

Wolfgang Albrecht, Christoph Schwitalla

Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS

Möglichkeiten der Wiederverwertung
von Bestandteilen des WDVS nach
dessen Rückbau durch Zuführung in
den Produktionskreislauf der Dämmstoffe
bzw. Downcycling in die Produktion
minderwertiger Güter bis hin zur
energetischen Verwertung

F 2932

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9411-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleiter

Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht BBHB 019/2014/281

Rückbau, Recycling und Verwertung von WDV

„Möglichkeiten der Wiederverwertung von Bestandteilen des WDV nach dessen Rückbau durch Zuführung in den Produktionskreislauf der Dämmstoffe bzw. Downcycling in die Produktion minderwertiger Güter bis hin zur energetischen Verwertung“

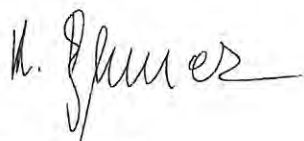
Durchgeführt im Auftrag
Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e. V.
Fremersbergstraße 33
76530 Baden-Baden

Der Bericht umfasst
91 Seiten Text
10 Tabellen
40 Abbildungen

Wolfgang Albrecht, FIW München
Christoph Schwitalla, Fraunhofer IBP

Valley, 13. November 2014

Stellv. Institutsleiter



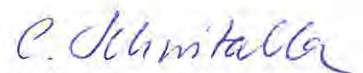
Dr. rer. nat.
Klaus Breuer

Abteilungsleiter



Dr. rer. nat.
Florian Mayer

Bearbeiter



Dipl.-Ing.
Christoph Schwitalla

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: II 3-F20-11-1-094 / SWD-10.08.18.7-12.24)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Abkürzungsverzeichnis	5
1 Einleitung	7
1.1 Hintergrund	7
1.2 Aufgabe und Zielsetzung	8
1.3 Antragsteller und Projektleitung	9
1.4 Forschende Stellen	9
1.5 Projektbegleitender Ausschuss	9
1.6 Projektablauf	10
2 Methodik	11
2.1 Regulatorischer Rahmen	12
2.2 Mengengerüste und Datengrundlage	13
2.3 Eigene Untersuchungen zum Rückbau von WDVS	14
2.4 Ableitung von Bewertungen und Empfehlungen	14
3 Grundlagenermittlung	15
3.1 Regulatorischer Rahmen und übergeordnete politische Ziele	15
3.1.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)	17
3.1.2 Abfallverzeichnisverordnung (AVV)	19
3.1.3 Bauproduktenverordnung (BauPVO)	21
3.1.4 Europäische Chemikalienverordnung REACH	22
3.1.5 Stockholmer Übereinkommen (POP-Konvention)	22
3.1.6 Ersatzbaustoffverordnung (Entwurf)	23
3.2 Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS)	23
3.2.1 Polystyrol	29
3.2.2 Herstellung von EPS und XPS	30
3.2.3 Flammschutzmittel	31
3.3 Mengengerüste	33
3.3.1 Produktionsmengen an Kunststoffen in Deutschland	33
3.3.2 Produktion von EPS für WDVS	34
3.3.3 Abfall	38
3.4 Rückbau	41
3.5 Trennverfahren	43
3.6 Verwertungsmöglichkeiten/Verfahren	45
3.6.1 Werksstoffliche Verwertung	46
3.6.2 Selektive Extraktion	48
3.6.3 Thermische Abfallbehandlung	49
3.6.4 Energetische Verwertung	49

4	Eigene Untersuchungen zum Rückbau von WDVS	50
4.1.1	Manuelles Abschälen	50
4.1.2	Maschinelles Abschälen	52
4.1.3	Abfräsen	54
4.1.4	Thermisches Entschichten	55
4.1.5	Versuchsweiser Rückbau eines Gebäudes	56
5	Bewertung	56
5.1	Rahmenbedingungen	58
5.2	Aufdoppeln	58
5.3	Rückbau	59
5.3.1	Nicht aufgedoppelte WDVS	59
5.3.2	Aufgedoppelte WDVS	59
5.4	Verwertung und Beseitigung	61
5.5	Abfallaufkommen	62
5.6	Prognose	66
6	Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf	72
7	Zusammenfassung	80
8	Literatur	82

Abkürzungsverzeichnis

AbfRRL	Abfallrahmenrichtlinie
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymerisat
ASA	Acrylnitril-Styrol-Acrylester
AVV	Abfallverzeichnisverordnung
BauGB	Baugesetzbuch
BauPVO	Bauproduktenverordnung
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
CAGR	Engl.: Compound annual growth rate jährliche Wachstumsrate
DepV	Deponieverordnung
EAK	Europäischer Abfallkatalog
ECHA	Engl.: European Chemicals Agency Europäische Chemikalienagentur
EnEV	Energieeinsparverordnung
EXIBA	Engl.: European Extruded Polystyrene Insulation Board Association Vereinigung der europäischen XPS-Dämmstoffhersteller
FV-WDVS	Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e. V.
EPS	Expandiertes Polystyrol
GDI	Gesamtverband Dämmstoffindustrie e. V.
HBCD	Hexabromcyclododecan
IVH	Industrieverband Hartschaum e. V.

KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LBO	Landesbauordnung
MBO	Musterbauordnung
MHKW	Müllheizkraftwerk
PA	Polyamid
PBT	Abkürzung für persistent, bioakkumulierend, toxisch
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCT	Polychlorierte Terphenyle
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PMMA	Polymethylmethacrylat
POP	Engl.: Persistent Organic Pollutant organischer Schadstoff, der in der Natur nicht oder nur sehr langsam abgebaut wird
PP	Polypropylen
PS	Polystyrol
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
REACH	Engl.: Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien nach EU-Chemikalienverordnung.
SAN	Styrol-Acrylnitril-Copolymer
WDVS	Wärmedämm-Verbundsystem
XPS	Extrudiertes Polystyrol

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Energieeinsparung, sowie Energie- und Ressourceneffizienz sind aktuell intensiv diskutierte Themen. Einen wesentlichen Beitrag zur Energieeinsparung im Gebäudebestand leistet die Verringerung des Transmissionswärmeverlusts durch die Gebäudehülle mit Hilfe von Wärmedämmstoffen. Als Materialien eignen sich z. B. Matten und Platten sowie Schüttungen aus porösen und faserigen, organischen und anorganischen Stoffen. Typische Vertreter von Wärmedämmstoffen sind z. B.:

- Schaumstoffe aus Polyurethan und Polystyrol
- Glas- und Steinwolle
- Holzfasern
- Calciumsilicate

Polystyrol wird dabei als Hartschaumstoff für Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) eingesetzt. Seit den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurden Dämmstoffe aus expandiertem Polystyrol (EPS) verbaut. Die Wärmedämm-Verbundsysteme der ersten Generation stehen inzwischen vor der Überarbeitung. D. h. der Anstrich ist zu erneuern, das System ist zu renovieren oder um aktuellen Vorgaben hinsichtlich der Energieeffizienz zu genügen aufzudoppeln, oder zu entfernen und durch aktuelle Systeme zu ersetzen. Auch beim Umbau von Gebäuden oder deren Rückbau und beim Ersatz der ursprünglichen WDVS durch aktuelle Systeme fallen EPS-Abfälle an. Der Umgang mit diesen Abfällen und eine Wiederverwendung bzw. möglichst effiziente Rückgewinnung von Rohstoffen werden auch medial intensiv diskutiert. Es ist davon auszugehen, dass die Antworten auf die Fragen nach der Wiederverwendung und der Rezyklierung des rückgebauten EPS oder der Beseitigung der WDVS-Abfälle einen wesentlichen Einfluss auf die Akzeptanz dieses Dämmstoffes – und damit von WDVS insgesamt – in der breiten Bevölkerung haben wird.

Betrachtet man die Volumina an EPS-Dämmstoff, die nach Beendigung der ursprünglichen Nutzung als Abfälle anfallen, werden konsequenterweise folgende Fragen zu beantworten sein:

- Was geschieht mit dem Dämmstoff nach der Nutzungsphase?
- Wird er einer weitergehenden Verwertung zugeführt?

Diese drängenden Fragen sind zu beantworten, da sie ein Hemmnis bezüglich der Akzeptanz von WDVS darstellen.

Die europäische Bauproduktenverordnung (BauPVO) [1] definiert sieben Basis-Anforderungen an Bauwerke. Die Basis-Anforderung Nummer 7 „Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen“ zielt darauf ab, „ein Bauwerk so zu entwerfen und zu errichten, dass die eingesetzten natürlichen Ressourcen nach

dem Rückbau wiederverwendet oder recycelt werden können“. Für die eingesetzten Baustoffe ist daher der Nachweis ihrer Wiederverwendbarkeit oder ihrer Rezyklierbarkeit zu führen. Hinzu kommt, dass in Artikel 11(2)b der europäischen Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL) [2] gefordert wird, dass „bis 2020 ... die Vorbereitung zur Wiederverwendung, des Recyclings und die sonstige stoffliche Verwertung (einschließlich der Verfüllung, bei der Abfälle als Ersatz für andere Materialien genutzt werden) von nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen — mit Ausnahme von in der Natur vorkommenden Materialien, die in Kategorie 17 05 04 des Europäischen Abfallkatalogs definiert sind — auf mindestens 70 Gewichtsprozent erhöht“ wird.

- Die o.g. Punkte gelten selbstverständlich nicht nur für den Dämmstoff als solchen, sondern für alle Komponenten eines WDVS. Die Betrachtungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden jedoch auf den EPS-Dämmstoff fokussiert, da
- EPS als Dämmstoff in ca. 80 % der WDVS Verwendung findet,
- Putze und Armierungsgitter keine WDVS-spezifischen Bauprodukte sind und
- die sonstigen Komponenten eines WDVS (Dübel, Anschlussleisten, etc.) nur ein verhältnismäßig geringes Volumen aufweisen.

1.2 Aufgabe und Zielsetzung

Der Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e. V. und der Industrieverband Hartschaum e. V. haben diese Fragestellungen aufgegriffen und unter Einbeziehung von Mitgliedsunternehmen sowie renommierten Forschungseinrichtungen ein Forschungsvorhaben initiiert, mit dem Ziel, ökologisch, ökonomisch und technisch sinnvolle Maßnahmen zur stofflichen und energetischen Wiederverwertung von Bestandteilen des Wärmedämm-Verbundsystems nach Rückbau und Trennung zu identifizieren. Das Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) vertritt im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ im Bereich Antragsforschung den Zuwendungsgeber.

Des Weiteren sollen mit dieser Studie Prognosen und Empfehlungen für

- eine Systemweiterentwicklung von WDVS auf der Basis von EPS,
- Rückbauverfahren und
- Verwertungsmöglichkeiten,

auch unter der Einbeziehung der Thematik zum Umgang mit dem Flamm-
schutzmittel Hexabromcyclododecan HBCD als POP-gelisteter Stoff (siehe 3.2.3) abgeleitet werden.

Die Ergebnisse des Vorhabens werden durch den Fachverband WDVS als technische Systeminformation „Rückbau, Recycling und Entsorgung von WDVS“ der breiten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

Zurzeit wird nach dem Rückbau bzw. der Modernisierung von mit WDVS gedämmten Gebäuden der rohstoffreiche Materialverbund aus Putzen, Geweben, Klebemörteln, Dübeln, Halteankern und Hartschaumstoff als Abfall in Müllverbrennungsanlagen energetisch verwertet. Das Potential des WDVS für einen Wertstoffkreislauf wird aktuell noch nicht genutzt. Ein wesentliches Hindernis stellt in der wirtschaftlichen Prozesskette die Trennung der einzelnen WDVS-Komponenten dar. Recycling-Verfahren zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus EPS-Hartschaumstoffen wie z. B. die selektive Extraktion haben noch nicht den Status von kommerziellen und großtechnischen Verfahren erreicht. Unter dem Gesichtspunkt sich stetig ändernder gesellschaftspolitischer und technischer sowie ökonomischer und ökologischer Voraussetzungen werden Verfahren der selektiven Extraktion am Beispiel des CreaSolv®-Verfahrens trotz der fehlenden Wirtschaftlichkeit in die Betrachtung mit einbezogen.

1.3 Antragsteller und Projektleitung

Die Antragsteller sind:

Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e. V., in Baden-Baden (Geschäftsführer: Herr Dr. Wolfgang Setzler).

Industrieverband Hartschaum e. V. IVH, in Heidelberg (Geschäftsführer: Herr Dr. Hartmut Schönell).

Die Projektleitung oblag dem Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e. V. (Herr Dr. Wolfgang Setzler).

1.4 Forschende Stellen

Die wissenschaftlichen Arbeiten wurden am Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP (Dipl.-Ing. Christoph Schwitalla) in Valley und am Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. FIW München (Dipl.-Ing. Wolfgang Albrecht) in Gräfelfing durchgeführt.

1.5 Projektbegleitender Ausschuss

Die Forschungsnehmer wurden durch einen projektbegleitenden Ausschuss beraten, dem folgende Mitglieder angehörten:

Herrn Dipl.-Ing. Claus Asam (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung BBSR, Zuwendungsgeber).

Herr Dr. Siegfried Kern (Industrieverband Hartschaum e. V. IVH).

Herr Dr. Jörg Vogelsang (BASF SE).

1.6 Projektablauf

Start der Studie war im Oktober 2012. Die erste Arbeitsbesprechung des projektbegleitenden Ausschusses fand am 12.11.2012 beim FIW München in Gräfelfing statt. Im Zeitraum von Oktober 2012 bis September 2014 fanden insgesamt 8 Arbeitstreffen statt. Bei jedem der Arbeitstreffen wurden Ergebnisse eines oder mehrerer Arbeitspakete vorgestellt und diskutiert. Die Schwerpunkte der einzelnen Treffen waren unter anderem:

- Europäische und nationale Regularien und Gesetze, die den Statuswechsel von WDVS als System von Bauprodukten hin zum Abfall begleiten
- Mengengerüste und Stoffströme für WDVS-Komponenten, hauptsächlich EPS-Dämmstoffe, als Produkt und als Abfall
- Verwertungs- und Recyclingverfahren für EPS-Dämmstoffe
- Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile von Rückbau und Trennverfahren
- Ergebnisse der eigenen praktischen Untersuchungen zum Rückbau von WDVS
- Prognosen und Empfehlungen

Die einzelnen Treffen der Arbeitsgruppe fanden beim FIW München in Gräfelfing, beim BBSR in Berlin und beim Fraunhofer IBP in Valley statt. Am 16. Juli 2013 fand im erweiterten Kreis die Besichtigung der CreaSolv® Technik-Anlage beim Fraunhofer IVV in Freising statt. Bei diesem Termin wurde dem Arbeitskreis das Verfahren der selektiven Extraktion von Polystyrol aus EPS-Dämmstoffen mit der Möglichkeit der Ausschleusung des Flammenschutzmittels HBCD als Alternative zur energetischen Verwertung von Herrn Dr. Mäurer und Herrn Dr. Schlummer vorgestellt. Die Demonstration der selektiven Extraktion erfolgte an rückgebauten EPS-Dämmstoffplatten aus den eigenen praktischen Untersuchungen des Fraunhofer IBP.

Der Rückbau eines mit WDVS gedämmten Gebäudes in der Praxis wurde am 23. April 2014 in Ludwigshafen von Herrn Dr. Kern und Herrn Schwitalla begleitet. Im Anschluss an diesen Termin fand am 24. April 2014 eine Besichtigung der EPS Produktion bei der Firma IsoBouw Dämmtechnik GmbH in Abstadt statt.

Die Studie ist mit der Veröffentlichung des Berichts abgeschlossen.

