

10.19

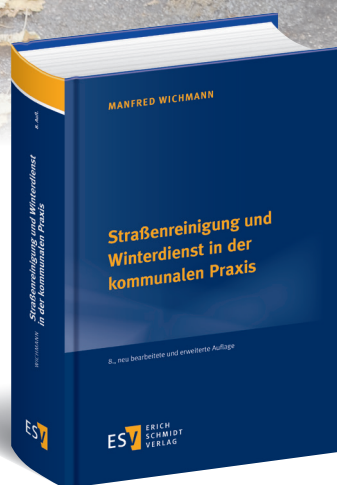
Lizenziert für MPW - Marketing Pro Wärmedämmung GmbH.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.

51. Jahrgang
Oktober 2019
Seite 481-524

www.MUELLundABFALL.de

Müll und Abfall

Fachzeitschrift
für Abfall-
und
Ressourcen-
wirtschaft



Straßenreinigung und Winterdienst in der kommunalen Praxis

Von Dr. Manfred Wichmann

8., neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2018, 823 Seiten,
fester Einband, € (D) 104,-, ISBN 978-3-503-17643-4

Online informieren und bestellen:  www.ESV.info/17643

ESV ERICH
SCHMIDT
VERLAG

21001

Flammschutzmittel für ein effektives Recycling von expandiertem Polystyrol (EPS)

Flame retardants for an effective recycling of expanded polystyrene (EPS)

Dr. Christian Sinn, Dr. Christoph Semisch, Prof. Dr. Michael Braungart und Dr. Peter Mösele



Zusammenfassung

Expandierbares Polystyrol, kurz EPS (allgemein auch als Styropor bekannt), wird seit vielen Jahrzehnten weltweit als Dämmstoff im Gebäudebau eingesetzt. Da das Material – wie jeder andere organische Dämmstoff – brennbar ist, müssen ihm für diesen Anwendungsbereich Flammschutzmittel zugesetzt werden. Bis 2016 war als Flammschutzmittel überwiegend Hexabromcyclododecan (HBCD) im Einsatz. Nach damals neuen Erkenntnissen erhielt es jedoch die Einstufung als sogenannte PBT-Substanz (PBT: persistent, bioakkumulativ, toxisch), darf inzwischen nicht mehr verwendet werden und machte gebrauchte EPS-Dämmplatten zwischenzeitlich sogar zu „gefährlichem Abfall“ – eine Regelung, die der Gesetzgeber aber wieder zurücknahm. Es mussten also bessere Alternativen gefunden werden. In der vorliegenden Studie haben wir daher zwei andere bromierte Flammschutzmittel hinsichtlich ihrer Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit als Flammschutzmittel in EPS-Dämmstoffen untersucht und bewertet. Es handelt sich um Polymer-FR und ein TBBPA-Derivat.



Polymer-FR, ein neues bromiertes Polymer, ist weder toxisch noch bioakkumulierbar. Bei der Verbrennung entwickelt Polymer-FR Bromwasserstoff, der für die flammhemmende Wirkung verantwortlich ist. Daneben können unter bestimmten Bedingungen Spuren toxischer organischer Verbindungen entstehen.



Im Gegensatz dazu ist das zweite untersuchte Flammschutzmittel, ein Tetrabrombisphenol A (TBBPA)-Derivat, sehr gefährlich. Es ist in vitro hormonell wirksam, bioakkumulierbar und persistent. Der Nachweis der Substanz in Umweltproben zeigt, dass sie in der Umwelt transportiert und angereichert werden kann. Momentan wird ihre Gefährlichkeit im Rahmen eines EU-Programmes (CoRAP) untersucht. Möglicherweise wird die Verwendung der Substanz in absehbarer Zeit verboten.



Christian Sinn and Christoph Semisch are scientific supervisors at EPEA GmbH – Part of Drees & Sommer. Michael Braungart is managing director of BRAUNGART EPEA – Internationale Umweltforschung GmbH. Peter Mösele is managing director of EPEA GmbH – Part of Drees & Sommer.

Ebenso wie Polymer-FR entwickelt das TBBPA-Derivat während der Verbrennung Bromwasserstoff. Unter anaeroben Bedingungen wird es langsam zu dem noch gefährlicheren TBBPA abgebaut, das im Verdacht steht, krebserregend und hormonell wirksam zu sein und ebenfalls im CoRAP-Programm untersucht wird. Aus Cradle-to-Cradle-Perspektive wird empfohlen, das TBBPA-Derivat wegen seiner Gefährlichkeit nicht länger einzusetzen.

Da das bromierte Polymer weder toxisch noch bioakkumulativ ist, ist es dem TBBPA-Derivat hinsichtlich seiner

Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit klar überlegen.

Sein Einsatz erlaubt sogar das werkstoffliche Recycling von gebrauchtem EPS und damit sowohl die Einsparung fossiler Ressourcen als auch eine Reduktion des Kohlendioxidausstoßes.

Abstract

Pure EPS is inflammable. Therefore, the addition of a flame retardant is mandatory, if EPS is – like any other organic insulation material – used for insulation of buildings. For many years HBCD was used as a flame retardant in EPS. However, after revealing its toxicity, used EPS became hazardous waste and better alternatives had to be found. In this study two brominated organic compounds were assessed for their environmental and health risk during use as flame retardant in EPS.

Polymeric FR, a new brominated polymer, is non-toxic and non-bioaccumulative. Combustion leads to the formation of hydrogen bromide which is intended for flame retardancy. Under certain conditions, traces of toxic organic compounds may be formed.

In contrast to Polymeric FR, the second flame retardant, a TBBPA derivative, is very hazardous. This substance is endocrine disrupting in vitro, bioaccumulative and persistent. Identification of the TBBPA derivative in environmental samples proves that the substance can disperse and accumulate in the environment. For final confirmation of its toxicity, currently, the TBBPA derivative is assessed by the EU. It may be possible that the use of the substance will be restricted after completion of this process in a few years.

Similar to Polymeric FR, the TBBPA derivative forms hydrogen bromide during combustion. Under certain conditions, traces of highly toxic organobromine compounds can be formed. Moreover, research has shown that the TBBPA derivative is slowly degraded under anaerobic conditions, leading to even more toxic metabolites, e.g. to its precursor substance TBBPA which is suspected of being carcinogenic and endocrine disrupting. It is recommended not to use this substance any longer due to its hazardous characteristics.

As the brominated polymer is neither toxic nor bioaccumulative due to its polymeric character, it is clearly superior to the TBBPA derivative in its environmental and health performance. Additionally, the use of this compound allows the mechanical recycling of EPS after use and thereby saving of fossil resources and reducing carbon dioxide emission.

1. Einleitung – Klimawandel, Dämmung, Dämmstoffe, Recycling

Steigende Energiepreise und der im Wesentlichen durch den Ausstoß von Kohlendioxid verursachte Klimawandel mit seinen gravierenden Folgen zwingen im Gebäudebereich zu einer besseren Wärmedämmung, u. a. durch einen verstärkten Einsatz von Dämmstoffen. Gleichzeitig erfordern sowohl eine wachsende Ressourcenknappheit als auch Engpässe bei der Verbrennung von gebrauchten Produkten ein Recycling der Dämmstoffe nach ihrer Nutzungsphase.

