

BROMIERTE FLAMMSCHUTZMITTEL - SCHUTZENGELE MIT SCHLECHTEN EIGEN- SCHAFTEN?

1	Zusammenfassung	2
2	Hintergrund	5
3	Einsatz von Flammschutzmitteln	7
4	Bewertung der Risiken von Stoffen	8
5	Stoffbewertungen von DecaBDE, TBBPA und HBCD	11
	5.1 Decabromdiphenylether	11
	5.2 Tetrabrombisphenol A	14
	5.3 Hexabromcyclododecan	16
	5.4 Die Stoffbewertungen in der Übersicht	18
6	Minderung der Umwelteinträge bromierter Flammschutzmittel	20
	6.1 Emissionskontrolle und Substitution als Minderungsstrategien	20
	6.2 Substitution von DecaBDE, TBBPA und HBCD	22
7	Übergreifender Handlungs- und Forschungsbedarf	25

1 Zusammenfassung

Was sind Flammschutzmittel und wozu dienen sie?

Flammschutzmittel dienen dazu, die Entzündung brennbarer Materialien – wie Kunststoffe, Textilien oder Holz – hinauszuzögern und die Flammausbreitung zu verlangsamen. Hierdurch lassen sich Brände entweder ganz verhindern, oder die Zeit zur Flucht verlängert sich. In einem voll entwickelten Brand brennen in der Regel auch flammgeschützte Gegenstände. Als Flammschutzmittel kommen viele unterschiedliche chemische Verbindungen zum Einsatz.

Was sind die besonderen Eigenschaften bromierter Flammschutzmittel?

Bromierte Flammschutzmittel sind mit einer breiten Palette von Kunststoffen gut kombinierbar und relativ kostengünstig. Etliche Verbindungen dieser Stoffgruppe sind persistent, also in der Umwelt schwer abbaubar, und reichern sich in Lebewesen an – sind also bioakkumulativ. Im Brandfall und bei unkontrollierter Entsorgung können sie hochgiftige Dioxine und Furane bilden. Aber: Nicht alle bromierten Flammschutzmittel haben gleich schädliche Wirkungen auf die Umwelt und die Gesundheit. Flammschutzmittel anderer chemischer Zusammensetzung – wie Chlorparaffine oder bestimmte halogenierte Phosphorverbindungen – können schädlich auf die Umwelt wirken.

Welches sind die wichtigsten bromierten Flammschutzmittel?

Die weltweit meistproduzierten bromierten Flammschutzmittel sind Decabromdiphenylether (DecaBDE), Tetrabrombisphenol A (TBBPA) und Hexabromcyclododecan (HBCD). DecaBDE dient vornehmlich dem Flammschutz bei Kunststoffgehäusen in Elektro- und Elektronikgeräten sowie bei Textilien. TBBPA findet vor allem in Leiterplatten Verwendung, in geringen Mengen auch in Gehäusekunststoffen. Der Hauptanwendungsbereich des HBCD liegt bei Dämmstoffen (expandiertes und extrudiertes Polystyrol) und Textilien, seltener in Gehäusekunststoffen.

Wie belasten bromierte Flammschutzmittel die Umwelt?

Die Beiträge der verschiedenen Pfade zum Eintrag in die Umwelt sind bis heute nicht hinreichend geklärt. Die Emissionen bei der Verarbeitung der Flammschutzmittel in Kunststoffen und Produkten – so genannte Punktquellen – sind jedoch besonders bedeutsam. Auch die Einträge in die Umwelt durch Ausdünstungen oder Auswaschungen während der Produktnutzung und Entsorgung sind – als so genannte diffuse Quellen – wichtig. Wegen ihres Potenzials zu Persistenz und Bioakkumulation lassen sich bromierte Flammschutzmittel sowohl in Sedimenten und Stäuben als auch in zahlreichen Tierarten nachweisen; etwa Greifvögel und deren Eier, Eisbären, Robben oder Füchse. Mit den globalen Luftströmungen gelangen sie auch in weit abgelegene Gegenden wie die Polarregion.

Wie belasten die bromierten Flammschutzmittel den Menschen?

DecaBDE, TBPPA und HBCD finden sich in niedrigen Konzentrationen sowohl in der Muttermilch als auch im Blut der Menschen. Bei diesen Konzentrationen bestehen nach den Risikobewertungen der Europäischen Union (EU) keine direkten Risiken. Aus Vorsorgegründen sollte Muttermilch diese Stoffe jedoch nicht enthalten (zur Begründung des Vorsorgeansatzes siehe Kap. 4). Als Hauptaufnahmeweg gilt die Nahrung. Daneben spielt der Hausstaub eine gewisse Rolle. Wegen der Anreicherung über die Nahrungskette ist es notwendig, langfristige indirekte Risiken als Folge der Summation (Wirkungsverstärkung) einzelner, niedriger Stoffkonzentrationen auszuschließen.

Welche Risiken identifizierte die EU-Risikobewertung?

Die Chemikalienbewertung in der EU befindet sich derzeit im Umbruch. Die EU-Altstoffverordnung, die vor allem auf die Kontrolle direkter Risiken zielt, wurde zum 1. Juni 2007 durch die neue Chemikalienverordnung REACH abgelöst, die anstrebt, auch langfristige, indirekte Risiken vorsorglich zu minimieren (zum Minimierungsgebot unter REACH siehe Kap. 4). Stoffe, die persistent, bioakkumulierend und toxisch sind (PBT-Stoffe), dürfen unter REACH nur noch mit einer, an bestimmte Bedingungen geknüpften Zulassung verwendet werden. Für die einzelnen Flammschutzmittel kommen die EU-Experten zu folgenden Ergebnissen:

- Decabromdiphenylether (DecaBDE) ist sehr persistent und reichert sich in Lebewesen an. Es ist bisher nicht als Gefahrstoff eingestuft. Der Stoff steht in Verdacht, langfristige, neurotoxische Wirkungen zu haben und sich langsam zu niedriger bromierten, stärker toxischen Verbindungen abzubauen. DecaBDE zeigt keine Überschreitung der schädlichen Umweltkonzentrationen. Das zuständige Expertengremium der EU diskutiert es jedoch wegen seiner Stoffeigenschaften als PBT-Stoff.
- Tetrabrombisphenol A (TBBPA) ist ebenfalls sehr persistent und reichert sich in Lebewesen an. Es ist toxisch für Gewässerorganismen, nicht jedoch für Menschen. Bei TBBPA bestehen lokale Risiken, da die Umweltkonzentrationen an einzelnen Produktionsstandorten die Schwellenwerte für mögliche Umweltschäden überschreiten.
- Hexabromcyclododecan (HBCD) ist persistent, sehr bioakkumulierend (reichert sich also stark in Lebewesen an) und giftig für Gewässerorganismen. Darüber hinaus besteht - wegen der hohen Akkumulationsneigung - die Gefahr langfristiger Schäden an der menschlichen Gesundheit und in Ökosystemen. HBCD zeigt sowohl lokale Risiken an einzelnen Produktionsstandorten als auch indirekte Risiken wegen der möglichen Aufnahme über die Nahrungskette. Das zuständige Expertengremium der EU hat HBCD als PBT-Stoff bewertet.

Welche Entscheidungen auf EU-Ebene stehen an?

In der EU stehen in den nächsten Monaten Entscheidungen über Risikominderungsmaßnahmen für HBCD an, wobei mit erheblichen Beschränkungen der Verwendung zu rechnen

ist. Weiterhin wird die EU-Kommission im Jahr 2008 einen Vorschlag zur Revision der RoHS-Richtlinie¹ unterbreiten, in dem Beschränkungen für weitere Schadstoffe in Elektro- und Elektronikgeräten - wie HBCD oder ungebundenes (additiv eingesetztes) TBBPA - enthalten sein könnten. Entscheidungen über die Zulassung von HBCD und DecaBDE unter REACH werden ab 2009 getroffen.

Eine weitere Entscheidung hat der Europäische Gerichtshof zudem am 1. April 2008 getroffen: DecaBDE darf ab dem 1. Juli 2008 nicht mehr in neu in Verkehr gebrachten Elektro- und Elektronikgeräten enthalten sein. Dies ist das Ergebnis einer Klage Dänemarks und des Europäischen Parlaments gegen die Europäische Kommission. Letztere hatte das ursprünglich im Rahmen der RoHS-Richtlinie vorgesehene Verwendungsverbot von DecaBDE wieder aufgehoben. Dies war jedoch nicht rechtmäßig, da ausreichend umweltverträglichere Alternativen zur Verfügung stehen.

Was tun die Industrieunternehmen, die bromierte Flammschutzmittel herstellen oder verarbeiten?

Die Hersteller und Verarbeiter bromierter Flammschutzmittel haben in jüngster Zeit die Programme „VECAP“ und „SECURE“ mit dem Ziel gestartet, die Emissionen der bromierten Flammschutzmittel bei Herstellung und Verarbeitung zu kontrollieren und zu senken.² Es geht also um technische Maßnahmen, um die Emissionen zu mindern. Basierend auf Stoffbilanzen und der persönlichen Beratung durch die Hersteller der Flammschutzmittel identifiziert jeder flammenschutzmittelverarbeitende Betrieb mögliche Quellen für unkontrollierte Emissionen und ergreift technische und organisatorische Maßnahmen, um diese Emissionen zu senken.

Wofür plädiert das Umweltbundesamt?

Das Umweltbundesamt plädiert aus Vorsorgegründen für die Vermeidung jeglicher Einträge schwer abbaubarer (persistenter) und/oder in Lebewesen anreichernder (bioakkumulierender) Stoffe in die Umwelt. Dies gilt auch für den Fall, dass mit den Umwelteinträgen (noch) keine bekannten toxischen Wirkungen verbunden sind, da solche Chemikalien weder aus der Umwelt noch aus dem menschlichen Körper rückholbar sind.

