

Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und  
Reaktorsicherheit

Forschungsbericht 204 08 542 (alt) 297 44 542 (neu)

## **Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel**

Auftragnehmer:  
Öko-Recherche. Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH, Frankfurt/M.

### **Inhaltsverzeichnis Band I - III**

#### **Band I:**

##### **Ergebnisse und zusammenfassende Übersicht**

Dr. André Leisewitz (Öko-Recherche GmbH), Dr. Hermann Kruse (Institut für  
Toxikologie der Christian-Albrechts-Universität Kiel) und Dr. Engelbert Schramm  
(ISOE GmbH)

#### **Band II:**

##### **Flammhemmende Ausrüstung ausgewählter Produkte – anwendungsbezogene Betrachtung: Stand der Technik, Trend, Alternativen**

Dr. André Leisewitz und Dr. Winfried Schwarz (Öko-Recherche GmbH)

#### **Band III:**

##### **Toxikologisch-ökotoxikologische Stoffprofile ausgewählter Flammschutzmittel**

Dr. Hermann Kruse, Olaf Paulsen, Cordula Schau, Mareke Wieben, Uwe Böhde  
(Institut für Toxikologie der Christian-Albrechts-Universität Kiel)

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Dezember 2000

# **Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel**

Auftragnehmer:  
Öko-Recherche. Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH, Frankfurt/M.