2 Methodik

Durch den Rückbau eines Gebäudes werden verbaute Produkte in der Regel zu Abfall. Von diesem Statuswechsel sind auch rückgebaute WDV's betroffen (Bild 1). Der Umgang mit Abfällen ist in Deutschland durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) geregelt. Regularien und Gesetze, die den Umgang mit EPS-Abfall festlegen, wurden im Rahmen der Studie recherchiert und im Kapitel 3.1 (Regulatorischer Rahmen) zusammengefasst. Ein wichtiges Augenmerk lag auf den Begriffsdefinitionen, die zur Abgrenzung von Produkt und Abfall dienen. Auf mögliche Änderungen, bezüglich der Einstufung aufgrund des Gefährlichkeitspotentials von einzelnen Komponenten wird hingewiesen.

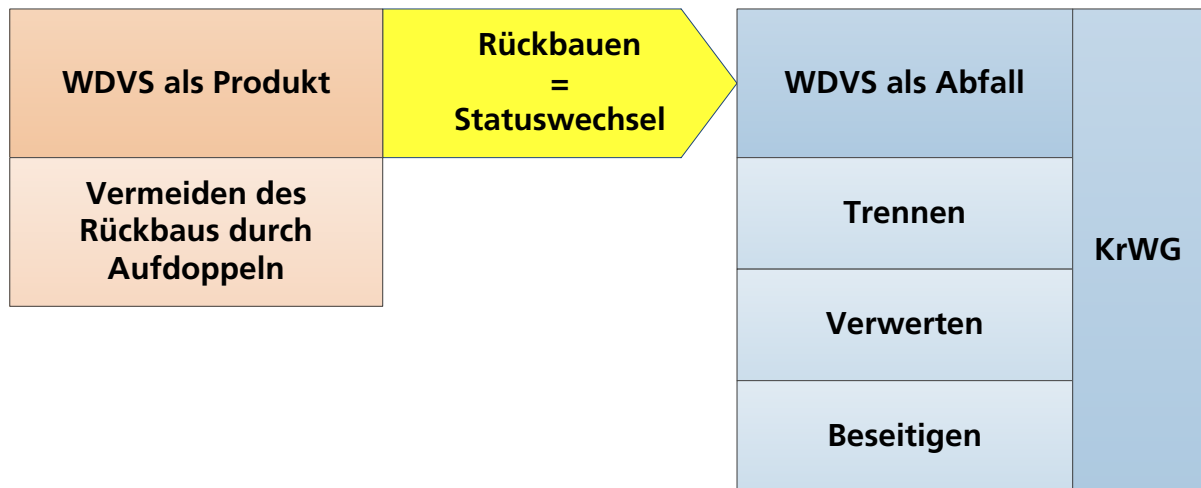


Bild 1:
Statuswechsel: vom Produkt zu Abfall.

Im Bild 2 sind die Hauptpunkte des Projekts graphisch aufbereitet. Die hoheitlichen Regularien bildeten gemeinsam mit den WDV's-Komponenten und deren Produktions- und Abfall-Massenströmen den Rahmen des Projekts, innerhalb dessen die Prozesskette vom Rückbau von WDV's-Komponenten über deren Trennung und Verwertung bis hin zum möglichen Produkt betrachtet wurde.



Bild 2:
Schematische Darstellung des Projektgerüsts.

Für die Ableitung von Empfehlungen wurde die Reihenfolge der einzelnen Verfahrensschritte innerhalb der Prozesskette umgestellt. Ausgehend von der Qualität des Endprodukts müssen die Anforderungen an das Verwertungsverfahren, die Qualität des Rückbaus und des Trennverfahrens definiert werden und zwar in der genannten Reihenfolge (siehe Bild 3). Je höher die Anforderungen an das Endprodukt, umso höher die Anforderungen an die einzelnen Verfahrensschritte.



Bild 3:
Abgeleitete Vorgehensweise innerhalb des Projekts.

Inwieweit die Komponenten rückgebauter WDVS wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden können oder ob diese in einer Müllverbrennungsanlage energetisch verwertet werden, ist von mehreren Faktoren abhängig:

- Das Vorhandensein geeigneter Rückbau- und Trennverfahren beeinflusst den Anfall an wiederverwertbaren WDVS-Komponenten (siehe 3.4, 3.5 und 4).
- Die Masse der anfallenden WDVS-Komponenten bestimmt ganz wesentlich, ob ein technisches Verfahren zur Wiederaufbereitung wirtschaftlich einsetzbar ist (siehe 3.3).
- Sind die mit der Wiederverwertung gewonnenen Produkte entsprechend den gesetzlichen Vorgaben und den langfristigen politischen Zielen überhaupt handel- und verwendbar (siehe 3.1)? Gibt es einen Markt für diese Produkte?

2.1 Regulatorischer Rahmen

Die nationalen und internationalen Regularien, die die möglichen Szenarien Weiterverwendung durch Aufdopplung, Wiederverwendung, sowie alle Arten der stofflichen und energetischen Verwertung betreffen, werden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf WDVS an ihrem Nutzungsende betrachtet. Dies betrifft den Übergang vom Produkt zum Abfall mit den begleitenden Prozessschritten, den selektiven oder teilselektiven Rückbau über die Selektier- und Klassierverfahren bis hin zur Verwertung. Hinzu kommen übergeordnete Schutzziele oder langfristige politische Ziele, die ebenfalls einen Einfluss auf die Behandlung von WDVS und/oder WDVS-Komponenten am Ende der Nutzungsphase nehmen können.

2.2 Mengengerüste und Datengrundlage

Die Studie stützt sich bezüglich des Abfallaufkommens im Baubereich auf Sekundärdaten des Statistischen Bundesamts DESTATIS [3] und der Firma Consultic [4]. Nachfragen und Interviews bei Unternehmen der Abfallwirtschaft in Bezug auf die Abfallquoten aus dem Bereich der WDVS erlauben keine Rückschlüsse auf die tatsächlich rückgebauten Mengen.

In dieser Studie wurden neben von der öffentlichen Hand erhobenen Daten (Sekundärdaten) in erster Linie Daten herangezogen, die von den beteiligten Verbänden (FV-WDVS und IVH) oder den Herstellern (EJOT Baubefestigungen GmbH, Oberschleißheim) zur Verfügung gestellt wurden. Daten, die von Firmen oder Verbänden zur Verfügung gestellt wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

Die Richtigkeit der recherchierten Abfalldaten wurde geprüft. Soweit vorhanden wurden mehrere Quellen miteinander verglichen. Abfalldaten und Produktionsdaten wurden gegeneinander gespiegelt. Fehlende Abfallmengen, wie zum Beispiel für die Rückbaumenge an WDVS, wurden aus den vorhandenen Produktionsdaten und Abfalldaten geschätzt. Aus den gesammelten Daten wurden Prognosen für zu erwartende Rückbauquoten abgeleitet. Die Prognosen beziehen sich sowohl auf EPS aus WDVS als auf EPS gesamt. Die identifizierten WDVS Abfallmengen haben einen Einfluss auf die Auswahl des Verwertungsverfahrens unter technischen, ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten.

Damit einzelne technische Prozessschritte wie Rückbauen, Trennen und Verwerten zu einer ökologisch und ökonomisch sinnvollen Prozesskette zusammengefügt werden können, müssen die zu erwartenden Massenströme bekannt sein. Im Rahmen der Studie wurden sowohl Abfalldaten als auch Produktionsdaten für die Bereiche EPS gesamt und EPS-WDVS bei Fachverbänden (FV-WDVS und IVH) abgefragt und recherchiert.

Ausgehend von bekannten und eingeführten Rückbauverfahren, wurden zusätzlich Entschichtungsverfahren, die in anderen Branchen wie z. B. der Lack- oder Holzindustrie zum Trennen von Materialverbünden zum Einsatz kommen, betrachtet.

Neben den eingeführten Verwertungsverfahren (werkstoffliche und energetische Verwertung von EPS) wurden auch Verfahren berücksichtigt, die noch nicht etabliert sind, von denen aber angenommen werden kann, dass sie vom Technikums- in den industriellen Produktionsmaßstab überführt werden können. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf Verfahren, die auch das Ausschleusen des Flammenschutzmittels Hexabromcyclododecan (HBCD) ermöglichen und eine Alternative zur energetischen Verwertung darstellen.

2.3 Eigene Untersuchungen zum Rückbau von WDVS

Die Studie umfasste u. a. die exemplarische Durchführung von praktischen Versuchen zum Rückbau von WDVS. Zur Anwendung kamen praxisübliche manuelle und maschinelle Rückbau-Verfahren. Ausgehend vom teilselektiven Rückbau von WDVS auf der Baustelle, bei dem der komplette Materialverbund vom Wandbildner gelöst wird, kamen auf dem Gelände des IBP selektive Verfahren zum Einsatz. Bei dieser Vorgehensweise werden die einzelnen Lagen des WDVS getrennt entfernt. Ergänzt wurden diese Untersuchungen durch die Anwendung von Entschichtungsmethoden aus den Bereichen der Holzwerkstoffbearbeitung, Lackierverfahren, etc. Die eigenen Untersuchungen sollten erste Anhaltspunkte liefern für

- mögliche Vorgehensweisen für den manuellen und maschinellen Rückbau von WDVS,
- den Zeitaufwand beim Rückbau von WDVS,
- das Vorgehen kommerzieller Anbieter beim Rückbau von WDVS auf der Baustelle,
- die Beschaffenheit des aus dem WDVS entstehenden Abbruchmaterials und
- die Identifizierung von potenziellen Problemen beim Rückbau und bei der Entschichtung.

2.4 Ableitung von Bewertungen und Empfehlungen

Ausgehend von den gesetzlichen Vorgaben, den verfügbaren Rückbau-, Trenn- und Verwertungsverfahren, den zu erwartenden Abfallmengen, sowie den langfristigen politischen Zielvorgaben, wurden Handlungsempfehlungen für den Umgang mit WDVS-Abfällen erarbeitet. Außerdem werden Maßnahmen zur Verlängerung der Nutzungsdauer von WDVS empfohlen.

Um dezidierte Empfehlung für mögliche Rückbau- und Verwertungsszenarien geben zu können, ist die Ermittlung der Mengengerüste bezogen auf die Produktionsmengen und die daraus zu erwartenden Abfallmengen unabdingbar. Das Hauptaugenmerk der Literatur- und Datenrecherche lag auf den Produktions- und Abfalldaten für EPS mit dem Anwendungsbereich WDVS. Die recherchierten Produktions- und Abfallmengen wurden herangezogen, um zukünftig zu erwartende Abfallquoten an EPS aus WDVS und EPS aus allen Bauanwendungen zu prognostizieren. Die abgeschätzten Mengen wurden mit den bislang erhobenen Daten (Verbandsangaben, Studien, Statistiken) verglichen.

Damit einzelne technische Prozessschritte wie Rückbauen, Trennen und Verwerten zu einer ökologisch und ökonomisch sinnvollen Prozesskette zusammengefügt werden können, wurde die Möglichkeit der Zusammenführung von EPS Abfällen aus unterschiedlichen Baugewerken geprüft.

3 Grundlagenermittlung

3.1 Regulatorischer Rahmen und übergeordnete politische Ziele

Auf der nationalen und der europäischen Agenda stehen eine Reihe politischer Ziele, u. a.

- Energieeinsparung und Verringerung des CO₂-Ausstosses,
- Ressourceneffizienz und Abfallvermeidung, sowie
- Umweltschutz.

Der Rückbau eines Gebäudes fällt in den Geltungsbereich einer Vielzahl von nationalen Gesetzen und Verordnungen. Tabelle 1 gibt eine Übersicht über die wesentlichen hoheitlichen Regelungen. Im Rahmen der Studie wurde hauptsächlich auf

- das Kreislaufwirtschaftsgesetz KrWG und
- die Abfallverzeichnisverordnung AVV

Bezug genommen. Ergänzend wurden die Bauproduktenverordnung (BauPVO), die Europäische Chemikalienverordnung REACH und im Hinblick auf das bislang verwendete Flammschutzmittel HBCD das Stockholmer Übereinkommen über persistente organische Schadstoffe (POP-Konvention) [5] betrachtet.

Tabelle 1:
Übersicht der wesentlichen nationalen hoheitlichen Regelungen [6].

BAURECHT	ABFALLRECHT	ARBEITSSICHERHEIT	SONSTIGE
Baugesetzbuch BauGB	Kreislaufwirtschaftsgesetz KrWG	Chemikaliengesetz ChemG	Bundes-Immissionsschutzgesetz BImSchG
Landesbauordnungen LBO	Deponieverordnung DepV	Arbeitsschutzgesetz ArbSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz BBodenSchG
	Abfallablagerungsverordnung AbfAbIV	Baustellenverordnung BaustellV	Wasserhaushaltsgesetz WHG
	Versatzverordnung VersatzV	Chemikalienverbotsverordnung ChemVerbotsV	Denkmalschutzgesetz DSchG
	Abfallverzeichnisverordnung AVV	Gefahrstoffverordnung GefStoffV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenver- ordnung BBodSchV
	Nachweisverordnung NachwV	Gewerbeordnung GewO	Grundwasserverordnung GrwV
	Gewerbeabfallverordnung GewAbfV	Arbeitsstättenverordnung ArbStättV	Oberflächengewässerverordnung OGewV
	Transportgenehmigungsverordnung TgV	Technische Regeln für Gefahrstoffe TRGS	
	Entsorgungsfachbetriebsverordnung EfbV	Technische Regeln für biologische Arbeitsstoffe TRBA	
	PCB/PCT Abfallverordnung PCBAbfallV	BG-Regeln BGR	
	Altholzverordnung AltholzV	Unfallverhütungsvorschriften UVV	

3.1.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Mit dem KrWG [7] wurde die EU-Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EG, AbfRRL) [2] in deutsches Recht umgesetzt und das bestehende deutsche Abfallrecht umfassend modernisiert. Ziel des Gesetzes ist eine nachhaltige Verbesserung des Umwelt- und Klimaschutzes sowie der Ressourceneffizienz in der Abfallwirtschaft durch Stärkung der Abfallvermeidung und des Recyclings von Abfällen.

Die zentralen Inhalte des Gesetzes sind:

- EU-rechtlich harmonisierte Begriffsbestimmungen (§ 3 KrWG)
- Regelungen zu den praxisrelevanten Fragen der Abgrenzung von Abfall und Nebenprodukt (§ 4 KrWG)
- Regelungen zum Ende der Abfalleigenschaft (§ 5 KrWG)
- die fünfstufige Abfallhierarchie (§ 6 KrWG) und ihre Umsetzung (§§ 6 bis 8 KrWG)
- Getrennthalten von Abfällen zur Verwertung, Vermischungsverbot (§ 9 KrWG)
- Regelungen zur Produktverantwortung (§§ 23 ff KrWG)

In § 3 KrWG sind die Begriffe Abfall, Verwertung, Recycling und Beseitigung wie folgt, definiert:

Abfälle im Sinne dieses Gesetzes sind alle Stoffe oder Gegenstände, derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Abfälle zur Verwertung sind Abfälle, die verwertet werden; Abfälle, die nicht verwertet werden, sind Abfälle zur Beseitigung [7].

Verwertung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verfahren, als dessen Hauptergebnis die Abfälle innerhalb der Anlage oder in der weiteren Wirtschaft einem sinnvollen Zweck zugeführt werden, indem sie entweder andere Materialien ersetzen, die sonst zur Erfüllung einer bestimmten Funktion verwendet worden wären, oder indem die Abfälle so vorbereitet werden, dass sie diese Funktion erfüllen. Anlage 2 enthält eine nicht abschließende Liste von Verwertungsverfahren [7].

Recycling im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden; es schließt die Aufbereitung organischer Materialien ein, nicht aber die energetische Verwertung und die Aufbereitung zu Materialien, die für die Verwendung als Brennstoff oder zur Verfüllung bestimmt sind [7].