Das Umweltbundesamt hält es daher aus Vorsorgegründen für erforderlich, jegliche Umwelteinträge von DecaBDE, HBCD und TBBPA zu minimieren, da alle drei Flammschutzmittel schwer abbaubar sind und sich in Lebewesen anreichern. Darüber hinaus sind sie in unterschiedlichem Maß toxisch und möglicherweise auch langfristig schädlich für Mensch und Umwelt. Die schädlichen Wirkungen lassen sich vermeiden, indem konsequent weniger problematische Ersatzstoffe und -produkte zum Einsatz kommen (Substitution) oder technische Maßnahmen die Emissionen deutlich mindern. Priorität hat aus Sicht des Umwelt-

¹ Richtlinie 2002/95/EG zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten.

² VECAP: Voluntary Emission Control Action Plan, SECURE: Self Enforced Control of Use to Reduce Emissions.

bundesamtes die Substitution, da nur der vollständige Ersatz eine deutliche Verringerung der Umwelteinträge sicherstellt (zu den erforderlichen Eigenschaften der Ersatzstoffe siehe Kap. 6). Solange Firmen diese Flammschutzmittel noch einsetzen, sind weit gehende technische Maßnahmen zur Emissionsminderung bei der Herstellung und Verarbeitung sinnvoll und notwendig. Ersatzstoffe mit weniger schädlichen Wirkungen auf Mensch und Umwelt sind in unterschiedlichem Maße verfügbar, und die drei Flammschutzmittel sind mal mehr und mal weniger fest an den Kunststoff gebunden. Daher ist ein differenziertes, zeitlich abgestuftes Vorgehen für die einzelnen Flammschutzmittelanwendungen sinnvoll:

- Für DecaBDE, TBBPA und HBCD in Gehäusekunststoffen von Elektro- und Elektronikgeräten gibt es weniger problematische Substitute. Ein vollständiger Ersatz ist daher möglich und sinnvoll. Schon heute verwenden zahlreiche Unternehmen diese Alternativen, in der Regel halogenfreie, phosphororganische Flammschutzmittel.
- Für die Verwendung von DecaBDE und HBCD in Textilien, etwa Vorhängen oder Möbelbezugsstoffen, liegen ebenfalls genügend weniger problematische Alternativen vor. Geeignet sind Fasern aus Glas oder schwer entflammaren Kunststofftypen sowie Fasern mit fest eingebundenen Flammschutzmitteln. Auch hier ist ein vollständiger Verzicht auf die Anwendung sinnvoll und möglich.
- Für die Verwendung von HBCD in Dämmstoffen aus Polystyrol ist bislang kein alternatives Flammschutzmittel bekannt; allerdings erfüllen in den meisten Anwendungsfeldern andere Dämmstoffe die gleiche Funktion. Wegen der positiven Umweltwirkungen der Wärmedämmung ist eine befristete Weiterverwendung von HBCD als Flammschutzmittel - bei strenger Emissionskontrolle während der Herstellung und Verarbeitung sowie gleichzeitiger Entwicklung geeigneter Ersatzstoffe - vertretbar.
- Für die Verwendung von TBBPA in elektronischen Leiterplatten liegen marktreife Alternativen vor. Leider setzen die Hersteller diese nur in geringem Umfang ein. Der Ersatz von TBBPA ist mittelfristig anzustreben. Kurzfristig sind technische Maßnahmen zur Emissionskontrolle während der Herstellung, Verarbeitung und Entsorgung sinnvoll.

2 Hintergrund

Bromierte Flammschutzmittel sind seit vielen Jahren in der Umwelt weit verbreitet. In den neunziger Jahren galt die Aufmerksamkeit vor allem den polybromierten Biphenylen (PBB) sowie den polybromierten Diphenylethern (PBDE). Hintergrund war die strukturelle Ähnlichkeit dieser Stoffe mit den polychlorierten Biphenylen (PCB) und den hochgiftigen und persistenten Dioxinen und Furanen. Letztere waren als Verunreinigungen in den Flammschutzmitteln enthalten und entstanden ebenfalls bei deren Verbrennung. Seitdem hat sich die Abfallverbrennung in Europa technisch so verbessert, dass die entstehenden Dioxin- und Furanemissionen bei der kontrollierten Entsorgung nur noch sehr gering sind. Anders ist dies natürlich im Brandfall und bei der unkontrollierten Entsorgung. Die PBB sind wegen ihrer schädlichen Stoffeigenschaften inzwischen vom Markt verschwunden. Das Inverkehrbringen von Penta- und Octabromdiphenylether ist seit 2004 in der EU verboten. De-

cabromdiphenylether, in einer erheblich verbesserten Reinheit, setzen verschiedene Produkthersteller jedoch noch immer in großem Umfang ein.

Zurzeit sind Tetrabrombisphenol A (TBBPA), Decabromdiphenylether (DecaBDE) und Hexabromcyclododecan (HBCD) die weltweit meistverbrauchten bromierten Flammschutzmittel. Sie stehen im Fokus wissenschaftlicher und politischer Diskussionen, weil die Konzentrationen dieser Stoffe weltweit sowohl in Sedimenten und Stäuben als auch in vielen Tieren - wie Greifvögeln (und deren Eiern), Krustentieren, Fischen, Eisbären, Robben oder Füchsen - steigen. Rückstände können über die Nahrungskette auch den Menschen erreichen und wirken dort möglicherweise während der besonders empfindlichen Lebensphasen der embryonalen und frühkindlichen Entwicklung.

In den letzten Jahren sind zahlreiche Forschungsergebnisse über die Umwelt- und Gesundheitswirkungen dieser drei bromierten Flammschutzmittel und ihre Verbreitung in der Umwelt erschienen. Die Risikobewertungen im europäischen Altstoffverfahren liegen für DecaBDE, TBBPA und HBCD mit ersten Entwürfen vor. Alle drei Stoffe sind mit den Standardtests zur Risikobewertung nur unzureichend zu beurteilen, da die geringe Wasserlöslichkeit und die Größe der Flammschutzmittelmoleküle teilweise zu Testproblemen führen. Die hohe Persistenz und die Anreicherung in Organismen geben jedoch ausreichend Anlass zur Sorge über das langfristige Risikopotenzial dieser Stoffe. Daher hat die EU-Kommission weitere Forschung zur Aufklärung des Umweltverhaltens gefordert. Unter anderem dient das EU-Forschungsprogramm „FIRE³“ zur Aufklärung des Wirkpotenzials auf das Hormonsystem bei Säugetieren.

HBCD erfüllt die Kriterien für persistente, bioakkumulierende und toxische Stoffe (PBT-Stoffe) der neuen europäischen Chemikalienverordnung REACH. Bei DecaBDE besteht immer noch wissenschaftliche Unsicherheit über die langfristig schädlichen Wirkungen und mögliche toxische Abbauprodukte, so dass die Fachwelt die Erfüllung der PBT-Kriterien kontrovers beurteilt. Aus Sicht des Umweltbundesamtes sind ausreichend Hinweise auf schädliche Wirkungen vorhanden, die eine Einstufung von DecaBDE als PBT-Stoff erforderlich machen. PBT-Stoffe werden unter REACH schrittweise ab dem 1. Juni 2009 zulassungspflichtig. Das bedeutet, PBT-Stoffe dürfen nur noch unter ganz bestimmten, strengen Auflagen zum Einsatz kommen, und auch nur solange keine geeigneten Ersatzstoffe oder Ersatzprodukte vorhanden sind.

Die Verwendung des DecaBDE in Elektro- und Elektronikgeräten, die nach der europäischen RoHS-Richtlinie zunächst verboten war, dann aber wieder erlaubt wurde, war rechtlich lange umstritten. Am 1. April 2008 hat der Europäische Gerichtshof nun entschieden, dass DecaBDE ab dem 1. Juli nicht mehr als Flammschutzmittel in neu auf den Markt gebrachten Elektro- und Elektronikgeräten enthalten sein darf.

Der Europäische Verband für bromierte Flammschutzmittel (EBFRIP) und dessen wissenschaftlicher Zweig BSEF⁴ sowie etliche Verbände der Textil- und Kunststoffindustrie rea-

³ FIRE: Flame Retardants Integrated Risk Assessment for endocrine Effects.

⁴ BSEF: Bromine Science and Environmental Forum.

gierten in jüngster Zeit mit den freiwilligen Programmen zur Emissionsminimierung „VECAP“⁵ und „SECURE“⁶. Die beteiligten Hersteller und Anwender in der EU reduzieren damit voraussichtlich die Umwelteinträge an DecaBDE, TBBPA und HBCD während der Produktion und der Verarbeitung der Flammschutzmittel erheblich. Etwas anders verlief die Entwicklung in Deutschland: Bereits 1986 verzichteten der Verband der Kunststoffherzeugenden Industrie (VKE) und der Verband der Textilhilfsmittelhersteller (TEGEWA)⁷ freiwillig auf alle polybromierten Diphenylether. Dies konnte jedoch nicht verhindern, dass andere Firmen, die keine Mitglieder der beiden Industrieverbände waren, DecaBDE weiterhin verwendeten. Während der Verband TEGEWA nun die Verpflichtung für DecaBDE kündigte, um VECAP beizutreten, hält der VKE an der ursprünglichen Selbstverpflichtung aus 1986 fest.