## **Inhaltsverzeichnis Band I: Ergebnisse und zusammenfassende Übersicht**

von

Dr. André Leisewitz  
Dr. Hermann Kruse  
Dr. Engelbert Schramm

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Dezember 2000

**Inhalt Band I**

I

**Abkürzungen**

VII

**Vorwort**

XI

**Kapitel I: Aufgabenstellung und Untersuchungsverfahren**

1

**1. Aufgabenstellung**

2

**2. Flammhemmung und Brandschutz - Problemstellungen**

3

**3. Vorgehensweise**

6

3.1 Flammschutzmittel und Stoffprofile

6

3.2 Anwendungsbezogene Betrachtung

7

3.3 Bewertungsgrundlagen

8

**4. Kooperationsformen im Rahmen des Projekts**

10

**Kapitel II: Flammschutzmittel und Flammschutzmittelverbrauch**

11

**1. Flammschutzmittel: Aufgaben, Wirkungsweise, Gruppen**

12

1.1 Funktion von Flammschutzmitteln

12

1.2 Wirkungsweise

12

1.3 Reaktive und additive Flammschutzmittel

13

**2. Die wichtigsten Flammschutzmittelgruppen**

15

**3. Flammschutzmittel - Mengenschätzung**

17

3.1 Gesamtverbrauch

17

3.2 Verbrauch nach Flammschutzmittel-Gruppen

18

3.3 Flammgeschützte Kunststoffe nach Flammschutzmittel-Gruppen

18

**5. Trend bei Flammschutzmittelverbrauch und -entwicklung**

21

**6. Quellen und Nachweise**

23

**Kapitel III: Die untersuchten Flammschutzmittel - allgemeine Charakteristik**

25

**1. Angaben zu den Einzelstoffen**

26

1.1 Decabromdiphenylether [CAS: 1163-19-5]

29

1.2 Tetrabrombisphenol A [CAS: 79-94-7]

30

1.3 Bis(pentabromphenyl)ethan [CAS: 84852-53-9]

31

1.4 Hexabromcyclododecan (HBCD) [CAS: 3194-55-6]

32

1.5 Tris(chlorpropyl)phosphat (TCPP) [CAS: 13674-84-5]

33

1.6 Resorcinol-bis-diphenyl-phosphat (RDP) [CAS:57583-54-7]

34

1.7 N-Hydroxymethyl-3-dimethylphosphonpropionamid [CAS:20120-33-6]

36

1.8 Roter Phosphor [CAS:7723-14-0]

37

1.9 Ammoniumpolyphosphat (APP) [CAS: 68333-79-9]

38

1.10 Melamincyanurat (MC) [CAS:37640-57-6]

39

1.11 Aluminiumtrihydroxid (ATH) [CAS 21645-51-2]

40

1.12 Natriumborat-decahydrat (Borax) [CAS: 1303-96-4]

41

1.13 Antimontrioxid (ATO) [CAS: 1309-64-4]

42

**2. Mengenrepräsentativität der ausgewählten Flammschutzmittel**

44

**3. Quellen und Nachweise**

46

<b>Kapitel IV: Zur Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen für die Umweltrelevanz von Stoffen und Produkten</b>	<b>51</b>
<b>Vorbemerkung</b>	<b>52</b>
<b>1. Umweltrelevanz und Umweltschädlichkeit von Stoffen und Produkten</b>	<b>53</b>
<b>2. Hintergrundsüberlegungen zur Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen für die Substitution umweltrelevanter Chemikalien</b>	<b>55</b>
2.1. Zur Kombination von Ansätzen der Stoff- und Produktbewertung	55
2.2. Exkurs zur gesellschaftlichen Akzeptanz des szientifischen Sachmodells der Stoffbewertung	56
2.3. Folgerungen zur Substitution umweltrelevanter Flammschutzmittel	58
<b>3. Bewertungsdimensionen</b>	<b>60</b>
3.1. Anforderungen an Kriterien und Bewertungsaspekte	60
3.2. Hinweise auf Bestandteile eines neuen Ziel- und Wertesystemes	61
3.3. Kriterien einer vorsorgenden nachhaltigen Stoffpolitik	62
3.4. Datenlage	65
<b>4. Bewertungsgrundlagen</b>	<b>66</b>
4.1. Ableitung der Bewertungsgrundlagen	66
4.2. Vergleichende Bewertungsaspekte	68
4.3. Exkurs: Zur Gewichtung der verschiedenen Phasen	69
<b>5. Abschlußbemerkung</b>	<b>71</b>
<b>6. Quellen und Nachweise</b>	<b>72</b>
<b>Kapitel V: Zusammenfassende Stoffbewertungen</b>	<b>75</b>
<b>Vorbemerkung</b>	<b>76</b>
<b>1. Decabromdiphenylether (DeBDE)</b>	<b>78</b>
1.1 Stoffeigenschaften	78
1.2 Umweltbelastungen	78
1.3 Toxikologie	80
1.4 Ökotoxikologie	81
1.5 Brandfall	81
1.6 Nachgebrauchsphase	81
1.7 Stoffregulierungen	82
1.8 Schlußfolgerungen	82
<b>2. Tetrabrombisphenol A (TBBA)</b>	<b>83</b>
2.1 Stoffeigenschaften	83
2.2 Umweltbelastungen	84
2.4 Ökotoxikologie	86
2.5 Brandfall	86
2.6 Nachgebrauchsphase	86
2.7 Stoffregulierungen	87
2.8 Schlußfolgerungen	87
<b>3. 1,2-Bis(pentabromphenyl)ethan (Saytex 8010)</b>	<b>88</b>
3.1 Stoffeigenschaften	88
3.2 Umweltbelastungen	89
3.3 Toxikologie	89
3.4 Ökotoxikologie	90
3.5 Brandfall	90
3.6 Nachgebrauchsphase	90
3.7 Stoffregulierungen	90
3.8 Schlußfolgerungen	91
<b>4. Hexabromcyclododecan (HBCD)</b>	<b>92</b>
4.1 Stoffeigenschaften	92
4.2 Umweltbelastungen	92

4.3 Toxikologie	94
4.4 Ökotoxikologie	95
4.5 Brandfall	95
4.6 Nachgebrauchsphase	95
4.7 Stoffregulierungen	95
4.8 Schlußfolgerungen	95
<b>5. Trischlorpropylphosphat (TCPP)</b>	<b>97</b>
5.1 Stoffeigenschaften	97
5.2 Umweltbelastungen	97
5.3 Toxikologie	98
5.4 Ökotoxikologie	99
5.5 Brandfall	99
5.6 Recycling	99
5.7 Nachgebrauchsphase	99
5.8 Stoffregulierungen	99
5.9 Schlußfolgerungen	100
<b>6. Resorcinol-bis-diphenyl-phosphat (RDP)</b>	<b>101</b>
6.1 Stoffeigenschaften	101
6.2 Umweltbelastungen	101
6.3 Toxikologie	102
6.4 Ökotoxikologie	103
6.5 Brandfall	103
6.6 Nachgebrauchsphase	103
6.7 Stoffregulierungen	103
6.8 Schlußfolgerungen	103
<b>7. N-Hydroxymethyl-3-dimethylphosphonpropionamid (Pyrovatex CP neu)</b>	<b>105</b>
7.1 Stoffeigenschaften	105
7.2 Umweltbelastungen	105
7.3 Toxikologie	106
7.4 Ökotoxikologie	107
7.5 Brandfall	107
7.6 Nachgebrauchsphase	107
7.7 Stoffregulierungen	107
7.8 Schlußfolgerungen	107
<b>8. Roter Phosphor</b>	<b>109</b>
8.1 Stoffeigenschaften	109
8.2 Umweltbelastungen	109
8.3 Toxikologie	109
8.4 Ökotoxikologie	110
8.5 Brandfall	110
8.6 Recycling	111
8.7 Stoffregulierungen	111
<b>9. Ammoniumpolyphosphat (APP)</b>	<b>112</b>
9.1 Stoffeigenschaften	112
9.2 Umweltbelastungen	112
9.3 Toxikologie	113
9.4 Ökotoxikologie	113
9.5 Brandfall	113
9.6 Recycling	114
9.7 Stoffregulierungen	114
9.8 Schlußfolgerungen	114
<b>10. Melamincyanurat (MC)</b>	<b>115</b>
10.1 Stoffeigenschaften	115
10.2 Umweltbelastungen	115
10.3 Toxikologie	116