Trotz zahlreicher konkurrierender Dämmstoffe in Deutschland wurde der Aspekt des Dämmstoffrecyclings bislang nicht ausreichend berücksichtigt. Ein Dämmstoffrecycling ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn sowohl ökologische als auch ökonomische Mindestanforderungen erfüllt werden. Das ist in der Regel dann der Fall, wenn ein großer Teil der für die Herstellung des Dämmstoffsystems verwendeten Materialien auf einem hohen Qualitätsniveau und mit möglichst geringem Aufwand unter wirtschaftlichen Bedingungen wiedergewonnen werden kann. Dabei dürfen keine Risiken für Umwelt oder Gesundheit entstehen. Für das Recycling von altem HBCD-haltigem EPS (expandierbarem Polystyrol) gibt es zurzeit noch keine kommerziell nutzbare Methode. Die Initiative PSLoop arbeitet jedoch gerade an der Weiterentwicklung eines Lösungsmittelverfahrens, mit dem in Zukunft auch das Polystyrol aus HBCD-haltigen alten Dämmplatten wiedergewonnen werden kann (s. Kap. 10).

Ziel dieses Berichtes ist jedoch nicht ein Vergleich der Recyclingfähigkeit verschiedener Dämmstoffsysteme. Vielmehr soll an einem Beispiel gezeigt werden, welchen Einfluss der Einsatz eines neuartigen Flammschutzmittels auf die Kreislaufführung von EPS haben kann.



Dämmstoffmontage, Copyright BASF

werden, dass sein Einsatz im Gebäudebereich möglich wird.

Die drei mengenmäßig wichtigsten Gruppen von Flammschutzmitteln sind [1]:

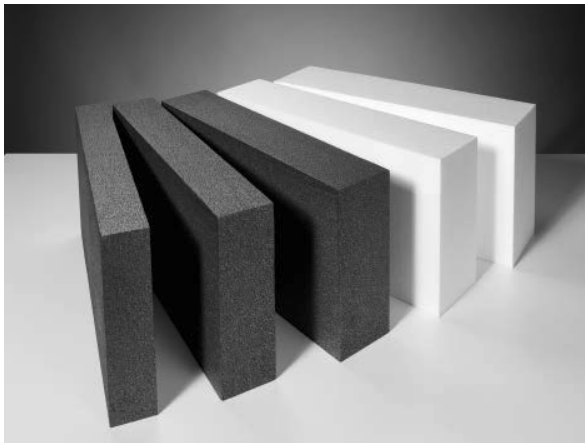
Anorganische Flammschutzmittel, z. B. Aluminium- und Magnesiumhydroxid: Sie entziehen durch die Abspaltung und das Verdampfen von chemisch gebundenem Wasser dem Verbrennungsprozess Wärme und bremsen ihn dadurch.

Bromierte und chlorierte Flammschutzmittel: Diese Substanzen geben beim Erhitzen leicht Halogenwasserstoff (z. B. Bromwasserstoff, HBr) ab. In einem mehrstufigen Mechanismus greift dieser Halogenwasserstoff blockierend in die einzelnen Schritte der Verbrennung ein: Er dissoziiert zu Halogenradikalen, die andere, bei der Verbrennung entstehende, Radikale abfangen und die Kettenreaktion der Verbrennung so abstoppen.

Phosphorbasierte Flammschutzmittel, z. B. organische und anorganische Phosphate: Diese Substanzen entwickeln im Brandfall schwerflüchtige und unbrennbare Verbindungen, z. B. Phosphorsäure, die die Oberfläche des Kunststoffes bedecken und eine weitere Oxidation verhindern.

3. Flammschutzmittel für EPS

Die Wahl des Flammschutzmittels für eine bestimmte Anwendung hängt von mehreren Faktoren ab. Zunächst muss das Flammschutzmittel grundsätzlich für ein Material geeignet sein, d. h. es muss mit dem zu schützenden Material mischbar sein, in angemessener Konzentration die erforderliche Wirkung zeigen und darf die Materialeigenschaften nicht signifikant beeinflussen. Weiterhin sollte es die Materialkosten nicht deutlich erhöhen. Und nicht zuletzt darf die Verwendung des Flammschutzmittels zu keinem zusätzlichen Risiko für Gesundheit oder Umwelt führen. Allein diese Kriterien sind oft nur schwer gleichzeitig zu erfüllen. Es hat sich gezeigt, dass für den Flammschutz von expandiertem Polystyrol, das für die Gebäudedämmung eingesetzt wird, nur bromierte, organische Verbindungen in Frage kommen. Diese chemischen Substanzen gehören zur Klasse der sogenannten „Organohalogenverbindungen“. Die Erfahrung hat aber auch gezeigt, dass Organohalogenverbindungen häufiger als andere Verbindungen persistent (d. h. nicht oder nur sehr schwer abbaubar), bioakkumulierbar (d. h.



Dämmstoffpalette, Copyright BASF

2. Flammschutzmittel allgemein

Nahezu alle organischen Dämmstoffe, ob aus nachwachsenden oder synthetischen Rohstoffen hergestellt, sind brennbar. Aus naheliegenden Gründen kann diese Eigenschaft im Bereich der Fassadendämmung problematisch sein. Auch EPS ist brennbar. Jedoch kann die Entflammbarkeit von EPS durch den Zusatz eines Flammschutzmittels so stark reduziert

sie können sich z.B. in Fettgewebe bzw. in der Nahrungskette anreichern) und toxisch (d. h. giftig) sind und daher das Kriterium der Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit nicht immer erfüllen. Sie stehen daher im besonderen Fokus. Insbesondere das über Jahrzehnte als Flammenschutzmittel in EPS eingesetzte Hexabromcyclododecan (übliche Abkürzung: HBCD) hat sich im Lauf der Zeit als gefährliche Substanz herausgestellt: Es zeichnet sich durch eine hohe Giftigkeit für im Wasser lebende Organismen aus, ist möglicherweise fortpflanzungsschädigend, chemisch sehr stabil und kann sich in der Nahrungskette anreichern – an deren Ende häufig der Mensch steht. HBCD wurde daher als POP (persistent organic pollutant) gelistet und wird seit 2016 in der EU nicht mehr bei der Produktion neuer Dämmstoffe eingesetzt [2]. Neben der strengen Regelung des Umgangs mit dem beim Rückbau alter Gebäude anfallenden EPS, das noch mit HBCD flammgeschützt ist [3], stellte sich die Frage nach einem alternativen Flammenschutzmittel. Nach intensiver, mehrjähriger Suche durch die EPS-Industrie stehen zurzeit nur drei bromierte chemische Verbindungen als Flammschutzmittel für EPS zur Verfügung. Es sind ein bromiertes Polymer und zwei Substanzen, die sich vom Tetrabrombisphenol A (TBBPA) ableiten:

