



Verwertung von Polystyrol-Schaumstoffabfällen mit HBCD

Untersuchung zur energetischen Verwertung von expandiertem Polystyrol-Schaumstoff (EPS) und extrudiertem Polystyrol-Schaumstoff (XPS), die als Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD) enthalten, durch die Mitverbrennung in der Abfallverbrennungsanlage für kommunale Abfälle der Stadt Würzburg

Technischer Bericht (Kurzfassung)



Sponsoren

Plastics Europe

EPS-Gruppe (Expandierter Polystyrol-Schaumstoff)

PlasticsEurope ist einer der führenden europäischen Wirtschaftsverbände. Der Verband unterhält Zentren in Brüssel, Frankfurt, London, Madrid, Mailand und Paris und kooperiert eng mit anderen europäischen und nationalen Kunststoffverbänden. Über 100 Mitgliedsunternehmen produzieren mehr als 90 Prozent der Kunststoffe in den 28 EU-Mitgliedsstaaten sowie Norwegen, der Schweiz und der Türkei.



EXIBA

EXIBA ist der europäische Verband für Isolierungen aus extrudiertem Polystyrol (European Extruded Polystyrene Insulation Board Association). EXIBA gehört zur CEFIC (Verband der europäischen chemischen Industrie) und arbeitet eng mit anderen Verbänden im Bereich von Kunststoffschäumen zusammen.



MARTIN GmbH

Das in Deutschland ansässige Unternehmen MARTIN GmbH ist weltweit einer der führenden Anbieter von Abfallverbrennungsanlagen. MARTIN konzentriert sich ausschließlich auf den Bau von Abfallverbrennungsanlagen und deckt von der Errichtung über die Betreuung/Beratung bis hin zu Service/Ersatzteilversorgung alle relevanten Bereiche ab.



Walhalla Kalk GmbH & Co. KG

Walhalla Kalk hat seinen Hauptsitz in Regensburg und stellt gebrannte Kalke, Spezialmischungen für Bau und Umweltschutz, ungebrannte Kalke und qualitätsgeprüfte Mineralstoffe für den Straßenbau her.



Würzburger Versorgungs- und Verkehrs GmbH (WVV)

Die WVV ist ein öffentliches Unternehmen, das sich mit Energie, Umwelt und Verkehr beschäftigt. Eigentümerin der WVV ist die Stadt Würzburg.



Zweckverband Abfallwirtschaft Raum Würzburg (ZVAWS)

Der Zweckverband Abfallwirtschaft Raum Würzburg (ZVAWS) wurde 1979 als Körperschaft des öffentlichen Rechts von der Stadt Würzburg, dem Landkreis Würzburg und dem Landkreis Kitzingen gegründet. Der Verband ist Eigentümer und gemeinsam mit der Stadtwerke Würzburg AG, einer Tochter der WVV, Betreiber des Müllheizkraftwerkes Würzburg.

Autoren

Hans Dresch, Zweckverband Abfallwirtschaft Raum Würzburg (ZVAWS)

Bogdan Dima, Würzburger Versorgungs- und Verkehrs GmbH (WVV)

Joachim Horn, MARTIN GmbH

Werner Grüttner, Zweckverband Abfallwirtschaft Raum Würzburg (ZVAWS)

Frank E. Mark, Projektleiter

Jürgen Vehlow, Reviewer

Untersuchung zur energetischen Verwertung von expandiertem Polystyrol-Schaumstoff (EPS) und extrudiertem Polystyrol-Schaumstoff (XPS), die als Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD) enthalten, durch die Mitverbrennung in der Abfallverbrennungsanlage für kommunale Abfälle der Stadt Würzburg.

Technischer Bericht (Kurzfassung)

Einleitung

Dämmstoffe aus Polystyrol sind dauerhaft und bieten über die gesamte Einsatzzeit von mehr als 50 Jahren ein sehr konstantes Eigenschaftsprofil.

Der Einsatz von Polystyrol(PS)-Schaumstoff zur Wärmedämmung von Gebäuden reduziert nachweislich den Energieverbrauch und mindert damit CO₂-Emissionen, die ansonsten durch Heizung und Klimatisierung verursacht würden. Damit wird ein wesentlicher Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz in Gebäuden geleistet.

PlasticsEurope und EXIBA initiierten den Grossversuch zur Verbrennung von PS-Schaumstoffen (EPS und XPS) gemeinsam mit festem Restmüll im Müllheizkraftwerk (MHKW) Würzburg, zur Demonstration der sicheren und zukunftsweisenden Behandlung von HBCD-haltigen Dämmstoffen, die am Ende ihres Einsatzes als Abfälle energetisch verwertet werden sollen.

Die Untersuchung wurde insbesondere durchgeführt, weil HBCD, das als bewährtes Flammschutzmittel von PS-Schaumstoffen eingesetzt wird, als Substanz der Autorisierung nach REACH unterliegt und aktuell durch die Entscheidung der UNEP Stockholm Konvention als POP klassifiziert wurde.

Die POP-Klassifizierung verbietet die stoffliche Wiederverwendung (Recycling) von HBCD-haltigen Schaumstoffabfällen.

Der Bericht gibt Auskunft über Details der Untersuchung, zu den Prozessparametern und den erzielten Ergebnissen.

Ziel der Untersuchung

Der hohe Nutzen von Dämmstoffen für die Energieeinsparung in Gebäuden ist bei der Gesetzgebung, bei Verbrauchern und in der Gesellschaft allgemein anerkannt. PS-Schaumstoffe haben dank ihrer Leistungsfähigkeit und Kosteneffizienz einen hohen Marktanteil. Aufgrund nationaler Brandschutzvorschriften wird PS-Schaumstoff für Bauanwendungen in Europa seit jeher unter Verwendung eines Flammenschutzmittels hergestellt. Die Chemikalie der Wahl für die Schaffung der flammhemmenden Eigenschaft ist wegen seiner langfristig nachgewiesenen Leistungsfähigkeit Hexabromcyclododecan (HBCD).