10.4 Ökotoxikologie	116
10.5 Brandfall	116
10.6 Stoffregulierungen	117
10.7 Schlußfolgerungen	117
<b>11. Aluminiumtrihydroxid (ATH)</b>	<b>118</b>
11.1 Stoffeigenschaften	118
11.2 Umweltbelastungen	118
11.3 Toxikologie	118
11.4 Ökotoxikologie	119
11.5 Brandfall	119
11.6 Recycling	120
11.7 Stoffregulierungen	120
11.8 Schlußfolgerungen	120
<b>12. Natriumborat-decahydrat (Borax)</b>	<b>121</b>
12.1 Stoffeigenschaften	121
12.2 Umweltbelastungen	121
12.3 Toxikologie	122
12.4 Ökotoxikologie	123
12.5 Brandfall	123
12.6 Entsorgung/Recycling	123
12.7 Stoffregulierungen	123
12.8 Schlußfolgerungen	124
<b>13. Antimontrioxid (ATO)</b>	<b>125</b>
13.1 Stoffeigenschaften	125
13.2 Umweltbelastungen	125
13.3 Toxikologie	126
13.4 Ökotoxikologie	127
13.5 Brandfall	128
13.6 Entsorgung/Recycling	128
13.7 Stoffregulierungen	128
13.8 Schlußfolgerungen	128
<b>14. Zusammenfassung</b>	<b>130</b>
14.1 Bewertungsgrundlagen und -Kategorien	130
14.2 Zusammenfassende Stoffcharakterisierungen	130
<b>15. Anhang: Flammschutzmittel-Übersicht nach Einstufungen gem. GefStVO</b>	<b>133</b>
<b>Kapitel VI: Flammhemmende Ausrüstung ausgewählter Produkte - Stand der Technik, Trend, Alternativen</b>	<b>139</b>
<b>Vorbemerkung</b>	<b>140</b>
<b>1. Schienenfahrzeuge - Innenausbau- und Außenteile aus UP-Harzen</b>	<b>142</b>
1.1 Kunststoffe bei Schienenfahrzeugen	143
1.2 Brandschutzanforderungen	143
1.3 UP-Harze: Formulierung, Verarbeitung, Brennverhalten	144
1.4 Flammschutzsysteme bei UP-Harzen - Stand, Trend, Einsatzmengen	145
1.5 Brennverhalten und Brandfolgeprodukte halogeniert und halogenfrei flammgeschützter UP-Harze im Vergleich	146
1.6 Materialeigenschaften, Kosten	147
1.7 Konstruktiv-werkstoffliche Alternativen	147
1.8 Recycling/Entsorgung	148
1.9 Bilanz	148
1.10 Bewertung	149
<b>2. Bauprodukte – Dämm- und Montageschäume aus Polyurethan (mit einem Exkurs zu Polystyrol-Dämmschaum)</b>	<b>150</b>
2.1 Dämmschäume im Baubereich	151