- ◆ Bromiertes Butadien-Styrol-Copolymer (im Folgenden Polymer-FR [4] genannt), CAS # 1195978-93-8
- ◆ TBBPA-bis(2,3-dibrompropyl)ether (im Folgenden TBBPA-Ether genannt), CAS # 21850-44-2 und
- ◆ TBBPA-bis(2,3-dibrommethylpropyl)ether, CAS # 97416-84-7

Diese drei Substanzen wurden im Rahmen eines Projektes von BASF SE und der EPEA GmbH – Part of Drees & Sommer [5] hinsichtlich ihrer Gefährlichkeit verglichen. Da die zweite und die dritte chemische Verbindung hinsichtlich ihrer Struktur aber auch hinsichtlich ihrer Gefährlichkeit sehr ähnlich sind, reduziert sich der Vergleich im Folgenden auf zwei Substanzen, nämlich auf das bromierte Polymer und auf den TBBPA-bis(2,3-dibrompropyl)ether. Zur besseren Lesbarkeit werden in den folgenden Abschnitten nur noch die Bezeichnungen „Polymer-FR“ und „TBBPA-Ether“ benutzt.

4. Cradle to Cradle-Bewertung/Methode

Zur Bewertung der Gefahren, die von chemischen Substanzen, Materialien und letztlich auch Produkten für Umwelt und Gesundheit ausgehen, gibt es verschiedene Ansätze, die im Kern jedoch ähnlich sind. In obengenanntem Projekt wurde eine Bewertung in Anlehnung an die Cradle to Cradle-Methode [6] durchgeführt. Bei dieser handelt es sich um einen risikobasierten Ansatz, der nicht nur die spezifische Gefährlichkeit (= Giftigkeit bzw. Toxizität) einer Substanz, sondern auch deren Anwendungskontext berücksichtigt und als Ergebnis eine halbquantitative Risikoeinschätzung erlaubt. In Abschnitt 6 wird auf die Methode der Risikobewertung der Flammschutzmittel im Detail eingegangen.

Der große Vorteil der Cradle to Cradle-Methode liegt darin, dass mit vergleichsweise geringem Aufwand

eine rasche Identifikation der Schwachstellen eines Produktes bezüglich seiner Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit möglich ist und somit noch genügend Ressourcen für den wichtigeren Prozess der eigentlichen Produktoptimierung verbleiben.

Für die Bewertung der Gefährlichkeit der beiden bromierten Flammschutzmittel wurden folgende 19 Kriterien gewählt:

Kriterien zur Gesundheitsverträglichkeit

- ◆ Karzinogenität
- ◆ Endokrine Wirksamkeit
- ◆ Mutagenität
- ◆ Reproduktionstoxizität
- ◆ Orale Toxizität
- ◆ Dermale Toxizität
- ◆ Inhalative Toxizität
- ◆ Neurotoxizität
- ◆ Haut- und Augenreizungspotential
- ◆ Sensibilisierungspotential

Kriterien zur Umweltverträglichkeit

- ◆ Fischtoxizität
- ◆ Daphnientoxizität
- ◆ Algentoxizität
- ◆ Bodentoxizität
- ◆ Persistenz
- ◆ Bioakkumulationspotential
- ◆ Klimatische Relevanz

Life Cycle-Kriterien

- ◆ Gefährlichkeit der Verbrennungsprodukte
 - ◆ Gefährlichkeit der biologischen Abbauprodukte
- Für jedes der 19 Kriterien gibt es eine exakte Definition sowie eine Skala für die Einstufung der Ergebnisse der toxikologischen Untersuchungen von „ungefährlich“ bis „gefährlich“ [7].

Die ersten 17 Kriterien (Gesundheits- und Umweltverträglichkeit) werden übereinstimmend in den meisten Methoden zur toxikologischen Bewertung von Stoffen gewählt. Bei der Persistenz und dem Bioakkumulationspotential handelt es sich dabei nicht um Toxizitäten im eigentlichen Sinne. Sie spielen jedoch für die Bewertung der Gefährlichkeit eine wichtige Rolle und werden daher stets mitberücksichtigt.

Zusätzlich werden im hier gewählten Cradle to Cradle-Ansatz die Folgeprodukte berücksichtigt, da häufig aus einem ungefährlichen Produkt erst nach thermischem oder biologischem Abbau gefährliche Stoffe entstehen.

Das Ergebnis der Gefährlichkeitsbewertung wird mit einer Farbe („Ampelcode“), das Risiko mit einem Buchstaben a, b, c, oder x und zusätzlich mit einer Farbe gekennzeichnet. Liegen keine Daten vor, wird dies mit der Farbe Grau gekennzeichnet. Der Schlüssel für die Codierung ist in Abbildung 1 gezeigt:

a oder b	optimal oder Einsatz empfohlen
c	geringe Gefährlichkeit; bis auf Weiteres empfohlen
x	gefährlich; phase-out notwendig
grau	nicht bewertbar wegen schlechter Datenlage

Abbildung 1
Farbcode für die Risikobewertung einer Substanz bzw. eines Materials („phase-out“ bedeutet, dass eine Substanz nicht mehr eingesetzt werden sollte.)

Neue bromierte Flammschutzmittel für EPS

Die Bewertung des Risikos durch eine Chemikalie umfasst die folgenden Schritte:

- ◆ Ermittlung der Gefährlichkeit (substanz-spezifische Größe)
- ◆ Definition des Expositionsszenarios (kontext-abhängige Größe)
- ◆ Bestimmung der Einzelrisiken durch Kombination von Gefährlichkeit und Exposition sowie ihre Beschreibung durch einen Buchstaben a, b, c oder x. Einzelrisiko bedeutet dabei die Gefahr in einer bestimmten Situation und durch ein einziges Gefährlichkeitsmerkmal, z. B. eine Sensibilisierung beim Anfassen des EPS (ein Risiko, das jedoch gleich Null ist, also nicht existiert).
- ◆ Ggf. Bestimmung des Gesamtrisikos durch Aggregation der Einzelrisiken.

Die Farbcodierung hat sich als vorteilhaft für die schnelle Identifikation von Risiken erwiesen. Insbesondere bei der Darstellung einer größeren Zahl von Einzelergebnissen wird dies deutlich (s. a. Kapitel 8).

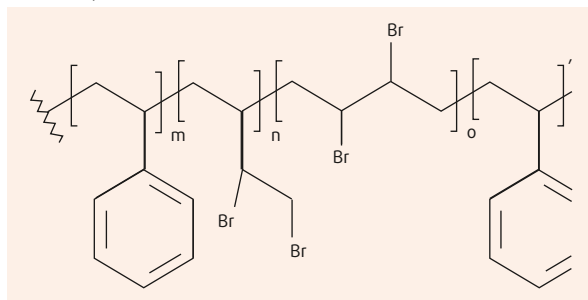
5. Cradle to Cradle-Bewertung/ Toxikologische Profile der bromierten Flammschutzmittel für EPS

In diesem Abschnitt werden die toxikologischen Profile der beiden bromierten Flammschutzmittel Polymer-FR und TBBPA-Ether als Ergebnis der Cradle to Cradle-Bewertung vorgestellt. Auf die detaillierte Herleitung der Profile soll an dieser Stelle wegen ihres Umfangs bewusst verzichtet werden. Vielmehr werden die Ergebnisse zusammenfassend vorgestellt, erläutert und auf Besonderheiten hingewiesen.