Im Jahre 2008 wurde HBCD unter REACH als PBT (persistent, bioakkumulierbar und toxisch) eingestuft und ist derzeit Gegenstand eines REACH-Genehmigungsverfahrens. Vor kurzem wurde HBCD zudem als POP (langlebiger organischer Schadstoff) in die POP-Liste der UNEP Stockholm Konvention aufgenommen. Die Industrie ist der Auffassung, dass es eine Möglichkeit der Verwertung nach Ablauf der Lebensdauer (EoL) für PS-Schaumstoffe ohne Diskriminierung geben sollte, wobei die bevorzugte Wahl unter den zur Verfügung stehenden Optionen in der Verbrennung mit Rückgewinnung der Energie und dem Recycling bzw. der Deponie der MVA Reststoffe bestehen sollte.

Die Mitverbrennung von PS-Schaumstoff aus den Bereichen Gebäuderückbau und Bau-Restabfällen zusammen mit kommunalem Restmüll ist eine ökologisch effiziente und praktische Option für die sichere Behandlung derartigen Abfalls, die auch die Rückgewinnung des Energiegehalts dieser Abfallstoffe ermöglicht. Ein kontrollierter einwöchiger Mitverbrennungsversuch wurde von einem breit angelegten Konsortium von Interessenvertretern zur Bewertung der Auswirkungen von HBCD-haltigem PS-Schaumstoffe auf die Leistung des Müllheizkraftwerks (MHKW) Würzburg in Deutschland durchgeführt.

Das Projekt wurde innerhalb des gesetzten Zeitrahmens und der von den Partnern des Konsortiums gesteckten Ziele abgeschlossen. Die beteiligten Partner waren das MHKW/Stadtwerke Würzburg (STW AG), Zweckverband Abfallwirtschaft Raum Würzburg, Martin GmbH, Walhalla Kalk, Regensburg und PlasticsEurope und EXIBA. Während des Tests waren zeitweise auch Vertreter des bayerischen Landesamts für Umwelt (LfU) und der Aufsichtsbehörde anwesend.

Die wichtigsten Ziele der Untersuchung waren:

1. Führung des Nachweises einer hohen Verbrennungseffizienz von PS-Schaumstoffabfällen bei gleichzeitiger Energierückgewinnung;
2. Einhaltung der Emissionsgrenzen auch bei hohen Zufuhrmengen von PS-Schaumstoff mit der vorhandenen Rauchgasbehandlung;
3. Prüfen, ob der Betrieb der Verbrennungsanlage durch Mitverbrennung von hohen PS-Schaumstoffanteilen in irgendeiner Weise negativ beeinflusst oder beeinträchtigt wird;
4. Führung des Nachweises einer hohen Effizienz der Zerstörung von HBCD.

Dämmung aus PS-Schaumstoff

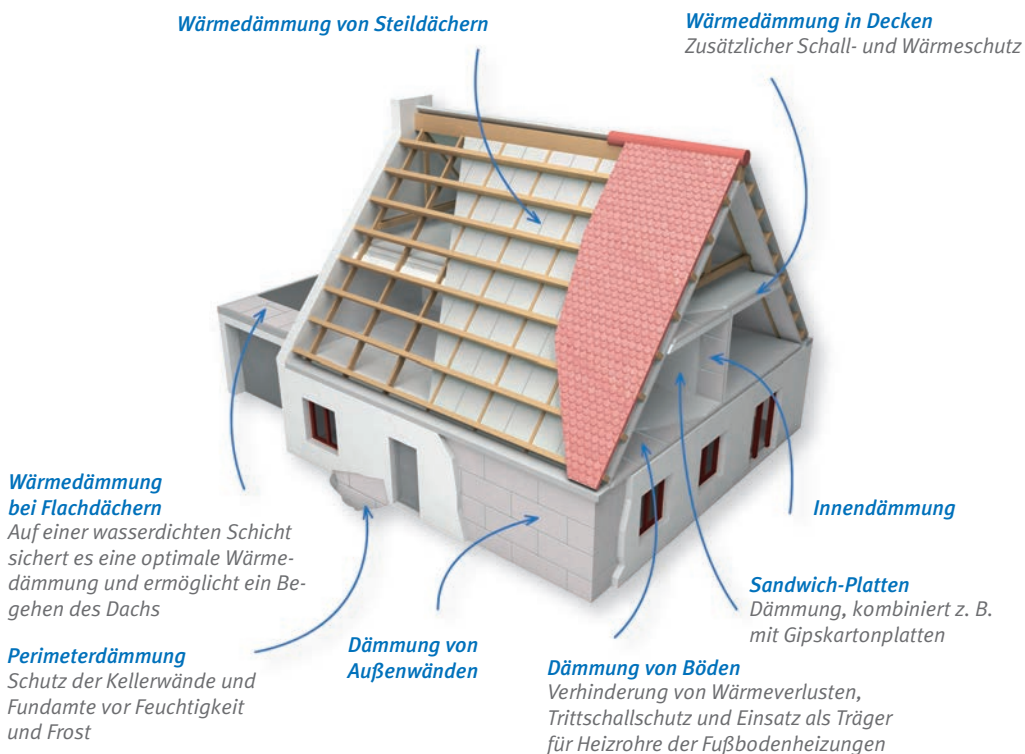
PS-Schaumstoffe werden als Dämmstoffe in Wohn-, Gewerbe- und öffentlichen Gebäuden sowie im Industriebau in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt. Vom Dach über die Wände bis zu den Böden, Hohlräumfüllungen, Perimeterdämmung und Frostschutzschichten – PS-Schaumstoffe bieten vielseitige Dämm Lösungen, die für jede Situation geeignet sind.

Das wichtigste Anwendungsfeld ist die Wärmedämmung zur Verhinderung von Wärmeverlusten. Aufgrund der Dauerhaftigkeit und des Feuchtigkeitswiderstandes von PS-Schaumstoffen haben Gebäude eine längere Lebensdauer und erfordern einen geringeren Instandhaltungsaufwand. PS-Schaumstoffe reduzieren dank ihrer Wärmedämmvermögens, des geringen Gewichts, der Festigkeit und der flexiblen Formgebung den Flächenbedarf von Wänden und Dächern und maximieren so das nutzbare Raumvolumen. Das ist insbesondere bei der Renovierung von bestehenden Gebäuden zur Einhaltung des geforderten Wärmeschutzstandards wichtig.