Beseitigung im Sinne dieses Gesetzes ist jedes Verfahren, das keine Verwertung ist, auch wenn das Verfahren zur Nebenfolge hat, dass Stoffe oder Energie zurückgewonnen werden. Anlage 1 enthält eine nicht abschließende Liste von Beseitigungsverfahren [7].

„Kern des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist die **fünfstufige Abfallhierarchie** (§ 6 KrWG) und ihre Umsetzung im bisherigen Grundpflichtenmodell (§§ 6 bis 8 KrWG). Die neue Hierarchie legt die grundsätzliche Stufenfolge aus Abfallvermeidung, Wiederverwendung, Recycling und sonstiger, u. a. energetischer Verwertung von Abfällen und schließlich der Abfallbeseitigung fest. Vorrang hat die jeweils beste Option aus Sicht des Umweltschutzes. Dabei sind neben den ökologischen Auswirkungen auch technische, wirtschaftliche und soziale Folgen zu berücksichtigen. Die Kreislaufwirtschaft wird somit konsequent auf die Abfallvermeidung und das Recycling ausgerichtet, ohne etablierte ökologisch hochwertige Entsorgungsverfahren zu gefährden“ [8].

„Die Umsetzung der Hierarchie in den Stufen Vermeidung, Verwertung, Beseitigung ist bereits durch das Gesetz vorgegeben. Die Festlegung des Vorrangs einer Verwertungsart (Wiederverwendung, Recycling und sonstiger, u. a. energetischer Verwertung) gegenüber den Abfallerzeugern und -besitzern wird in erster Linie durch abfallspezifische Rechtsverordnungen erfolgen. Hierdurch kann für einzelne Abfallarten die jeweils beste Verwertungsoption vorgegeben werden. Die bestehenden Verordnungen werden derzeit am Maßstab der Hierarchie überprüft. Da nicht für alle relevanten Abfallarten zeitnah Verordnungen erlassen werden können, übernimmt das Kreislaufwirtschaftsgesetz das bereits im geltenden Recht festgelegte Heizwertkriterium von 11.000 kJ/kg als Auffang- und Übergangsregelung. Der bislang starre Heizwert wird jedoch flexibilisiert: So kann eine energetische Verwertung auch unterhalb des Heizwertes erfolgen, wenn sie im konkreten Fall den Schutz von Mensch und Umwelt im Vergleich zu den anderen Optionen am besten gewährleistet. Andererseits kann auch trotz Vorliegens des Heizwertes ein Recycling oder eine Wiederverwendung gefordert werden, wenn dies die bessere Verwertungsoption darstellt“ [8].

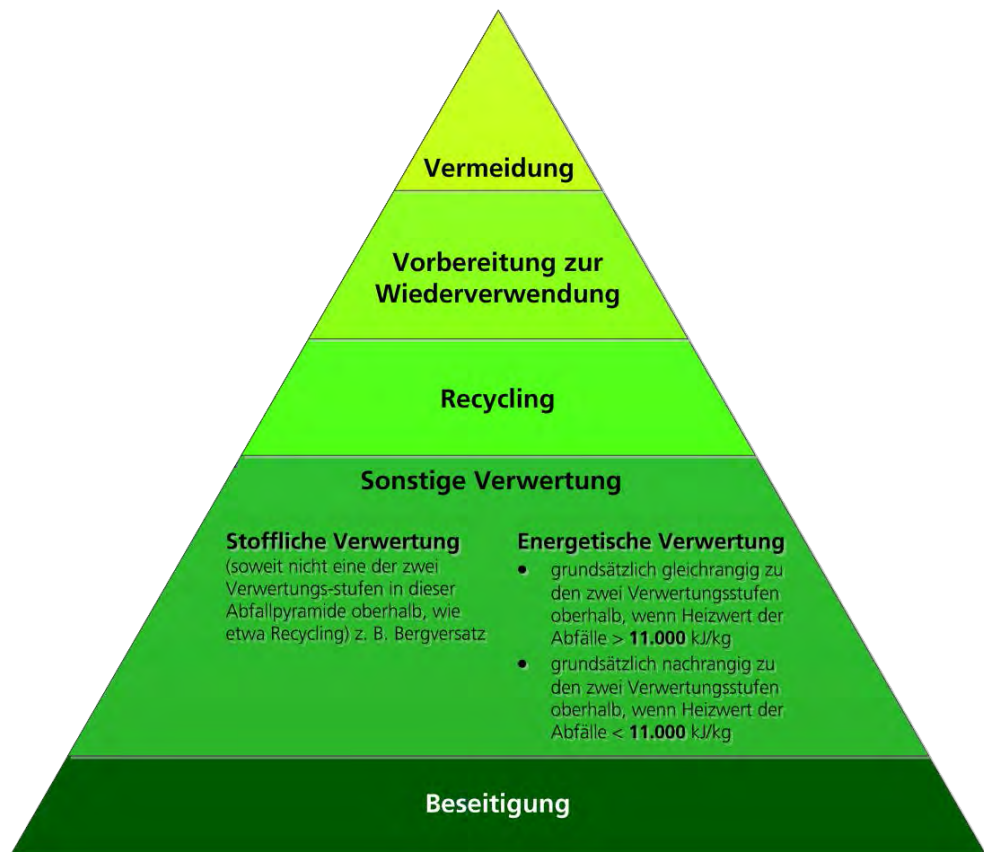


Bild 4:
Die fünfstufige Abfallhierarchie nach [9].

Die Abfallvermeidung am Ende der Nutzungsdauer eines WDVS lässt sich z. B. durch das Aufdoppeln eines bestehenden Systems mit einer weiteren Lage WDVS realisieren. Durch den obsoleten Rückbau fällt kein WDVS-Abfall an. Mit der Aufdopplung wird die oberste Stufe der fünfstufigen Abfallhierarchie, die Abfallvermeidung, umgesetzt. Ist ein Rückbau unumgänglich, bestehen für den WDVS-Abfall zwei Verwertungsmöglichkeiten, nämlich die energetische Verwertung in einem Müllheizkraftwerk (EPS-Abfälle übertreffen das Heizwert-Kriterium mit ca. 38.000 kJ/kg deutlich.) oder eine stoffliche Verwertung mittels eines geeigneten Verwertungsverfahrens. Dieses setzt in Ausnahmen die Trennung der WDVS-Komponenten vor der Verwertung voraus.

3.1.2 Abfallverzeichnisverordnung (AVV)

Die jeweilige Abfallart ist einer sechsstelligen Schlüsselnummer zugeordnet, die nach dem Europäischen Abfallkatalog als EAK-Abfallschlüssel bezeichnet wird. Die EAK-Abfallschlüssel sind seit 01.01.1999 gültig und ersetzen die bis dahin gültigen Abfallschlüsselnummern der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), die sogenannten LAGA-Abfallschlüsselnummern [10].

Die Abfälle werden nach einem sechsstelligen Code, der sich aus drei zweistelligen Codes zusammensetzt, herkunftsbezogen klassifiziert, wobei die Abfallherkunft von den Kapitelüberschriften hin zu den einzelnen Codes immer präziser beschrieben wird. Deshalb dürfen die im EAK aufgeführten Abfälle auch nicht unabhängig von ihrer jeweiligen Kapitelüberschrift betrachtet werden. Die numerische Kennzeichnung der zusammengehörigen Abfallkategorien ist nicht fortlaufend, sondern enthält Fehlstellen für die Fortschreibung des Katalogs.

Tabelle 2:
Zuordnung von Abfällen und Abfallschlüsseln.

Kategorie		Beispiel EAK Abfallschlüssel-Nr.	
Obergruppe	2-stellige-Nr.	17	Bau- und Abbruchabfälle
Gruppe	4-stellige-Nr.	17 01 17 06	Beton, Ziegel, Fliesen, Keramik usw. Dämmmaterialien und asbesthaltige Dämmstoffe
Abfallart	6-stellige-Nr.	17 01 01 17 06 04	Beton Dämmmaterial mit Ausnahme desjenigen, das unter 17 06 01* (Asbest) und 17 06 03* (gefährliche Stoffe) fällt

Die Herkunft des Abfalls ist grundlegend bei der Zuordnung von Abfällen zu Schlüsselnummern des EAK [11].

Abfälle aus EPS-Dämmstoff fallen zurzeit unter die EAK-Abfallschlüsselnummer 17 06 04 Dämmmaterialien.

In der folgenden Tabelle 3 sind die wesentlichen Bestandteile eines Wärmedämmverbundsystems den einzelnen EAK-Abfallschlüsselnummern zugeordnet.

Tabelle 3:
Mögliche Zuordnung von WDVS-Bestandteilen zu EAK-Schlüsselnummern.

WDVS-KOMPONENTE	ABFALLSCHLÜSSEL	ABFALLBEZEICHNUNG
Putz/Kleber/Farben/Haftvermittler	17 01 07	Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 01 06* (gefährliche Stoffe) fallen
Putz/Kleber/Farben/Haftvermittler/Dämm-materialreste	17 09 04	gemischte Bau- und Abbruchabfälle mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 09 01* (Quecksilber), 17 09 02* (PCB) und 17 09 03* (gefährliche Stoffe) fallen
Armierungsmörtel	17 01 01	Beton
Armierungsgewebe	10 11 03 17 02 03 17 04 05	Glasfaserabfall Kunststoff Eisen und Stahl
Dämmmaterial	17 06 04	Dämmmaterial mit Ausnahme desjenigen, das unter 17 06 01* (Asbest) und 17 06 03* (gefährliche Stoffe) fällt
Dübel	17 02 03	Kunststoff
Schienen	17 02 03	Kunststoff
Schrauben/Nägeln	17 04 05	Eisen und Stahl

3.1.3 Bauproduktenverordnung (BauPVO)

Die Verordnung (EU) Nr. 305/2011 des europäischen Parlaments und des Rates vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates [1] löste am 1. Juli 2013 die seit 1989 geltende Bauprodukte-Richtlinie (BPR) [12] vollständig ab. Harmonisierte technische Spezifikationen sollen zu EU-weit einheitlichen Produkt- und Prüfstandards und damit harmonisierten Leistungsangaben bei Bauprodukten führen. Die BauPVO regelt die Bedingungen für das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von harmonisierten Bauprodukten auf dem Markt und legt Anforderungen an die Leistungserklärung und die CE-Kennzeichnung fest. Mitgliedstaaten dürfen die Bereitstellung CE-gekennzeichneter Bauprodukte weder untersagen noch behindern, wohl aber jede Verwendung, die nicht den nationalen Anwendungsregeln im Baubereich entspricht. Damit sollen die übergeordneten Ziele, der freie Warenverkehr von Bauprodukten und der Abbau technischer Handelshemmnisse im EU-Wirtschaftsraum, erreicht werden.

Die Verordnung legt Grundanforderungen an Bauwerke fest, die die Basis für die Ausarbeitung von harmonisierten technischen Spezifikationen für Bauprodukte bilden. Die sieben Grundanforderungen lauten:

1. Mechanische Festigkeit und Standsicherheit
2. Brandschutz
3. Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz
4. Sicherheit und Barrierefreiheit bei der Nutzung
5. Schallschutz
6. Energieeinsparung und Wärmeschutz
7. Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen

Im Vergleich zur aufgehobenen Bauproduktenrichtlinie erfuhr die Grundanforderung Nr. 3 eine wesentliche Erweiterung. Laut BauPVO ist nun der gesamte Lebenszyklus des Bauwerks zu betrachten. Zu berücksichtigen sind hierbei nun u. a. auch die Freisetzung gefährlicher Stoffe in das Trinkwasser und die Freisetzung klimarelevanter Stoffe (z. B. Treibhausgase). Die Grundanforderung Nr. 7 wurde neu aufgenommen. Sie zielt darauf ab, dass ein Bauwerk so zu entwerfen und zu errichten ist, dass die eingesetzten natürlichen Ressourcen nach dem Rückbau wiederverwendet oder recycelt werden können.

3.1.4 Europäische Chemikalienverordnung REACH

Gemäß der Europäischen Chemikalienverordnung REACH [13] müssen Hersteller, Importeure und nachgeschaltete Anwender ihre Chemikalien registrieren. Sie sind für deren sichere Verwendung selbst verantwortlich. Die Registrierungsunterlagen werden von den Behörden nur stichprobenartig inhaltlich überprüft. Ausgewählte Stoffe werden von den Behörden bewertet und ggf. einer Regelung zugeführt. Besonders besorgniserregende Stoffe kommen in das Zulassungsverfahren. Als weitere Regulierungsmöglichkeit sieht REACH das Instrument der Beschränkung vor. Schließlich enthält REACH Bestimmungen zur Informationsweitergabe innerhalb der Lieferkette und Auskunftsrechte für Verbraucher.

3.1.5 Stockholmer Übereinkommen (POP-Konvention)

In der EU wird das Stockholmer Übereinkommen [5] durch die Verordnung (EG) Nr. 850/2004 [14] umgesetzt. Diese Verordnung enthält Verbote bzw. Beschränkungen für das Inverkehrbringen und Verwenden von persistenten organischen Schadstoffen, so genannte POPs. Im Stockholmer Übereinkommen formulierte Anforderungen zur unschädlichen Vernichtung von POP-Stoffen müssen innerhalb des Basel-Übereinkommens umgesetzt werden.

Danach müssen Abfälle so verwertet oder beseitigt werden, dass die in ihnen enthaltenen Schadstoffe zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden. Vom generellen Zerstörungsgebot gibt es zwei Ausnahmen: Zum einen können POP-haltige Abfälle, deren POP-Gehalt einen unteren Grenzwert nicht überschreiten, nach sonstigem EU-Recht entsorgt werden. Zum anderen können die Abfälle, die in Anhang V des Stockholmer Übereinkommens gelistet sind, auch bei Überschreitung der unteren Grenzwerte unter Tage im Salinar, in Festgestein oder auf einer oberirdischen Deponie für gefährliche Abfälle nach vorheriger Verfestigung bzw. teilweiser Stabilisierung entsorgt werden.

3.1.6 Ersatzbaustoffverordnung (Entwurf)

Die Ersatzbaustoffverordnung ist eine geplante Rechtsverordnung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Sie ist Teil der geplanten Mantelverordnung [15] zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen und das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser und an den Einbau von Ersatzbaustoffen sowie für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material (Mantelverordnung Grundwasser, Ersatzbaustoffe, Deponieverordnung, Bodenschutz). Derzeit existiert die Verordnung als Arbeitsentwurf mit Stand 31. Oktober 2012. Gegenstand der Verordnung ist die Regelung mineralischer Ersatzbaustoffe, also „anstelle von Primärrohstoffen verwendete Baustoffe aus industriellen Herstellungsprozessen oder aus Aufbereitungs-/ Behandlungsanlagen (Abfälle, Produkte) wie z. B. Recyclingbaustoffe (Bauschutt), Bodenmaterial, Schlacken, Aschen, Gleisschotter.“

3.2 Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS)

Definition von WDVS

„Ein Wärmedämm-Verbundsystem stellt einen Multikomponentenbausatz dar, in dem baustoffchemisch sehr unterschiedliche Systemkomponenten kombiniert sind. Zudem impliziert der Begriff, dass die Komponenten des Systems zusammengehören und einen festen Verbund untereinander und mit der Außenwand bilden“ [16].