Das Umweltbundesamt begleitet die Risikobewertung bromierter Flammschutzmittel schon länger und ist für den Einsatz umweltverträglicherer Alternativen. Im Hinblick auf eine mögliche Zulassungspflicht für HBCD und DecaBDE unter der REACH-Verordnung und die Rechtsstreitigkeiten zu DecaBDE in Elektro- und Elektronikgeräten unter der RoHS-Richtlinie bekommt die Frage nach geeigneten Ersatzstoffen aktuelle Dringlichkeit. Das Umweltbundesamt empfiehlt auch über die gesetzlichen Regularien hinaus, möglichst wenig umwelt- und gesundheitsschädliche Flammschutzmittel zu verwenden oder den Einsatz der Flammschutzmittel mit veränderten Produktdesigns zu vermeiden. Auf der Grundlage wissenschaftlicher Erkenntnisse erarbeitet das Umweltbundesamt daher Empfehlungen, die auch in die Vergabegrundlagen für Umweltzeichen einfließen (Einzelheiten siehe Punkt 6).

3 Einsatz von Flammschutzmitteln

Flammschutzmittel dienen dazu, die Entzündung brennbarer Materialien – wie Kunststoffe, Textilien oder Holz – hinauszuzögern und die Flammausbreitung zu verlangsamen. Hierdurch lassen sich Brände entweder ganz verhindern - oder aber es bleibt mehr Zeit zur Flucht und Rettung. In einem voll entwickelten Brand brennen in der Regel jedoch auch flammgeschützte Gegenstände. Neben der Ausrüstung brennbarer Gegenstände mit Flammschutzmitteln gibt es auch andere Konzepte zum Flammschutz, wie den Einsatz nicht oder schwer entflammbarer Materialien - etwa Glas, Metall oder schwer entflammbare Kunststofftypen - oder ein an Sicherheitskriterien orientiertes Produktdesign mit eingefügten Sperrschichten oder ausreichend großen Sicherheitsabständen. Darüber hinaus sind organisatorische und bauliche Maßnahmen wesentliche Bestandteile des vorbeugenden Brandschutzes.

Als Flammschutzmittel kommen chemisch sehr unterschiedliche Stoffe zum Einsatz, die mittels verschiedener Mechanismen die Ausbreitung des entstehenden Brandes verhindern

⁵ VECAP: Voluntary Emission Control Action Plan.

⁶ SECURE: Self Enforced Control of Use to Reduce Emissions.

⁷ TEGEWA: Verband der Hersteller von Textil-, Papier-, Leder- und Pelzhilfsmitteln, Tensiden, Komplexbildnern, Antimikrobiellen Mitteln, Polymeren Flockungsmitteln, Kosmetischen Rohstoffen und Pharmazeutischen Hilfsstoffen oder verwandten Produkten.

sollen. Dabei erfolgt die Verwendung der Flammschutzmittel entweder reaktiv, das heißt mit fester chemischer Bindung an das zu schützende Material, oder additiv, das heißt als Zusatz ohne feste chemische Bindung. Der europäische Verbrauch an Flammschutzmitteln lag im Jahr 2005 bei insgesamt 463.800 Tonnen, davon 50.000 Tonnen (rund 11 Prozent) bromierte Flammschutzmittel (EFRA 2006). Bild 1 zeigt die Anteile der verschiedenen Flammschutzmittel am Gesamtverbrauch

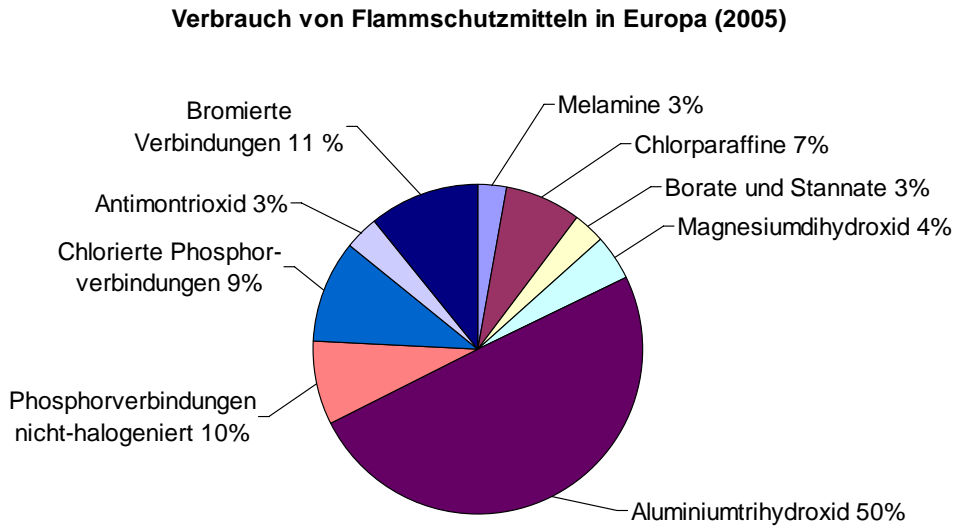


Bild 1: Flammschutzmittelverbrauch in Europa 2005 - Anteile der verschiedenen Flammschutzmitteltypen nach Gewicht (Quelle: EFRA 2006).

Die Hauptanwendungen der Flammschutzmittel sind Elektro- und Elektronikgeräte, Fahrzeuge (Schienen, Luft, See), Bauprodukte sowie Möbel und Textilien. Dort gibt es jeweils eigene Regelwerke zu Brandschutzanforderungen und Prüfnormen.

Bromierte Flammschutzmittel finden sich vor allem in Elektro- und Elektronikgeräten, aber auch in Baustoffen und Textilien. Die zur Flammhemmung in Fahrzeugen verwendeten Flammschutzmittel sind hingegen weitgehend halogenfrei⁸, da dort im Brandfall keine korrosiven Rauchgase entstehen dürfen. Bromierte Flammschutzmittel sind mit vielen verschiedenen Kunststoffen kombinierbar und kosten relativ wenig. Sie wirken in der Gasphase des Brandes. Durch Hitze spalten die bromierten Flammschutzmittel Bromwasserstoff und freies Brom ab, die die normale Kettenreaktion der Verbrennung chemisch unterbrechen. Die Einzelstoffe mit den größten Anteilen am Gesamtverbrauch der bromierten Flammschutzmittel sind TBBPA, DecaBDE und HBCD.

4 Bewertung der Risiken von Stoffen

Um die Umwelt- und Gesundheitswirkungen von Chemikalien zu bewerten und mögliche Risiken festzustellen, gibt es EU-weit harmonisierte Konventionen. Flammschutzmittel sind Industriechemikalien. Die Rechtsgrundlage ihrer Bewertung überführt die EU derzeit von

⁸ In Bezug auf Flammschutzmittel bedeutet dies frei von den chemischen Elementen Brom und Chlor.

der EU-Altstoffverordnung (EG/793/93) in die neue Chemikalienverordnung REACH (EG/1907/2006), die am 1. Juni 2007 in Kraft trat. Die Verordnungen einschließlich ihrer technischen Umsetzungshilfen enthalten - neben Prüfverfahren zur Feststellung gefährlicher Eigenschaften der Chemikalien - auch standardisierte Methoden zur quantitativen Bewertung der von Chemikalien ausgehenden Risiken für Mensch und Umwelt; von der Herstellung bis zur Entsorgung.

Ein Risiko im Sinne der EU-Altstoffverordnung ist stoff- und situationsspezifisch quantifizierbar. Es beruht auf transparenten Ursache-Wirkungs-Beziehungen, die im Labortest reproduzierbar sind. Mit diesen Voraussetzungen ist das Verfahren vor allem für die Bewertung **direkter Risiken** durch räumlich und zeitlich eingrenzbare Stoffeinträge geeignet. Ein direktes Risiko liegt dann vor, wenn die in der Umwelt vorhergesagte Konzentration einer Chemikalie (PEC⁹) über der schädlichen Wirkungsschwelle liegt (PNEC¹⁰). Wird in der Risikobewertung kein Risiko festgestellt, heißt dies daher nicht, dass ein Stoff an sich unwirksam ist, sondern nur, dass die aktuellen Verwendungen keine schädlichen Umweltkonzentrationen verursachen.

Abzugrenzen von den direkten Risiken sind die **indirekten oder systemischen Risiken**. Bei diesen entstehen die Schäden nicht als Folge des direkten Kontakts mit der Chemikalie, zum Beispiel über die Atemluft, sondern indirekt aus Wechselwirkungen in ökologischen Systemen (zum Beispiel Anreicherungen über die Nahrungsketten). Typisch für diese Risiken ist, dass sich keine Schädlichkeitsschwelle (PNEC) ermitteln und damit auch keine unschädliche Stoffkonzentration (PEC) definieren lassen. Es bestehen vielmehr große wissenschaftliche Unsicherheiten über die langfristigen Wirkungen auch kleiner Umweltkonzentrationen. Bromierte Flammschutzmittel geben - wegen ihrer hohen chemischen Stabilität und ihrer Anreicherung in Organismen - Anlass zur Sorge, dass sie indirekte Risiken verursachen.

Wissenschaftliche Unsicherheit über Umweltwirkungen sowie über die Bewertung und Beherrschung der Risiken tritt typischerweise bei Stoffen mit bestimmten Eigenschaften auf. Nach der neuen Chemikalienverordnung REACH gelten deshalb folgende Stoffe als besonders besorgniserregend:

- PBT-Stoffe: persistente, bioakkumulierende und toxische Stoffe.
Persistenz (in der Umwelt nicht leicht abbaubar), Bioakkumulation (Anreicherung in Organismen) und Toxizität (giftige Wirkungen für Mensch, Ökosysteme oder Organismen) müssen dabei in Kombination auftreten.
- vPvB-Stoffe: sehr persistente und sehr bioakkumulierende Stoffe.¹¹

⁹ PEC: Predicted Environmental Concentration. Die in der Umwelt - auf der Grundlage von Berechnungen oder Messungen - vorhergesagte Konzentration.

¹⁰ PNEC: Predicted No Effect Concentration. Die Konzentration, ab der schädliche Wirkungen in der Umwelt nicht auszuschließen sind.

¹¹ vPvB: very persistent, very bio-accumulative.