2.2 Brandschutzanforderungen	152
2.3 PUR-Dämm- und Montageschäume: Formulierung, Verarbeitung, Brennverhalten	152
2.4 Flammenschutzsysteme für PUR-Dämm- und Montageschäume – Stand, Trend, Einsatzmengen	153
2.5 Emissionen, Brandfolgeprodukte	155
2.6 Materialeigenschaften, Kosten	156
2.7 Konstruktiv-werkstoffliche Alternativen	156
2.8 Recycling/Entsorgung	158
2.9 Bilanz	158
2.10 Bewertung	159
<b>3. Flammhemmend ausgerüstete Kunststoffe in Geräten der Elektro- und Elektronik-Industrie (E+E-Geräte)</b>	<b>161</b>
3.1 Flammgeschützte Kunststoff für E+E-Geräte - Mengen	161
3.2 Flammschutz nach Kunststoffen und Gerätekomponenten	162
3.3 Anteile der Flammschutzmittelgruppen	162
3.4 Hauptanwendungsbereiche halogener Flammenschutzmittel	162
3.5 Flammschutz nach Gerätetypen	163
3.6 Bewertung	163
<b>4. Elektro- und Elektronikanwendungen - duroplastische Leiterplatten</b>	<b>164</b>
4.1 Leiterplatten und Leiterplattenbasismaterial	165
4.2 Brandschutzanforderungen (V0-/V1-Standard)	166
4.3 Tränkharze für Leiterplattenbasismaterial: Verarbeitung, Brennverhalten	166
4.4 Flammschutzsysteme für Leiterplattenbasismaterial - Stand, Trend, Einsatzmengen	167
4.5 Emissionen, Brandfolgeprodukte	169
4.6 Materialeigenschaften, Kosten	170
4.7 Konstruktiv-werkstoffliche Alternativen	171
4.8 Recycling/Entsorgung	171
4.9 Bilanz	171
4.10 Bewertung	172
<b>5. Elektro- und Elektronikanwendungen - thermoplastische Außengehäuse für IT- und TV-Geräte</b>	<b>174</b>
5.1 Thermoplastische Kunststoffe für Außengehäuse von IT- und TV-Geräten	175
5.2 Brandschutzanforderungen	176
5.3 Thermoplasten für Außengehäuse: Verarbeitung, Brennverhalten	176
5.4 Flammschutzsysteme bei Thermoplasten für Außengehäuse – Stand, Trend, Einsatzmengen	177
5.5 Emissionen	179
5.6 Materialeigenschaften, Kosten	180
5.7 Konstruktiv-werkstoffliche Alternativen	180
5.8 Recycling/Entsorgung	181
5.9 Bilanz	181
5.10 Bewertung	182
<b>6. Textilanwendungen – Bezugstoffe für Polstermöbel und Matratzen</b>	<b>184</b>
6.1 Flammenschutzmittel für Textilien – Übersicht	185
6.2 Werkstoffe für Matratzen und Polsterverbunde	187
6.3 Brandschutzanforderungen	187
6.4 Brennverhalten von Polsterverbunden	188
6.5 Flammschutzausrüstung	188
6.6 Bilanz	189
6.7 Bewertung	190
<b>Tabellen</b>	<b>191</b>
<b>Übersichten</b>	<b>191</b>

Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und  
Reaktorsicherheit

Forschungsbericht 204 08 542 (alt) 297 44 542 (neu)

**Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution  
umweltrelevanter Flammschutzmittel**

Auftragnehmer:

Öko-Recherche. Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH, Frankfurt/M.

**Inhaltsverzeichnis Band II:  
Flammhemmende Ausrüstung ausgewählter Produkte -  
anwendungsbezogene Betrachtung: Stand der Technik,  
Trend, Alternativen**

von

Dr. André Leisewitz  
Dr. Winfried Schwarz

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Dezember 2000

**Inhalt Band II**

<b>Abkürzungen</b>	<b>XII</b>
<b>Einleitung zu Band II</b>	<b>XVII</b>
<b>Kapitel I: Schienenfahrzeuge - Innenausbau- und Außenteile aus UP-Harzen</b>	<b>1</b>
<b>Vorbemerkung</b>	<b>3</b>
<b>1. Glasfaserverstärkte Duroplaste im Schienenfahrzeugbau</b>	<b>4</b>
1.1 Kunststoffe im Schienenfahrzeugbau	4
1.2 Anwendungsbereiche von GFK im Schienenfahrzeugbau	4
1.3 Der Markt für glasfaserverstärkte Kunststoffe im Schienenfahrzeugbau	5
<b>2. Brandschutzanforderungen bei Schienenfahrzeugen</b>	<b>7</b>
2.1 Brandschutztechnische Besonderheiten bei Schienenfahrzeugen	7
2.2 Brandschutzanforderungen in Europa	7
2.3 Trend	9
<b>3. GFK-Harze im Schienenfahrzeugbau: Kunststoffe und Einsatzbereiche</b>	<b>10</b>
3.1 GFK-Composites 1999	10
3.2 UP- und Phenolharze im Vergleich	11
<b>4. UP-Harze: Formulierung und Verarbeitung</b>	<b>14</b>
4.1 UP-Harze, Herstellung und Formulierung	14
4.2 Verarbeitungsverfahren: SMC, BMC, Pultrusion, RTM u.a.	16
<b>5. Flammhemmende Ausrüstung von UP-Harzen</b>	<b>19</b>
5.1 Halogenierter Flammschutz	20
5.2 UP-Harze mit nichthalogeniertem Flammschutz	21
5.3 Brennverhalten und Brandfolgeprodukte im Vergleich (halogenierte und halogenfreie UP-Harze und Phenolharze)	26
<b>6. Recycling und Entsorgung</b>	<b>30</b>
6.1 Entsorgungsrealität	30
6.2 Recyclingfähigkeit ATH-gefüllter UP-Harze	30
<b>7. Flammschutz bei UP-Harzen für Schienenfahrzeuge - Bewertung</b>	<b>31</b>
<b>8. Quellen und Nachweise</b>	<b>33</b>
<b>Kapitel II: Bauprodukte - Dämm- und Montageschäume aus Polyurethan</b>	<b>37</b>
<b>Vorbemerkung</b>	<b>40</b>
<b>1. Polyurethan-Hartschaum: Eigenschaften, Formulierung, Verarbeitung</b>	<b>41</b>
1.1 Dämmstoffe aus Polyurethan-Hartschaum	41
1.2 Polyurethan-Chemie	42
1.3 PUR- und PIR-Schaum; Isocyanat-Index	44
1.4 Flammgeschützter PUR- und PIR-Schaum: Standard-Formulierungen	46
1.5 Systemhäuser, Systemkunden, Selbstformulierer, Verarbeiter	48
1.6 Verschäumtechnik	49
<b>2. Brandschutzanforderungen und Brandverhalten von PUR-Hartschaum</b>	<b>51</b>
2.1 Brandschutzanforderungen	51
2.2 Brandverhalten von PUR- und PIR-Schäumen	53
<b>3. Flammhemmend ausgerüsteter PUR-Hartschaum (Dämm- und Montageschaum)</b>	
<b>Übersicht</b>	<b>55</b>
3.1 Mengenaspekt: Einzelmärkte 1998/99	55