Nach ETAG 004 [17] wird WDVS wie folgt definiert:

„Wärmedämm-Verbundsysteme (WDVS) [...] werden als außenseitige Wärmedämmung im Neubau sowie – in der Praxis mit höherem Anteil – zur energetischen Sanierung von Gebäudewänden verwendet. Die Wände bestehen im Allgemeinen aus Mauerwerk (Ziegeln, Blöcken, Steinen ...) oder Beton (Baustellenbeton oder vorgefertigte Platten). Die Systeme bestehen aus einem vorgefertigten Wärmedämmstoff, der auf eine Wand geklebt oder mit Hilfe von Dübeln, Profilen, Spezialteilen usw. mechanisch befestigt wird, oder aus einer Kombination von Kleber und mechanischen Befestigungen. Der Wärmedämmstoff ist mit einem Putz versehen, der aus einer oder mehreren (auf der Baustelle aufgetragenen) Schichten besteht und eine Bewehrung enthält. Der Putz wird direkt auf die Dämmplatten ohne Luftzwischenraum oder Trennschicht aufgebracht. Systeme mit abschließenden Bekleidungen wie z. B. Riemchen

oder Fliesen sind möglich. Die Systeme schließen besondere Zubehörteile (z. B. Sockelprofile, Kantenprofile...) für den Anschluss an angrenzende Bauteile (Öffnungen, Ecken, Brüstungen usw. ...) mit ein“.

Laut DIBt sind Wärmedämm-Verbundsysteme Bausätze, „im Allgemeinen bestehend aus Dämmstoffplatten, die mit Klebemörtel am Untergrund angeklebt und ggf. zusätzlich mit mechanischen Befestigungsmitteln (Dübel, Profile u. a.) befestigt werden, bewehrtem Unterputz und einer dekorativen Schlusschicht“. Die Schlusschicht kann dabei aus Putz oder einer keramischen Verkleidung bestehen. Darüber hinaus gibt es Dämmverbundelemente aus organischen oder anorganischen Baustoffen, unter denen man „werkseitig hergestellte wärmedämmende Bauteile“ versteht, „die als Wetterschutz auf der tragenden Wand außenseitig befestigt werden“. In allgemein bauaufsichtlich zugelassene Wärmedämm-Verbundsysteme dürfen unter „bestimmten Bedingungen“ verschiedene Dämmstoffe (genormt und nicht genormt) eingebaut werden [18].

Aufbau

Ein Wärmedämm-Verbundsystem besteht aus mehreren Komponenten. Der prinzipielle Aufbau eines WDVS inklusive der Gebäudeaußenwand ist wie folgt:

- Gebäudeaußenwand
- Kleber
- Wärmedämmstoff
- Dübel
- Unterputz
- Glasfasergewebe als Armierung eingebettet in Unterputz
- Schlussbeschichtung: Oberputz, ggf. mit Zwischenbeschichtung und/oder Dekorbeschichtung
- Zubehör, z. B. Sockelprofile, Anputzleisten, Eckprofile, Dehnfugenprofile

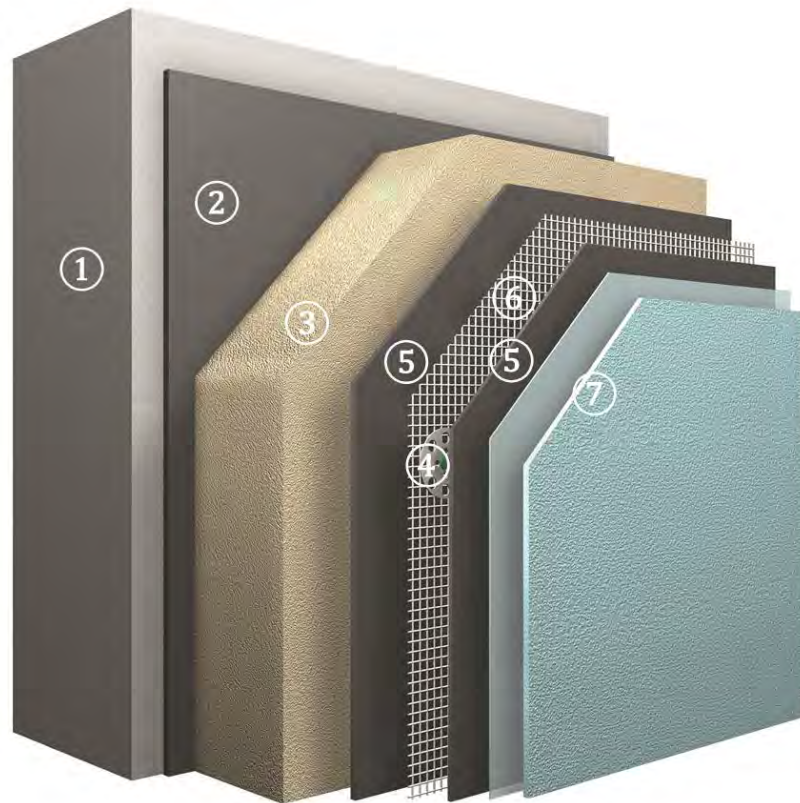


Bild 5:
Schematischer Aufbau eines typischen Wärmedämm-Verbundsystems inklusive Gebäudeaußenwand (1), Kleber (2), Wärmedämmstoff (3), Dübel (4), Unterputz (5), Glasfasergewebe (6) und Schlussbeschichtung (7) nach FV-WDVS.

Die Fixierung des WDVS auf dem Untergrund kann entweder ausschließlich durch Kleben oder zusätzlich mit Dübeln, Schienen oder Profilbefestigungen, sowie mit anderen bauaufsichtlich zugelassenen Befestigungsmitteln erfolgen [19] (Tabelle 4).

Tabelle 4:
Mögliche Putz/Dämmstoff-Kombinationen für WDVS mit Schlussbeschichtungen aus Putz oder Anstrich [16].

Putzsystem		Dämmstoff	Befestigung
Oberputz	Unterputz		
Kunstharzputz	Mineralisch, vergütet	Polystyrol-Hartschaum	Geklebt, geklebt und gedübelt, auf Schiene
Silikonharzputz		Mineralwolle	Geklebt, geklebt und gedübelt
Mineralischer Putz		Minerallamellen	Geklebt, geklebt und gedübelt
Mineralischer vergüteter Putz		Mineralschaum	
Dispersionssilikatputz			Geklebt, geklebt und gedübelt
Kunstharzputz	Dispersionsgebunden und dispersionsgebunden mit Zementzusatz	Polystyrol-Hartschaum	Geklebt, geklebt und gedübelt
Silikonharzputz			
Flachverblender			

Als Dämmstoff überwiegt EPS-Hartschaum mit einem Marktanteil von ca. 80 % [20]. Auf den Dämmstoff wird eine Armierung bestehend aus Armierungsmörtel mit eingebettetem Gittergewebe aufgebracht. Die Schlussbeschichtung kann aus mineralisch oder organisch gebundenen Deckputzen bestehen. Anstelle der Putzbeschichtung kann auch eine Verkleidung mit Keramik, Klinker, Natursteinen oder anderen Fassadenelementen angebracht werden [19]. Im Bild 6 ist die Kombinationsvielfalt von WDVS dargestellt.

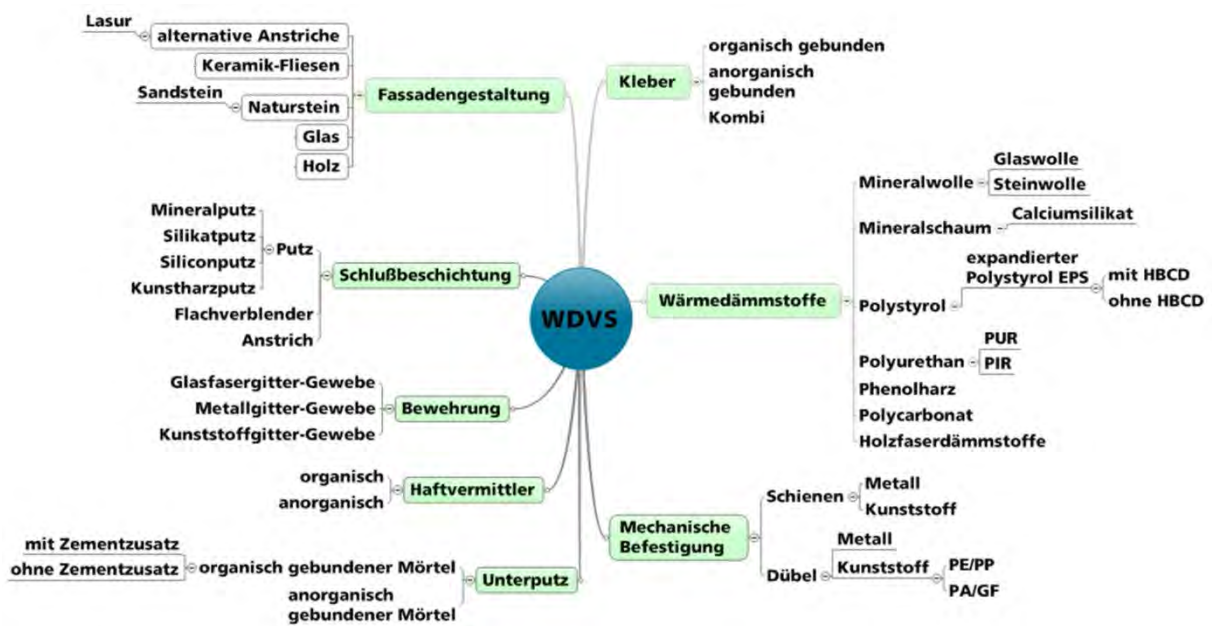


Bild 6:
Die Vielfalt der WDVS und ihre Kombinationsmöglichkeiten.

Entwicklung

Anfangs wurde aus Blöcken geschnittenes, weißes EPS, mit einer Rohdichte von ca. 20 kg/m^3 verwendet. Im Laufe der Zeit entwickelten sich die Dämmstoffe aus expandiertem Polystyrol (EPS) und die Putzsysteme weiter. 1961 wurde die Gütegemeinschaft Hartschaum gegründet, um eine gleichbleibende Qualität der EPS-Platten zu sichern. Etwa 1970 etablierte sich als anerkannte Fassadenqualität der Typ PS15SE mit einer Rohdichte von 15 kg/m^3 und einer Wärmeleitfähigkeitsgruppe von $0,040 \text{ W/(m} \times \text{K)}$. Andere Qualitäten mit höherer Rohdichte und niedriger Wärmeleitfähigkeit blieben vorerst die Ausnahme (z. B. Wärmeleitfähigkeitsgruppe 035 mit ca. 25 kg/m^3 Rohdichte). Im Laufe der Jahre stieg die mittlere Dämmschichtdicke an. Ab ca. 1995 kam eine neue Generation von grauen, infrarotabsorbierenden EPS-Dämmplatten auf den Markt. Diese Dämmstoffe erreichen bei einer Rohdichte von 15 kg/m^3 die Wärmeleitfähigkeitsgruppe 035.

Mit Einführung der europäischen Norm für EPS-Dämmstoffe EN 13163:2002 [21], wurden die bis dahin in Deutschland üblichen $5 \text{ mW/(m} \times \text{K)}$ -Stufen aufgehoben und die $1 \text{ mW/(m} \times \text{K)}$ -Stufen eingeführt. Das ermöglichte bei entsprechend höherer Rohdichte eine Absenkung der Bemessungswerte der Wärmeleitfähigkeit [22] auf den Wert von $0,032 \text{ W/(m} \times \text{K)}$ und später auf $0,031 \text{ W/(m} \times \text{K)}$.

Grundsätzlich sind auch andere Dämmstoffe für WDVS geeignet. Wegen des Preis-Leistungsverhältnisses, der mechanischen Eigenschaften und der einfachen Verarbeitbarkeit haben EPS-Dämmstoffe seit Jahren einen Marktanteil von ca. 80 % bei WDVS-Systemen. Weitere nennenswerte Marktanteile am WDVS-Markt besitzen auch Mineralwolle-Dämmstoffe mit der Klasse A1 (nicht brenn-

bar nach DIN EN 13501 [23]) und den Wärmeleitfähigkeitsstufen 0,035; 0,036; 0,040 und 0,041 W/(m × K). Des Weiteren werden auch XPS-Dämmstoffe aus extrudiertem Polystyrol (XPS), Polyurethan (PUR), Phenolharz (PF), Holzfaser (WF) und mineralische Schäume in WDVS eingesetzt.

Lebensdauer

Zur Untersuchung des Langzeitverhaltens von WDVS wurden von 1975 bis 2004 eine Vielzahl von Objekten durch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik regelmäßig optisch begutachtet und bezüglich ihres Alterungsverhaltens bewertet. Eine der Kernaussagen lautet: „Wartungsaufwand und Wartungshäufigkeit bei WDVS entsprechen den von konventionellen Wandbildnern mit Putz. Dies gilt auch für die Dauerhaftigkeit insgesamt.“ Hinsichtlich der Renovierungshäufigkeit ergab die Studie eine mittlere Lebensdauer von 20 Jahren [24] [25] [26]. Dieses Ergebnis bestätigt eine von Arlt [27] mit bis zu 60 Jahren prognostizierte Gesamtlebensdauer eines WDVS und zeigt, dass auch die von der „Leitlinie für Europäische Technische Zulassung für Außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme mit Putzschicht“ avisierte Mindestlebensdauer von 25 Jahren unter Erfüllung der gestellten technischen Anforderungen bei entsprechender Pflege leicht erreicht werden kann [28].

1957 wurde das erste Wärmedämmverbundsystem aus EPS an einem Gebäude in Berlin-Dahlem angebracht und erfolgreich erprobt [29]. Seit ca. 1960 werden Gebäude mit WDVS auf EPS-Basis energetisch ertüchtigt. Die Dicke des verwendeten EPS-Dämmstoffs lag im Mittel bei 60 mm. Bis etwa Ende der 1980er Jahre wurden auf diese Weise rund 150 Mio. m² Fassadenfläche gedämmt. Aufgrund der geringen Dämmstoffstärke entsprechen diese Systeme in vielen Fällen nicht mehr den heutigen energetischen Anforderungen an Wohngebäude (EnEV) [30]. Aufgrund des Alters ergibt sich in vielen Fällen sowohl aus energetischer als auch aus optischer Sicht die Notwendigkeit einer Überarbeitung dieser Systeme. Neben der Entfernung des Altsystems und der Montage eines aktuellen WDVS besteht mit der Aufdopplung eine weitere Möglichkeit zur Sanierung wärmegedämmter Fassaden. Bei der Aufdopplung wird auf das bestehende WDVS ein weiteres komplettes System aufgebracht. Die Prinzipskizze eines aufgedoppelten WDVS ist im Bild 7 dargestellt.

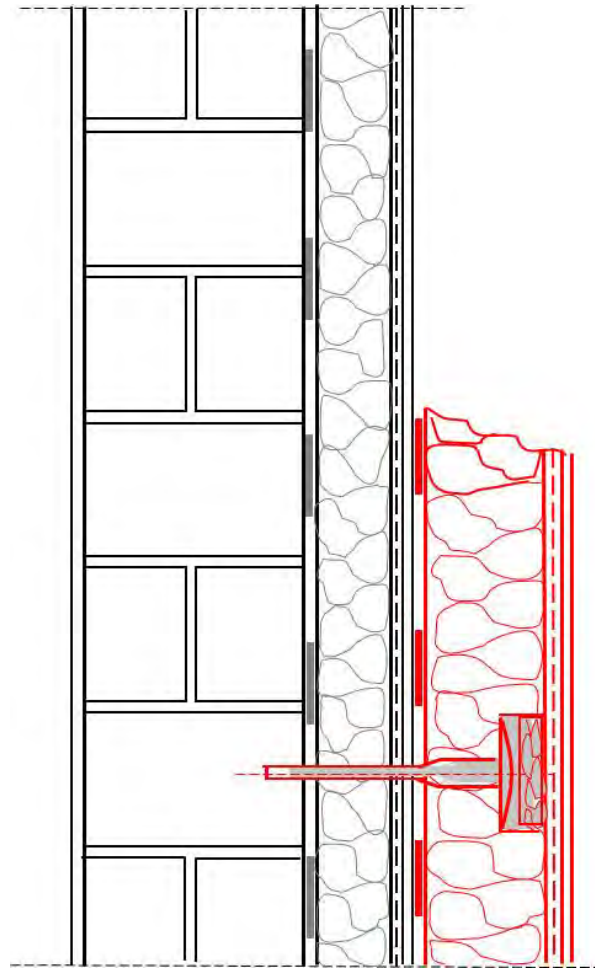


Bild 7:
Prinzipskizze für die Aufdopplung von WDVS, d. h. das Aufbringen einer zweiten Lage WDVS (rot) auf ein bestehendes WDVS nach FV-WDVS.