Die beiden bei der Untersuchung eingesetzten Schaumstoff-Typen sind extrudiertes und expandiertes Polystyrol, abgekürzt XPS und EPS. Fast alle XPS- und EPS-Dämmstoffplatten für die Bauindustrie, die flammhemmende Eigenschaften haben müssen, enthalten das Flammschutzmittel HBCD, das einen Bromgehalt von 74,7 Gew.-% aufweist. Der tatsächliche Anteil an HBCD hängt vom Dämmstofftyp und von der Anwendung ab. In Europa gibt es unterschiedliche Prüfverfahren und Anforderungen an den Flammenschutz. Aus diesem Grund sind die Anteile von HBCD in den PS-Schaumstoffen am Markt unterschiedlich. Schätzungen zufolge sind 77 % des EPS und 94 % des XPS für die Bauindustrie flammhemmend ausgerüstet.



Bilder 1a und 1b:
Beispiele für den Einsatz
von PS-Schaumstoff als
Dämmstoff: XPS und EPS.



Charakterisierung der Schaumstoffe

Der von den Herstellern gelieferte PS-Schaumstoff wies die typische Marktqualität auf und wurde in folgenden Abmessungen geliefert: EPS 1000/500/100 mm und XPS 1265/615/50-80 mm mit Plattengewichten von 0.75, 1.5 und 2.2 kg bei EPS, XPS1 und XPS2. Die Abmessungen der Platten entsprechen dem, was nach Ende der Nutzungsdauer als ganze Platten zur Verwertung gelang. Platten in kleineren Formaten oder gebrochene Stücke sind typisch für Abfall von Baustellen oder Abrissarbeiten. Die Dichte von EPS, XPS1 und XPS2 betrug jeweils 15, 38.5 und 35.5 kg/m³.

Die Gesamtkonzentration von Schwermetallen in den PS-Schaumstoffen, die gemäß der europäischen Richtlinie über die Verbrennung von Abfällen (WID) gesetzlichen Regelungen unterliegt, ist sehr gering und liegt bei 100 bis 200 mg/kg. Diese Konzentration ist mit den durchschnittlichen Konzentrationen in anderen Kunststoffabfallströmen in kommunalen Abfällen vergleichbar niedrig. Der Gehalt von anderen Heteroatomen wie den Halogenen Cl, Br, F sowie Schwefel wurde gemessen, um den Massefluss von sauren Gasen im Rohgas nachvollziehen zu können.

Die sauren Gase erfordern eine Neutralisation und unterliegen den Emissionsbegrenzungen gemäß EU-Gesetzgebung und in Deutschland dem Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG).

Bis Mitte der 1990er Jahre wurde XPS-Schaumstoff unter Verwendung der Treibmittel FCKW und H-FCKW hergestellt, die seither als ozonschädigende Substanzen (ODS) eingestuft sind. Die sichere Zerstörung dieser ODS-Gase in XPS wurde 1993/1994 untersucht und in der TAMARA-Pilotanlage (Karlsruhe) demonstriert. Keiner der heutzutage verwendeten PS-Schaumstoff-Typen enthält solche ODS-Gase. Zur damaligen Zeit war die Umweltverträglichkeit von HBCD kein Untersuchungsgegenstand der Verbrennungsversuche.

Im Rahmen des Tests wurden Schaumstoffe untersucht, in denen Pentan als Treibmittel für EPS und Kohlendioxid mit halogenfreien Zusatztreibmitteln für XPS eingesetzt wurden. Die Schaumstoffe enthalten bei der Anwendung als Zellgas Luft, weil die Treibmittel während der Herstellung und Lagerung herausdiffundieren.

Probe	Konzentrationen von HBCD und Heteroatomen in den PS-Schaumstoffen				
	Br, Gew.-%	Cl, Gew.-%	F, Gew.-%	S, Gew.-%	HBCD-Angaben des Herstellers, Gew.-%
EPS	0.41	0.046	<0.005	0.005	0.7
XPS1	0.74	0.025	<0.005	<0.005	1.3
XPS2	1.53	<0.005	<0.005	0.032	2.4

Tabelle 1: Halogene, Schwefel und HBCD in PS-Schaumstoff

Handhabung der PS-Schaumstoffplatten und Vermischung mit dem Restmüll

Die Art der Vermischung von kommunalem und gewerblichem Restabfall mit PS-Schaumstoff bei der Aufgabe in den Trichter zur Verbrennung, wie sie bei dieser Untersuchung durchgeführt wurde, stellt keine Handhabung unter realen Bedingungen dar. Das spezielle Verfahren wurde gewählt, um eine möglichst präzise Dosierung von PS-Schaumstoff mit einem bekannten HBCD-Gehalt zu dem gewogenen Restabfall zu erreichen. Durch dieses Vorgehen wird gewährleistet, dass die Menge an HBCD während der Probenahmen und Messungen bekannt ist, so dass

mit hoher Zuverlässigkeit die Effizienz der Vernichtung von HBCD ermittelt werden kann.

Die untersuchte Mischung von PS-Schaumstoffen mit üblichen Abfällen liefert ein Maß für die Festlegung der zukünftig geeigneten Beimischungsverhältnisse. Ein möglicher Anteil von PS-Schaumstoff-Platten in der normalen Mischung aus kommunalem und gewerblichem Abfall wurde nicht berücksichtigt. Für die gewählten Prozessbedingungen konnte der übliche Massendurchsatz beibehalten werden.