5.1 Polymer-FR

Eigenschaften:

- ◆ Name: Bromiertes Butadien-Styrol-Copolymer
- ◆ Molekulargewicht: 60.000–160.000 g/mol
- ◆ Registrierungsnummer nach CAS: 1195978-93-8
- ◆ Status: nichttoxisches Polymer
- ◆ Handelsnamen: Emerald Innovation 3000; FR-122P; GreenCrest C



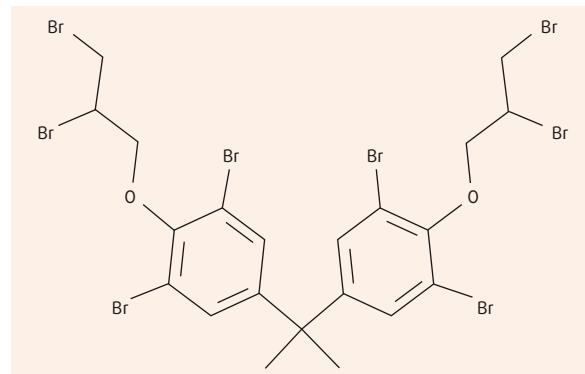
Das Besondere an Polymer-FR im Vergleich zum TBBPA-Ether ist, dass Polymer-FR ein Polymer, d. h. ein sehr großes Molekül ist. Wegen seiner Größe kann das Molekül Zellmembranen nicht passieren. Daraus ergibt sich zwangsläufig, dass Polymer-FR weder toxisch noch bioakkumulativ ist. Dies bestätigen auch ausnahmslos alle durchgeführten Toxizitätstests. [1] Denkbar ist lediglich die Bildung toxischer Substanzen bei der Verbrennung von Polymer-FR. Wie die meisten synthetischen Polymere ist Polymer-FR biologisch nicht abbaubar. Daher rührt das rote Feld für Persistenz. Für sich

allein ist Persistenz (Langlebigkeit, Beständigkeit) jedoch keine problematische Eigenschaft: Bei Dämmwendungen, deren Flammschutz über Jahrzehnte wirken muss, ist sie sogar erwünscht.

5.2 TBBPA-Ether

Eigenschaften:

- ◆ Name: Tetrabrombisphenol A-bis(2,3-dibrompropyl)ether
- ◆ Summenformel: $C_{21}H_{20}Br_8O_2$
- ◆ Molekulargewicht: 944 g/mol
- ◆ Registrierungsnummer nach CAS: 21850-44-2
- ◆ Status: Zurzeit im CoRAP-Prozess (Community Rolling Action Plan)
- ◆ Handelsnamen: SR-720, FR-720 und andere



Dem Gefährlichkeitsprofil in Abbildung 3 lässt sich entnehmen, dass TBBPA-Ether nicht nur endokrin (d. h. hormonell) wirksam [8, 9] sondern auch persistent [10, 11] und bioakkumulierbar [12] ist. Das bedeutet u. a., dass die Substanz in sehr niedriger und damit ungefährlicher Konzentration über große Entfernungen in der Umwelt (z. B. in Flüssen oder im Meer) transportiert werden und sich dann in einem Organismus oder in einer Nahrungskette wieder bis zu einer gefährlichen Konzentration anreichern kann. Ein bekanntes Beispiel dafür ist das Pestizid DDT, das welt-

Gefährlichkeit (Kategorie)	Karzinogenität	Endokrine Wirksamkeit	Mutagenität	Reproduktionstoxizität	Orale Toxizität	Dermale Toxizität	Inhalative Toxizität	Neurotoxizität	Irritationspotential	Sensibilisierungspotential	Fischtoxizität	Daphnientoxizität	Algentoxizität	Bodentoxizität	Persistenz	Bioakkumulationspotential	Klimatische Relevanz	Verbrennungsprodukte	Bioabbauprodukte
Bewertung																			

Abbildung 2
Cradle to Cradle® Gefährlichkeitsprofil für Polymer-FR

Gefährlichkeit (Kategorie)	Karzinogenität	Endokrine Wirksamkeit	Mutagenität	Reproduktionstoxizität	Orale Toxizität	Dermale Toxizität	Inhalative Toxizität	Neurotoxizität	Irritationspotential	Sensibilisierungspotential	Fischtoxizität	Daphnientoxizität	Algentoxizität	Bodentoxizität	Persistenz	Bioakkumulationspotential	Klimatische Relevanz	Verbrennungsprodukte	Bioabbauprodukte
Bewertung																			

Abbildung 3
Cradle to Cradle® Gefährlichkeitsprofil für TBBPA-Ether

Abbildung 4
Ableitung der Cradle to Cradle-Risiken für bromierte Flamm-schutzmittel in EPS

		Gefährlichkeit			
		GRÜN	GELB	ROT	GRAU
Expositionsniveau	keine Exposition				
	niedrig				
	niedrig im Falle hoher Persistenz und hohen Bio-akkumulationspotentials				
	mittel/hoch				

weit in der Landwirtschaft eingesetzt wurde und sich später im Fettgewebe von Eisbären in der Arktis wiederfand. Wegen dieser Eigenschaft zählen solche Substanzen zu den sehr gefährlichen Chemikalien. Dieser „Transporteffekt“ wurde auch für den TBBPA-Ether experimentell nachgewiesen. So wurde die Substanz in Eiern von Silbermöwen an den Großen Seen und im Gewebe von Fischen und Pinguinen in der Antarktis gefunden [13, 14].

Beide nach der Cradle to Cradle-Methode ermittelten Gefährlichkeitsprofile stimmen inhaltlich völlig mit den von der US-Umweltbehörde EPA in 2014 [15] publizierten Profilen überein.

Weiterhin entsteht bei dem – sehr langsamen – biologischen Abbau von TBBPA-Ether auch die Ausgangssubstanz TBBPA. TBBPA selbst ist noch gefährlicher als TBBPA-Ether. Es steht unter anderem im Verdacht, krebserregend zu sein [16]. Man spricht in diesem Fall daher auch von einer Toxifizierung der ursprünglichen Substanz durch den biologischen Abbau. Auch bei der unvollständigen Verbrennung von TBBPA-Ether entstehen wahrscheinlich weitere toxische Substanzen, u. a. bromierte Phenole [17].