3.2 Produktionsbedingungen, Schaumqualität	56
3.3 Einsatzbereiche und Baustoffklassifizierung	57
<b>4. Flammhemmung von PUR-Hartschaum (Dämm- und Montageschaum)</b>	<b>58</b>
4.1 Blockschaum	58
4.2 Bandschaum – Plattenware	61
4.3. Sandwich-Elemente	64
4.4 Ortschaum (Dachspritz-, Spritz- und Gießschaum)	68
4.5 Montageschaum	71
<b>5. Flammschutzmittel-Angebot und -Einsatz bei PUR-Dämmschäumen</b>	<b>76</b>
5.1 Flammschutzmittel-Angebot für PUR-Dämmschäume	76
5.2 Eingesetzte Flammschutzmittel	78
5.3 Einstufung relevanter Flammschutzmittel für PUR-Dämmschäume	81
<b>6. Flammhemmende Ausrüstung von PUR-Dämmschaum - Zusammenfassung, Trends</b>	<b>85</b>
6.1 Flammschutzmittelgehalt nach Schaumtypen und Flammschutzmitteltypen 1998/9985	85
6.2 Trend bei Dämmschaumformulierung und Flammschutzmittelverbrauch	86
6.3 Trend und Substitutionsprobleme	87
6.4 Verfahrenstechnischer Aspekt: Feste Flammschutzmittel auf Hochdruckanlagen	88
<b>7. Emissionen und Brandfolgeprodukte</b>	<b>89</b>
7.1 Freisetzung von Flammschutzmitteln aus PUR-Dämmschäumen	89
7.2 Brandfolgeprodukte: Rauchgas, Löschwasser	90
<b>8. Recycling und Entsorgung</b>	<b>92</b>
8.1 Produktionsabfall	92
8.2 PUR-Dämmstoffe im Bauschutt: Mengenaufkommen, Flammschutzmittelgehalt	92
8.3 PUR-Montageschaum	93
8.4 Fazit	94
<b>9. Gesamtbetrachtung Dämmstoffe: Mineralwolle, Polystyrol, PUR</b>	<b>95</b>
9.1 PUR im Gesamtdämmstoffmarkt	95
9.2 Einsatzbereiche der verschiedenen Dämmstoffe	96
9.3 Vergleichsdaten: Stoffeigenschaften, Kosten	97
9.4 Flammschutz-Ausrüstung und -Trend	98
<b>10. Exkurs: Anmerkungen zu Mineralwolle- und Polystyrol-Dämmstoffen</b>	<b>99</b>
10.1 Mineralwolle	99
10.2 Polystyrol-Dämmschäume	100
10.3 "Flammschutzintensität" von Polystyrol- und PUR-Dämmschaum	105
<b>11. Flammschutz bei Polyurethan-Dämm- und Montageschäumen (einschl. Exkurs Polystyrol-Dämmschäume) - Bewertung</b>	<b>107</b>
11.1 Sachstand	107
11.2 Substitutionstrend bei PUR-Dämmschäumen	107
11.3 Substitutionshemmnisse	110
11.4 Recycling/Entsorgung	110
11.5 Exkurs: Polystyrol	110
11.6 Fazit	110
<b>12. Quellen und Nachweise</b>	<b>112</b>
<b>Kapitel III: Flammhemmend ausgerüstete Kunststoffe in E+E-Geräten (Übersicht)</b>	<b>117</b>
<b>Vorbemerkung</b>	<b>118</b>
<b>1. Kunststoffe in der Elektro- und Elektronik-Industrie - Verbrauchsschätzungen für die neunziger Jahre</b>	<b>119</b>
1.1 Gesamtschätzungen nach ZVEI, VKE und APME	119
1.2 Mengenschätzungen für Kunststoffarten	119