Untersuchung der Verbrennung von PS-Schaumstoff gemeinsam mit kommunalen und gewerblichen Rest-Abfällen

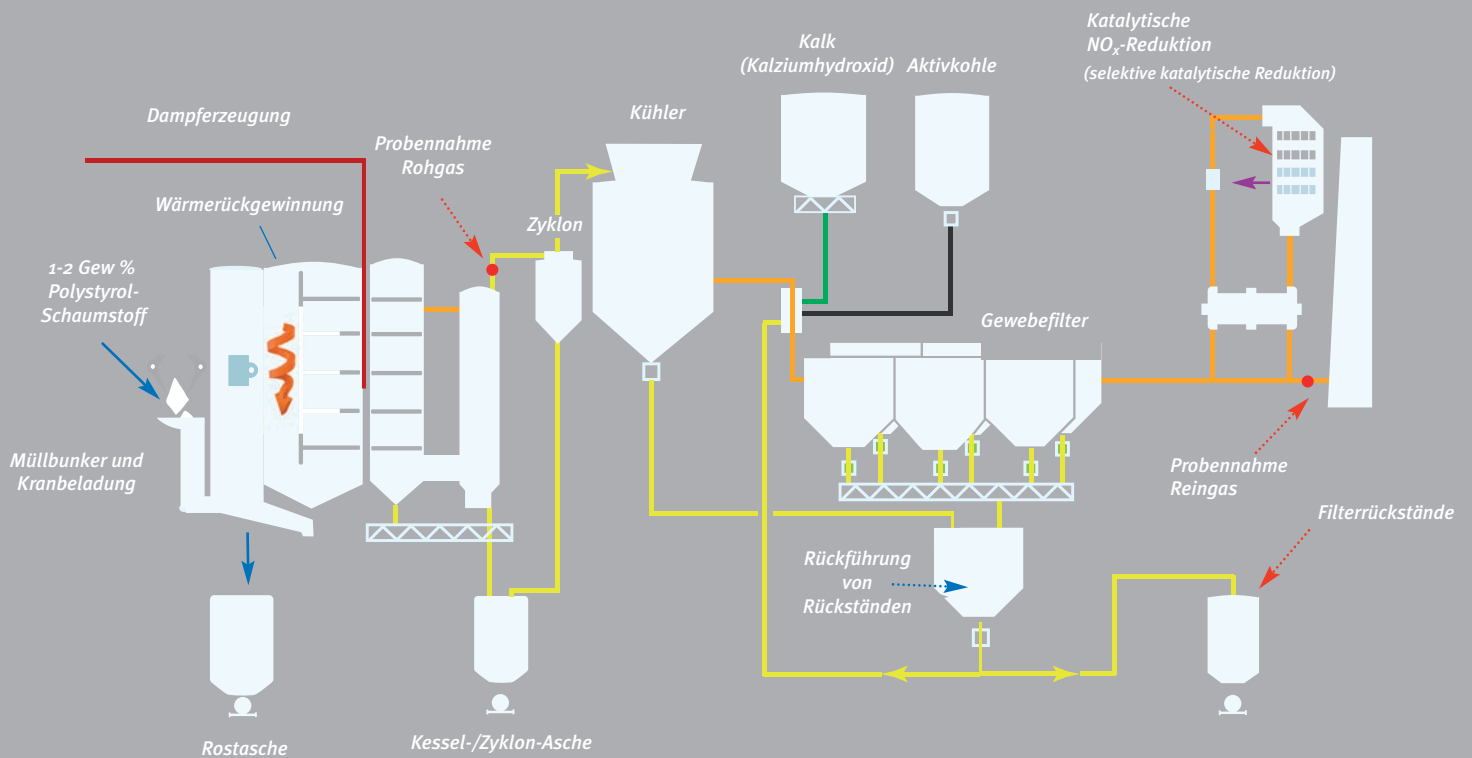
Die Auswahl der Müllverbrennungsanlage erfolgte aus denselben Gründen wie bei dem Mitverbrennungstests für Kunststoffverpackungen im Jahr 1993/94 sowie den ASR- und ESR-Tests jeweils in den Jahren 1997 und 2004. Das Müllheizkraftwerk Würzburg (MHKW) verfügt über einen kosteneffizienten Betrieb, eine zuverlässige trockene Rauchgasreinigung, eine

lange Verweilzeit im Ofen, die zu einem guten Ausbrand in der Gasphase führt, eine bewährte Verbrennungsrost/Kessel-Konstruktion, die eine hohe Qualität der Verbrennungsrückstände (Rostasche) garantiert, sowie gut und ausführlich dokumentierte Emissionsmessungen.

Beschreibung der Verbrennungsanlage des MHKW und seines Betriebs

Das Konzept der Müllverbrennungsanlage und ihr Betrieb wurden von PlasticsEurope (www.plasticseurope.org) und auch in anderer, der Öffentlichkeit zugänglichen Literatur (www.zvaws.de) beschrieben.

In der folgenden Grafik sind die wichtigsten Prozesse dargestellt.



Testprogramm und -bedingungen

Das Programm wurde innerhalb einer Woche durchgeführt und die Testbedingungen wurden wie folgt bezeichnet:

A	Normalbetrieb	A1, A2
B	Zuführung von 1 Gew.-% PS-Schaumstoff	B1, B2
C	Zuführung von 2 Gew.-% PS-Schaumstoff	C1, C2
A	Normalbetrieb	A3, A4

Während des Versuchs zeigte sich, dass die Bedingungen des Normalbetriebs der Anlage nicht verändert werden mussten. Der Prozessleitreehner der Anlage wurde während der Tests ohne Änderungen oder spezielle Prozesseinstellungen vollautomatisiert betrieben.

Die Proben der Feststoffrückstände Rostasche und kombiniert Flugasche mit Filterasche wurden extern analysiert. Die Proben des Rein-Gases und des Roh-Gases wurden von einem externen Labor gezogen und analysiert.

Betrieb: Online-Analyse

Das Müllheizkraftwerk wird von einem vollautomatisierten Prozessleitsystem betrieben. Zur Dokumentation der Onlinedaten in unterschiedlichen Zeitintervallen wird ein Datenerfassungssystem eingesetzt: Rohdaten, im Durchschnitt alle 10, 300 und 900 Sekunden. Die Online-Betriebsdaten der Anlage, gemittelt über jeweils vier und sechs Stunden Probennahmezeit, sind der Tabelle 2 zu entnehmen. Die Rohgaskonzentrationen von HBr unter Normalbedingungen blieben auf dem sehr niedrigen Niveau

von 5 mg/m³. Die Rohgaskonzentrationen der wesentlichen sauren Gase blieben während der Beschickung mit PS-Schaumstoff innerhalb des Bereiches von bis zu 12 mg/m³ für HBr, 220 bis 1145 mg/m³ für HCl und 60 bis 220 mg/m³ für SO₂. Die NO_x-Werte von 300 bis 350 mg/m³ im Rohgas und die CO-Werte von 7 bis 13 mg/m³ lieferten den Nachweis für die effiziente und stabile Verbrennung. Die Schwankungen sind durch die Inhomogenität der zur Verbrennung anstehenden Abfälle bedingt.