Bei sehr hoher Persistenz und Bioakkumulation bedarf es also keines Nachweises der Toxizität. Einen Hinweis auf Persistenz und Bioakkumulation liefert - neben den Ergebnissen von Laborstudien - der Nachweis der weiten räumlichen Verteilung einer Chemikalie, auch in Organismen, die in unbewohnten Gebieten wie der Arktis leben.

- CMR-Stoffe: cancerogene, mutagene oder reproduktionstoxische Stoffe, also Stoffe, die bei Säugetieren Krebs (kanzerogen), Erbgutschäden (mutagen) oder Fortpflanzungsschäden (reprotoxisch) hervorrufen.
- Stoffe mit ähnlich besorgniserregenden Eigenschaften.

Die neue Chemikalienverordnung REACH verbietet aus Vorsorgegründen die Herstellung, Vermarktung und Verwendung von Stoffen mit diesen besonders besorgniserregenden Eigenschaften. Ausnahmen gelten nur für Anwendungen, für die keine Ersatzstoffe (Substitute) zur Verfügung stehen und bei denen der sozioökonomische Nutzen die Risiken überwiegt. Für solche Anwendungen erteilt die EU-Kommission auf Antrag des Stoffherstellers oder Stoffanwenders eine Zulassung. Für die Zulassung muss der Antragsteller nachweisen, dass er Einträge in die Umwelt auf einem so niedrigen Niveau hält, wie technisch und praktisch möglich ist (Minimierungsgebot).

Das Umweltbundesamt formuliert Kriterien für eine nachhaltige und vorsorgende Stoffpolitik, die zum Teil über die rechtlich verbindlichen Vorgaben der EU hinausgehen. Das Umweltbundesamt plädiert aus Vorsorgegründen für die Vermeidung jeglicher Einträge persistenter und/oder bioakkumulierender Stoffe in die Umwelt, auch für den Fall, in dem (noch) keine toxischen Wirkungen bekannt sind. Persistente, anreicherungsfähige Chemikalien gehören nach Auffassung des UBA nicht in den menschlichen Körper - und auch nicht in den von Eisbären. Der folgende Kasten fasst die fünf Handlungsziele des Umweltbundesamtes für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik zusammen:

Die fünf Handlungsziele des Umweltbundesamtes für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik¹²:

1. Kein irreversibler Eintrag von persistenten und/oder bioakkumulierenden Fremdstoffen in die Umwelt, unabhängig von ihrer Giftigkeit
2. Kein Eintrag von krebserzeugenden, erbgutverändernden oder reproduktionstoxischen Fremdstoffen in die Umwelt
3. Keine Freisetzung von Naturstoffen mit den in 1. und 2. genannten Eigenschaften durch den Menschen, die zu einer Erhöhung der natürlichen Hintergrundbelastung führt
4. Reduktion des Eintrags von anderen toxischen oder ökotoxischen Stoffen auf das technisch unvermeidbare Maß
5. Minimierung des Eintrags von Stoffen mit unbekanntem Wirkungen, sofern diese nicht aus der Umwelt rückholbar sind

¹² Umweltbundesamt (1999): Handlungsfelder und Kriterien für eine vorsorgende nachhaltige Stoffpolitik am Beispiel PVC. Erich Schmidt Verlag.

5 Stoffbewertungen von DecaBDE, TBBPA und HBCD

Die Flammschutzmittel Decabromdiphenylether (DecaBDE), Tetrabrombisphenol A (TBBPA) und Hexabromcyclododecan (HBCD) sind in der Umwelt weit verbreitet und an der Spitze der Nahrungskette sowie in der Polarregion nachweisbar. Diese Funde zeigen das Potenzial der Stoffe zu Persistenz und Bioakkumulierbarkeit. Das Umweltbundesamt hält daher einen vollständigen Verzicht oder zumindest eine Minimierung der Umwelteinträge dieser drei bromierten Flammschutzmittel für notwendig. Neben Gemeinsamkeiten zeigen diese Flammschutzmittel auch Unterschiede in ihren Stoffeigenschaften, ihren toxischen Wirkungen und ihren chemischen Folgeprodukten nach einem Brand. Die Anwendungsfelder der drei Stoffe überschneiden sich in einigen Bereichen. In anderen Fällen kommt nur eines der drei Flammschutzmittel zum Einsatz.

Die Anwendungen sowie die toxikologischen Profile, die Ergebnisse der europäischen Risikobewertungen und die bestehenden Maßnahmen zeigen für die drei Flammschutzmittel folgendes Bild:

5.1 Decabromdiphenylether

Anwendung: Bei DecaBDE handelt es sich um das bromierte Flammschutzmittel mit der weltweit zweitgrößten Produktionsmenge von circa 56.400 Tonnen jährlich; die Verarbeitungsmenge in Europa beträgt rund 8.300 Tonnen im Jahr. DecaBDE wird überwiegend zum Flammschutz bei Elektro- und Elektronikgeräten verwendet und dient dort in erster Linie zum Schutz der Kunststoffgehäuse. Die zweitwichtigste Anwendung sind Textilien.

Umweltbelastungen und Toxizität: DecaBDE ist sehr persistent, reichert sich an und hat eine hohe Mobilität. DecaBDE ist sowohl in erhöhten Konzentrationen in Sedimenten in der Nähe einzelner Produktionsstandorte, als auch an der Spitze der Nahrungsketten sowie in entfernten Regionen zu finden. So wurde DecaBDE in Füchsen, Robben, Falkeneiern und in der Muttermilch nachgewiesen. DecaBDE ist zwar weder human- noch ökotoxisch eingestuft, es bestehen jedoch nach wie vor Unsicherheiten über die möglichen toxischen Wirkungen von DecaBDE im Niedrigdosisbereich (Neurotoxizität und endokrine Wirkungen). Ebenso bestehen Hinweise auf einen langsamen Abbau von DecaBDE zu niedriger bromierten, stärker toxischen und höher bioakkumulierenden Verbindungen, wie PentaBDE und OctaBDE. Penta- und OctaBDE dürfen bereits heute in Europa weder angewendet oder verkauft werden; noch in Produkten enthalten sein. Die steigenden Umweltkonzentrationen und die Belastung des Menschen über fettreiche Lebensmittel sowie über Produkte in seiner Wohnumgebung sind daher besorgniserregend. Nach wie vor liegen jedoch keine vollständigen Angaben zu Höhe und Bedeutung der verschiedenen Eintragspfade und Verteilungswege von DecaBDE in der Umwelt vor. Im Brandfall und bei unkontrollierter Entsorgung trägt DecaBDE zur Bildung hochgiftiger Dioxine und Furane bei.

Tabelle 1: Nachweise von Decabromdiphenylether in der europäischen Umwelt (Die Zahlen stammen aus dem Update der EU-Risikobewertung von August 2007).

Nachweise von Decabromdiphenylether (DecaBDE) in der europäischen Umwelt		
Nachweise in Umweltmedien ^a		
Oberflächengewässer (Süßwasser)	-	µg / l
Sedimente (Süßwasser)	<0,25 - 1.293 (174.000)	µg / kg TG
Böden	<0,02 - 330 (2.200)	µg / kg TG
Klärschlamm	<0,1 - 7.963 (18.039)	µg / kg TG
Nachweise in Organismen (Auswahl) ^b		
Sperber, Eier, Großbritannien	< 2 - 36	µg / kg Fett
Möwe, Eier, Norwegen, Studie 1	< 2,7 - 52,5	µg / kg Fett
Möwe, Eier, Norwegen, Studie 2	< 0,5 - 4,3	µg / kg Fett
Möwe, Leber, Norwegen	<1- 2.586	µg / kg Fett
Fisch, Scheldemündung, Wattenmeer (unter anderem Aal, Scholle, Seezunge, Hering)	1,9 - 17	µg / kg Fett
Schwebegarnele, Scheldemündung	269 -600	µg / kg Fett
Miesmuschel, Norwegen	0,04 - 0,46	µg / kg FG
Kabeljau, Leber, Norwegen	0,4 - 3,0	µg / kg FG
Robbe, Norwegen	0,02	µg / kg Fett
Eisbär, Fettgewebe, Norwegen	0,09	µg / kg Fett
Fuchs, Leber, Belgien	< 9,1- 760	µg / kg Fett
Greifvögel, Blut, Belgien	< 2 - 58	µg / kg Fett
Nachweise im Menschen		
Blut	< 1 - 273 (2.400)	µg / kg Fett
Muttermilch	< 0,1 - 6,8	µg / kg Fett
TG = Trockengewicht, FG = Feuchtgewicht, () = extrem hoher Einzelwert a = Die höchsten Konzentrationen stammen aus der unmittelbaren Nähe von Industrieanlagen. b = Die Konzentrationen im Fett liegen höher als im gesamten Frischgewicht, da DecaBDE im Fett anreichert. Wegen des unterschiedlichen Fettanteils von Organen und Organismen liegt kein allgemeiner Umrechnungsfaktor vor.		

Ergebnisse der EU-Risikobewertung: Die Risikobewertung aus dem Jahr 2005 ergibt keine unmittelbare Notwendigkeit, rechtliche Risikominderungsmaßnahmen für DecaBDE zu ergreifen. Zur Klärung der wichtigsten offenen Fragen verpflichtete die EU-Kommission die

Industrie zu weiteren Untersuchungen bis 2014. Ein Programm zum Umwelt- (2004 bis 2010) und Humanmonitoring (2004 bis 2014) dient nun dazu, die Wissenslücken zur Bioakkumulation und zum Abbau des Stoffes zu niedriger bromierten, toxischen und persistenten Verbindungen zu verringern. Zurzeit diskutiert ein Expertengremium beim Europäischen Chemikalienbüro (ECB)¹³, ob DecaBDE wegen seiner möglichen langfristigen Toxizität als PBT-Stoff gelten soll. Als PBT-Stoff würde DecaBDE die Kriterien für eine Zulassungspflicht unter REACH erfüllen.