3.2.1 Polystyrol

Nach den Polyolefinen und Polyvinylchlorid ist Polystyrol der drittwichtigste Kunststoff. Seine Erfolgsgeschichte beginnt im Jahr 1839. Der Berliner Apotheker Eduard Simon gewann aus dem Baumharz des Storaxbaums eine ölige Substanz, der er den Namen Styrol gab [31]. Als erste befassten sich im Jahr 1845 John Blyth und August Wilhelm Hofmann mit der Polymerisation von Styrol [32]. Nachdem Hermann Staudinger die wissenschaftlichen Grundlagen der makromolekularen Chemie (Polymerchemie) geschaffen hatte, begann im Jahr 1930 die industrielle Polymerisation von Polystyrol bei der I. G. Farbenindustrie AG (kurz IG Farben) im Werk Ludwigshafen. Ausgangspunkt für das großtechnische Verfahren war eine im Jahr 1868 durch Bertholt beobachtete Dehydrierung von Ethylbenzol zu Styrol.

Ausgangspunkt für die großtechnische Polystyrolsynthese ist die Dehydrierung von Ethylbenzol zu Styrol [31]. Ethylbenzol wird aus den erdölbasierten Chemikalien Benzol und Ethylen in Gegenwart von Katalysatoren wie z. B. Aluminiumchlorid gewonnen (siehe Bild 8 und Bild 9).

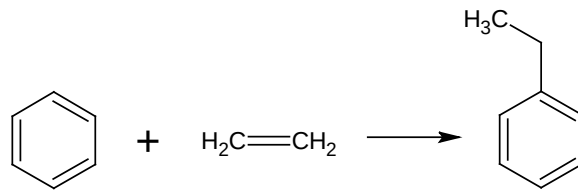


Bild 8:
Herstellung von Ethylbenzol aus Benzol und Ethylen.

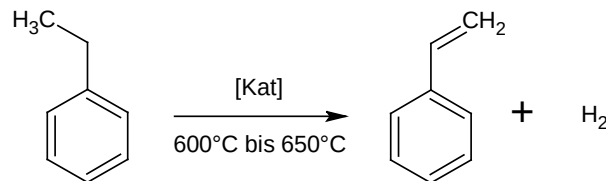


Bild 9:
Katalytische Dehydrierung von Ethylbenzol zu Styrol.

Polystyrol wurde großtechnisch erstmals 1931 bei der IG Farben in Ludwigshafen und etwas später bei der DOW Chemical Company hergestellt. Extrudiertes Polystyrol (XPS) wurde erstmals 1941 hergestellt.

Die Markteinführung von EPS (expandiertem Polystyrol-Hartschaum) erfolgte in den 1950 Jahren. Die größten Märkte liegen im Verpackungs- und Dämmstoffbereich [33]. 1957 wurde das erste Wärmedämmverbundsystem aus EPS an einem Gebäude in Berlin-Dahlem angebracht und erfolgreich erprobt.

3.2.2 Herstellung von EPS und XPS

Als EPS werden im Allgemeinen alle schäumbaren (expandierbaren) Homo- und Copolymere des Styrols zusammengefasst. Laut Maul [34] unterteilt man EPS in Partikelschaumstoffe, extrudierte Schaumstoffe und Integralschaumstoffe. Sie werden meist aus vorgefertigtem Polystyrol unter Verwendung von Treibmitteln hergestellt. Als Treibmittel finden niedrig siedende Kohlenwasserstoffe (z. B. Pentan) oder sich unter Gasentwicklung zersetzende Chemikalien wie z. B. Azo-Verbindungen Verwendung.

Partikelschaumstoffe ist Oberbegriff für alle Schaumstoffe, deren Herstellung in 2 Stufen erfolgt: In der ersten Stufe erzeugte vorgeschäumte, treibmittelhaltige Partikel werden in der zweiten Stufe in geschlossenen Formen unter Temperatureinwirkung (Wasserdampf, 120 °C) aufgeschäumt und verschweißen dabei zu einem kompakten Schaumstoffkörper. In Bild 10 sind die einzelnen Produktionsschritte vom Vorschäumen über Blockschaumherstellung bis zur Konfektionierung und Rückführung des Zuschnitts in den Herstellungsprozess abgebildet.



Bild 10:

Herstellung einer Hartschaumplatte (Fa. isoBouw, Werk Abstatt) von links nach rechts: Vorschäumen, Blockschaumherstellung, Konfektionierung und Rückführung des Zuschnitts.

Extrudierter Polystyrolschaumstoff XPS (auch: Extruderschaumstoff) ist ein geschlossenzelliger harter Dämmstoff. Die Herstellung erfolgt auf einer Extrusionsanlage in Form eines kontinuierlichen Schaumstoffstrangs. Das Polystyrol-Granulat wird unter Zugabe von Treibmitteln wie Kohlendioxid oder teilhalogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffen in einem Extruder aufgeschmolzen. Über eine Breitschlitzdüse wird das Extrudat ausgetragen. Nach dem Passieren einer Kühlzone wird der Schaumstoffstrang zu Platten konfektioniert. Der Schaumstoff hat eine geschlossene Zellenstruktur. XPS zeichnet sich durch äußerst geringe Wasseraufnahme und hohe Druckfestigkeit aus. Dadurch ist XPS hoch mechanisch belastbar und unempfindlich gegen Feuchtigkeit. Aufgrund dieser Eigenschaften findet XPS seinen Einsatz als Perimeterdämmung.

Weiterführende Informationen zu den Dämmstoffen EPS und XPS finden sich im ökologischen Baustoffinformationssystem WECOBIS des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit [35].

3.2.3 Flammenschutzmittel

Damit Kunststoffe gegen Flammen widerstandsfähig sind, werden ihnen bereits bei der Herstellung Flammenschutzmittel hinzugegeben. Das in geschäumtem Polystyrol verwendete Flammenschutzmittel Hexabromcyclododecan und das neue Flammenschutzmittel Polymer FR sind Additive. Diese Additive sind auf den jeweiligen Kunststoff abgestimmt, damit deren Herstellprozess (Polymerisation) und deren Funktionalität, wie z. B. optische, mechanische und wärmeschutztechnische Eigenschaften nicht negativ beeinflusst werden.

Hexabromcyclododecan (HBCD)

Wie viele Kunststoffe ist auch Polystyrol brennbar. PS-Schaumstoff ohne Flammenschutzmittel erfüllt die Forderungen der Musterbauordnung [36] bzw. Landesbauordnungen [37] hinsichtlich des Brandverhaltens nicht. Daher muss das Material für Bauanwendungen mit geeigneten Flammenschutzmitteln ausgestattet werden. Das hierfür am weitesten verbreitete Flammenschutzmittel war Hexabromcyclododecan (HBCD). HBCD war aufgrund seiner Effizienz seit mehreren Jahrzehnten das bevorzugte Flammenschutzmittel für EPS. Typischerweise lag der HBCD-Anteil – je nach Dämmstofftyp - zwischen 0,7 (EPS) und 3 % (XPS). HBCD (Bild 11) wurde überwiegend in Dämmstoffen (EPS und XPS), schwerentflammaren Textilien und seltener in Gehäusekunststoffen für elektronische Geräte eingesetzt [38].

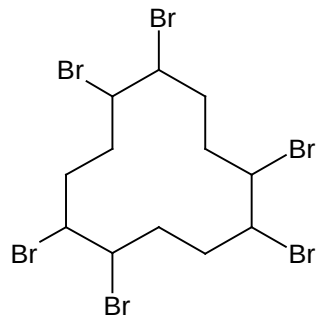


Bild 11:
Struktur von Hexabromcyclododecan HBCD.

Im Jahr 2008 wurden im Final-Report zur Risikobewertung [39] die PBT-Eigenschaften (**p** - persistent, **b** - bioakkumulierend, **t** - toxisch) von HBCD identifiziert. Gemäß Artikel 57 d) der REACH-Verordnung wurde HBCD ausschließlich aufgrund dieser PBT-Eigenschaft in den Annex XIV der Verordnung als „besonders besorgniserregender Stoff“ im Februar 2011 aufgenommen. Als Ablaufdatum für die Verwendung von HBCD wurde der 21.08.2015 festgelegt.

Die Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (Stockholmer Übereinkommen über persistente organische Schadstoffe – POP-Konvention) hat im Mai 2013 HBCD in die Liste der Chemikalien mit POP-Eigenschaften aufgenommen. Formal tritt damit ein weltweites Verwendungsverbot für HBCD am 26.11.2014 in Kraft. Die Europäische Kommission wird ein opt out aussprechen, das bis zum Ablauftermin nach REACH gelten wird.

Viele EPS-Schaumstoffhersteller so z. B. die Mitglieder des Industrieverbandes Hartschaum e. V., haben bereits auf Rohstoffe mit dem neuen Flammschutzmittel Polymer-FR umgestellt. Die Umstellung soll bis Ende 2014 und somit nahezu ein Jahr vor dem Eintreten des Verwendungsverbots abgeschlossen sein.

Polymer-FR

Aufgrund des bevorstehenden Verwendungsverbots für HBCD wurde ein neues bromhaltiges Flammenschutzmittel für Polystyrol entwickelt. Bei dem Flammschutzmittel Polymer FR handelt es sich um ein bromiertes Copolymer aus Styrol und Butadien (siehe Strukturformel im Bild 12). Die CAS-Nr. lautet 1195978-93-8.

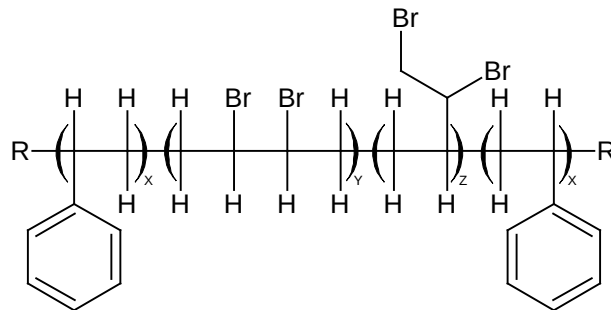


Bild 12:
Strukturformel des Flammschutzmittels FR-122P nach [40].

3.3 Mengengerüste

Grundlagen für die Prognose der zu erwartenden Rückbauquoten und des damit verbundenen Abfallaufkommens sind in erster Linie bereits bekannte Produktions- und Abfallmengen.

3.3.1 Produktionsmengen an Kunststoffen in Deutschland

Die Verarbeitungsmenge für Kunststoffwerkstoffe betrug in Deutschland im Jahr 2011 ca. 11.860 kt [4]. Im Baubereich wurden davon 2.780 kt verarbeitet. Hier dominiert PVC mit ca. 40 %, das entspricht 1.112 kt. Wesentliche Einsatzfelder sind hierbei Kunststoffprofile und -rohre. Darüber hinaus spielen PUR und EPS/XPS, die vornehmlich zur Dämmung, im Rahmen von gebäudespezifischen Energiesparmaßnahmen eingesetzt werden, eine immer wichtigere Rolle. Auf den Sektor EPS/XPS entfielen 271 kt, davon fanden 64 kt ihre Verwendung als EPS-Dämmstoffe im WDVS (Bild 13).

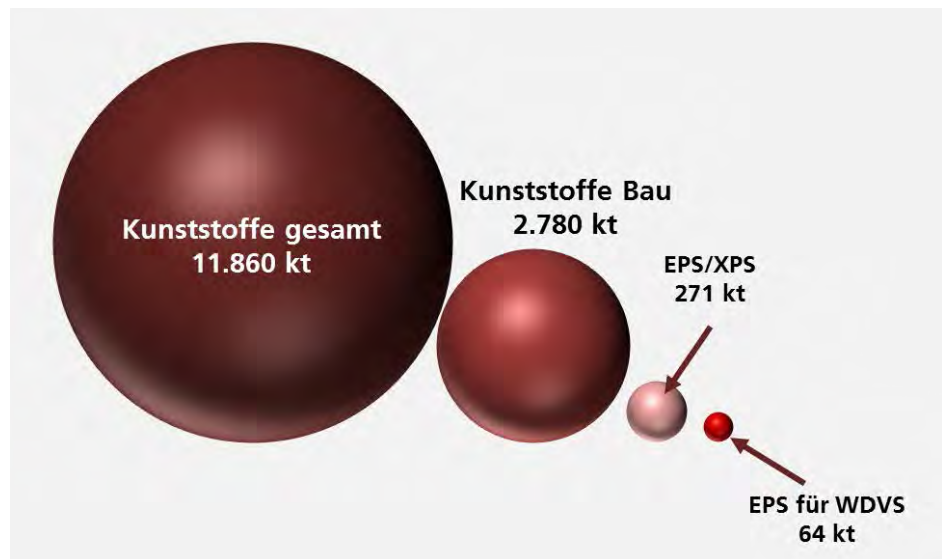


Bild 13:
Kunststoffproduktion 2011 nach [4] ergänzt durch den Anteil von EPS als WDVS nach FV-WDVS.

Der Bereich der baulichen Anwendungen wird dominiert von den Produktgruppen Profile und Rohre sowie Dämmung / Isolierung. Die in diesem Sektor im Jahr 2011 verarbeiteten 2780 kt an Kunststoffen verteilen sich auf die genannten baulichen Anwendungen wie folgt:

- Profile 35 %
- Rohre 28 %
- Dämmung/Isolierungen 24 %
- Sonstige 13 %

3.3.2 Produktion von EPS für WDVS

In dem Zeitraum von 1960 bis 2012 wurden laut Angaben des FV-WDVS [41] insgesamt 900.000.000 m² an WDVS verbaut. Der Hauptanteil von 80 % entfällt dabei auf Systeme mit EPS-Dämmplatten. In dem genannten Zeitraum wurden 720.000.000 m² an Gebäudeflächen mit EPS gedämmt. Die gedämmte Fläche entspricht einem EPS-Verbrauch von:

- 646 kt bei einer Dämmstoffdicke von 6 cm und einem Raumgewicht von 15 kg/m³
- 1.080 kt bei einer Dämmstoffdicke von 10 cm und einem Raumgewicht von 15 kg/m³
- 1.570 kt bei einer Dämmstoffdicke von 12,8 cm und einem Raumgewicht von 17 kg/m³

In Bild 14 sind die Produktionsmengen an expandierten Polystyrol-Hartschaumplatten nach Angaben des FV-WDVS [19] für die Jahre 1977 bis 2012 dargestellt.