6. Die Risikobewertung/Methode

Das Risiko (synonym mit „Gefahr“), das eine Substanz für Gesundheit oder Umwelt darstellt, wird durch zwei Faktoren bestimmt, nämlich durch die Gefährlichkeit der Substanz und durch die Exposition gegenüber der Substanz. Während die Gefährlichkeit eine substanzspezifische Eigenschaft ist, beschreibt die Exposition die potentielle Wechselwirkung der gefährlichen Substanz mit ihrer Umgebung, bspw. den Kontakt über die menschliche Haut, ihre orale Aufnahme oder ihre Freisetzung in die Umwelt. Beispielsweise ist die Exposition eines Menschen gegenüber einem Stoff in einer Hautcreme oder gegenüber einer inhalierten Substanz naturgemäß sehr hoch. Risiko und Gefährlichkeit sind miteinander über die folgende Gleichung verbunden:

Risiko = Gefährlichkeit × Exposition
Daraus ergibt sich z. B., dass eine sehr giftige Substanz (d. h. eine Substanz hoher Gefährlichkeit), die sich in einer stabilen und verschlossenen Flasche (d. h. keinerlei Exposition) befindet, kein Risiko darstellt.

(Anmerkung: Im Deutschen kann die Benutzung der Begriffe Gefahr (= Risiko) und Gefährlichkeit leicht zu

Verwechslungen führen. Im Englischen kann dies nicht passieren. Obige Gleichung lautet dort:

Risk = Hazard × Exposure)

Trotz der einfachen Struktur der Gleichung ist die quantitative Berechnung eines Risikos häufig komplex, weil sie viele Annahmen erfordert und viele Daten benötigt – die nicht immer verfügbar sind.

Eine alternative Methode ist die qualitative Bestimmung des Risikos. Sie ist eine Kombination aus der Bestimmung der Gefährlichkeit und der aufwendigen quantitativen Risikobestimmung. Die qualitative Risikobestimmung ist ein einfaches Werkzeug, das die schnelle Identifikation von Gefahren erlaubt. Es ist eine maßgeschneiderte Verknüpfung der Gefährlichkeit einer Substanz und der qualitativen Beschreibung der Exposition. Im Fall der bromierten Flamm-schutzmittel zeigt die Tabelle in Abbildung 4 die Kombinationsmöglichkeiten von Gefährlichkeit und Expositionsniveau und die daraus resultierenden Risiken.

7. Risikobewertung/Expositionsszenarien

Nach der Bestimmung der Gefährlichkeit der Flamm-schutzmittel und der Vorstellung der Methode zur qualitativen Risikobestimmung werden in diesem Abschnitt alle möglichen Szenarien für die beiden Flamm-schutzmittel aufgezeigt, die während der Lebenszyklus-Phasen Produktion, Logistik, Verarbeitung, Installation, Nutzung und Nachnutzungsphase auftreten können. Die in den Szenarien auftretende Exposition wird qualitativ ermittelt. Das bedeutet, dass die Höhe der Exposition auf begründeten Abschätzungen basiert. Im Detail handelt es sich um 17 mögliche Szenarien, die im Folgenden aber nur ausschnittsweise beschrieben sind. Besonderes Augenmerk liegt auf

- ◆ Produktion des Flamm-schutzmittels
- ◆ Nutzungsphase
- ◆ Recycling
- ◆ Verbrennung

In den Ergebnistabellen der Risikokalkulation (Abbildung 6) werden jedoch alle 17 Szenarien berücksichtigt.

7.1 Produktion

Die Flamm-schutzmittel werden unter den üblichen hohen Sicherheitsbestimmungen in einer chemischen Fabrik hergestellt. Es wird angenommen, dass sich der Arbeitsschutz auf eben diesem hohen Niveau befindet und die Arbeiter nicht exponiert sind. Jedoch gelangen permanent kleine Mengen des Flamm-schutzmittels über das Abwasser in die Umwelt, z. B. bei Reinigungsoperationen.

Expositionsniveau: Niedrig, nur umweltrelevant

7.2 Nutzungsphase

Im Normalfall verbleibt der Dämmstoff für viele Jahre unverändert und ohne Kontakt zu Mensch oder Umwelt im oder am Gebäude.

Expositionsniveau: Keines

Ausnahmefall Gebäudebrand

Im Falle eines Brandes wird das EPS zerstört. Dabei ist die Umwelt gegenüber dem Flamm-schutzmittel und

seinen Verbrennungsprodukten kurzzeitig stark exponiert. Da der Brand des Außendämmmaterials EPS außen am Gebäude stattfindet, wo sich in der Regel in unmittelbarer Nähe keine Menschen befinden, sind diese kaum exponiert.

Expositionsniveau: Kurzzeitig hoch

7.3 Recycling

Für das Recycling von gebrauchtem EPS gibt es verschiedene Möglichkeiten. EPS ist ein Thermoplast. Es kann werkstofflich oder chemisch recycelt werden. Hier soll nur das werkstoffliche Recycling betrachtet werden, da es derzeit gängige Praxis ist. Dabei wird die polymere Struktur des EPS nicht zerstört, d. h. das EPS wird chemisch nicht verändert. Das Recycling umfasst lediglich das Einschmelzen und die Reextrusion des Polystyrols. Bei diesen Prozessen ist, abhängig von der Temperatur, bei beiden Flammenschutzmitteln eine geringe thermische Zersetzung sowie im Fall des niedermolekularen TBBPA-Ethers zusätzlich eine unkontrollierte Freisetzung des im EPS vorhandenen Flammenschutzmittels denkbar. Es muss an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen werden, dass für eine Quantifizierung dieser Annahmen analytische Untersuchungen notwendig wären. Wegen der Unsicherheiten erfolgt in diesem Fall für das Expositionsniveau eine worst case-Annahme.

Unabhängig von einer Quantifizierung ist es jedoch plausibel, dass leichter flüchtige Flammenschutzmittel wie der TBBPA-Ether für ein Recycling von gebrauchtem EPS deutlich weniger geeignet sind.

Expositionsniveau: Mittel

7.4 Verbrennung

Wird das EPS nicht recycelt, kann es grundsätzlich deponiert oder verbrannt werden. Da die Deponierung von Abfällen mit mehr als 5 % Glühverlust in Deutschland jedoch verboten ist [18], soll sie hier nicht im Detail beschrieben werden.

Eine Verbrennung von gebrauchtem EPS in Anlagen ohne Rauchgasreinigung ist in Deutschland nicht zulässig. Die Nutzung von gebrauchten Kunststoffen als Haushaltsbrennstoff ist jedoch in bestimmten Gebieten der Welt durchaus üblich. Eine Verbrennung unter solchen Umständen würde zur Zerstörung des Flammenschutzmittels, zur Freisetzung von korrosivem und toxischem Bromwasserstoff sowie zur Bildung gefährlicher, organischer Verbindungen führen, die im Falle des TBBPA-Ethers stark toxisch sein können (siehe Abschnitt 5.2).