Weitere Maßnahmen: Bereits jetzt hat Schweden für DecaBDE ein nationales Verwendungsverbot erlassen, in Norwegen tritt es zum 1. April 2008 in Kraft. Laut der internationalen Übereinkommen zum Schutz der Nord- und Ostsee, dem OSPAR- und dem Helsinki-Übereinkommen, sollen die Einträge von DecaBDE mittelfristig auf Null reduziert werden. Darüber hinaus hat der Europäische Gerichtshof (EUGH) kürzlich entschieden, dass Elektro- und Elektronikgeräte, die nach dem 1. Juli 2008 erstmalig in der EU in Verkehr gebracht werden, kein DecaBDE mehr als Flammenschutzmittel enthalten dürfen. Er gab damit einer Klage von EU-Parlament und Dänemark recht und setzte das ursprünglich in der „RoHS-Richtlinie zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten“ vorgesehene, dann aber von der Europäischen Kommission wieder aufgehobene Verwendungsverbot von DecaBDE erneut in Kraft. Um die weitere Verwendung des Stoffes zu kontrollieren, starteten die Hersteller und Verarbeiter bromierter Flammenschutzmittel im Jahr 2004 in Europa das so genannte „VECAP“-Projekt zur freiwilligen Minderung von Emissionen, das sich auf die Verwendung von DecaBDE in Kunststoffen und in Textilien bezieht. In Deutschland besteht seit 1986 ein freiwilliger Verzicht des Verbands der Kunststoffherstellenden Industrie (jetzt Plastics Europe Deutschland) auf DecaBDE in Kunststoffen.

Position des Umweltbundesamtes: DecaBDE ist ein additiv verwendetes Flammschutzmittel, für das es sowohl bei Kunststoffen als auch im Bereich Textilien umweltverträglichere Ersatzstoffe gibt. Das Umweltbundesamt hält daher einen vollständigen Anwendungsverzicht für möglich und erforderlich. Die Hersteller und Verarbeiter bromierter Flammschutzmittel setzen in der EU hingegen auf freiwillige Maßnahmen zur Emissionsminderung. Durch diese Maßnahmen lassen sich Umwelteinträge von DecaBDE während der Herstellung und Verarbeitung an EU-Standorten vermindern. Umwelteinträge während der Nutzung und der unkontrollierten Entsorgung sowie Umwelteinträge aus Produktion und Verarbeitung an Standorten außerhalb der EU lassen sich aber nur mit der Substitution des DecaBDE vermeiden. Ohne verlässliche Kenntnisse über die Haupteintragspfade sind Maßnahmen nicht ausreichend, die sich auf die Herstellung und Verarbeitung beschränken.

¹³ Das Europäische Chemikalienbüro koordiniert für die EU-Kommission alle Aktivitäten zur europäischen Chemikalienbewertung. Ein Gremium aus Industrie- und Behördenexperten diskutiert zurzeit über 100 bekannte, problematische Stoffe und prüft, ob diese potenzielle Zulassungskandidaten sind. Zugleich prüft das Gremium, ob die aktuellen Zulassungskriterien für PBT-Stoffe und vPvB-Stoffe geeignet sind (Anhang XIII, REACH).

5.2 Tetrabrombisphenol A

Anwendung: TBBPA ist mit ca. 145.000 Tonnen/Jahr das bromierte Flammschutzmittel mit der weltweit höchsten Produktionsmenge, der Verbrauch in der EU liegt bei etwa 7.000 Tonnen im Jahr. Es wird zu rund 90 Prozent als reaktives Flammschutzmittel in elektronischen Leiterplatten verwendet. In kleinerem Umfang kommt es als additives Flammschutzmittel in Phenolharzen und in ABS-Kunststoffen¹⁴, letztere vornehmlich für Gehäuse von Elektro- und Elektronikgeräten, zum Einsatz.

Umweltbelastungen und Toxizität: TBBPA ist nicht als toxisch für den Menschen eingestuft, wohl aber für Gewässerorganismen. Darüber hinaus ist der Stoff in der Umwelt sehr persistent und wird in Organismen an der Spitze der Nahrungskette in geringen Konzentrationen gefunden. In Europa ließ er sich beispielsweise in Falkengewebe und in Raubvogeleiern aus Grönland sowie in menschlicher Muttermilch nachweisen. Auch bei TBBPA kann das enthaltene Brom, unterstützt durch katalytisch wirkendes Kupfer aus Leiterplatten, im Brandfall und bei unkontrollierter Entsorgung zur Dioxin- und Furanbildung beitragen, jedoch nicht in demselben Maß wie bei DecaBDE.

Tabelle 2: Nachweise von Tetrabrombisphenol A in der europäischen Umwelt (Zahlen stammen aus dem Entwurf der EU-Risikobewertung von Juni 2007)

Nachweise von Tetrabrombisphenol A (TBBPA) in der europäischen Umwelt		
Nachweise in Umweltmedien ^a		
Oberflächengewässer (Süßwasser)	< 0,001 - 0,020	µg / l
Sedimente (Süßwasser)	< 0,1 - 270 (9.752)	µg / kg TG
Böden	< 0,1	µg / kg TG
Klärschlamm	< 0,1 - 192 (600)	µg / kg TG
Nachweise in Organismen (Auswahl) ^b		
Flussaal, Berlin	0,045 - 0,10	µg / kg FG
Fisch, Mjøsasee, Norwegen	0,01 - 0,18	µg / kg FG
Kabeljau, Leber, Norwegen	0,35 - 1,73	µg / kg FG
Weißfisch, Filet, Nordsee	97 - 245	µg / kg Fett
Seestern, Flussmündung, Großbritannien	4,5	µg / kg FG
Einsiedlerkrebs, Nordsee	< 1 - 35	µg / kg Fett
Schweinswal, Tran, Großbritannien	6 - 35	µg / kg FG
Kormoran, Leber, Großbritannien	0,07-10,9	µg / kg FG
Greifvögel, Eier, Norwegen	< 0,004 - 0,013	µg / kg FG

¹⁴ ABS: Acrylnitril-Butadien-Styrol-Kunststoffe

Nachweise im Menschen	
Blut	< 0,1 - 10 µg / kg Fett
Muttermilch	< 0,01 - 11 µg / kg Fett
TG = Trockengewicht, FG = Feuchtgewicht, () = extrem hoher Einzelwert a = Die höchsten Konzentrationen stammen aus der unmittelbaren Nähe von Industrieanlagen. b = Die Konzentrationen im Fett liegen höher als im gesamten Frischgewicht, da TBBPA im Fett anreichert. Wegen des unterschiedlichen Fettanteils von Organen und Organismen liegt kein allgemeiner Umrechnungsfaktor vor.	

Ergebnisse der europäischen Risikobewertung: Wie bei DecaBDE zeigt die europäische Risikobewertung auch hinsichtlich TBBPA große Wissenslücken und damit hohe Unsicherheiten über die bestehende Exposition (Umweltkonzentration). Sie identifiziert jedoch sowohl Risiken für Gewässer, Böden und Sedimente in der direkten Umgebung der Produktionsstandorte (Punktquellen) als auch systemische Risiken. Die indirekten, langfristigen Risiken sind auf diffuse Einträge von TBBPA in Böden und auf den möglichen Abbau zu Bisphenol A und Tetrabrombisphenol-A bis(methylether) - letzterer ist ein Kandidat für die Einstufung als PBT-Stoff - zurückzuführen. Als Konsequenz hat die EU im November 2007 zur Minderung der Risiken durch Punktquellen Maßnahmen zur Emissionsbegrenzung und Regelungen unter dem europäischen Anlagen- und dem Wasserrecht empfohlen (IVU-Richtlinie¹⁵ und Wasserrahmenrichtlinie¹⁶). TBBPA erfüllt die aktuellen PBT-Kriterien nach REACH nicht, da der Biokonzentrationsfaktor und die Toxizität unter dem kritischen Schwellenwert liegen.

Weitere Maßnahmen: Die internationalen Übereinkommen zum Schutz der Nord- und Ostsee - das OSPAR- und das Helsinki-Übereinkommen - sehen vor, die Einträge von TBBPA mittelfristig auf Null zu reduzieren. Auf EU-Ebene schlug das Europäische Parlament TBBPA als prioritären Stoff für die Wasserrahmenrichtlinie vor. Die Hersteller und Verarbeiter bromierter Flammschutzmittel haben TBBPA aktuell in das VECAP-Programm zur freiwilligen Emissionsminderung aufgenommen und erheben genauere Daten zu den Emissionen aus der Verwendung des Stoffes. Ob diese Initiative ausreicht, um die identifizierten Risikopotenziale zu beherrschen, ist derzeit nicht absehbar.

Position des Umweltbundesamtes: Da TBBPA unbestritten persistent und in der Umwelt weit verbreitet ist, muss die Vermeidung Vorrang vor punktuellen Maßnahmen zur Emissionsbegrenzung erhalten. Für die additiven Verwendungen des TBBPA stehen ausreichend umweltverträglichere Ersatzstoffe zur Verfügung, die kurzfristig einsetzbar sind (siehe Kap. 6). Auch für die reaktive Verwendung in Leiterplatten mit Epoxydharz als Trägermaterial haben Leiterplattenhersteller in den letzten Jahren Alternativen entwickelt, deren Marktan-

¹⁵ Richtlinie 96/61/EG des Rates vom 24. September 1996 über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung.

¹⁶ Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (Wasserrahmenrichtlinie WRRL).

teile jedoch noch klein sind. Für diese Verwendung ist mittelfristig ein Ersatz durch umweltverträglichere Alternativen anzustreben, falls die Hersteller keine effektive Vermeidung der Emissionen in allen Produktlebensphasen belegen können.