<b>2. Flammhemmend ausgerüstete Kunststoffe in der Elektro- und Elektronik-Industrie</b>	<b>121</b>
2.1 ZVEI-Schätzung für 1989	121
2.2 APME-Schätzungen für 1995 und 2000	123
2.3 Flammgeschützte Kunststoffe im Siemens-Konzern 1999	127
<b>3. Flammgeschützte Kunststoffe im E+E-Sektor - Zusammenfassung und Schlußfolgerungen</b>	<b>133</b>
3.1 Hauptergebnisse	133
3.2. Schlußfolgerungen	135
<b>4. Quellen und Nachweise</b>	<b>136</b>
<b>Kapitel IV: Elektro- und Elektronikanwendungen - duroplastische Leiterplatten</b>	<b>139</b>
<b>Vorbemerkung</b>	<b>141</b>
<b>1. Leiterplatten - Übersicht</b>	<b>142</b>
<b>2. Laminat und Leiterplatten: Markt, Technik, Neudefinition von Anforderungen</b>	<b>144</b>
2.1 Der deutsche und der internationale Laminat- und Leiterplattenmarkt	144
2.2 Leiterplattentechnik	148
2.3 "Green electronics" - Umbruch in der internationalen Leiterplattenherstellung	152
<b>3. Leiterplattenbasismaterial: Flammschutzanforderungen und Einsatzbereiche</b>	<b>157</b>
3.1 Flammschutzanforderungen	157
3.2 Einsatzbereiche nach Laminat-Typen	159
<b>4. Flammhemmend eingestellte Tränkharze für Leiterplattenbasismaterial</b>	<b>161</b>
4.1 Tränkharze und Laminatherstellung	161
4.2 Phenolharze	162
4.3 Epoxidharze	164
4.4 Hochleistungslamine	169
<b>5. Flammschutz bei Leiterplattenbasismaterial - Stand und Trend</b>	<b>171</b>
5.1 Aktueller Stand der Flammschutzausrüstung bei Leiterplattenbasismaterial	171
5.2 PBDE in Leiterplattenbasismaterial	173
5.3 FR 4-V0 mit halogenfreiem Flammschutz – Entwicklungstrend	174
5.4 Technische Entwicklungsprobleme	178
<b>6. Emissionen und Brandfolgeprodukte</b>	<b>181</b>
6.1 Emissionen bei bestimmungsgemäßem Gebrauch	181
6.2 Verbrennungsversuche mit halogenierten und halogenfrei flammgeschützten FR4-Platinen	182
<b>7. Der Gesamthalogengehalt von Leiterplatten und Flachbaugruppen</b>	<b>186</b>
7.1 Basismaterial	186
7.2 Lötstopplack	186
7.3 Vergussmassen	187
7.4 Schutzlack	189
7.5 Gesamtmengenschätzung	189
<b>8. Konstruktiv-werkstoffliche Alternativen zur flammgeschützten duroplastischen FR 2-Leiterplatte</b>	<b>192</b>
8.1. Thermoplastische Kunststoffe	193
8.2 Folienkonzept	193
8.3 Flammschutzmittelgehalt bestückter TV-Chassis nach FR 2-, Thermoplasten- und Folienkonzept	194
8.4 Auswirkungen der konstruktiv-werkstofflichen Alternativen auf Schadstoffgehalt, Materialverbrauch, Recyclingmöglichkeit und Kosten des Materials	195
<b>9. Leiterplatten im Elektronikschrott - Entsorgung, Recycling</b>	<b>196</b>
9.1 Produktions-Abfall aus der Basismaterial- und Leiterplatten-Herstellung	196
9.2 Leiterplattenschrott – Mengenanfall	197