Ofen / Kessel	A1/2	B1/2	C1/2	A3/4	Kommentare
Dampf, effektiv, t/Std.	27.3	26.9	26.5	27.8	95.2 % max
O ₂ Durchschn. Kessel, Vol.-%	7.8	7.45	7.95	7,65	Istwert 8.09 Vol.-%
Primär-Luft, Nm ³ /Std.	26552	25829	25931	25483	66.5 %
Sekundär-Luft, Nm ³ /Std.	13632	12892	12875	12819	33.5 %
Durchschnittliche Verbrennungsraumtemperatur, °C	912/924	913/912	900/903	933/932	900-932 °C An der Kesseldecke

Tabelle 2: Online-Betriebsparameter des MHKW

Rohgas: Dioxine / Furane

Die Rohgaskonzentrationen der PCDD/F bewegten sich in einer sehr engen Spanne zwischen 1,8 und 3,3 ITEQ ng/m³. Dieser sehr geringe Unterschied zwischen hohen und niedrigen Konzentrationen bestätigt die stabilen Verbrennungsbedingungen, die durch eine gute Abfallmischung, gleichmäßige Zufuhr des PS-Schaumstoffes und einen kontrollierten automatisierten Prozessbetrieb erreicht wurden.

Dies zeigt, dass eine gute Steuerung der Verbrennung mit einer hohen Verbrennungseffizienz erreicht wurde.

Die Bildung der gemischt-halogenierten PBCDD/F erfolgt vor der Bildung niedrig-halogenierter Kongenere vom Typ PBDD/F. Wie aufgrund von früheren Studien erwartet, war die PBDD/F-Konzentration sehr niedrig und es wurde kein einziges PBDD/F Kongener gefunden.

Rohgas PCDD/Fs	A1	B1	C1
ITEQ ng/m ³ ohne NG	1.84	3.05	3.31
ITEQ ng/m ³ mit NG	1.65	2.67	3.01
Rohgas : PBCDD/Fs			
ng/m ³ ohne NG	11.6	59.4	110.8
ng/m ³ mit NG	< 15.8	< 63.1	114.2
Raw gas: PBDD/Fs			
ng/m ³ ohne NG	n.d.	n.d.	n.d.
ng/m ³ mit NG	0.02-0.5*	0.02-0.5*	0.02-0.5*

Hinweis: n.d. = nicht messbar

* Es wurde kein einziges Kongener gefunden, die Nachweisgrenze (NG) von einzelnen Kongeneren liegt in dem genannten Bereich.

Tabelle 3: Dioxin/Furan-Konzentrationen im Rohgas in ITEQ oder ng/m³ bei 11 Vol.-% O₂

Effiziente Rohgasreinigung und Emissionskontrolle

Die Rohgasreinigung und Emissionskontrolle funktionierte sehr gut, was durch einen Vergleich der Reingasdaten mit den Emissionsgrenzwerten (EGW) in Tabelle 4 bestätigt wird. Die Konzentrationen von Schwermetallen blieben ebenfalls weit unter den Emissionsgrenzwerten. Die Zugabe von Kalk und Aktivkohle (AK) wurde über eine Reihe von online gemessenen Parametern gesteuert. Die Mengen der

sauren Gase HCl, SO₂ und NO_x konnten auf Maximalwerte von 9 mg/m³ für HCl und SO₂ und 75 mg/m³ für NO_x begrenzt werden. Ein erhöhter Bedarf an Kalziumhydroxid für die Neutralisation war nicht erforderlich. Auf Grund der Analyseergebnisse des Reingases konnten keine Auswirkungen der Zugabe von PS-Schaumstoff auf die Verbrennung festgestellt werden.

Komponente	A1* und A3* [durchschn. Wert f. 6 Std.]	B1* und C1* [durchschn. Wert f. 6 Std.]	Min/max täglich [Monat März]	Emissionsgrenzwert (täglich)
CO, mg/m ³	14.6	18.3	5.7/15.5	50
C, gesamt mg/m ³	< 0.1	< 0.1	0.01/0.03	10
HCl, mg/m ³	7.3	5.1	4.8/7.3	10
Hg, µg/m ³	< 0.01	< 0.01	0.0001/0.0004	0.03
NO _x , mg/m ³	62.5	76	58/82	200
SO ₂ , mg/m ³	6.7	1.7	0.16/13.8	50
Staub, mg/m ³	0.13	1.6	0.01/0.9	10

Bemerkung: * max. Durchschnittswert für ½ h

Tabelle 4: Emissionsdaten und der zugehörige Emissionsgrenzwert

HBCD Zerstörungseffizienz

Für die Kalkulation der Zerstörungseffizienz von HBCD müssen alle Masseströme der Verbrennungsanlage und alle HBCD Konzentrationen in diesen Strömen so genau wie möglich bekannt sein.

Die Eingangsströme sind der Hausmüll, die PS-Schaumstoffe und die Verbrennungsluft. Die Zugabe von Hausmüll wurde über die Kranwaage erfasst, die PS-Schaumstoffe wurden gemäß einer Vorgabeliste dem gewogenen Hausmüll zugegeben, wobei die Genauigkeit mit $\pm 5\%$ angenommen wird. Das Volumen der

Verbrennungsluft liegt bei etwa $40.000 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Der Massefluss der Rostasche und der Kessel- bzw. Kühlerasche, sowie die Rückstände der Rauchgasreinigung

sind Mittelwerte, bei einer angenommenen Standardabweichung von $\pm 20\%$.

Zur Bestimmung der HBCD Konzentration in den Masseströmen wurden zunächst Untersuchungen zur Ermittlung der Bestimmungsgrenze (LOQ) in den jeweiligen Matrices durchgeführt.

Die entsprechenden Werte sind 1 ng m^{-3} im Rauchgas und $1,4 \text{ } \mu\text{g kg}^{-1}$ in den festen Rückständen. Als Analysefehler werden $\pm 10\%$ angenommen.

Mit diesen Angaben wurde der HBCD-Stoffstrom berechnet. Die Ergebnisse sind in der nachfolgenden Tabelle 5 dargestellt.