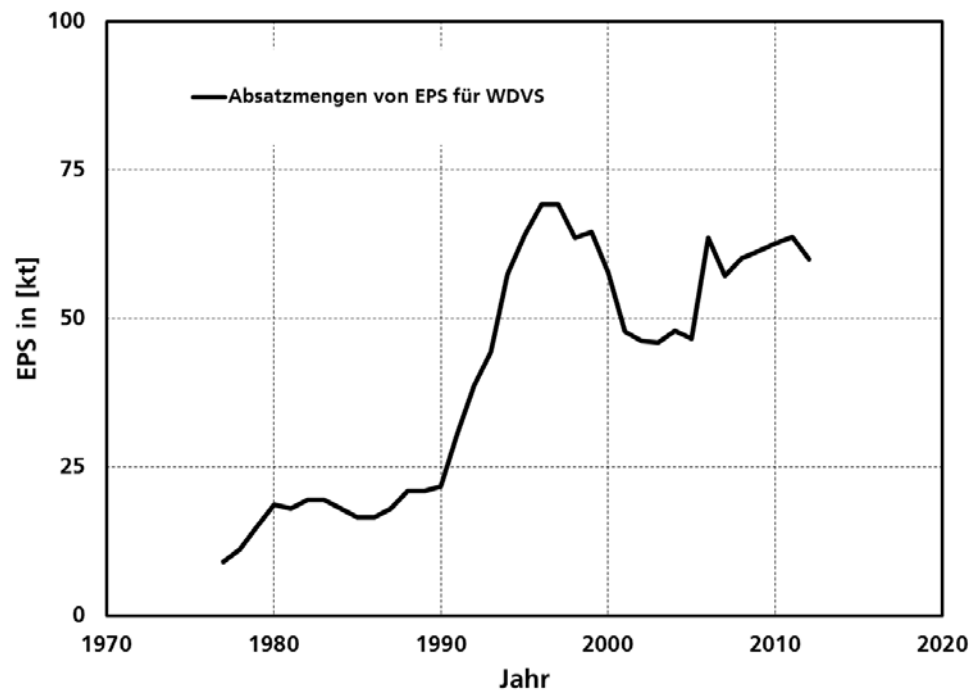


Bild 14:
Produktionsmengen an expandiertem Polystyrol-Hartschaumstoff, EPS für den Bereich WDV in Deutschland nach FV-WDV.

Bezogen auf die gedämmte Gebäudefläche von 720.000.000 m² wurden zusätzlich verbraucht.

- 2.822 kt Kleber (bei einem Verbrauch von 4 kg/m²)
 - o 80 % oder 2.304 kt entfielen auf mineralische Kleber
 - o 18 % oder 518 kt auf Dispersionskleber
 - o 2 % wurden mechanisch befestigt
- 2.880 kt Armierungsmörtel (bei einem Verbrauch von 4 kg/m²)
- 130 kt Armierungsgewebe mit einem Flächengewicht von 165 g/m² und einer Überlappung von 10 %
- 2.160 kt Oberputz (bei einem Verbrauch von 3 kg/m²)
 - o 65 % oder 1.872 kt entfielen auf mineralische Oberputze
 - o 35 % oder 1.008 kt entfielen auf pastöse Oberputze

Bei 60 % der mit EPS gedämmten Gebäudefläche wurden zusätzlich Dübel als Befestigungsmittel eingesetzt. Im Mittel wurden nach Angaben der EJOT Baubefestigungen GmbH 6,2 Dübel/m² verwendet. Dies entspricht einem Verbrauch von 2.678.400.000 Dübeln. Bei einem angenommenen Gewicht von 20 g pro Dübel ergibt sich ein Gesamtgewicht von 53,5 kt. Bei einem Gewichtsverhältnis Metall/Kunststoff von 7:1 ergibt sich Gewichtsanteil an Metall von 46,9 kt und ein Kunststoffanteil von 6,7 kt. Davon entfallen 95 % oder 6,3 kt auf die Polyolefine PE/PP und 5 % oder 0,3 kt auf glasfaserverstärktes Polyamid (PA). In Bild 15 sind diese Daten graphisch aufbereitet dargestellt. Das

Verhältnis zwischen der anorganischen Fraktion aus Kleber, Armierungsmörtel und Oberputz und der organischen Fraktion aus EPS bewegt sich zwischen 12:1 und 5:1 abhängig von Raumgewicht und Dicke der Dämmplatte.

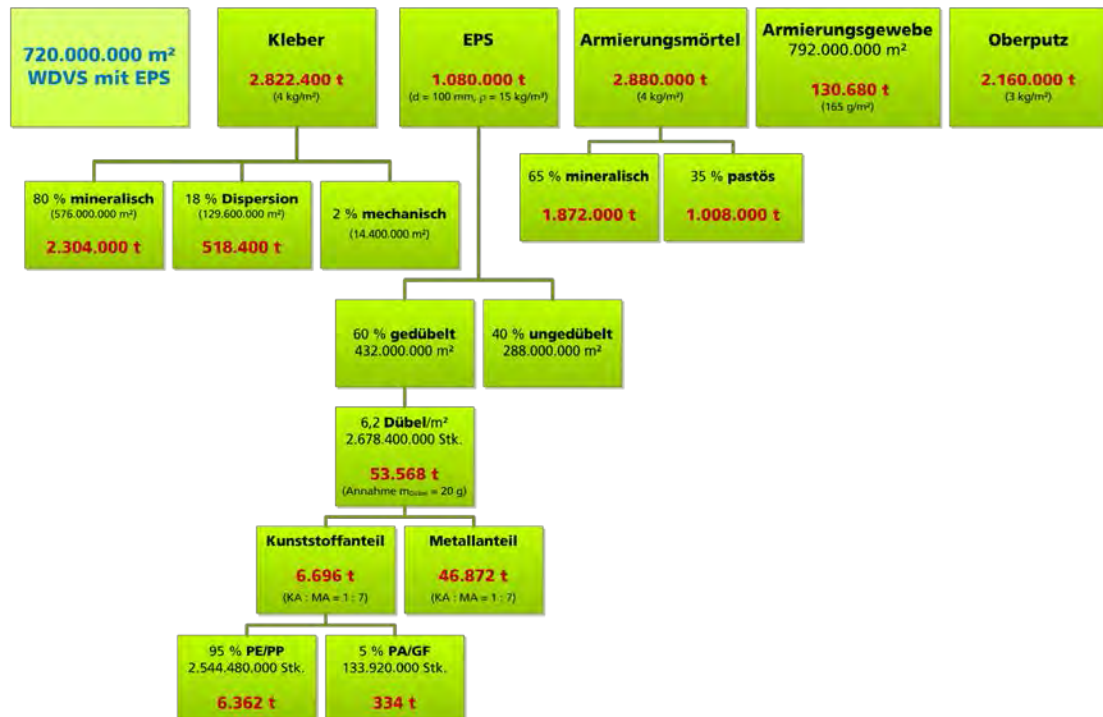


Bild 15:

Berechnete Massen der von 1960 bis 2012 eingebauten WDV-Komponenten bezogen auf die in diesem Zeitraum mit EPS-Hartschaumstoff gedämmte Fassade nach Angaben des FV-WDV.

Im Zeitraum von 1981 bis 2012 wurden in Deutschland ca. 5.000 kt an expandiertem Polystyrol-Hartschaumstoff EPS produziert (Tabelle 5). Für den Zeitraum von 1960 bis 1980 sind keine Zahlen des Industrieverbands Hartschaum e. V. (IVH) verfügbar.

Bei einer linearen Extrapolation der Produktionsdaten für die Jahre 1981 bis 2012 rückwirkend bis zum Jahr 1960 kann die Produktionsmenge an EPS für den Zeitraum 1960 bis 1980 geschätzt werden (Bild 16). Demnach wurden in diesen zwei Jahrzehnten ca. 800 kt an EPS produziert. Daraus ergibt sich eine Gesamtproduktionsmenge an EPS zwischen 1960 und 2012 von ca. 5.800 kt.

Im gleichen Zeitraum wurden ca. 40 kt des Flammenschutzmittels HBCD verbraucht [42]. Diese Menge ergibt sich aus den Produktionsmengen der Jahre 1981 bis 2012 und den extrapolierten Daten der Jahre 1960 bis 1980.

Tabelle 5:

Produktionsmengen an expandiertem Polystyrol-Hartschaumstoff, EPS in Deutschland und die Mengen für enthaltenes HBCD; Basisdaten für 1981 bis 2012 nach den statistischen Erfassungen des IVH, FV-WDVS und des GDI [42].

Jahr	produziertes Volumen [m³] × 1000	Verbrauch Rohstoff [t]	enthaltenes HBCD [t]
1981	4.088	79.724	558
1982	4.758	92.779	649
1983	4.872	95.005	665
1984	4.886	95.274	667
1985	4.579	89.291	625
1986	4.900	95.550	669
1987	4.925	96.038	672
1988	4.928	96.096	673
1989	5.050	98.475	689
1990	5.162	100.659	705
1991	5.895	114.953	805
1992	6.625	129.188	904
1993	7.354	143.403	1.004
1994	8.773	171.074	1.198
1995	9.071	176.885	1.238
1996	9.100	177.450	1.242
1997	9.610	187.395	1.312
1998	9.500	185.250	1.297
1999	9.500	185.250	1.297
2000	9.873	192.514	1.348
2001	9.335	182.033	1.274
2002	8.908	173.701	1.216
2003	8.903	171.925	1.203
2004	8.688	167.728	1.174
2005	8.369	162.179	1.135
2006	10.991	207.958	1.456
2007	8.894	182.340	1.276
2008	10.159	207.446	1.452
2009	10.255	220.400	1.543
2010	11.020	238.239	1.668
2011	11.700	248.353	1.738
2012	12.261	244.008	1.708
Gesamt	252.932	5.008.560	35.060

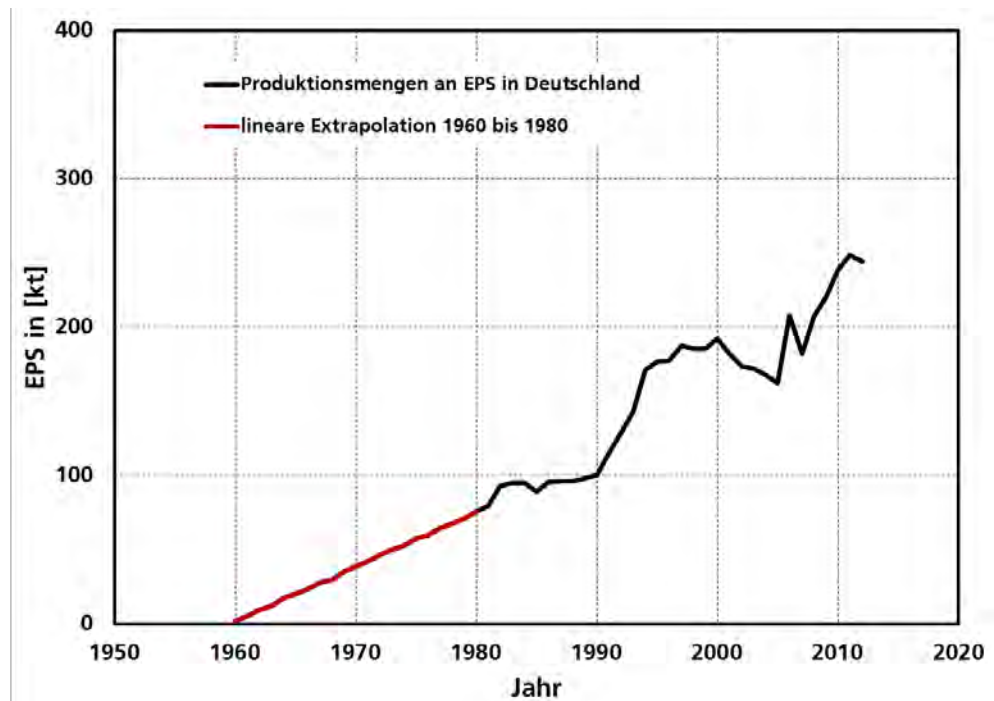


Bild 16:
Produktionsmengen an expandiertem Polystyrol-Hartschaumstoff in Deutschland [kt]; Basisdaten für 1981 bis 2012 nach den statistischen Erfassungen des IVH, FV-WDVS und des GDI; Daten von 1960 bis 1980 extrapoliert.

3.3.3 Abfall

Hartschaumdämmstoffe aus EPS werden seit den 1960er Jahren als Wärmedämmstoffe bei der energetischen Ertüchtigung von Gebäuden eingesetzt. Die Lebensdauer für WDVS wurde bisher mit 40 Jahren angegeben. Neuere Untersuchungen gehen davon aus ([26], [27]), dass je nach technischer Ausführung des gesamten WDVS eine Nutzungsdauer von 50 bis 60 Jahren realistisch erscheint. Bis in die 1980er Jahre wurden ca. 100.000.000 m² an Gebäudefläche energetisch ertüchtigt. Der Hauptanteil der energetischen Ertüchtigungsmaßnahmen fand nach 1980 statt. Daher ist davon auszugehen, dass momentan - bezogen auf die verbauten Mengen der Jahre 1960 bis 1980 - nur sehr geringe Mengen an EPS aus WDVS als Abfall durch Sanierung oder Rückbau entstehen.

Abfallaufkommen

Nach [43] betrug das gesamte Abfallaufkommen in Deutschland im Jahr 2012 387.112 kt. Davon entfielen 201.345 kt auf Bau- und Abbruchabfälle. Ein großer Teil der Bau- und Abbruchabfälle wurde durch den Erdaushub (Baggergut) mit ca. 106.000 kt verursacht. Das Aufkommen der Abfälle aus dem Bereich Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik betrug 52.525 kt. 15.759 kt entfielen auf die übrigen Bau- und Abbruchabfälle. Der Anteil von Dämmmaterialien am Abfallaufkommen war 229 kt, davon entfielen 85 kt auf Dämmmaterialien mit der Abfallschlüsselnummer 17 09 04 (gemischter Baustellenabfall) (Bild 17).

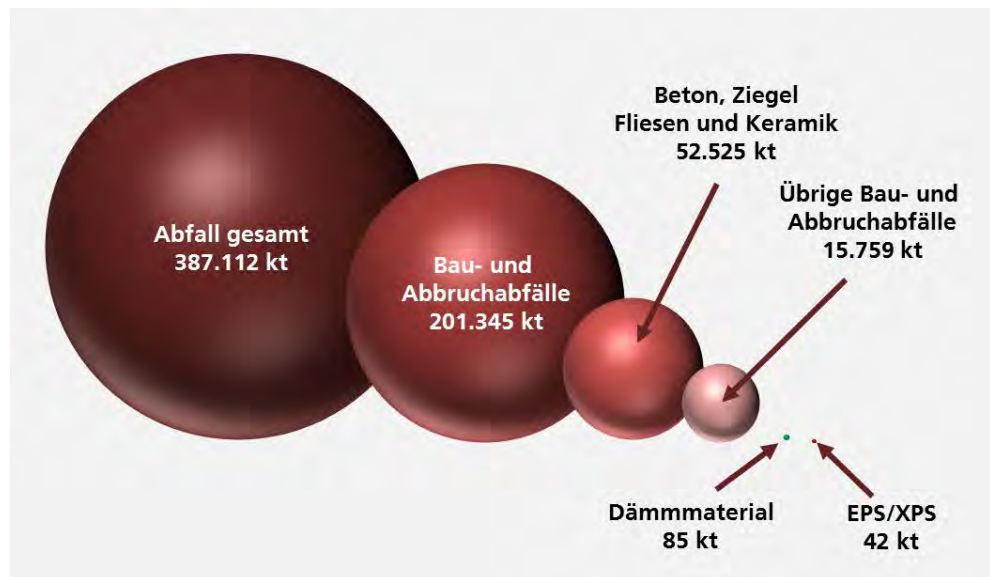


Bild 17:
Abfallaufkommen 2012 in Deutschland Statistisches Bundesamt DESTATIS [43]
ergänzt durch Abfallmengen an EPS/XPS aus dem Baubereich nach [4].

Die Kunststoffabfallmenge aus dem Post-Consumer-Bereich betrug nach [4] in Deutschland in 2011 ca. 4.440 kt, davon entfielen 8 % oder 372 kt auf den Bausektor. Der Hauptanteil an Kunststoffabfällen stammt mit 2.692 kt oder 61 % aus dem Verpackungsbereich. In Bild 18 sind die Kunststoffabfallmengen nach den Einsatzfeldern für das Jahr 2011 in Deutschland dargestellt.

