abbau	persistent (a)
photolytischer Abbau	evtl. Debromierung zu tiefer bromierten BDE (a)
hydrolytischer Abbau	
Akkumulation (BCF)	2 in Karpfen (a)

### 9.3.3 DecaBDPE

Tabelle 9-50: Wichtigste Eigenschaften von DecaBDPE

<b>Allg. Stoffinfo</b>	
Stoffname	Decabromdiphenylether
Kommerzielle Namen	z.B.: DE-83, DE-83R, Saytex 102E, Adine 505
CAS-Nr.	1163-19-5
<b>Verwendung</b>	
Verwendung	PS, Polyester, PA, Textilien (g) EEE, Textilbeschichtungen, Polymere etc., oft mit SbO <sub>3</sub> (a)
additiv / reaktiv	additiv
Gehalte des Endprodukts	5-30% (a)
Verbrauchsmengen [t/Jahr]	54'800 (i). 30'000 im 1992 (a)
<b>Chemisch-Physikalische Stoffdaten</b>	
Molmasse [g/mol]	959
Siedepunkt [°C bei 101.3 kPa]	zersetzt (e)
Dampfdruck [mm Hg] oder [Pa]	4.63E-6 Pa bei 21°C, Sättigung bei 25 µg/m <sup>3</sup> (e), tief (a)
Wasserlöslichkeit	<1 µg/l bei 25°C bzw. 20-30 µg/l bei unbekanntem Bdg. (e); tief (a)
log K <sub>ow</sub>	6.265 (e)
<b>Human-Toxizität</b>	
akute Tox (LD <sub>50</sub> ) oral [mg/kg]	>2000-5000 (e) schwache akute Tox (a)
akute Tox (LD <sub>50</sub> ) dermal [mg/kg]	>2000 (e)
akute Tox (LD <sub>50</sub> ) inhalativ [mg/l]	>48.2 (j)
Reizend (Haut, Augen, Atemwege)	Haut und Augen negativ (a),(e)
Sensibilisierend (dermal, inhalativ)	dermal negativ (e)
subakute, subchronische bis chronische Tox	NOAEL 1'100-7'000 mg/kg/d (e)
Mutagenität (Ames-Test etc.)	negativ (a), (e)
Karzinogenität	nicht carcinogen für Menschen klassiert (e); Lebertumore in Mäusen bei sehr hohen Dosen (2.5-5% im Futter während 2 y)
Reproduktionstox, Entwicklungstox, Teratogenität	Keine klaren Hinweise (a)
Toxikokinetik Mensch/Säuger	langsame gastro-int. Aufnahme, kleines Bioakk.-Potential, schnelle Ausscheidung (a), (e)
<b>Ökotoxizität</b>	
LC <sub>50</sub> Fisch (96 h) [mg/l]	nd (j), (a)
EC <sub>50</sub> Daphnia (48 h) [mg/l]	nd (j), (a)
EC <sub>50</sub> algae (72 h) [mg/l]	Weniger als 50% Inhibition bei 1 mg/l Acetone (j)
EC <sub>50</sub> Mikroorganismen (30 min.) [mg/l]	nd (j), (a)
Langzeittox (NOEC 21-90 d) [mg/l]	nd (j), (a)
<b>Umweltverhalten</b>	
Biologischer Abbau	persistent (a)
photolytischer Abbau	evtl. Debromierung zu tiefer bromierten BDE (a)
hydrolytischer Abbau	
Akkumulation (BCF)	<5 bzw. <50 in Karpfen (a)

### 9.3.4 TBBPA

Tabelle 9-51: Wichtigste Eigenschaften von TBBPA

<b>Allg. Stoffinfo</b>	
Stoffname	Tetrabrombisphenol A
Kommerzielle Namen	z.B.: BA-59P, Saytex RB-100
CAS-Nr.	79-94-7
<b>Verwendung</b>	
Verwendung	Additiv in ABS, PBT, PS, oft mit SbO <sub>3</sub> ; reaktiv in Epoxy, PC-Harze, Polyester-Harz, ungesättigte Polyester (a), (g)
additiv / reaktiv	additiv und reaktiv
Gehalte des Endprodukts	11-20%, oft zusammen mit ca. 5% SbO <sub>3</sub> (a)
Verbrauchsmengen [t/Jahr]	121'300 (i). 10'000-50'000 (b)
<b>Chemisch-Physikalische Stoffdaten</b>	
Molmasse [g/mol]	543.9
Siedepunkt [°C bei 101.3 kPa]	316 (a)
Dampfdruck [mm Hg] oder [Pa]	<1 mm Hg bei 20°C (a) 4.15E-5 mmHg (ohne Temperaturangabe) = 5.52E-3 Pa (c)
Wasserlöslichkeit	4.16 mg/l bei 25°C (a), (b)
log K <sub>ow</sub>	4.54 (a), (b)
<b>Human-Toxizität</b>	
akute Tox (LD <sub>50</sub> ) oral [mg/kg]	>2'000 (a)
akute Tox (LD <sub>50</sub> ) dermal [mg/kg]	>2'000 (b)
akute Tox (LD <sub>50</sub> ) inhalativ [mg/l]	>0.5 (b), 0.5 bis 2.5 (a)
Reizend (Haut, Augen, Atemwege)	Haut negativ (a), Augen negativ (b)
Sensibilisierend (dermal, inhalativ)	dermal negativ (b)
subakute, subchronische bis chronische Tox	NOAEL inhalativ > 18mg/l; NOAEL oral >100mg/kg bis >2500 mg/kg (b)
Mutagenität (Ames-Test etc.)	negativ, aber zuwenig Daten (a), (b)
Karzinogenität	nd (b)
Reproduktionstox, Entwicklungstox, Teratogenität	negativ, aber zuwenig Daten (a)
Toxikokinetik Mensch/Säuger	schwache gastro-intestinale Absorption, Halbwertszeit in Ratten-Fett 71h, in Leber 10h (a)
<b>Ökotoxizität</b>	
LC <sub>50</sub> Fisch (96 h) [mg/l]	0.4-0.54 (b), 0.51 (a)
EC <sub>50</sub> Daphnia (48 h) [mg/l]	0.96 (a), (b)
EC <sub>50</sub> algae (72 h) [mg/l]	0.09 bis 1 (a), (b)
EC <sub>50</sub> Mikroorganismen (30 min.) [mg/l]	0.09-0.89 bzw. 0.13-1 (h)
Langzeittox (NOEC 21-90 d) [mg/l]	Fisch 0.16 (b)
<b>Umweltverhalten</b>	
Biologischer Abbau	partieller Abbau, unvollständig (a)(b) Hinweise, dass in Umwelt und Organismen Abbau zu Dimethoxy-Derivaten (a)
photolytischer Abbau	
hydrolytischer Abbau	
Akkumulation (BCF)	200-3200 in aquatischen Org. (a), 20-720 (b)