5.3 Hexabromcyclododecan

Anwendung: Jährlich werden weltweit ca. 22.000 Tonnen HBCD verwendet, womit HBCD das bromierte Flammenschutzmittel mit der dritthöchsten Einsatzmenge ist. Der Verbrauch in der EU beträgt etwa 9.600 Tonnen im Jahr. Es wird vorwiegend zum Flammenschutz bei Dämmstoffen aus Polystyrol eingesetzt, weiterhin in Textilien sowie in Bauteilen für Elektro- und Elektronikgeräte.

Umweltbelastungen und Toxizität: HBCD ist toxisch für Gewässerorganismen. Es ist in zahlreichen marinen Organismen sowie in der menschlichen Muttermilch nachweisbar. Die Gefährdung der Menschen durch die Weitergabe mit der Muttermilch, potenzielle reprotoxische Effekte oder neurotoxische Entwicklungsstörungen sind wissenschaftlich noch nicht geklärt. HBCD ist persistent in der Umwelt und neigt stark zur Bioakkumulation. Es findet sich in an der Spitze mariner (Vogeleier, Robben, Eisbären) und terrestrischer (Vogeleier) Nahrungsketten. Es kommt in der Umwelt bewohnter sowie nicht bewohnter Gegenden, etwa in polaren Regionen, vor. Die Belastungen steigen im zeitlichen Trend deutlich. Im Falle unzureichender Verbrennungstechnik oder unkontrollierter Brände bilden sich aus HBCD polybromierte Dioxine und Furane, jedoch nicht in demselben Maße wie bei DecaBDE.

Tabelle 3: Nachweise von Hexabromcyclododecan in der europäischen Umwelt (Die Zahlen stammen aus dem Entwurf der EU-Risikobewertung für den Bereich Umwelt von Oktober 2006. Für den Menschen sind sie Covaci et al. (2006) entnommen, da dieser Teil der Risikobewertung noch nicht vorliegt.).

Nachweise von Hexabromcyclododecan (HBCD) in der europäischen Umwelt		
Nachweise in Umweltmedien^a		
Oberflächengewässer (Süßwasser)	< 0,02 - 1,5	µg / l
Sedimente (Süßwasser)	< 0,1 - 11.000	µg / kg TG
Böden	0,14 - 90	µg / kg TG
Klärschlamm	< 0,3 - 9.120	µg / kg TG
Nachweise in Organismen (Auswahl)^b		
Süßwasserfische, (u.a. Barsch, Aal, Forelle)	< 0,03 - 9.432 (27.705)	µg / kg FG (Fett)
Moos, Norwegen	< 1,5 - 11.114	µg / kg FG

Wanderfalke, Eier (u.a. Grönland, Schweden)	< 0,002 - 160 (590)	µg / kg FG (Fett)
Krustentiere (u.a. Muscheln, Shrimps)	< 0,5 - 329 (17.337)	µg / kg FG (Fett)
Meeresfische, Muskel (u.a. Barsch, Aal, Gründling)	< 0,001 - 49 (1.113)	µg / kg FG (Fett)
Meeresfische, Leber (u.a. Kabeljau, Seezunge)	< 0,3 - 89	µg / kg FG
Meeressäuger (Robben, Schweinswal, Delphin)	0,5 - 6.400 (21.345)	µg / kg FG (Fett)
Eisbären	5 - 45	µg / kg FG
Seevögel	0,5 - 100	µg / kg FG

Nachweise im Menschen

Blut, Niederlande	< 80 -360	µg / kg Fett
Muttermilch, Schweden	< 0,2 - 2,4	µg / kg Fett

TG = Trockengewicht, FG = Feuchtgewicht, () = extrem hoher Einzelwert

a = Die höchsten Konzentrationen stammen aus der unmittelbaren Nähe von Industrieanlagen.

b = Die Konzentrationen im Fett liegen höher als im gesamten Frischgewicht, da HBCD im Fett anreichert. Wegen des unterschiedlichen Fettanteils von Organen und Organismen liegt kein allgemeiner Umrechnungsfaktor vor.

Ergebnisse der EU-Risikobewertung: Die Risikobewertung hat direkte Risiken und ein systemisches Risikopotenzial ergeben. Die Verarbeitung des HBCD verursacht erhebliche lokale Risiken für Mensch und Umwelt (Gewässer, Sedimente). Kritische Punktquellen sind Anlagen zur Formulierung expandierten und extrudierten Polystyrols (EPS, XPS) und zur Beschichtung von Textilien. Die Expositionsszenarien der Risikobewertung belegen gesundheitliche Risiken am Arbeitsplatz als Folge des Einatmens von HBCD als Feinpuder. Die starke Bioakkumulation verursacht weiterhin indirekte Risiken über alle Nahrungsketten, besonders für Meeressäuger. Diese Risiken gehen auf Einträge aus allen wesentlichen Anwendungsbereichen zurück. Wie für die beiden anderen Flammschutzmittel gilt aber auch für HBCD, dass große Unsicherheiten vor allem bei der Quantifizierung der Eintragspfade bestehen, so dass die Autoren der Risikobewertung empfehlen, die Datenlage mit Hilfe zusätzlicher Tests und Daten aus der Umweltbeobachtung zu verbessern. Da insgesamt jedoch erheblicher Handlungsbedarf besteht, unterbreitete der für die Risikobewertung von HBCD zuständige EU-Mitgliedstaat Schweden im September 2007 Vorschläge zur Risikominderung. Diese sehen ein Verbot fast aller Verwendungen vor. Ausgenommen ist die Verwendung in Wärmedämmstoffen, für die Schweden eine Übergangsfrist vorschlägt. HBCD erfüllt zudem die Kriterien für eine Zulassungspflicht unter REACH. Würde HBCD ein zulassungspflichtiger Stoff unter REACH, so könnte die Verwendung - falls überhaupt - nur noch befristet und unter strengen Auflagen erfolgen.

Weitere Maßnahmen: Neben den zu erwartenden, weitreichenden Maßnahmen für die Risikominderung, die Schweden vorschlug, ist HBCD Gegenstand weiterer Regelungen. Die

internationalen Übereinkommen zum Schutz der Nord- und Ostsee sehen eine Verminderung der Einträge des HBCD mittelfristig auf Null vor. Die Industrieunternehmen, die HBCD herstellen oder verarbeiten, nahmen das Flammschutzmittel aktuell in das VECAP-Projekt zur Emissionsminderung auf. Darüber hinaus hat der Herstellerverband EBFRIIP im Jahr 2007 auf EU-Ebene ein Monitoringprogramm für HBCD in der Umwelt angestoßen (SECURE), um aktuelle Belastungsdaten und zukünftige Trends zu erheben.

Position des Umweltbundesamtes: HBCD ist ein additiv eingesetztes Flammschutzmittel mit sehr hoher Neigung zur Bioakkumulation, dessen langfristige Toxizität für den Menschen noch nicht völlig geklärt ist. Zudem ist es persistent und für aquatische Organismen toxisch. Die Vermeidung dieses Stoffes in der Umwelt muss daher vor punktuellen Maßnahmen zur Emissionsbegrenzung Vorrang erhalten. Für die Verwendungen des HBCD in Textilrückenbeschichtungen und Gehäusekunststoffen stehen ausreichend umweltverträglichere Substitute zur Verfügung, so dass diese Anwendungen kurzfristig verzichtbar sind (siehe Kap. 6). Für Dämmstoffe aus Polystyrol ist hingegen zurzeit kein anderes, geeignetes Flammschutzmittel bekannt. Hier ist Forschung nötig, um ein geeignetes Flammschutzmittel zu suchen und zu erproben. Solange die Hersteller der Polystyrol-Dämmstoffe HBCD verwenden, sind Maßnahmen zur effektiven Vermeidung der Emissionen in allen Produktlebensphasen kurzfristig erforderlich. Das Umweltbundesamt plädiert darüber hinaus dafür, zur Wärmedämmung - soweit technisch möglich - andere, umweltverträgliche Dämmmaterialien zu verwenden, bis ein alternatives Flammschutzmittel für Polystyrol gefunden ist.

5.4 Die Stoffbewertungen in der Übersicht

Tabelle 4 zeigt die Gefährlichkeitsmerkmale sowie die Bewertung der potenziellen, direkten und indirekten Risiken der drei bromierten Flammschutzmittel Decabromdiphenylether (DecaBDE), Tetrabrombisphenol A (TBBPA) und Hexabromcyclododecan (HBCD) im Überblick.

Tabelle 4: Übersicht über gefährliche Eigenschaften und Risikocharakteristik der drei betrachteten Flammschutzmittel

Flammschutzmittel	DecaBDE	TBBPA	HBCD
Gefahrenmerkmal (Einstufung und Kennzeichnung)	-	R 50/53	R 50/53, R 33, R 64 (Vorschläge)
Direkte Risiken (PEC/PNEC-Bewertung)			
Lokale Umweltrisiken durch Punktquellen (Gewässer, Boden, Klärschlamm, Sediment)	nein	ja	ja
Risiken für Gesundheit (Arbeitsschutz, Produktnutzung)	?	nein	ja (Arbeitsschutz)
Indirekte Risiken (PBT-Bewertung)			
Persistenz Halbwertszeit > 60 Tage Wasser Halbwertszeit > 120 Tage limnisches Sediment/Boden	ja (sehr persistent)	ja (sehr persistent)	ja (persistent)
Bioakkumulation BCF > 2000	? (Testprobleme)	ja (unterhalb des Schwellenwertes)	ja (sehr bioakkumulierend)
Anreicherung in der Nahrungskette (Monitoringbefunde)	ja	Ja	ja
Nachweis in den Polregionen (Ferntransportpotenzial)	ja	Ja	ja
Langfristige toxische Eigenschaften (CMR-Eigenschaften, endokrine Wirkungen, Neurotoxizität)	? (endokrine Effekte, Neurotoxizität)	Nein	?
Langfristige ökotoxische Eigenschaften (0,1 mg/l im chronischen Test für aquatische Organismen)	?	ja (unterhalb des Schwellenwertes)	ja
Toxische und/oder persistente Abbauprodukte	ja	ja	ja
BCF = Biokonzentrationsfaktor, PEC = Predicted Environmental Concentration, PNEC = Predicted No Effect Concentration, PBT = persistent, bioakkumulierend und toxisch, CMR = cancerogen, mutagen oder reproduktionstoxisch, R 50/53 = sehr giftig für Wasserorganismen, kann in Gewässern längerfristig schädliche Wirkungen haben, R 33 = Gefahr kumulativer Wirkungen, R 64 = Kann Säuglinge über die Muttermilch schädigen.			

