

Recyclingfähigkeit von Wärmedämmverbundsystemen mit Styropor

Andreas Mäurer und Martin Schlummer

1.	Herausforderungen.....	450
2.	Rohstoffliche Verwertung Hexabromcyclododekan-freier Wärmedämmverbundsysteme.....	451
3.	Energetische Verwertung.....	452
4.	Werkstoffliche Verwertung.....	452
5.	Ausblick auf die zukünftige Verwertungspraxis	454
6.	Quellen	454

In ihrem Positionspapier vom April diesen Jahres *Über den Sinn von Wärmedämmung* [6] kommt die Klimaschutz- und Energieagentur Baden-Württemberg gemeinsam mit renommierten unabhängigen Experten des Fraunhofer IBP und des Karlsruher Instituts für Technologie KIT zu folgenden Schlüssen: Etwa 40 Prozent des Endenergieverbrauchs in Deutschland entfällt auf den Gebäudesektor, mehrheitlich auf die Beheizung. Mit am Markt verfügbaren und technisch ausgereiften Lösungen, wie z.B. dem Einsatz von Wärmedämmverbundsystemen (kurz WDVS), lässt sich der Energiebedarf gegenüber Bestandsbauten um den Faktor 4 bis 10 reduzieren. Dabei liegen die energetischen Amortisationszeiten bei üblicherweise 2 Jahren und auch unter ungünstigen Bedingungen noch unter 5 Jahren. Damit ist der Einsatz von Wärmedämmverbundsystemen aus Sicht der Ressourceneffizienz als sehr sinnvoll zu bewerten.

Unter einem Wärmedämmverbundsystem versteht man ein System zum Dämmen von Gebäudeaußenwänden. Das Dämmmaterial (meist expandiertes Polystyrol, kurz EPS) wird in Form von Platten oder Lamellen durch Kleben und/oder Dübeln auf dem bestehenden Wanduntergrund aus Ziegel, Kalksandstein oder Beton befestigt und mit einer armierenden Putzschicht versehen. Wärmedämmverbundsysteme finden seit den 1970er Jahren Anwendung im Neubau sowie bei der energetischen Sanierung von Altbauten. Beim Gebäudeabriss oder Rückbau der WDVS entsteht ein Verbundabfall aus EPS und Mörtel, der bislang keiner Verwertung zugeführt wird. Der EPS-Anteil im Verbundabfall variiert dabei stark mit der verwendeten Rückbaumethode. Selbst manuelle Verfahren erzeugen nur EPS-Gehalte von 60 Prozent.

Die prinzipiellen Verwertungsmöglichkeiten für WDVS Abfälle wären vielfältig. Der mineralische Anteil könnte nach sauberer Trennung in Recyclingbaustoffen wiederverwendet werden. Komplexer ist die Situation für das EPS. Hier steht die energetische Verwertung im Wettbewerb mit werkstofflichen Verfahren (z.B. beim Einsatz zur Herstellung von Leichtbeton) und closed loop Recyclingansätzen. Das EPS-Recycling wird allerdings durch den Umstand erschwert, dass EPS bis dato mit etwa 0,7 - 1 Prozent Hexabromcyclododekan (HBCD) als Flammschutzmittel ausgerüstet wurde. Dieses wurde allerdings bereits 2008 von der ECHA (European Chemicals Agency) als PBT-Substanz (persistente, bio-akkumulative und toxische Substanz) in die Liste von besonders besorgniserregenden Stoffen aufgenommen. Damit erfüllt der Stoff alle Kriterien des Stockholmer Übereinkommens über persistente organische Schadstoffe, der *Stockholmer-POP-Konvention*. 2013 wurde HBCD im Zuge der sechsten Vertragsstaatenkonferenz dieser Konvention nun in Anhang A (Verbot) aufgenommen, die Teil der POPs-Liste ist. Das Expertengremium der Stockholmer Konvention hat die POP-Eigenschaften der Chemikalie bestätigt und damit den Grundstein für das weltweite Verbot unter der Konvention gelegt. Der Beschluss wurde formal im Mai 2013 umgesetzt und trat mit einer etwa einjährigen Übergangsphase in Kraft [5]. Damit darf HBCD-haltiges EPS nicht mehr einfach recycelt und als Recyclat vermarktet werden.