9.3 Brom- und Antimongehalt des Leiterplattenschrotts	198
9.4 Entsorgung, Recycling	199
9.5 Gesamtbilanz	201
<b>10. Flammhemmende Ausrüstung von Leiterplatten - Bewertung</b>	<b>203</b>
10.1 Substitutionstrend	203
10.2 Substitute bei FR 4-Leiterplatten	203
10.3 Konstruktiv-werkstoffliche Alternativen bei FR 2-Leiterplatten	204
10.4 V0 - V1	204
10.5 Fazit	205
<b>11. Quellen und Nachweise</b>	<b>206</b>
<b>Kapitel V: IT- und TV-Geräte - thermoplastische Außengehäuse</b>	<b>213</b>
<b>Vorbemerkung</b>	<b>215</b>
<b>1. Thermoplastische Kunststoffe für Außengehäuse bei IT- und TV-Geräten</b>	<b>216</b>
1.1 Der Markt für thermoplastische Außengehäuse bei IT- und Fernsehgeräten: Produktions- und Absatzdaten	216
1.2 Kunststoffanteile und Gehäusekunststoffe bei IT-Geräten und Fernsehern	218
<b>2. Brandschutzanforderungen bei IT- und Fernsehgeräten</b>	<b>220</b>
2.1 IT-Geräte	220
2.2 Fernsehempfänger	221
2.3 Internationale Geltung von Brandschutznormen für IT- und TV-Geräte	222
<b>3. Außengehäuse für IT- und Fernsehgeräte: Kunststoffe und Flammschutzmittel</b>	<b>223</b>
3.1 Materialanforderungen und eingesetzte Kunststoffe	223
3.2 Kunststoff-Eigenschaften und Flammschutzmittelausrüstung	226
3.3 Flammschutzmittel-Angebot für Gehäusewerkstoffe (Außengehäuse)	231
3.4 Gehäusekunststoffe nach Gerätetypen, Herkunftsregionen und Flammschutz	233
3.5 Zusammenfassung: Aktueller Stand des Flammschutzes bei Gehäusewerkstoffen	236
<b>4. IT- und Fernsehgeräte: Aktueller Stand der Brandschutzgewährleistung bei Gehäusen - Unternehmensauskünfte und Ergebnisse empirischer Erhebungen</b>	<b>238</b>
4.1 Unternehmensauskünfte für 1997 und 1998	238
4.2 Prüfung von Computergehäusen auf Halogengehalt (LGA Bayern, 1998)	239
4.3 Untersuchungen auf Schadstoffgehalte in Außengehäusen von Monitoren, Notebooks, Druckern und Fernsehgeräten (Stiftung Warentest, 1997-2000)	240
4.4 Trend der Gehäuseausrüstung	245
<b>5. Umweltzeichen und Gehäusewerkstoffe bei IT- und TV-Geräten</b>	<b>246</b>
5.1 TCO	246
5.2 "Blauer Engel"	246
<b>6. Konstruktive und werkstoffliche Alternativen</b>	<b>249</b>
6.1 Konstruktive Lösung des Brandschutzproblems bei Fernsehgeräten	249
6.2 Konstruktive Lösungen bei PC-Monitoren	250
6.3 TV-Brandstatistiken als Argument gegen konstruktiven Brandschutz?	250
<b>7. Werkstoffliches Recycling von Gehäusewerkstoffen für IT- und Fernsehgeräte</b>	<b>252</b>
7.1 Experimentelle Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit bromiert flammgeschützer Thermoplasten	252
7.2 Industrielles Recycling von Gehäusewerkstoffen (PC/ABS; ABS)	258
<b>8. Flammhemmend ausgerüstete Gehäusewerkstoffe für IT- und Fernsehgeräte : Mengenaspekt 1990/1999 und eingesetzte Flammschutzmittel</b>	<b>262</b>
8.1. Bromierte Flammschutzmittel 1990/1999	262
8.2 Phosphororganische Flammschutzmittel	264
<b>9. Emissionen aus IT- und TV-Geräten bei Normalbetrieb</b>	<b>265</b>
9.1 Emissionen in die Gasphase bei Normalbetrieb	265
9.2. Emissionen in die flüssige Phase	268

<b>10. Flammschutz bei Außengehäusen für IT- und TV-Geräte - Bewertung</b>	<b>269</b>
10.1 Sachstand	269
10.2 Substitutionstrend	269
10.3 Substitute	270
10.4 Konstruktiv-werkstoffliche Alternativen	271
10.5 Substitutionshemmnisse	272
10.6 Fazit	272
<b>11. Quellen und Nachweise</b>	<b>273</b>
<b>Kapitel VI: Textilanwendungen - Bezugstoffe für Polstermöbel und Matratzen</b>	<b>281</b>
<b>Vorbemerkung</b>	<b>282</b>
<b>1. Flammschutz bei Textilien – Übersicht</b>	<b>283</b>
1.1 Textilrelevante Brandschutzanforderungen	283
1.2 Brennverhalten von Textilien und ihre flammhemmende Ausrüstung	285
<b>2. Flammschutzmittel für textile Gewebe, Ausrüstverfahren, Einsatzmengen</b>	<b>288</b>
2.1 Produkttypen	288
2.2 Trends bei Formulierungen	290
2.3 Wirkstoffübersicht	291
2.4 Von der Anwendung bei Textilien ausgeschlossene Flammschutzmittel	292
2.5 Anwendungsbezogene Ausrüstungsempfehlungen	292
2.6 Verbrauchsmengenschätzung 1995 und 1997	295
<b>3. Flammhemmende Ausrüstung von Polstermöbeln und Matratzen</b>	<b>297</b>
3.1 Rechtliche Regelung in der Bundesrepublik und anderen Ländern	297
3.2 Flammhemmende Ausrüstung von Matratzen und Polstermöbeln - allgemeine Gesichtspunkte	298
3.3 Flammschutz bei Matratzen	300
3.4 Flammschutz bei Polstermöbeln	304
<b>4. Flammschutz bei Polstermöbeln und Matratzen – Zusammenfassung und Bewertung</b>	<b>312</b>
4.1 Mengenbetrachtung	312
4.2 Eingesetzte Flammschutzmittel	313
<b>5. Quellen und Nachweise</b>	<b>315</b>
<b>Tabellen</b>	<b>319</b>
<b>Übersichten</b>	<b>321</b>

Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und  
Reaktorsicherheit

Forschungsbericht 204 08 542 (alt) 297 44 542 (neu)

**Erarbeitung von Bewertungsgrundlagen zur Substitution  
umweltrelevanter Flammschutzmittel**

Auftragnehmer:

Öko-Recherche. Büro für Umweltforschung und -beratung GmbH, Frankfurt/M.

**Inhaltsverzeichnis Band III:**

**Toxikologisch-ökotoxikologische Stoffprofile ausgewählter  
Flammschutzmittel**

von

Dr. Hermann Kruse, Olaf Paulsen, Cordula Schau, Mareke Wieben, Uwe Böhde  
(Institut für Toxikologie der Christian-Albrechts-Universität Kiel)

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Dezember 2000

**Inhalt Band III**

<b>Vorwort</b> .....	<b>1</b>
<b>Stoffprofile</b>	
<b>1. Decabromdiphenylether (DeBDE)</b>	
CAS-Nr. 1163-19-5 .....	<b>4</b>
<b>2. Tetrabrombisphenol A (TBBA)</b>	
CAS-Nr. 79-94-7 .....	<b>48</b>
<b>3. 1,2-Bis(pentabromphenyl)ethan</b>	
CAS-Nr. 84852-53-9 .....	<b>77</b>
<b>4. Hexabromcyclododecan (HBCD)</b>	
CAS-Nr. 3194-55-6 (1,2,5,6,9,10-Hexabromcyclododecan)	
CAS-Nr. 25637-99-4 (Stellungsisomerengemisch) .....	<b>92</b>
<b>5. Tris(chlorpropyl)phosphat (TCPP) 123</b>	
CAS-Nr. 13674-84-5 .....	<b>124</b>
<b>6. Resorcinol-bis-diphenyl-phosphat (RDP)</b>	
CAS-Nr. 57583-54-7 .....	<b>151</b>
<b>7. N-Hydroxymethyl-3-dimethylphosphonpropionamid (Pyrovatex CP neu)</b>	
CAS-Nr. 20120-33-6 .....	<b>163</b>
<b>8. Roter Phosphor (RP)</b>	
CAS-Nr. 7723-14-0 .....	<b>174</b>
<b>9. Ammoniumpolyphosphat (APP)</b>	
CAS-Nr. 68333-79-9 .....	<b>188</b>
<b>10. Melamincyanurat (MC)</b>	
CAS-Nr. 37640-57-6 .....	<b>199</b>
<b>11. Aluminiumtrihydroxid (ATH)</b>	
CAS-Nr. 21645-51-2 .....	<b>207</b>
<b>12. Natriumborat-Decahydrat (Borax)</b>	
CAS-Nr. 1303-96-4 .....	<b>231</b>
<b>13. Antimontrioxid (ATO)</b>	
CAS-Nummer 1309-64-4.....	<b>259</b>

**Anhang****Herstellerkommentare zu den Entwürfen der Stoffprofile**

DeBDE kommentiert von Albemarle Corp.. .....	<b>298</b>
TBBA kommentiert von Bromine Compounds Ltd. ....	<b>314</b>
1,2-Bis(pentabromphenyl)ethan kommentiert von Albemarle Corp. ....	<b>328</b>
HBCD kommentiert von Albemarle Corp. und BASF AG; APME.....	<b>330</b>
TCPP kommentiert von Akzo Nobel .....	<b>351</b>
RDP kommentiert von Akzo Nobel .....	<b>353</b>
Pyrovatex CP neu kommentiert von Ciba Spezialitätenchemie Pferssee GmbH .....	<b>354</b>
RP kommentiert von Clariant GmbH .....	<b>360</b>
APP kommentiert von Clariant GmbH .....	<b>366</b>
MC kommentiert von DSM Melapur.....	<b>370</b>
ATH kommentiert von Alusuisse Martinswerk GmbH.....	<b>370</b>
Borax kommentiert von Borax Europe Ltd.....	<b>373</b>
ATO kommentiert von Campine N.V. und Great Lakes Chemical Corp. ....	<b>377</b>