	Einheit	A1	B1	C1
EPS	gh ⁻¹	0	366 ± 46	671 ± 84
XPS1	gh ⁻¹	0	333 ± 48	610.5 ± 88
XPS2	gh ⁻¹	0	648 ± 63	1,188 ± 115
Eingabe Schaumstoffe, kumuliert	gh ⁻¹	0	1,347 ± 96	2,470 ± 145
Rostasche	mgh ⁻¹	3.08 ± 0.70	3.18 ± 0.75	5.94 ± 1.32
Kessel- und Kühlerasche	mgh ⁻¹	0.44 ± 0.10	0.82 ± 0.18	0.55 ± 0.11
Rauchgasreinigungs-Rückstände	mgh ⁻¹	0.18 ± 0.04	0.18 ± 0.04	0.20 ± 0.04
Rauchgas	mgh ⁻¹	0.031 ± 0.006	0.18 ± 0.04	0.36 ± 0.07
Rückstände, kumuliert	mgh ⁻¹	3.80 ± 0.70	4.36 ± 0.82	7.04 ± 1.33
Zerstörungseffizienz	%	–	99.999	99.999

EPS: Expandierter Polystyrolschaumstoff; XPS: Extrudierter Polystyrolschaumstoff

Tabelle 5: Stoffstrom von HBCD und seine Zerstörungseffizienz

Aus den obigen Daten wurde eine nahezu identische Zerstörungseffizienz (DE) von aufgerundet $> 99,999\%$ für die Testreihen B1 und C1 errechnet.

Die Ergebnisse zeigen die praktisch vollständige Zerstörung von HBCD.

Energiebilanz/Kesselwirkungsgrad

Die Energiebilanz des MHKW ergab einen Wirkungsgrad von etwa 75% . Die Unterschiede bei dem unteren Heizwert (Hu) der kommunalen Abfälle sind durch die unterschiedlichen Abfallsammel- und Abfalltrennungssystemen begründet und davon abhängig. In früheren Tests bewegte sich der Hu für den Restmüll im MHKW zwischen 10 und 13 MJ/kg . Unterschiedliche Gesamtbrennwerte entstehen aufgrund normaler Abweichungen der Abfallbrennwerte, die bei den angelieferten kommunalen und gewerblichen Abfällen unterschiedlicher Zusammensetzung während des Tests zu beobachten waren.

Die dem „Normalmüll“ beigegebene geringe Menge an PS-Schaumstoff (1 bis 2 Gew.-%) führt nicht zu einer

wesentlichen Erhöhung des Heizwertes (max. 6%). Die Heizwerte von EPS und XPS liegen bei etwa 38 MJ/kg . Durch den Gesamtwirkungsgrad des Kessels des MHKW wurde die Abfallverbrennungsanlage als Energierückgewinnungsanlage gemäß 2008/98/EG (Abfallrahmenrichtlinie) eingestuft. Die über das Jahr erzeugten Mengen an Dampf und Elektrizität wurden publiziert. 25% dieser Energie werden für interne Zwecke verwendet und 75% werden in das Elektrizitäts- und Fernwärmenetz der Stadt Würzburg eingespeist. Diese Energiemenge entspricht 14 und 16% der gesamten vom Energieversorger STW AG erzeugten Energie und Wärme.

Analytische Ergebnisse der Emissionen

Reingasemissionen: Dioxine/Furane

Es ist zu beachten, dass alle Ergebnisse für die Reingase weit unter dem Emissionsgrenzwert von $0,1 \text{ ng/m}^3$ liegen, der in den internationalen Toxizitätsäquivalenten (ITEQ) angegeben wird. Wie Tabelle 6 zu entnehmen ist, liegen die durchschnittlichen Reingasdaten in Linie 2, die in früheren Verbrennungsversuchen verwendet wurde, im Bereich der Reingasergebnisse in Linie 1. Die Spanne zwischen hohen und niedrigen Werten unterscheidet sich bei PS-Schaumstoff und ESR nicht wesentlich.

Die Variationsbreite lässt sich auf die gemessenen, extrem niedrigen Konzentrationen zurückzuführen. Die Reingaskonzentrationen von PCDD/F während des Tests mit PS-Schaumstoff lagen im Rahmen von 1 % des Emissionsgrenzwerts (EGW) der europäischen Richtlinie über die Verbrennung von Abfällen. Dies bestätigt erneut die hohe Zuverlässigkeit und Leistungsfähigkeit des MHKW bei der Reduktion der Dioxin- bzw. Furan-Konzentrationen von der Rohgasseite hin zur Reingasseite. Die zugegebene Aktivkohle absorbiert mehr als 99 % der PCDD/F.

MHKW-Linien	Reingas A1/A2	Reingas B1/B2	Reingas C1/C2	Anmerkungen
März 2013 (Linie 1)				
ITEQ ng/m^3 exkl. LOQ	0.0019/0.0007	0.0004/0.00005	0.00002/0.00005	PS-Schaumstoffe-Zugabe zu den kommunalen Abfällen
ITEQ ng/m^3 inkl. LOQ	0.0021/0.0018	0.0004/0.00016	0.00003/0.00016	
August 2004 (Linie 2)				
ITEQ ng/m^3 inkl. LOQ	0.0023	0.004	0.013	Elektrische und elektronische Schredderabfälle

Tabelle 6: PCDD/F-Konzentrationen im Reingas

Schwermetalle/Halogene

Die Menge an Schwermetallen im Reingas war extrem niedrig und lag bei manchen Elementen nahe der Nachweisgrenze. Die Mengen aller Elemente lagen in

einem analytisch gesicherten Bereich unterhalb der festgelegten Grenzwerte gemäß der europäischen Abfallverbrennungsrichtlinie. Die Zugabe von PS-Schaumstoff hatte keinen Einfluss auf die Reingasemissionen.