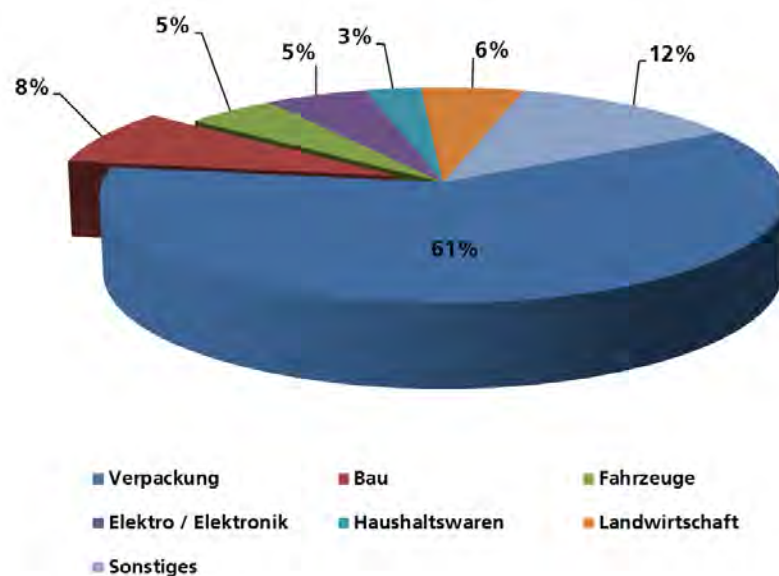


Bild 18:
Kunststoffabfallmengen 2011 in Deutschland nach den Einsatzfeldern [4].

Laut der Consultic-Studie [4] betrug der Anteil an Abfällen aus expandiertem Polystyrol am gesamten Kunststoffabfallaufkommen von 4.440 kt im Jahr 2011 2 % oder 102 kt. Aufgeschlüsselt auf die zwei Hauptanwendungsfelder entfielen 60 kt an expandiertem Polystyrol-Abfall auf Verpackungen und 42 kt auf den Bereich Bau [44]. 78 % des Kunststoffabfalls entfällt auf die Massenkunststoffe PE, PP, PET und PVC (Bild 19).

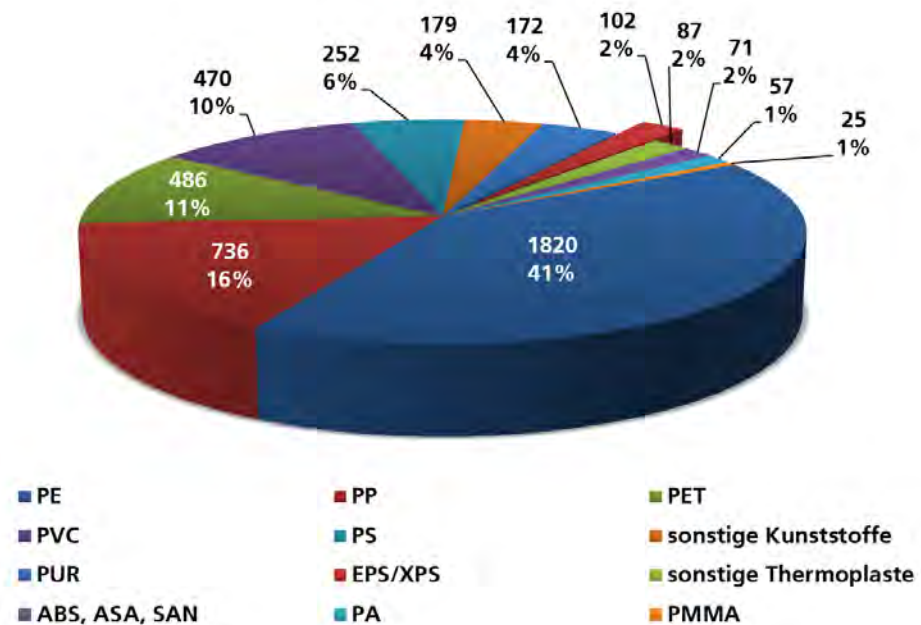


Bild 19:
Kunststoffabfallmengen 2011 in Deutschland nach Kunststoffarten [4].

Verwertung

Die Verwertungsrate für Kunststoffabfälle in Deutschland lag im Jahr 2011 bei 99 %. Die Rate für die werkstoffliche Verwertung betrug 32 %. Rohstofflich wurde 1 % der Kunststoffabfälle verwertet. Der Hauptanteil entfiel mit 66 % auf die energetische Verwertung. Die Beseitigungsrate auf Deponien lag bei 1 %. Von den 372 kt Kunststoffabfällen aus dem Bausektor wurden 261 kt energetisch und 96 kt werkstofflich verwertet. Einer Beseitigung wurden 15 kt zugeführt. Dies entspricht einem Anteil von 4 %.

3.4 Rückbau

In Deutschland hält der Trend zu größeren Wohnflächen pro Kopf an. Von 1998 bis 2010 erhöhte sich die von einer Person bewohnte Fläche von im Durchschnitt 39 m² auf 45 m² [45]. Diese Entwicklung führt u. a. dazu, dass Bestandsgebäude an die steigenden Nutzeransprüche angepasst werden, was z. T. mit Anbauten und Änderungen der Kubatur einhergeht. Außerdem werden Gebäude, die aufgrund ihres baulichen Gesamtzustandes als nicht mehr wirtschaftlich instandzusetzen angesehen werden, abgerissen. Zusätzlich verursacht eine massive Abwanderung der Bevölkerung aus strukturschwachen Regionen einen erhöhten Leerstand an Wohnungen. Insbesondere in den neuen Bundesländern führt diese Entwicklung dazu, dass Wohnanlagen, die nach 1990 energetisch saniert wurden, inzwischen nicht mehr benötigt und deshalb rückgebaut werden. Schäden durch Brand oder Naturkatastrophen (Hochwasser, Sturm, Hagel) sind ebenfalls Gründe für einen teilweisen oder vollständigen Rückbau eines Gebäudes. Die Abbruch-/Rückbauquote lag 2011 in Deutschland bei 0,4 % [46]. Bei Gebäuden, die mit einem WDVS versehen sind, führen diese Maßnahmen zur Notwendigkeit, das WDVS in Teilen oder in seiner Gesamtheit vom Gebäude zu entfernen.

Im Bausektor fallen pro Jahr große Mengen an unterschiedlichen Abbruch- und Bauabfällen an. Diese stellen den größten Anteil am Gesamtabfallaufkommen dar. Häufig wird die Verwertung von Abbruchabfällen durch die große Vielfalt an verbauten Materialien und ihre Vermischung (Kontamination) untereinander verhindert. Im Sinne der Ressourcenschonung ist es sinnvoll, die Abbruchabfälle bereits am Ort ihrer Entstehung voneinander zu trennen und einer Wiederverwertung zuzuführen. Grundsätzlich existieren drei Methoden, ein Gebäude rückzubauen:

- konventioneller Rückbau
- teilselektiver Rückbau
- und selektiver Rückbau.

Der selektive Rückbau eines Bauwerks in der umgekehrten Reihenfolge des Aufbaus wird favorisiert [47].

Beim **konventionellen Rückbau** wird die Bausubstanz, ohne zwingende Anforderungen hinsichtlich Entrümpelung oder Entkernung des Gebäudes, zumeist durch Zertrümmern zerstört und in transportierbare Bestandteile zerlegt. Die hierbei anfallenden Abbruchabfälle stellen ein heterogenes Gemisch aller Baustoffe des vormaligen Gebäudes dar. Die Vermischung der Abbruchabfälle ist im Hinblick auf die Entsorgung sehr ungünstig. Für die Entsorgung fallen höhere Kosten an, da das Materialgemisch üblicherweise in einer Sortieranlage getrennt werden muss. Häufig findet daher bereits auf der Abbruchbaustelle eine grobe Vorsortierung statt. Nachteilig ist auch, dass das Materialgemisch oft durch Schad- und Störstoffe aus einzelnen Bauteilen verunreinigt ist, die sich durch eine nachträgliche Sortierung kaum entfernen lassen. Eine hochwertige Verwertung der Abbruchabfälle ist somit stark eingeschränkt. Dennoch

wird der konventionelle Rückbau auch in Zukunft beispielsweise bei einsturzgefährdeten oder durch Brand, Erschütterungen o. ä. geschädigten Objekten von Bedeutung sein [47].

Als **teilselektiver Rückbau** wird der Rückbau eines Gebäudes mit vorhergehender, zumindest teilweiser Entrümpelung und Entkernung des Innenausbaus bezeichnet. Hauptzweck dieser Vorarbeiten ist es, die Vermischung der anfallenden Abbruchabfallfraktionen zu reduzieren und Schad- und Störstoffe weitgehend auszusondern, so dass ein großer Teil der Abbruchabfälle einer direkten Verwertung zugänglich wird. Der Umfang der Demontagearbeiten kann beim teilselektiven Rückbau unterschiedlich sein. Es ist sowohl eine Annäherung an den „konventionellen Rückbau“ als auch an den „selektiven Rückbau“ möglich [47].

Beim **selektiven Rückbau** eines Gebäudes werden alle Bau-, Konstruktions- und Ausrüstungsteile nach ihrer Funktion oder nach ihrer Materialzusammensetzung rückgebaut. Hauptzweck des selektiven Abbruchvorgehens ist die Wiederverwendung gut erhaltener Bauteile, die sortenreine Verwertung und Beseitigung der anfallenden Abbruchabfälle, sowie die Ausschleusung von Stör- und Fremdstoffen aus den jeweiligen Abbruchabfallfraktionen. Die Demontage der Gebäude erfolgt beim selektiven Rückbau zumeist in umgekehrter Reihenfolge des Auf- und Einbaus [47].

In Tabelle 6 sind die Vor- und Nachteile des konventionellen und des selektiven Rückbaus gegenübergestellt. Die selektive Rückbaumethode ist die favorisierte Vorgehensweise. Beim selektiven Rückbau eines WDVS werden die einzelnen Materiallagen Schicht für Schicht abgetragen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht darin, dass die einzelnen Materialfraktionen bereits auf der Baustelle getrennt vorliegen, was ein Ausschleusen von Stoffen, die als gefährlich eingestuft sind bzw. in der Zukunft eingestuft werden, erleichtert.

Tabelle 6:
Vor- und Nachteile der einzelnen Rückbauverfahren bezogen auf WDVS.

	Konventioneller Rückbau	Selektiver Rückbau
Vorteile	- Arbeitsaufwand wird durch den Einsatz von schweren Maschinen erleichtert - schnelles Verfahren Arbeitsaufwand ist proportional zum Gebäude-Volumen	- Vermischung der einzelnen Fraktionen wird vermieden - Vermischung mit gefährlichen Stoffen wird vermieden (Vor)Trennung der einzelnen Fraktionen erfolgt bereits beim Rückbau auf der Baustelle favorisierte Vorgehensweise
Nachteile	- Vermischung der einzelnen Fraktionen - Trennung und Rückgewinnung von verwertbaren Fraktionen muss in separaten Anlagen erfolgen - Ungeeignet, wenn gefährliche Stoffe verbaut wurden	- Hoher Anteil an manueller Vorarbeit notwendig - Hoher zeitlicher Aufwand Arbeitsaufwand ist proportional zur Gebäude-Fläche und steigt mit der Anzahl der miteinander verbundenen Lagen oder Schichten

3.5 Trennverfahren

Für den selektiven Rückbau von WDVS werden geeignete Verfahren zur Trennung der einzelnen Komponenten benötigt. Diese Verfahren müssen unter den Bedingungen auf der Baustelle wirtschaftlich einsetzbar sein und eine zuverlässige Trennung der Komponenten ermöglichen. Wie Bild 20 zeigt, erfolgt das Entschichten von WDVS auf Baustellen häufig noch manuell. Im Verlauf der Studie wurden folgende Trennverfahren betrachtet:

- Manuelles Entschichten
- Maschinelles Entschichten
- Abfräsen
- Thermisches Entschichten



Bild 20:
Beispiel für manuelles Entschichten von WDVS in der Praxis; Rückbau eines Büro- und Werkstattgebäudes im Jahr 2013 in Gräfelfing.

Im Tabelle 7 sind die Vor- und Nachteile von ausgewählten Verfahren gegen-
übergestellt.

Tabelle 7:
Vor- und Nachteile der einzelnen Abschälverfahren.

Verfahren	Vorteile	Nachteile
Händisches Abschälen z. B. „Strippen“	• Eingeführtes Verfahren • Selektiver Schichtenabtrag • Flächiger Rückbau • Unabhängig von Zugänglichkeit	• Manuelles Verfahren • Zeitlich aufwendig • Kosten durch Gerüst
Maschinelles Abschälen „Baggern“	• Eingeführtes Verfahren • schnell • Flächiger Rückbau • Selektiver Schichtenabtrag möglich	• Höhenbegrenzung • Örtlicher Zugang • Selektiver Schichtenabtrag wird nicht immer praktiziert
Fräsen	• Schnell • Selektiver Schichtenabtrag	• Bildung von kleinen PS-Teilchen • Störung durch Dübel • Elektrostatische Aufladung • Absaugung notwendig
Bürsten	• Schnell • Selektiver Schichtenabtrag • Abtrag trotz Dübel möglich	• Kleine PS-Stücke müssen abgesaugt werden • Elektrostatische Aufladung

3.6 Verwertungsmöglichkeiten/Verfahren

Entsprechend des KrWG sind die werkstoffliche, die rohstoffliche und die energetische Verwertung als gleichrangig zu betrachten. Im Verlauf der Studie wurden deshalb diese drei Verwertungsverfahren (Bild 21) für den EPS-Dämmstoff ausführlich diskutiert.



Bild 21:
Zusammenfassung der geeigneten Verwertungsverfahren für EPS-Dämmstoff.

Die Verwertungsmöglichkeiten für die weiteren Komponenten des WDVS, wie sie in den Umwelt-Systemdeklarationen des Instituts Bauen und Umwelt e.V. [48] für unterschiedliche WDVS-Hersteller zu finden sind, sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

In der Praxis wird WDVS-Abfall am häufigsten unter der Abfallschlüsselnummer 17 09 04 als gemischte Bau- und Abbruchabfälle (Baumischabfall) entsorgt.

Die Verwendung von gemahlene EPS-Abfällen als Leichtzuschlag für Beton, Mauerziegel, Mörtel und Putz, insofern es sich um HBCD-haltige EPS-Abfälle handelt, darf nach den Anforderungen von Basel POP nicht mehr angewendet werden. Als unkritisch kann der Einsatz solcher Abfälle als Porosierungsmittel beim Brennen von Ziegeln angesehen werden. Erfahrungen und Untersuchungen in diesem Bereich fehlen noch.

Tabelle 8:
Verwertungsmöglichkeiten von WDVS Bestandteilen laut Abfallschlüssel [10]
der Umwelt-Systemdeklarationen [48].