Expositionsniveau: Hoch

Dagegen wird bei einer Verbrennung in Anlagen mit Rauchgasreinigung gemäß Stand der Technik (d. h. 17. BImSchV [19]) eine Freisetzung von Bromwasserstoff und Organobromverbindungen nahezu vollständig vermieden. Experimentelle Daten zu diesem Szenario liegen vor [20], sind allerdings nicht umfangreich.

Expositionsniveau: Keines

Die Ergebnisse führen im nächsten Abschnitt zu den Risiken.

8. Risikobewertung/Ergebnisse

Nach der Zusammenstellung der Gefährlichkeitsmerkmale und der Abschätzung der Expositions niveaus

wird die qualitative Risikobewertung durchgeführt. Dies geschieht, indem für jedes Flammenschutzmittel jedes Gefährlichkeitsmerkmal aus Abschnitt 5.2 mit jedem Expositions niveau aus Abschnitt 7 gemäß dem Algorithmus aus Abschnitt 6, Abbildung 4 verknüpft wird. Es ergibt sich jeweils eine Risikomatrix mit $17 \times 19 = 323$ Einzelrisiken. Die Resultate sind in den beiden folgenden Tabellen dargestellt [21]. Wie sind die Tabellen zu lesen? Ein Beispiel soll dies zeigen: Aus Zeile 9 in Abbildung 6 ergeben sich die Einzelrisiken beim Brand eines Gebäudes, das mit TBBPA-Ether flammgeschütztem EPS isoliert wurde: Wegen der starken Freisetzung der schädlichen Substanz bei einem Brand ist die Exposition hoch. Dies führt zu einem direkten Risiko für Gesundheit und Umwelt durch die hormonelle Wirksamkeit der Substanz. Weiterhin kann die Substanz durch ihre Kombination von Persistenz und Bioakkumulierbarkeit auch an weit entfernten Orten schädlich sein. Zudem entstehen zusätzlich toxische Verbrennungsprodukte. Und durch biologischen Abbau können später und an anderer Stelle gefährliche Substanzen gebildet werden.

Für die beiden Flammenschutzmittel bedeutet das zusammengefasst Folgendes:

Flammenschutzmittel 1 (Polymer-FR)

Die Risikobewertung von Polymer-FR ergibt keinerlei Hinweise auf irgendein Risiko beim Einsatz von Polymer-FR als Flammenschutzmittel in EPS – mit Ausnahme der Bildung gefährlicher Verbrennungsprodukte in den vier Szenarien „Verkehrsunfall und Brand beim Transport“, „Brand des Dämmstoffs bei einem Gebäudebrand“, „Brand von EPS auf einer Mülldeponie“ und „Verbrennung in einer Anlage ohne Rauchgasreinigung“. In diesen Fällen wird überwiegend korrosiver und akut toxischer Bromwasserstoff gebildet. In Spuren können auch andere giftige Verbindungen entstehen.

Bei der Betrachtung dieser vier Fälle muss berücksichtigt werden, dass Verkehrsunfälle mit einem Brand der Ladung beim Transport von Flammenschutzmittel sehr selten auftreten. Da in Deutschland sowohl die Deponierung von flammgeschütztem EPS als auch seine Verbrennung in Anlagen ohne Rauchgasreinigung verboten sind, sind auch diese beiden Szenarien praktisch ausgeschlossen. Lediglich beim Brand eines gedämmten Gebäudes ist die Wahrscheinlichkeit der Freisetzung gefährlicher Gase hoch. Allerdings ist auch ein Gebäudebrand kein häufiges Ereignis.

Insgesamt muss Polymer-FR daher als vergleichsweise „ungefährliches Flammenschutzmittel“ eingestuft werden.

Flammenschutzmittel 2 (TBBPA-Ether)

Die Risikobewertung von TBBPA-Ether weicht von der des Polymer-FR stark ab. Zum einen weisen die Untersuchungen zur Toxizität auf eine hormonelle Wirksamkeit dieser Verbindung hin. Zum anderen ist TBBPA-Ether persistent und bioakkumulierbar. In der Kombination dieser Eigenschaften kann daher jede Freisetzung von TBBPA-Ether zu langfristigen Schäden in der Umwelt führen. Zudem kann die Verbin-

dung in der Umwelt zu noch gefährlicheren Substanzen abgebaut werden.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis zeigt die Risikoanalyse ebenfalls: Während der Nutzung ist die Exposition gering, da die Flammenschutzmittel in der Polymermatrix eingeschlossen und kaum freisetzbar sind. Eine Exposition erfolgt nur ausnahmsweise. Eine Exposition findet jedoch auch bei der Herstellung von TBBPA-Ether (und ggf. beim Recycling von TBBPA-Ether-additiviertem EPS) statt. Diese Exposition ist zwar gering aber dafür permanent und daher von viel größerem Ausmaß. Auch hier wird das Ergebnis der Risikomatrix durch einen experimentellen Fund bestätigt: Die weiter oben erwähnten Funde von TBBPA-Ether in den Eiern der Silbermöwe an den Großen Seen in den USA fanden in der Nähe einer Fabrik zur Herstellung des Flammenschutzmittels statt [22]. Daraus lässt sich ableiten, dass die größte Gefahr für Gesundheit und Umwelt bei der Verwendung von TBBPA-Ether in EPS

nicht von der Nutzungsphase, sondern von der Herstellung des Flammenschutzmittels und ggf vom Recycling ausgeht.

9. Diskussion und Empfehlungen

Polymer-FR, ein bromiertes Polymer, ist weder toxisch noch bioakkumulierbar. Bei der Verbrennung entwickelt Polymer-FR Bromwasserstoff (HBr), der für die flammhemmende Wirkung verantwortlich ist. Daneben können unter bestimmten Bedingungen Spuren toxischer organischer Verbindungen entstehen. Von zentraler Bedeutung ist jedoch vor allem das hohe Molekulargewicht, das Polymer-FR die Eigenschaften eines Kunststoffes verleiht, der mit dem Polystyrol gemischt wird und daher nicht migrieren kann. Damit ist es reaktiven, an der Kunststoffmatrix kovalent gebundenen Flammenschutzmitteln diesbezüglich gleichzustellen.