Als Reaktion darauf haben die Flammschutzmittelhersteller und EPS Produzenten global einen neuen polymeren bromierten Flammhemmer entwickelt, der ab 2014/2015 verbindlich in Neu-EPS eingesetzt wird.

Allerdings fällt aktuell nur etwa 1 Promille der verkauften WDVS-Menge als Abfall an, eine Menge die nicht ausreicht, um technische Recyclingverfahren im Industriemaßstab zu betreiben oder zu etablieren. WDVS-Systemen wird aber eine Lebensdauer von 25-30 Jahren nachgesagt, so dass in den kommenden Jahren ein verstärktes Aufkommen an WDVS-Abfällen erwartet wird. Diese Abfälle werden sowohl HBCD und auch das neue polymere Flammschutzmittel enthalten, da sie sowohl aus HBCD-haltigen Rückbaumengen als auch aus Abfällen vom Verbau neuer EPS-Platten mit neuem Flammschutzsystem bestehen. Aus heutiger Sicht wird der HBCD-Anteil im Abfall größer sein als der von der Stockholm Konvention noch festzulegende Grenzwert für die Einstufung als POP-Abfall (zur Diskussion steht derzeit ein Grenzwert von 50 ppm).

1. Herausforderungen

Die sichere und ökonomische Verwertung von WDVS-Abfällen steht damit vor großen Herausforderungen.

Zunächst ist eine sinnvolle WDVS-Erfassung auf der Baustelle notwendig. Ziel ist hier, den Anteil mineralischer Komponenten möglichst gering zu halten, da dieser separat erheblich leichter wiederverwertet werden kann. Dazu wurden in einem aktuellen Forschungsvorhaben verschiedene Rückbautechniken erprobt [9], die sehr EPS-reiche WDVS-Abfallfraktionen erzeugen können. Die angereicherten Abfälle dieser Techniken sind für eine nachfolgende Verwertung der EPS Fraktion prädestiniert, aber sie müssen sich am Markt erst noch etablieren.

Rückgebaute WDVS-Abfälle sind ferner sehr voluminös. So entstehen beim Rückbau eines Einfamilienhauses Volumina von mindesten 30 m^3 , in der Regel aufgrund fehlender Verdichtung eher 60 m^3 , bei einem Gewicht von etwa 500 kg. Der Transport dieser Abfallmengen über größere Strecken ist daher sehr ineffektiv [11]. Eine vorhergehende Verpressung des Abfalls wäre zwar technisch möglich, sie würde allerdings die für jede folgende Verwertung sinnvolle Verbundtrennung erheblich erschweren.

Wie unten noch dargelegt wird, stehen für HBCD-haltige und HBCD-freie WDVS- oder daraus gewonnene EPS Fraktionen verschiedene Verwertungsoptionen zur Wahl. Daher ist eine Trennung der Abfallströme nach Flammenschutzmittel wünschenswert. Gängige Schnellanalysengeräte auf Basis von NIR, RFA oder Gleitfunkspektroskopie sind allerdings nicht in der Lage, Materialien nach HBCD und neuem polymerem bromierten Flammenschutzmittelsystem zu sortieren. Geeignete Verfahren hierzu sind daher erst noch zu entwickeln und zu etablieren.

Die größte Herausforderung besteht allerdings im Umgang mit WDVS-Fraktionen, die das POP gelistete HBCD enthalten. Hier stehen sich zwei Kerninteressen entgegen:

- a) die sichere Zerstörung des HBCD und
- b) die werkstoffliche Verwertung der enthaltenen mineralischen und polymeren Wertstoffe.