HBCD

Die HBCD-Werte im Reingas lagen in der Größenordnung von $1 \text{ bis } 8 \text{ ng/m}^3$. Durch die Zugabe von PS-Schaumstoff gab es keinen erkennbaren Einfluss auf die HBCD-Konzentration in Reingas. Die Bestimmungsgrenzen lagen bei $0,09 \text{ ng/m}^3$ und damit deutlich niedriger als die gemessenen HBCD-Konzentrationen im Reingas. Somit lässt sich bestätigen, dass zwischen den gemessenen Werten der Rückstände einerseits und der Gasphase andererseits kein Widerspruch besteht. Die HBCD-Konzentrationen in beiden Emissionspfaden, Gase und Feststoffe, sind zudem unabhängig von der tatsächlich in die Abfallverbrennungsanlage eingespeisten Menge an

PS-Schaumstoff. Daraus lässt sich folgern, dass die gewöhnlich verfügbare Menge an HBCD aus anderen Quellen (z.B. Textilien) in kommunalen und gewerblichen Restabfällen eine ebenso wichtige oder größere Rolle spielen, als die im Versuch zugegebene Menge von HBCD aus PS-Schaumstoff. Der Rostascherückstand ist aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzung der kommunalen Abfälle sehr heterogen. Die Nachweisgrenze lag zwischen $1,2 \text{ und } 1,6 \text{ } \mu\text{g/kg}$. Die HBCD-Konzentrationen werden als die Summe der drei Isomere angegeben, eine Differenzierung nach einer unterschiedlichen Isomeren-Verteilungen im PS-Schaumstoff oder in den Emissionsrückständen und dem Gas wurde nicht berücksichtigt.

Eigenschaften der Rostasche

Die Eigenschaften der Rostasche wurden eingehend untersucht, um die Erfüllung der gesetzten Ziele zu überprüfen: (1) Eine gute Verbrennungsleistung ist direkt mit einem guten Ausbrand und einem geringen Glühverlust/TOC und (2) einer hohen Effizienz der Zerstörung von HBCD verbunden. Die Rückstände aus unverbranntem Material, Metallen und Steinen bzw.

inertem Material wurden per Hand ausgesondert und gewogen. Es konnte kein Einfluss der Mitverbrennung von PS-Schaumstoff festgestellt werden. Das Gewicht der Rückstände lag bei den von Hand aussortierten Anteilen im normalen Bereich und liefert eine Bestätigung für die stabile gute Verbrennung.

Auslaugprüfungen an der Rostasche: gemäß EU/EN 12457 1-4 und CH/TVA

Es gibt in Europa verschiedene Anforderungen an Auslaugprüfungen für Deponien und die International Ash Working Group ist mit der Erfassung sowie Untersuchung zur Bildung von Know-how beauftragt. Die durchgeführten Auslaugprüfungen unterscheiden sich in ihrem Zweck und daher in den angewendeten Verfahren. Die standardisierten europäischen Auslaugprüfungen EN 12457-1 bis 4 beschreiben im Wesentlichen die verschiedenen nationalen Anforderungen. In Tabelle 7 werden ausgewählte Ergebnisse der klassifizierenden Auslaugprüfungen dargestellt. Aufgrund der Heterogenität der Schlacke

müssen erhebliche Schwankungen innerhalb derselben Testserien akzeptiert werden. Die vorgeschriebenen Grenzwerte bei den europäischen Auslaugtests sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Die Unterschiede zwischen den Referenztests A und der Testvariante C waren unerheblich. Es wird deutlich, dass die Qualität der Rostasche durch die Mitverbrennung des PS-Schaumstoffes nicht negativ beeinflusst wird. Im Falle der Blei-Auslaugung ist bekannt, dass eine Lagerung von Rostasche an der Luft über mehrere Monate die Auslaugfähigkeit drastisch reduziert („Alterung“, „Carbonatisierung“).

Probe	EN 12457-4		EN 12457-3				CH-TVA		EU-Grenzwerte für ungefährliche granulare Abfälle	
	A1	C1	A1, 1 Eluat	A1, 2 Eluat	C1, 1 Eluat	C1, 2 Eluat	A1	C1	L/S=2	L/S=10
pH	12.2	11.8	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.	n.z.
Arsen	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	< 0.005	0.4	2
Blei	0.27	< 0.005	2.1	0.77	0.021	< 0.005	< 0.005	< 0.005	5	10
Kadmium	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.004	0.01	0.6	1.0
Copper	0.024	0.14	0.077	0.031	0.55	0.063	0.13	0.22	25	50
Nickel	< 0.005	< 0.005	0.014	< 0.005	0.018	< 0.005	0.17	0.24	5	10
Quecksilber	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	< 0.0002	0.05	0.2
Zink	0.09	0.02	0.23	0.06	0.02	< 0.01	3.3	7.8	25	50
Chlorid	520	660	2500	130	3400	170	n. z.	n. z.	100000	150000
Sulfat	920	630	1400	680	720	140	n. z.	n. z.	10000	20000
TDM	3100	2400	10000	2200	8400	820	n. z.	n. z.	40000	60000

Bemerkung: n.z. = nicht zutreffend; TDM = vollständig gelöste Feststoffe (Total Dissolved Matter); alle Angaben in mg/l außer der pH-Wert.

Tabelle 7: Ausgewählte Grenzwerte für das Auslaugverhalten und analytische Ergebnisse

Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Untersuchung der Mitverbrennung von PS-Schaumstoff gemeinsam mit kommunalem und gewerblichem Restmüll lieferte wichtige Erkenntnisse zu Emissionen und Betrieb der Verbrennungsanlage. Der Test wurde mit handelsüblichen Dämmstoffplatten durchgeführt, um sicherzustellen, dass im Messzeitraum eine kontrollierte Zugabe von PS-Schaumstoff und damit HBCD erfolgt. Die folgenden Empfehlungen für den praktischen Umgang mit verwertbaren Abfällen von PS-Schaumstoffen in Abfallverbrennungsanlagen sind nicht nur für die derzeitigen Produktions- und Baustellenabfälle wichtig, sondern insbesondere auch für Abfälle, die durch Abbruch bzw. Rückbau entstehen. Die Vermischung der Schaumstoffabfälle mit dem normalen Restmüll ist wichtig und sollte von den Kranführern

Abfallverbrennungsanlagen nach dem Stand der Technik gewährleisten eine hocheffiziente und simultane Zerstörung von Flammschutzmitteln wie HBCD und Treibhausgasen (ODS) wie FCKW bzw. H-FCKW (TAMARA, 1993/1994).