Gefährlichkeit (Kategorie) >			Karzinogenität	Endokrine Wirksamkeit	Mutagenität	Reproduktionstoxizität	Orale Toxizität	Dermale Toxizität	Inhalative Toxizität	Neurotoxizität	Irritationspotential	Sensibilisierungspotential	Fischtoxizität	Daphnientoxizität	Algentoxizität	Bodentoxizität	Persistenz	Bioakkumulationspotential	Klimatische Relevanz	Verbrennungsprodukte	Bioabbauprodukte
Bewertung der Gefährlichkeit >																					
#	Life Cycle Phase	Exposition																			
1	Produktion (Synthese des Flammenschutzmittels)	niedrig, nur umweltrelevant																			
2	Logistik (Transport des Flammenschutzmittels)	keine																			
3	Logistik (Unfall beim Transport des Flammenschutzmittels)	hoch																			
4	Produktion (Beimischen des Flammenschutzmittels zum EPS)	niedrig, nur umweltrelevant																			
5	Logistik (Transport des verkaufsfertigen EPS)	keine																			
6	Logistik (Unfall beimTransport des verkaufsfertigen EPS)	keine																			
7	Verbauen des Isolationsmaterials im Gebäude	keine																			
8	Nutzungsphase – Standard-szenario (ohne Brandfall)	keine																			
9	Nutzungsphase – Gebäudebrand	hoch																			
10	Nachnutzungsphase – Rückbau	niedrig, nur umweltrelevant																			
11	Nachnutzungsphase – Transport des gebrauchten EPS	keine																			
12	Nachnutzungsphase – Werkstoffliches Recycling (Reextrusion)	mittel																			
13	Nachnutzungsphase – Werkstoffliches Recycling (PS Loop)	niedrig, nur umweltrelevant																			
14	Nachnutzungsphase – Chemisches Recycling (Pyrolyse)	niedrig, nur umweltrelevant																			
15	Nachnutzungsphase – Deponie	mittel																			
16	Nachnutzungsphase – Verbrennung (ohne Rauchgasreinigung)	hoch (nur Rauchgas)																			
17	Nachnutzungsphase – Verbrennung (mit Rauchgasreinigung)	keine																			

Abbildung 5
Übersicht über die qualitativen Einzelrisikobewertungen für Polymer-FR in EPS

Neue bromierte Flammschutzmittel für EPS

Im Gegensatz dazu ist das zweite untersuchte Flammschutzmittel, ein TBBPA-Derivat, sehr gefährlich. Es ist in vitro hormonell wirksam, bioakkumulierbar und persistent. Der Nachweis der Substanz in Umweltproben zeigt, dass die Substanz in der Umwelt transportiert und angereichert werden kann. Zurzeit wird ihre Gefährlichkeit im Rahmen des CoRAP-Programms untersucht. Möglicherweise wird die Verwendung der Substanz in absehbarer Zeit verboten.

Ebenso wie Polymer-FR entwickelt das TBBPA-Derivat während der Verbrennung HBr. Unter anaeroben Bedingungen wird es langsam zu dem noch gefährlicheren TBBPA abgebaut, das vermutlich krebs-erregend und hormonell wirksam ist und ebenfalls im CoRAP-Programm untersucht wird. Aus Cradle to Cradle-Perspektive wird empfohlen, das TBBPA-Derivat wegen seiner Gefährlichkeit nicht länger einzusetzen. Die größte Gefahr geht vermutlich nicht von der Nutzung, sondern von der Herstellung und even-

tuell problematischen Nachnutzungsszenarios dieses Flammschutzmittels aus.

Da das bromierte Polymer weder toxisch noch bioakkumulativ ist, ist es dem TBBPA-Derivat hinsichtlich seiner Umwelt- und Gesundheitsverträglichkeit klar überlegen.

10. Bedeutung für die Recyclingfähigkeit von flammgeschütztem EPS

Die ökotoxikologische Bewertung der bisher eingesetzten Flammschutzmittel für EPS zeigt deutlich, welche wichtige Rolle dem Flammschutzmittel für die zukünftige Recyclingfähigkeit von EPS-Dämmstoffabfällen zukommt. Die Nutzung eines Flammschutzmittels, das auch bei Freisetzung weitgehend ungefährlich ist und das zudem während des Recyclings nicht zerstört wird, ist eine der Voraussetzungen für ein effektives Recycling von gebrauchtem EPS. Daher ist das Recycling von

Gefährlichkeit (Kategorie) >			Karzinogenität	Endokrine Wirksamkeit	Mutagenität	Reproduktionstoxizität	Orale Toxizität	Dermale Toxizität	Inhalative Toxizität	Neurotoxizität	Irritationspotential	Sensibilisierungspotential	Fischtoxizität	Daphnientoxizität	Algentoxizität	Bodentoxizität	Persistenz	Bioakkumulationspotential	Klimatische Relevanz	Verbrennungsprodukte	Bioabbauprodukte
Bewertung der Gefährlichkeit >																					
#	Life Cycle Phase	Exposition																			
1	Produktion (Synthese des Flammschutzmittels)	niedrig, nur umweltrelevant																			
2	Logistik (Transport des Flammschutzmittels)	keine																			
3	Logistik (Unfall beim Transport des Flammschutzmittels)	hoch																			
4	Produktion (Beimischen des Flammschutzmittels zum EPS)	niedrig, nur umweltrelevant																			
5	Logistik (Transport des verkaufsfertigen EPS)	keine																			
6	Logistik (Unfall beim Transport des verkaufsfertigen EPS)	keine																			
7	Verbauen des Isolationsmaterials im Gebäude	keine																			
8	Nutzungsphase – Standard-szenario (ohne Brandfall)	keine																			
9	Nutzungsphase – Gebäudebrand	hoch																			
10	Nachnutzungsphase – Rückbau	niedrig, nur umweltrelevant																			
11	Nachnutzungsphase – Transport des gebrauchten EPS	keine																			
12	Nachnutzungsphase – Werkstoffliches Recycling (Reextrusion)	mittel																			
13	Nachnutzungsphase – Werkstoffliches Recycling (PS Loop)	niedrig, nur umweltrelevant																			
14	Nachnutzungsphase – Chemisches Recycling (Pyrolyse)	niedrig, nur umweltrelevant																			
15	Nachnutzungsphase – Deponie	mittel																			
16	Nachnutzungsphase – Verbrennung (ohne Rauchgasreinigung)	hoch (nur Rauchgas)																			
17	Nachnutzungsphase – Verbrennung (mit Rauchgasreinigung)	keine																			

Abbildung 6
Übersicht über die qualitativen Einzelrisikobewertungen für TBBPA-Ether in EPS

EPS-Platten mit dem Flammschutzmittel Polymer-FR bereits heute möglich und wird in der deutschen EPS-Industrie immer mehr genutzt, vorausgesetzt es handelt sich um saubere EPS-Abschnitte.

Auch für die Rezyklierbarkeit von „alten“ EPS-Dämmplatten, die noch das Flammschutzmittel HBCD enthalten, ist inzwischen eine Lösung in Sicht. Aufgrund der langen Nutzungsdauer von EPS (mehr als 50 Jahre bzw. bis zum Gebäudeabriss) gewinnt die Entsorgung dieses „alten“ Dämmmaterials wegen des Anstiegs von Gebäudeabbruch und -sanierungen in den nächsten 100 Jahren an Bedeutung. Herstellerseitig wird eine kontinuierliche Zunahme des jährlich anfallenden Polystyrol-Bauabfalls bis 2050 auf ca. 85.000 t prognostiziert. Daher arbeitet die EPS-Industrie derzeit an einem Pilotprojekt zum Aufbau einer Demonstrationsanlage für die Aufbereitung und das Recycling von Polystyrol aus HBCD-haltigen, verschmutzten Dämmstoffabfällen im Rahmen der sogenannten Polystyrene Loop-Initiative [23]. In Zukunft wird es wichtig sein, dass die Entsorgung von EPS-Abfällen unter Beachtung der Abfallhierarchie (Wiederverwendung vor Recycling vor Verbrennung mit Energiegewinnung vor Deponierung) für alle Beteiligten, d. h. Industrie, Entsorger, Handwerker und Behörden nicht nur umweltverträglich, sondern auch wirtschaftlich und in der Praxis umsetzbar ist.