Beide Interessen lassen sich nur dann in Einklang bringen, wenn eine sichere und ausreichende Abtrennung des HBCD vom Abfall gelingt und HBCD-freie Recyclate erzeugt werden können.

Diese in Zukunft anzustrebende Trenntechnik muss zunächst den mineralische Anteil vom Polymer trennen, im zweiten Schritt aber das HBCD Additiv aus dem Polymer entfernen, ohne das Polymer nachhaltig (z.B. thermisch) zu schädigen.

2. Rohstoffliche Verwertung Hexabromcyclododekan-freier Wärmedämmverbundsysteme

Eine stoffliche Verwertung von post-consumer Styropor bietet sich im Bauwesen an. Das gemahlene Recycling-Material wird vorwiegend als Leichtzuschlag für Mörtel und Beton genutzt. Dies ist möglich, da die für diesen Anwendungsbereich besonders günstigen physikalischen Eigenschaften von Styropor (geringe Wärmeleitfähigkeit) auch nach der Nutzungsphase erhalten bleiben. Vermahlene Alt-Styropor dient daher als Zuschlagstoff für Styropor-Leichtbeton, Dämmputze und Leichtputze sowie in der Tonindustrie.

Styropor-Leichtbeton ist ein mineralisch gebundener Leichtbeton, bei dem die Poren durch geschäumte Polystyrol-Partikel als Betonzuschlag gebildet werden. Die äußerst niedrige Schüttdichte der Schaumstoffpartikel ermöglicht die Herstellung von Leichtbeton mit einem auf die jeweilige Anwendung abgestimmten Rohdichtebereich und entsprechend breitem Eigenschaftsspektrum. Anwendungsmöglichkeiten von Styropor-Leichtbeton sind Frostschutz- und Trageschichten im Straßenbau, wärmedämmende Wandbausysteme im Hochbau, Gefälle- oder Ausgleichsestrich, sowie als Füllbeton in Deckenkonstruktionen.

In der Altbausanierung werden vermehrt Dämmputze mit Styropor als Zuschlag verwendet, was dem Putz nicht nur wärmedämmende Eigenschaften verleiht, sondern auch die Verarbeitung erleichtert. Als Dämm-Mörtel eignet er sich besonders zur Füllung von Aussparungen und Leitungsschlitzten. Für Leichtputze werden besonders die feingemahlten EPS-Abfälle oder Fräs-/Sägestaub verwendet.

Porotonsteine sind gebrannte Tonziegel, die viele Poren enthalten, welche dem Stein seine wärmedämmende Eigenschaft geben. Die Anzahl der Poren sowie ihre Größe sind genau vorgegeben und erfordern einen *Porenbildner*, der sehr gleichmäßig in Form und Eigenschaft ist. Gemahlene Styropor-Abfälle mit einer Partikelgröße von 1 bis 4 mm, welches dem aufbereiteten Rohton zugesetzt wird, erfüllen diese Anforderungen. [10]

3. Energetische Verwertung

Die energetische Verwertung des hochkalorischen EPS geschieht vergleichsweise einfach in einer Müllverbrennungsanlage [14]. Flammenschutzmittel stören den Verbrennungsprozess nicht und werden bei geeigneten Verbrennungsbedingungen (z.B. 2 s bei 900 °C) sicher und hinreichend zerstört. So belegt eine aktuelle Forschungsarbeit aus Japan [5] in bilanzierten Laborversuchen eine Zerstörungseffizienz von 99,9999 Prozent und 99,99999 Prozent für HBCD-haltige EPS und XPS-Abfälle. Auch die Emission polychlorierter und polybromierter Dioxine und Furane (PCDD/F und PBDD/F) lag weit unter dem gesetzlichen Grenzwert für PCDD/F bzw. dem für PBDD/F abgeleiteten Analogwert.