6 Minderung der Umwelteinträge bromierter Flammschutzmittel

6.1 Emissionskontrolle und Substitution als Minderungsstrategien

Die Umwelteinträge bromierter Flammschutzmittel lassen sich prinzipiell auf zwei Wegen mindern: erstens mittels technischer Maßnahmen zur Emissionskontrolle und zweitens mit der Substitution (Ersatz) durch weniger problematische Flammschutzmittel in den verschiedenen Anwendungen oder gänzlich andere Werkstoffe sowie Brandschutzkonzepte. Mit technischen Maßnahmen lassen sich vor allem Punktquellen in der Produktion oder in der gezielten Abfallbehandlung kontrollieren, während sich diffuse Quellen bei der Nutzung oder der unkontrollierten Entsorgung in der Regel nur mit dem Ersatz der Flammschutzmittel beseitigen lassen. Bei bromierten Flammschutzmitteln spielen alle Eintragspfade in die Umwelt eine Rolle.

Für die Wahl der Risikominderungsmaßnahme ist zukünftig auch die Bewertung eines Stoffes unter REACH entscheidend. Prinzipiell steht es den Anwendern von Flammschutzmitteln frei, sich zwischen der Substitution problematischer Stoffe oder Maßnahmen zur Emissionsminderung zu entscheiden. Handelte es sich nach den REACH-Kriterien um einen PBT-Stoff - also um einen persistenten, bioakkumulierenden und toxischen Stoff -, so wäre seine Verwendung jedoch nur noch für eine Übergangszeit möglich und danach aus Vorsorgegründen grundsätzlich verboten. Eine weitere Verwendung würde nur auf Antrag zugelassen, falls kein weniger schädlicher Ersatzstoff zur Verfügung stünde, die sozioökonomischen Folgen eines Verwendungsverbots unzumutbar und die Emissionen des Stoffes auf dem gesamten Lebensweg ausreichend kontrollierbar wären. Das Europäische Chemikalienbüro schlägt das Flammschutzmittel HBCD als PBT-Stoff vor, DecaBDE steht ebenfalls auf der Agenda. Im Fall einer Bewertung beider Flammschutzmittel als PBT-Stoffe sind vorhandene Substitute und Möglichkeiten zur effektiven Emissionskontrolle (Minimierung) für die spätere Entscheidung über einen Zulassungsantrag maßgeblich.

Das Umweltbundesamt hält bei allen drei bromierten Flammschutzmitteln allerdings auch dann anspruchsvolle Maßnahmen zur Emissionskontrolle und/oder Substitution für notwendig, falls keine PBT-Einstufung nach den REACH-Kriterien erfolgen sollte. Auch wenn die Flammschutzmittel zum Teil nicht alle drei PBT-Kriterien formal erfüllen, so liegen einige Schwellenwerte nur knapp darunter, oder bedeutende Hinweise auf schädliche Wirkungen sind nicht ausreichend entkräftet (siehe Tabelle 4). Zudem zeigen die PBT-Kriterien im Anhang XIII von REACH bislang keine hinreichende Treffsicherheit, um bekannte Problemstoffe sicher zu identifizieren. Folgerichtig sieht der Gesetzgeber eine Revisionsfrist bis zum 1. Dezember 2008 für den Anhang XIII vor. Die drei bromierten Flammschutzmitteln DecaBDE, HBCD und TBBPA erfüllen die UBA-Kriterien zur Begründung von vorsorgenden Maßnahmen (siehe Infokasten Abschnitt 4). Weltweite Funde in der Umwelt und an der Spitze von Nahrungsketten belegen ihre Persistenz, ihre hohe Mobilität und ihr Anreicherungspotenzial.

Die Hersteller bromierter Flammschutzmittel verpflichten sich im VECAP- und im SECURE-Programm freiwillig, die Emissionen zu kontrollieren. Die Programme wenden sich sowohl

an Branchenverbände, als auch direkt an alle Abnehmer bromierter Flammschutzmittel. Basierend auf Stoffbilanzen und der persönlichen Beratung durch den Stofflieferanten identifiziert jeder Betrieb mögliche Quellen für unkontrollierte Emissionen und versucht dann, diese zu schließen. Berechnungen der DecaBDE-Hersteller zeigen, dass sich die Emissionen an vielen Herstellungs- und Verarbeitungsstandorten senken lassen. Das ist ein erster positiver Schritt. Er reicht aber nicht, um die Belastungen, insbesondere der Meeresumwelt, deutlich genug zu senken.

Um diffuse Einträge aus Produkten sowie aus schädlichen Folgeprodukten im Brandfall und bei der unkontrollierten Entsorgung zu mindern, hält das Umweltbundesamt eine möglichst weitgehende Substitution der drei bromierten Flammschutzmittel für erforderlich. Aus dem konsequenten Einsatz von Ersatzstoffen oder Ersatzprodukten folgt zudem die Reduktion der Umwelteinträge bromierter Flammschutzmittel auch bei solchen Unternehmen in der EU, die nicht an den Programmen zur Emissionsminderung teilnehmen, sowie an außereuropäischen Produktionsstandorten.

Tabelle 5 zeigt die aus Sicht des Umweltbundesamtes generell bestehenden, ökologischen Prioritäten für den Einsatz der verschiedenen Flammschutzmittel in Produkten. Das Umweltbundesamt bewertet die Verwendung halogenfreier, reaktiv gebundener Flammschutzmittel oder den Einsatz anderer Werkstoffe und Gerätekonstruktionen in der Regel als ökologisch vorteilhaft gegenüber halogenierten Flammschutzmitteln.¹⁷ Zudem haben reaktiv eingebundene Flammschutzmittel grundsätzlich eine geringere Neigung zur Migration oder Auswaschung aus den Produkten als additive Flammschutzmittel und sind daher zu bevorzugen. Voraussetzung für die Verwendung aller (halogenfreien wie halogenhaltigen) Flammschutzmittel ist, dass ihre Umwelt- und Gesundheitswirkungen ausreichend untersucht sind und bei Herstellung und Entsorgung keine Risiken für Umwelt und Gesundheit entstehen. Im Einzelfall können betriebs- und anwendungstechnische Maßnahmen zu einer geänderten Reihung der Prioritäten führen. Das Umweltbundesamt empfiehlt Produktherstellern, auf Flammschutzmittel zu verzichten, die die in Tabelle 5 genannten Eigenschaften nicht erfüllen.

¹⁷ Nahezu alle der als besonders problematisch identifizierten Flammschutzmittel stammen aus der Gruppe der halogenierten Flammschutzmittel. Insbesondere zeigen viele bromierte Verbindungen eine Tendenz zur Persistenz und Bioakkumulation. Bromierte Verbindungen, die in ihrer Struktur nur geringfügig modifiziert sind, stellen daher keine geeigneten Substitute dar. Halogenierte Phosphorverbindungen verfügen über ungünstige toxikologische Eigenschaften; weiterhin ist allen stark halogenhaltigen Verbindungen im Brandfall und bei unkontrollierter Entsorgung ein erhöhtes Potenzial zur Bildung korrosiver Brandgase sowie von Dioxinen und Furanen gemeinsam.

Tabelle 5: Ökologische Prioritäten beim Einsatz von Flammschutzmittel in Produkten

Ökologische Prioritäten beim Einsatz von Flammschutzmitteln in Produkten

1. Konstruktive Maßnahmen zur Reduktion des Flammschutzmitteleinsatzes (Verwendung schwer entflammbarer Materialien, Einbau von Sperrschichten, Anpassung des Flammschutzmitteleinsatzes an die Gerätespannung, usw.)
2. Anorganische Flammschutzmittel (Aluminiumhydroxid, Magnesiumhydroxid, roter Phosphor (mikroverkapselt), Ammoniumpolyphosphat)
3. Reaktiv eingebundene, halogenfreie, organische Stickstoff- und Phosphorverbindungen
4. Additiv eingesetzte, halogenfreie, organische Stickstoff- und Phosphorverbindungen, die nicht persistent, bioakkumulierend, langfristig humantoxisch oder ökotoxisch sind
5. Reaktiv eingebundene, halogenhaltige Flammschutzmittel
6. Additiv eingesetzte, halogenhaltige Flammschutzmittel, die nicht persistent, bioakkumulierend, langfristig humantoxisch oder ökotoxisch sind

Voraussetzungen

- Alle verwendeten Flammschutzmittel müssen ausreichend untersucht sein.
- Bei fachgerechter Produktherstellung und Entsorgung dürfen keine Risiken für Umwelt und Gesundheit entstehen.
- Betriebs- und anwendungstechnische Maßnahmen können im Einzelfall zu einer geänderten Reihenfolge der Prioritäten führen.

6.2 Substitution von DecaBDE, TBBPA und HBCD

Die Entwicklung und Bewertung der Ersatzmöglichkeiten für die drei bromierten Flammschutzmittel ist unterschiedlich weit. Den aktuellen Stand technisch geeigneter, halogenfreier Substitutionsmöglichkeiten für die verschiedenen Anwendungsbereiche fasst dieser Abschnitt zusammen, ohne dass an dieser Stelle eine detaillierte Bewertung der Umwelt- und Gesundheitswirkungen dieser Ersatzstoffe erfolgt.