UNEP, die EU sowie nationale staatliche Behörden sollten aus diesem Grund die Mitverbrennung auch von altem PS-Schaumstoffen (XPS mit FCKW/H-FCKW) in herkömmlichen Abfallverbrennungsanlagen unterstützen, ohne die Verwendung von Verbrennungsanlagen für gefährlichen Abfall zu fordern, weil dafür kein Grund vorliegt.

Auf nationaler und lokaler Ebene sind die Verwertungspraktiken innerhalb der Europäischen Union äußerst unterschiedlich. Dies ist auf geographische Faktoren, Kosten bei der Verbrennung, Demographie, Bevölkerungsdichte und die bestehende Infrastruktur der Abfallentsorgungsverfahren wie Abfalldeponien, Verbrennungsanlagen, Wärmeabnahme etc. zurückzuführen.

Die Untersuchung hat deutlich gezeigt, dass moderne Abfallverbrennungsanlagen für die sichere Verwertung von PS-Schaumstoff mit dem

der MVA aufmerksam durchgeführt werden. PS-Schaumstoff kann in einer klassischen Müllverbrennungsanlage behandelt werden, wenn bestimmte Randbedingungen beachtet werden:

- Vorzugsweise Anlieferung von einzelnen Platten oder Bruchstücken mit anderen Baustellenabfällen (gemischter Baustellenabfall).
- Die Anlieferungen von vollständigen Plattenpaketen in eine Folienverpackung sollten vermieden werden, da diese Pakete nicht gut untergemischt werden können.
- Handelsübliche Platten, wie sie für diesen Test eingesetzt wurden, können problemlos behandelt werden.
- Es sollten keine Großgebilde, z. B. Big Bags zur Verwertung angeliefert werden.

Flammschutzmittel HBCD geeignet sind. Die Verbrennung von PS-Schaumstoffabfällen aus dem Bauwesen gemeinsam mit kommunalen und gewerblichen Abfällen ist eine praktikable, sichere und kostengünstige Lösung für deren Entsorgung, wobei der Energiegehalt im Sinne einer Verwertung noch sinnvoll genutzt werden kann. Dies gilt ganz allgemein auch für PS-Schaumstoffabfälle, die kein HBCD enthalten, wie PS-Schaumstoff für Verpackungen. Die Ergebnisse der Untersuchung bilden eine zuverlässige und dokumentierte Grundlage für die Festlegung spezifischer Anforderungen, die Klassifizierung und den Umgang mit HBCD-haltigen PS-Schaumstoffabfällen.

Nach der POP-Einstufung von HBCD durch die UNEP Stockholm Konvention ist nun die UNEP Basel Konvention beauftragt, technische Richtlinien für HBCD bzw. HBCD-haltige Abfälle zu erstellen. Die Verbrennung derartiger Abfälle in Abfallverbrennungsanlagen mit Energierückgewinnung gewährleistet die sichere Zerstörung des Flammschutzmittels HBCD und ermöglicht gleichzeitig, den Energieinhalt des PS-Schaumstoffes zur Erzeugung von Strom und Wasserdampf zu nutzen.

Referenz

Der vollständige technische Bericht ist erhältlich bei *PlasticsEurope* und *EXIBA*.

www.plasticseurope.org www.exiba.org

Glossar

A	Zustand ohne Zugabe von PS-Schaumstoff
A ₁	Zeitraum für die Messung bei Zustand A, 6 Stunden
AC	Aktivkohle (Activated Carbon)
ASR	Schredderabfälle von Fahrzeugen (Automotive Shredder Residue)
B, C	Bedingungen bei Zugabe von PS-Schaumstoff
C	Kohlenstoff
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
DE	Zerstörungsrate (Destruction Efficiency)
EGW	Emissionsgrenzwert (Emission Limit Value)
EoL	am Ende der Lebensdauer (End of Life)
EPS	Expandierter Polystyrol-Schaumstoff
ESR	Schredderabfälle von elektrischen und elektronischen End-of-life-Produkten (Electrical & Electronic Shredder Residue)
HBCD	Hexabromcyclododecan
HBr, HCl	Bromwasserstoff, Chlorwasserstoff
HM	Schwermetalle
Hu	Heizwert, unterer
ITEQ	Internationale Toxizitätsäquivalente (International Toxic Equivalent)
LOQ	Bestimmungsgrenze (Limit of Quantification)
MHKW	Müllheizkraftwerk
MSW	Kommunale Abfälle (Municipal Solid Waste)
MSWI	Verbrennungsanlage für kommunale Abfälle (Municipal Solid Waste Incinerator)
MVA	Müllverbrennungsanlage
NO _x	Stickoxide
O ₂	Sauerstoff
ODS	Ozonschädigende Substanzen (Ozone Depleting Substances)
PBDD/F	Polybromierte Dioxine und Furane
PBT	Persistent, bioakkumulierend und toxisch (Persistent Bioaccumulative Toxic)
PCDD/F	Polychlorierte Dioxine und Furane
POP	Langlebiger organischer Schadstoff (persistent organic pollutant)
PS	Polystyrol
PXDD/F	Halogenierte (bromierte und/oder chlorierte) Dioxine und Furane
SO ₂	Schwefeldioxid
TEAP	Ausschuss für Technologie und Wirtschaftlichkeitsbewertungen (Technology and Economic Assessment Panel)
TEQ	Toxizitätsäquivalent (Toxic Equivalent)
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff (Total Organic Carbon)
TVA	Technische Verordnung über Abfälle, Schweiz
UNEP	Umweltprogramm der Vereinten Nationen (United Nations Environment Programme)
WFD	Europäische Richtlinie über Abfälle (Waste Framework Directive)
WID	Europäische Richtlinie über die Verbrennung von Abfällen (Waste Incineration Directive)
XPS	Extrudierter Polystyrol-Schaumstoff



c/o Cefic
Avenue E. van Nieuwenhuyse 4
1160 Brüssel – Belgien
Telefon +32 (0)2 676 72 62
www.exiba.org

PlasticsEurope
Der Verband der Kunststoffherzeuger

Avenue E. van Nieuwenhuyse 4/3
1160 Brüssel – Belgien
Telefon +32 (0)2 676 72 62
celine.oostens@plasticseurope.org
www.plasticseurope.org

© 2015 PlasticsEurope. All rights reserved.

 **Kunststoff**
Werkstoff des 21. Jahrhunderts