Diese Verwertungsvariante bietet damit eine sichere End-of-life-Option für den EPS-Anteil im WDVS Abfall. Allerdings wird bei der *energetischen Verwertung* lediglich der kalorische Wert der Abfälle genutzt – zumindest teilweise, je nach Wirkungsgrad der jeweiligen MVA. Aus rohstofflicher Sicht werden allerdings die polymeren Ressourcen dabei nur sehr schlecht genutzt, da die große aufgewendete Produktions- und Veredlungsenergie (vom Erdöl über Styrol-Fraktionierung mit Polymerisation und Schäumung) komplett verloren geht.

4. Werkstoffliche Verwertung

Aus Sicht der Ressourceneffizienz erscheint daher das folgende Alternativkonzept ökologisch vorteilhafter: Die Rückgewinnung des Polystyrols nach vorheriger Flammenschutzmitteltrennung. Dies ist technisch mithilfe lösungsmittelbasierten Recyclingtechnologien erreichbar [3]. Das abgetrennte bromierte Flammenschutzmittel könnte dann durch thermische Behandlung zur Bromrückgewinnung eingesetzt werden [15].

Eine Möglichkeit zum werkstofflichen Recycling von WDVS-Abfällen besteht in der Anwendung des CreaSolv Prozesses¹. Der Prozess eignet sich generell für das Recycling von Polymeren aus Verbundstrukturen [7, 8]. Eine Verfahrensvariante für das Recycling von EPS wurde bis 2004 am Fraunhofer IVV in einem öffentlich geförderten InnoNet-Forschungsprojekt entwickelt (EPS-Loop, [2]) und seitdem am IVV optimiert.

¹ CreaSolv ist eine eingetragenes Markenzeichen der Creacycle GmbH, Grevenbroich

Seit 2011 erfolgt eine Applikation dieser Technologie im europäischen POLYSOLVE Projekt [4]. Dabei wird das Zielpolymer mit einem Lösungsmittel aus dem Verbundabfall gelöst und der Lösungsrückstand abgetrennt. Die Polymer-Lösung kann in einem folgenden Reinigungsschritt von mitgelösten Schad- und Störstoffen gereinigt werden. Dies wurde z.B. bereits für die Abtrennung bromierter Flammschutzmittel aus ABS und Polystyrol aus Elektroaltgeräten eingehend untersucht und nachgewiesen [12, 13]. Das Verfahrensprinzip ist in Bild 1 dargestellt.

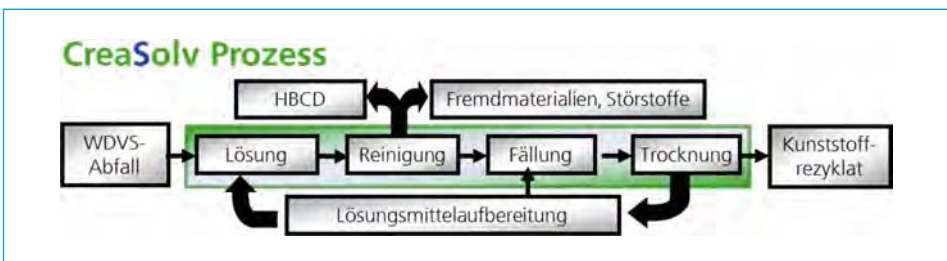


Bild 1: Verfahrensprinzip der werkstofflichen Aufbereitung HBCD-haltiger WDVS-Abfälle

Zunächst wird der WDVS Abfall mit einem Lösungsmittel benetzt. Dabei löst sich das expandierte EPS oder XPS auf und kann anschließend durch Fest-Flüssig-Trennung vom mineralischen Anteil separiert werden. Dieser wird dann thermisch vom Lösungsmittel befreit und als Recyclingbaustoff verwendet. Das eingesetzte Lösungsmittel ist dabei eine als non-VOC klassifizierte Flüssigkeit, die weit unterhalb des Flammpunktes eingesetzt wird. Daher ist die Verbundtrennung mithilfe des Lösungsmittels z.B. auch direkt am Anfallort, der Baustelle im Prinzip sicher machbar.