Ersatz von DecaBDE, TBBPA und HBCD in Kunststoffen für Elektro- und Elektronikgeräte: Für den Ersatz bromierter Flammschutzmittel in Gehäusekunststoffen und Kleinteilen in diesen Geräten liegen zahlreiche Untersuchungen und Praxisbeispiele vor. Für Gehäusekunststoffe werden anstelle der bromierten Flammschutzmittel in der Regel halogenfreie, organische Phosphorverbindungen eingesetzt. Dies erfordert gleichzeitig den Austausch der günstigen Massenkunststoffe ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) und HIPS (High Impact Polystyrol, schlagzähes Polystyrol) gegen etwas teurere, schwerer entflammbare Mischungen dieser Kunststoffe mit PC (Polycarbonat) oder PPE (Polyphenylenether). Für Kleinteile aus Polyesterkunststoffen (PBT, PET) oder Polyamid (PA) sind Ersatzstoffe - wie Magnesiumhydroxid, mikroverkapselter roter Phosphor, Melamine oder organische Phosphinate - geeignet. Bei Geräten im Niederspannungsbereich lässt sich die Menge des Flammschutzmitteleinsatzes oft reduzieren, da diese häufig stärker ausgerüstet sind, als nötig wäre, um Brandschutzanforderungen zu erfüllen. Auch der zunehmende Flammschutz der Elektro-

und Elektronikgeräte gegen externe Zündquellen, der zu einem steigenden Flammschutzmittelverbrauch führt, bedarf einer breiteren fachlichen und gesellschaftlichen Diskussion zur Abwägung der Vor- und Nachteile. Bisher findet diese Diskussion ausschließlich in den mit Flammschutzmitteln befassten Gremien auf technischer Ebene statt.

Ersatz DecaBDE und HBCD in Textilien: Für den Ersatz der bromierten Flammschutzmittel bei Textilien gibt es viele Wege: Hierzu zählen die Permanentausrüstung der Zellulosefasern mit reaktiven Flammschutzmitteln auf Phosphorbasis oder inhärent flammgeschützte Polyesterfasern mit fest einreagierten, ebenfalls phosphorhaltigen Flammschutzmittelmolekülen. Bewährt sind weiterhin Gewebe aus schwer entflammaren Fasermaterialien - wie Polyaramiden - oder aus nicht brennbaren Glasfasern. Eine weitere Möglichkeit ist die weitere Entwicklung der Intumeszenz-Systeme, die im Brandfall anschwellen und dadurch Sperrschichten bilden. Entscheidenden Einfluss auf das Brandverhalten haben auch der Aufbau und die Dichte eines Gewebes oder Polsters.

Ersatz von TBBPA in Leiterplatten: Bei bromfreien Leiterplatten gab es in den letzten Jahren zahlreiche technische Fortschritte. Einige Hersteller verfügen über marktreife Produkte. Auch hier kommen in erster Linie phosphorhaltige Ersatzstoffe wie DOPO (Dihydrooxaphosphaphenanthren), polymere Phosphonate oder Metallphosphinate zum Einsatz, teilweise in Kombination mit anorganischen Verbindungen - wie Aluminiumhydroxid oder Siliciumdioxid. Das Trägerpolymer bleibt dabei in der Regel Epoxydharz, wie auch bei konventionellen Leiterplatten. Neue Forschungsergebnisse zeigen daneben die mögliche Eignung thermoplastischer Leiterplatten aus schwer entflammaren Trägerpolymeren wie PEI (Polyetherimid) oder PES (Polyethersulfon).

Ersatz des HBCD in Dämmstoffen: Bisher ist kein Flammschutzmittel für Dämmstoffe aus Polystyrol bekannt, das als Ersatzstoff für HBCD geeignet wäre. Als Ersatzmaterial für flammgeschützte Polystyrolämmstoffe ist Mineralwolle - mit Ausnahme der Wärmedämmung erdberührter Bauteile (Perimeterdämmung) - grundsätzlich geeignet. Die Gesundheitsauswirkungen von Mineralwolle während der Gebäudenutzung sind heutzutage unbedenklich. Beim Einbau müssen jedoch die üblichen Arbeitsschutzmaßnahmen eingehalten werden. Aus Klimaschutzgründen ist es notwendig, die Wärmedämmung bei Gebäuden im Vergleich zum heutigen Zustand deutlich zu verbessern. Der für die Erarbeitung von Risikominderungsmaßnahmen zuständige EU-Mitgliedstaat Schweden rät daher „zu erwägen, ob eine befristete Ausnahme für Dämmstoffe aus Polystyrol von einem vollständigen Verwendungsverbot notwendig ist“, um kurzfristig weiterhin Wärmedämmung mit flammgeschütztem Polystyrolämmstoffen zu ermöglichen.

Tabelle 6 fasst die wesentlichen, technisch geeigneten, halogenfreien Substitutionsmöglichkeiten für die verschiedenen Anwendungsbereiche zusammen. Eine detaillierte Bewertung der Umwelt- und Gesundheitseigenschaften der Ersatzstoffe erfolgt nicht, sie erfüllen jedoch mindestens die in Tabelle 5 genannten Anforderungen.

Tabelle 6: Übersicht über halogenfreie Substitutionsmöglichkeiten zu den bromierten Flammschutzmitteln DecaBDE, TBBPA und HBCD (Beispiele)

Anwendungsbereich	bromiertes Flammschutzmittel (Kunststoff/Faser)	Technisch geeignete Substitutionsmöglichkeiten (Beispiele) Ersatzstoff und/oder Ersatzmaterial
Gehäusekunststoffe für Elektro- und Elektronikgeräte	DecaBDE (ABS, HIPS) HBCD (HIPS) TBBA additiv (ABS)	Phosphorhaltige, halogenfreie Flammschutzmittel: RDP, BDP (PC, PC/ABS, PPE/HIPS)
Kleinteile für Elektro- und Elektronikgeräte	DecaBDE (PBT, PET, PA)	Roter Phosphor (mikroverkapselt), Magnesiumhydroxid, Melamine, Metallphosphinate (PA) Metallphosphinate (PBT, PET)
Leiterplatten	TBBPA reaktiv (Epoxydharz) TBBPA additiv (Phenolharz)	Phosphorhaltige, halogenfreie Flammschutzmittel: DOPO/Aluminiumhydroxid (Epoxydharz) Metallphosphinate/DOPO/Siliciumdioxid (Epoxydharz) Polymere Phosphonate (Epoxydharz) schwer entflammbare duroplastische Kunststoffe schwer entflammbare thermoplastische Kunststoffe (in Entwicklung)
Textilrückenbeschichtungen	DecaBDE (diverse Fasern) HBCD (diverse Fasern)	Inhärent flammgeschützte Kunstfasern mit eingesponnenem FSM (PP, PE) Schwer entflammbare Kunstfasern (Polyamide); Glasfasern Permanentausrüstung mit Phosphoniumverbindungen (Zellulose) Intumeszenzsysteme (diverse Fasern)
Dämmstoffe aus Polystyrol	HBCD (EPS, XPS)	Mineralwolle (außer Perimeterdämmung)
Mit:	ABS = Acrylnitril-Butadien-Styrol BDP = Bisphenol A-bis(diphenylphosphat) DOPO = Dihydrooxaphosphaphenanthren EPS = expandiertes Polystyrol FSM = Flammschutzmittel HIPS = High Impact Polystyrol	PC = Polycarbonat PET = Polyethylenterephthalat PP = Polypropylen PPE = Polyphenylenether RDP = Resorcinol-bis(diphenylphosphat) XPS = extrudiertes Polystyrol

7 Übergreifender Handlungs- und Forschungsbedarf

An folgenden, übergeordneten Punkten besteht aus Sicht des Umweltbundesamtes weiterer Handlungs- und Forschungsbedarf:

Die unter REACH geltenden **Kriterien für PBT-Stoffe** sind nicht ausreichend flexibel, um relevante Umweltchemikalien sicher zu erfassen. Die aktuellen Kriterien beruhen in erster Linie auf Labortests, die für viele relevante Umweltchemikalien nicht geeignet sind. Die EU sollte daher die Ergebnisse aus Monitoringuntersuchungen über Chemikalienrückstände in der Umwelt bei der Identifizierung von PBT-Stoffen stärker berücksichtigen.

Die unzureichende **Einstufung und Kennzeichnung** persistenter und bioakkumulierender Stoffe macht es Nicht-Fachleuten schwierig, die Notwendigkeit vorsorgender technischer Maßnahmen im Betriebsablauf zu erkennen. Eine weiterreichende Einstufungs- und Kennzeichnungspflicht wäre auch für die Entwicklung umwelt- und gesundheitsverträglicher Produkte eine große Unterstützung, da die Produktentwickler solche problematischen Stoffe dann einfacher erkennen und durch weniger problematische Stoffe ersetzen können.

Die **Bewertung der Ersatzstoffe** ist von grundlegender Bedeutung, sowohl für die Bewertung der Zulassungsanträge unter REACH als auch für freiwillige Substitutionsmaßnahmen. Da die technische Entwicklung permanent voranschreitet, ist eine regelmäßige, möglicherweise sogar institutionalisierte Bewertung der Ersatzstoffe und Ersatzprodukte erforderlich, um ausreichend gesicherte Empfehlungen geben zu können.

Es ist notwendig, den Blick nicht nur auf die drei in diesem Text beschriebenen bromierten Flammschutzmittel in der Umwelt zu richten. Forschungsarbeiten müssen verstärkt das **Vorkommen anderer - bromierter oder nicht bromierter - Flammschutzmittel** in der Umwelt untersuchen, sofern Hinweise auf potenziell problematische Eigenschaften bestehen.