Literatur

[1] **US Environmental Protection Agency:** Flame Retardant Alternatives for Hexabromocyclododecane (HBCD). Final Report. (June 2014) EPA Publication 740R14001.

[2] **Umweltbundesamt (UBA):** Häufig gestellte Fragen und Antworten zu Hexabromocyclododecan (HBCD). Antworten auf häufig gestellte Fragen. Hintergrundpapier. (Dezember 2017) <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/haufig-gestellte-fragen-antworten-zu> (accessed April 2019) .

[3] **Kambeck, N. and Grunow, M.:** Recycling von HBCD-haltigen Dämmstoffen als Entsorgungsoption im Sinne der „Circular Economy“ StoffR 6 (2018) Seiten 245–248.

[4] **„Polymeric FR“** ist der interne Produktname der Firma Dow Chemical für das bromierte Polymer.

[5] **EPEA – Part of Drees & Sommer:** Comparison of Brominated Flame Retardants used in Expanded Polystyrene (EPS). (January 2019) Confidential Report for BASF SE.

[6] **Cradle to Cradle Products Innovation Institute (C2CPII):** <https://www.c2ccertified.org/>

[7] **Cradle to Cradle Standard/Material Health Assessment:** https://www.c2ccertified.org/resources/detail/cradle_to_cradle_certified_product_standard

[8] **Cantón, R., Sanderson, J., Nijmeijer, S., et al.:** In vitro effects of brominated flame retardants and metabolites on CYP17 catalytic activity: A novel mechanism of action? Toxicol. Appl. Pharmacol. 2006, 274:274–281.

[9] **Hamers, T., Kamstra, J., Sonneveld, E., et al.:** In vitro profiling of the endocrine-disrupting potency of brominated flame retardants. Toxicol. Sci. 2006, 92(1):157–173.

[10] **ECHA (2013):** 1,1’-(isopropylidene)bis[3,5-dibromo-4-(2,3-dibromopropoxy)benzene]. Registered substances. European Chemicals Agency. [http://apps.echa.europa.eu/registered/data/dossiers/DISS-d6b26f7d-78a6-4269-e044-00144f67d031/DISS-d6b26f7d-78a6-4269-e044-00144f67d031.html](http://apps.echa.europa.eu/registered/data/dossiers/DISS-d6b26f7d-78a6-4269-e044-00144f67d031/DISS-d6b26f7d-78a6-4269-e044-00144f67d031_DISS-d6b26f7d-78a6-4269-e044-00144f67d031.html) 11/4/2013.

[11] **MITI (Japanese Ministry of International Trade and Industry):** Biodegradation and bioaccumulation data of existing chemicals based on the CSCL Japan. Compiled under the supervision of Chemical Products Safety Division, Basic Industries Bureau, Ministry of 4-165 International Trade & Industry, Japan; Chemicals Inspection & Testing Institute, Japan. Ed.; Japan Chemical Industry Ecology – Toxicology & Information Center: 2007.

[12] **EPI (EPIWIN/EPISUITE):** Estimation Program Interface for Windows, Version 4.0. U.S. Environmental Protection Agency: Washington D.C. <http://www.epa.gov/opptintr/exposure>

[13] **Letcher, R. and Chu, S.:** High-Sensitivity Method for Determination of Tetrabromobisphenol-S and Tetrabromobisphenol-A Derivative Flame Retardants in Great Lakes Herring Gull Eggs by Liquid Chromatography – Atmospheric Pressure Photoionization – Tandem Mass Spectroscopy. Environ. Sci. Technol. 2010, 44, 8615–8621.

[14] **Wolschke, H.; Meng, X.; Xie, Z.; Ebinghaus, R. and Cai, M.:** Novel Flame Retardants, polybrominated diphenyl ethers and dioxin-like polychlorinated biphenyls in fish, penguin, and skua from King George Island, Antarctica. Marine Pollution Bulletin 96 (2015) 513–518.

[15] **US Environmental Protection Agency:** Flame Retardant Alternatives for Hexabromocyclododecane (HBCD). Final Report. (June 2014) EPA Publication 740R14001.

[16] **Justification for the selection of a substance for CoRAP inclusion – Tetrabromobisphenol A:** <https://echa.europa.eu/documents/10162/743bdc8-bd85-486c-84a4-e685e9245a9c> (accessed on Dec 15, 2018).

[17] **Liu, A.; Zhao, Z.; Qu, G.; Shen, Z.; Shi, J. and Jiang, G.:** Transformation/ degradation of tetrabromobisphenol A and its derivatives: A review of the metabolism and metabolites. Environmental Pollution 243 (2018), 1141–1153.

[18] **Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen (TASi) vom 14. Mai 1993.**

[19] **17. BImSchV (BGBl. 2003 I S. 1633):** https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBL&jumpTo=bgbl103s1633.pdf#_bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl103s1633.pdf%27%5D__1547568452851 (accessed on Dec 12, 2018).

[20] **Mark, F. E.; Vehlow, J.; Dresch, H.; Dima, B.; Grüttner, W.; Horn, J.:** Destruction of the flame retardant hexabromocyclododecane in a full-scale municipal solid waste incinerator. Horn J. Waste Manag Res. 2015 Feb; 33(2):165–74.

[21] **Anmerkung 1:** Persistenz und Bioakkumulierbarkeit werden in der Risikomatrix kombiniert betrachtet, da nur hohe Persistenz in Verbindung mit hohem Bioakkumulationspotential ein Risiko darstellt. Ist eine der beiden Risiken für sich „Grün“, ist das kombinierte Risiko ebenfalls „Grün“.

Anmerkung 2: Im Fall eines Expositionsniveaus „niedrig, nur umweltrelevant“, werden die Verbrennungsprodukte nicht berücksichtigt.

[22] **Letcher, R. and Chu, S.:** High-Sensitivity Method for Determination of Tetrabromobisphenol-S and Tetrabromobisphenol-A Derivative Flame Retardants in Great Lakes Herring Gull Eggs by Liquid Chromatography – Atmospheric Pressure Photoionization – Tandem Mass Spectroscopy. Environ. Sci. Technol. 2010, 44, 8615–8621.

[23] **PolyStyreneLoop (PSLoop):** an industry-scale recycling process for HBCD containing PS foam. <https://polystyreneloop.org/> (accessed on July 15, 2019).

Anschrift der Autoren

Dr. Christian Sinn (Corresponding author)
Dr. Christian Semisch, Prof. Dr. Michael Braungart, Dr. Peter Mösele
EPEA GmbH – Part of Drees & Sommer
Trostbrücke 4, 20457 Hamburg