Die von Mineralien befreite Polymerlösung wird im zweiten Schritt extraktiv vom Flammschutzmittel HBCD und anderen Altadditiven sowie den niedermolekularen Abbauprodukten befreit, so dass eine reine hochwertige Recyclat-Lösung übrig bleibt. Dies geschieht in mehreren optimierten Prozesszyklen und kann an einen erforderlichen Zielwert des Recyclats (z.B. < 30 ppm HBCD oder aber bei Bedarf auch deutlich geringer) adaptiert werden. Schließlich wird das Lösungsmittel in der Trocknungsstufe vom Polymer getrennt und für den nächsten Lösungszyklus wiederverwendet. Das Recyclingprodukt, ein gereinigtes Polystyrolgranulat, ist marktfähig oder kann alternativ durch Zugabe eines Treibmittels (üblicherweise Pentan) wieder zu expandierfähigen EPS-Beads aufgearbeitet werden.

Das extraktiv abgereinigte HBCD wird ebenfalls vom Lösungsmittel getrennt und kann als hochbromhaltige und schwermetallfreie Fraktion zur Rückgewinnung von Brom verwendet werden. Dazu besteht im holländischen Terneuzen eine industrielle Anlage, die anorganische und organische Abfälle in einem thermischen Verfahren oxidiert und Brom zurückgewinnt. Das Brom findet dann z.B. zur Produktion des neuen polymeren bromierten Flammschutzmittels für die aktuelle WDVS-Produktion erneute Verwendung. Beide Stoffströme, sowohl das Polymer als auch das Flammschutzmittel, sind somit sehr hochwertig wiedergewonnen.

Dadurch ermöglicht die hier beschriebene Verfahrenskombination ein integriertes closed-loop Recycling von WDVS-Abfällen mit Styropor, denn die neu produzierten EPS-Paneele sollen natürlich auch wieder für neue WDVS-Anwendungen eingesetzt werden können. Das Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München hat bereits vor Jahren die guten mechanischen, thermischen und anwendungstechnischen Kennwerte von EPS-Recyclaten aus dem CreaSolv Prozess festgestellt.

Aktuelle Arbeiten am Fraunhofer IVV zielen auf die Optimierung der Technologie zur Umsetzung in Klein-Anlagen. Es ist auf Basis der aktuellen Entwicklungsarbeiten aber darauf hinzuweisen, dass eine vorgeschaltete mechanische Verbundtrennung anzustreben ist, die den mineralischen Abfall im Input für den Lösungsmittelprozess möglichst gering hält. Diese wird aktuell in Kooperationen mit Industriepartnern evaluiert und wird eine kostenoptimierte Verwertung des mineralischen Anteils gewährleisten.

5. Ausblick auf die zukünftige Verwertungspraxis

Da für das EPS-Recycling zurzeit aber noch keine CreaSolv Anlage im Industriemaßstab verfügbar ist, kann das Konzept noch nicht in der industriellen Praxis genutzt werden. Die Realisierung einer Erstanlage ist damit der notwendige Schritt, um die aussichtsreiche Technologie am Markt zu etablieren. Gelingt die Umsetzung in rentablen Kleinanlagen, könnte in naher Zukunft ein Netzwerk geeigneter Aufbereitungsanlagen dazu beitragen, das in den kommenden Jahren stark steigende WDVS-Abfallaufkommen werkstofflich optimal zu nutzen.

Parallel ist ein optimiertes Logistikkonzept zu entwickeln, das WDVS-Abfälle bereits am Anfallort mechanisch aufbereitet und dann EPS-angereicherte WDVS-Abfälle regionalen CreaSolv Aufbereitungsanlagen zuführt. Zur Einsparung von Logistikkosten wurde bereits 2002 vorgeschlagen, für diese EPS Erfassung mobile Lösungsmitteltanks zu verwenden, in denen das voluminöse EPS gelöst und somit um den Faktor 10-20 verdichtet wird. Dies senkt die Transportkosten maßgeblich.

Beim CreaSolv Prozess gehen Ökonomie und Ökologie Hand in Hand wie Ökobilanzen, LCA und Kostenprojektionen von Recycling-Anlagen für andere flammgeschutzmittelhaltigen Polystyrol-Abfälle [1] bereits belegten.

6. Quellen

- [1] Freegard, K.; Tan, G.; Morton, R.: Develop a process to separate brominated flame retardants from WEEE polymers. Final Report of WRAP project PLA- 037. <http://www.wrap.org.uk/content/develop-and-commercialise-creasolv-process-weee-plastics>. Banbury, 2006
- [2] <http://www.creacycle.de>
- [3] <http://www.ivv.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/kunststoff-rezyklate/recycling-eps-abfall.html>
- [4] <http://www.polysolve.eu>
- [5] <http://www.umweltbundesamt.de/themen/chemikalien/chemikalien-management/stockholm-konvention>

- [6] Kienzlen, V.; Erhorn, H.; Krapmeier, H.; Lützkendorf, Th.; Werner, J.; Wagner, A.: Über den Sinn von Wärmedämmung. Positionspapier von KEA, Fraunhofer IBP, Energieinstitut Vorarlberg, KIT und ebök GmbH. http://www.ivh.de/Start_I28.whtml, 8.4.2014
- [7] Knauf, U.; Mäurer, A.; Holley, W.; Wiese, M.; Utschick, H.: Recycling von PVC/PET-Verbunden. Erzeugung sortenreiner Rezyklate und Prozessverfolgung. *Kunststoffe* 90, Nr. 2, S. 72 - 76, 2000
- [8] Menz, V.; Lefevre, J.; Schlummer, M.: Werte wiedergewinnen. *Kunststoffe* 102, Nr. 7, S. 72 - 75, 2012
- [9] Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des Wärmedämm-Verbundsystems nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktkreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur thermischen Verwertung. Forschungsinitiative Forschung Bau, Projektnummer F20-11-1-094; 10.08.18.7-12.24
- [10] Mötzl H.; Bauer B.; Lerchbaumer S.; Torghele K.: Planungsleitfaden: Ökologische Baustoffwahl. Erstellt im Auftrag der Projektgruppe des Interreg IIIA – Projektes „Ökologisch Bauen und Beschaffen in der Bodenseeregion“ vertreten durch den Umweltverband Vorarlberg. Wien, 2007
- [11] Salhofer S.; Schneider F.; Obersteiner G.: The ecological relevance of transport in waste disposal systems in Western Europe. *Waste Management* 27 (8), S. 47–S. 57, 2007
- [12] Schlummer, M.; Mäurer, A.; Arends, D.: Recycling flammgeschützter Kunststoffe aus Elektronikaltgeräten mit dem CreaSolv-Prozess. In: Hösel, G. (Ed.) *Müll-Handbuch. Sammlung und Transport, Behandlung und Ablagerung sowie Vermeidung und Verwertung von Abfällen*. Berlin: E.Schmidt (ESV-Handbücher zum Umweltschutz)
- [13] Stockholm Convention. Guidance on Best Available Techniques and Best Environmental Practice for the Recycling and Disposal of Articles containing Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (Draft)
- [14] Takigami H.; Watanabe M.; Kajiwara N.: Destruction behavior of hexabromocyclododecanes during incineration of solid waste containing expanded and extruded polystyrene insulation foams. *Chemosphere*, in press, 2014
- [15] www.iclip-terneuzen.com/dbdocs/attachment_36.pdf