WDVS Komponente	Abfall-schlüssel	Mögliche Verwertungswege
Putz/Kleber/Farben/ Haftvermittler Armierungsmörtel	17 01 07 17 09 04 17 01 01	- Als mineralische Granulaten für Straßenbau, Erdbauanwendungen wie z. B. Bauwerkshinterfüllungen und Lärmschutzwälle sowie im Garten- und Landschaftsbau. - als Gesteinskörnungen für die Herstellung von Beton für Betonwerksteine und Beton für nicht konstruktive wie konstruktive Bauteile
Armierungsgewebe	10 11 03 17 02 03 17 04 05	s. o. Kunststoffregranulat Rückgewinnung von Eisen und Stahl
Dämmmaterial	17 06 04	- Schutzplatten bei Rückbauarbeiten - Gemahlene EPS-Abfälle als Leichtzuschlag für Beton, Mauerziegel, Mörtel und Putz - Recycling-Dämmplatten - Herstellung von Parkbänken, Zaunpfählen, Schuhsohlen, Pflanzenkübeln etc. - Ersatzbrennstoff in Zementwerken
Dübel, Schienen	17 02 03	Kunststoffregranulat
Schrauben/Nägel	17 04 05	Rückgewinnung von Eisen und Stahl

3.6.1 Werksstoffliche Verwertung

Wärmedämmplatten aus Produktions- oder Verschnittabfällen mit kleiner 20 Gew.-% an Recyclinganteil

Aus der Vergangenheit ist bekannt, dass bei der Produktion von EPS-Dämmstoffen Produktionsabfälle und Verschnittabfälle von Baustellen wieder mit eingesetzt werden. Die Recyclingmengen, die bei der Produktion eingesetzt werden, hängen erheblich von den Anforderungen für das spätere Einsatzgebiet ab. Bei Fassadendämmplatten darf lt. Qualitätsrichtlinie des IVH und des FV-WDVS der Anteil an Recycling-EPS 5 Gew.-% nicht überschreiten. Bei Anwendungen mit geringeren technischen Anforderungen, wie Fußbodendämmungen vom Typ DEO nach DIN 4108-10 [49] oder Flachdach-Dämmplatten vom Typ DAA nach DIN 4108-10 werden teilweise deutlich höhere Recyclingmengen bis ca. 20 Gew.-% zugesetzt.

Recyclingplatten aus Baustellenabfällen mit bis zu 100 % Recyclinganteil

In den letzten Jahren kamen sogenannte „EPS-Recyclingplatten“ auf den Markt, die aus teilweise mit Putz, Kleber und Sand vermischtem EPS gefertigt werden. Diese Recyclingplatten enthalten weißes, graues, sowie eingefärbtes EPS und erscheinen nach der Fertigung meist weiß-grau, wobei die Perlengrenzen durch den hohen Staubanteil nicht mehr exakt zu sehen sind.

Aufbereitung

- Die Baustellenabfälle werden von groben Verschmutzungen wie Putz, Mörtel und Sand gereinigt
- Die EPS-Fraktion wird in einer Mühle gemahlen, die ohnehin jeder EPS-Schäumbetrieb zur Aufarbeitung der Produktionsabfälle im Betrieb vorhält
- Entstauben des Mahlgutes
- Verarbeitet werden Korngrößen $< 9 \text{ mm}$

EPS-Granulat

Das EPS-Granulat enthält vollständige Perlen, Bruchstücke von Perlen, verschmolzene Teile durch das Heißdrahtschneiden, sowie alle auf dem Bau anzutreffenden EPS-Farben.

Verarbeitung

- Das oben beschriebene Granulat wird über Düsen $< 10 \text{ mm}$ in EPS-Schäumautomaten gefüllt
- Der Recyclinganteil kann hierbei 100 % betragen
- Feststoffanteile, z. B. Putzteile, Korngröße $< 10 \text{ mm}$ werden mit eingeschäumt
- Verschweißen mit Wasserdampf

Endprodukt

Das Endprodukt sind EPS-Platten mit harter Oberfläche, die z. B. für die Fußbodendämmung, Anwendungstyp DEO nach DIN 4108-10 [49], oder als Drainageplatten für die Perimeterdämmung eingesetzt werden.

Die EPS-Recyclingplatten besitzen folgende Eigenschaften:

- Wärmeleitfähigkeitsstufe: $0,035 \text{ W/(m} \times \text{K)}$
- Zugfestigkeit senkrecht zur Plattenebene : 50 kPa bzw. 80 kPa
- Rohdichte: erhöht gegenüber frischem Rohstoff

Die heute üblichen Fassadenqualitäten werden heute noch nicht erreicht. Um diese Qualitäten zu erreichen, bedarf es noch weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Bauaufsichtliche Regelungen

Derzeit sind drei Verarbeiter bekannt, die entsprechende Platten herstellen. Es liegen zwei allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen vor [50] [51]. Die EPS-Recyclingplatten können für die Anwendungsgebiete WI, DI, DZ oder DEODg nach DIN 4108-10 [49] eingesetzt werden, wobei der Typ DEO dg von DIN 4108-10 abweicht und deshalb in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen geregelt wird.

3.6.2 Selektive Extraktion

Bereits 1988 wurde von Kampouris et al. ein Modell zum Recycling von Polystyrol mit Lösungsmitteln wie Toluol und Benzol vorgestellt [52]. Weitere Arbeitsgruppen beschäftigen sich mit dem Recycling von Polystyrol mittels selektiver Extraktion [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61].

Der Begriff „selektive Extraktion“ nach dem CreaSolv®-Verfahren des Fraunhofer IVV beschreibt ein rohstoffliches Recyclingverfahren für Kunststoffe, die aufgrund ihrer spezifischen Löslichkeit in hoher Reinheit wiedergewonnen werden können (Bild 22). Das besondere Potential des Verfahrens liegt in der Reinigung des Materials auf molekularer Ebene. Qualitätsbeeinflussende Störstoffe werden schonend und unter Erhalt der Polymereigenschaften entfernt.

Die drei Hauptschritte dabei sind:

- Auflösen des Zielkunststoffes mit einem selektiven Lösemittel; andere Bestandteile der Abfallfraktion bleiben ungelöst,
- Abtrennen von Fremdstoffen aus der gewonnenen Polymerlösung,
- Ausfällen des Zielkunststoffes aus der gereinigten Polymerlösung.

Ergänzt werden die Hauptschritte bei Bedarf durch eine vorgeschaltete Zerkleinerung und Vorreinigung sowie durch eine nachgeschaltete Konfektionierung zum mechanischen Konzentrieren, Trocknen und Compoundieren.

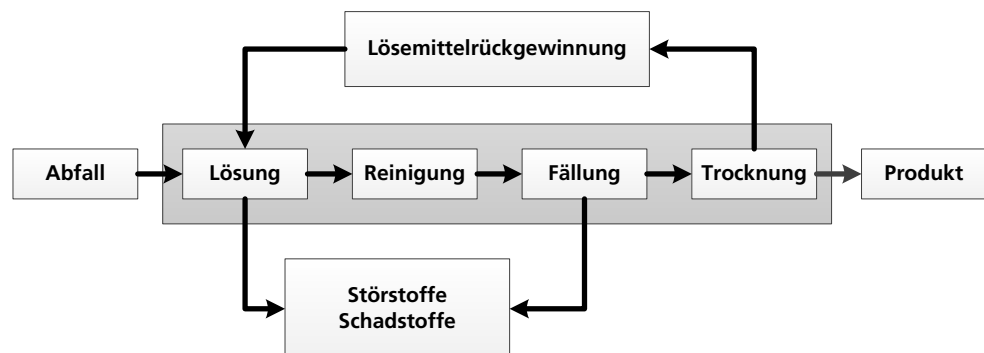


Bild 22:
Prozessschema des CreaSolv®-Verfahrens [62].

Nach Aussagen von Herrn Dr. Andreas Mäurer vom Fraunhofer IVV können bietet das CreaSolv-Verfahren folgende Vorteile:

- Verwendung von organischen Lösungsmitteln bei denen keine Emissionen von flüchtigen organischen Verbindungen auftreten
- Trennung des gelösten Polymers Polystyrol im Falle von EPS vom Flamm-schutzmittel HBCD
- Rückgewinnung von Brom in einem separaten Prozess

3.6.3 Thermische Abfallbehandlung

Grundsätzlich sind alle thermischen Verfahren geeignet, um HBCD zu zerstören. Das Flammenschutzmittel beginnt sich oberhalb von 190 °C zu zersetzen [39]. Diese Temperatur wird von den Konversionsverfahren wie Cracken, Pyrolyse, Vergasung, Hydrierung, etc. erreicht. In der gesichteten Literatur fand sich jedoch kein Hinweis auf Untersuchungen zur Ausschleusung von HBCD mittels der genannten Verfahren.

Das wichtigste und in Deutschland in der Praxis bisher fast ausschließlich eingesetzte Verfahren ist die Abfallverbrennung in ihren Varianten Hausmüllverbrennung, Klärschlammverbrennung und Sonderabfallverbrennung. Noch überwiegend im Versuchs- bzw. Pilotmaßstab betrieben werden alternative thermische Behandlungsverfahren wie Pyrolyse, Vergasung, Hydrierung, Plasma- und Metallbadverfahren sowie Verfahrens-Kombinationen, z. B. Pyrolyse/Verbrennung oder Pyrolyse/Vergasung.

3.6.4 Energetische Verwertung

Bei der energetischen Verwertung werden brennbare Reststoffe oder Abfälle zur Energieerzeugung durch direkte Verbrennung genutzt. Entscheidend nach dem KrWG ist, dass durch die Verbrennung der Abfälle mehr Energie erzeugt und zurückgewonnen wird, als beim Verbrennungsvorgang verbraucht wird. Die Abfälle werden als Brennstoff genutzt, so dass natürliche Rohstoffquellen erhalten bleiben. Genau wie bei einer thermischen Beseitigung von Abfällen/Reststoffen muss auch bei der Verwertung sichergestellt werden, dass die menschliche Gesundheit nicht gefährdet und die Umwelt nicht geschädigt wird.

In Deutschland existieren ca. 80 Anlagen mit denen Siedlungsabfälle energetisch verwertet werden. Die Jahreskapazität dieser Anlagen beträgt ca. 20.000 kt.

PlasticsEurope und EXIBA [63] führte einen 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, durch.

Die Vorteile der energetischen Verwertung von WDVS-Abfällen durch kommunale Restabfallverbrennung sind:

- geringe Anforderungen an Sauberkeit und Fremdstoffgehalt der WDVS-Abfälle
- relativ kurze Transportwege zwischen Rückbaustelle und Müllverbrennungsanlage
- Ausschleusung von HBCD aus dem Material- und Stoffkreislauf
- Rückgewinnung von Energie.

Die Versuche zeigten, dass die Obergrenze für die Mitverbrennung von EPS oder XPS-Abfällen mit Restabfällen bei 2 Gew.-% liegen sollte. Höhere Konzentrationen an Leichtstoffen führen zu Störungen im Anlagenbetrieb. Die Konzentrationen an halogenierten und gemischt-halogenierten Dioxinen und Furanen in Roh- und Reingas lagen unter den Grenzwerten.

4 Eigene Untersuchungen zum Rückbau von WDVS

Die Rückbaumöglichkeiten von WDVS wurden auf dem Gelände des IBP an diversen Testhäusern erprobt sowie an einem realen Objekt begleitet. Zur Anwendung kamen praxisübliche Verfahren wie das Abschälen des Putzes und des Hartschaums mit einem Schepseisen und mit Hilfe von Großgeräten wie eines Baggers mit einem Schaber oder einem Greifer. Grundsätzlich konnte bei allen Abschälversuchen gezeigt werden, dass die Ablösung der Putzschicht von der darunter liegenden Hartschaumlage nahezu vollständig möglich ist.

4.1.1 Manuelles Abschälen

Voraussetzung für einen rückstandsfreien Rückbau der Decklage aus Oberputz, Armierungsgewebe und Armierungsmörtel ist die Berücksichtigung des Schälwinkels, mit dem die Decklage von der Hartschaumplatte gelöst wird. Spitze Winkel ($< 45^\circ$; Keilwirkung) und langsame Abzugsgeschwindigkeit eignen sich besser als weite Winkel ($> 90^\circ$) und schneller Abzug, denn durch die Überstreckung wird das Armierungsgewebe zwischen Oberputz und Armierungsputz freigelegt (siehe Bild 23).

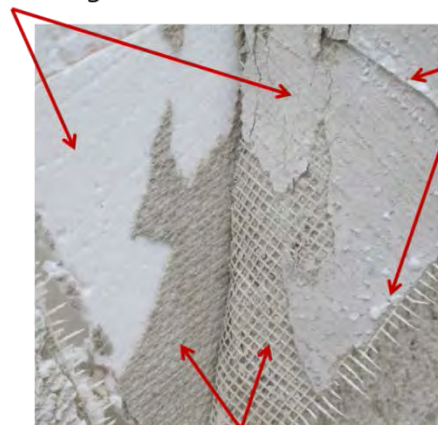


Bild 23:
Abschälen der Decklage ohne Berücksichtigung des Abschälwinkels.

Geschieht dies, dann verläuft das Ablösen der Decklage nicht mehr entlang der Grenzfläche Armierungsputz/Hartschaum sondern entlang des Gittergewebes. Das Armierungsgewebe verbleibt auf dem Hartschaum haften. Für das Lösen der Decklage vom Hartschaum können genutzt werden:

- das adhäsive Versagen an der Grenzschicht Dämmstoff/Armierungsmörtel
- und/oder das kohäsive Versagen im Dämmstoff.

Adhäsives Versagen
Dämmstoff/Armierungsmörtel



Kohäsives Versagen
im Dämmstoff

Kohäsives Versagen des Armierungsmörtels
entlang des Armierungsgitters

Bild 24:
Abschälen der Decklage ohne Berücksichtigung des Abschälwinkels.

Bei Berücksichtigung des Schälwinkels und niedriger Schälgeschwindigkeit kann die Decklage bestehend aus Armierungsmörtel, Armierungsgitter und Deckputz nahezu vollständig vom Dämmstoff abgeschält werden (Bild 25). Diese Erkenntnisse lassen sich auch auf das mechanische Abschälen der WDVS-Lagen übertragen.



Bild 25:
Abschälen der Decklage ohne (links) und mit Berücksichtigung des Schälwinkels und der Schälgeschwindigkeit (Mitte, Hartschaum): Rückseite der Decklage (rechts).

4.1.2 Maschinelles Abschälen

Die Versuche mit den auf der Baustelle üblichen Großgeräten wie Schaufelbagger zeigten, dass mit diesen ein selektives Ablösen der einzelnen Lagen ebenfalls möglich ist. In der Praxis kommt diese Vorgehensweise jedoch nicht zum Einsatz (siehe Bild 26 rechts). Üblicherweise wird der gesamte Verbund von der Gebäudefassade abgeschabt. Die selektive Vorgehensweise, bei der die einzelnen Lagen nach einander abgelöst werden, hat den Vorteil, dass keine zusätzlich Vermischung der einzelnen Fraktionen des Verbundmaterials beim Rückbau erfolgt. In der Praxis wird der abgeschabte Verbund einer Baumischabfalltrennanlage zugeführt. Hier wird die mineralische von der organischen Fraktion abgetrennt. Zurzeit wird die abgetrennte organische Fraktion einer energetischen Verwertung durch eine kontrollierte Verbrennung zugeführt.



Bild 26:
Selektives Abschälen der einzelnen Lagen im IBP-Versuch, Oberputz (links),
Dämmstoff (Mitte) und teilselektives Abschälen in der Praxis (rechts).

Ein selektiver Rückbau von WDVS ist bereits jetzt mit den üblichen Baumaschinen (hydraulischer Bagger mit Schaufel oder Sortiergreifer) möglich. Im Gegensatz zum Pilotversuch wird eine Entschichtung Lage für Lage aus zeitlichen Gründen derzeit auf der Baustelle nicht durchgeführt.

Ein weiteres Beispiel für das mechanische Abschälen von WDVS mit EPS ist der Rückbau mehrerer Gebäude eines Übergangswohnheims in Dortmund im Jahr 2009.



Bild 27:
Mechanische Abschälen von WDVS mit EPS beim Rückbau eines Übergangs-
wohnheims in Dortmund im Jahr 2009 (©Carsten Hördemann).

4.1.3 Abfräsen

Die von der Berliner Firma GPS entwickelte Fassadenfräse **Biber** hat sich auf dem Markt nicht durchgesetzt. Dieses System wurde nach den Aussagen von Mitarbeitern der Firmen Austrotherm und BauMit Wopfinger gezielt für das Abfräsen von Oberputzen entwickelt. Ein vollständiger Abtrag von Putzen war mit diesem System nicht möglich, was ein manuelles Nacharbeiten erforderte.

Versuche mit Handfräsen haben gezeigt, dass grundsätzlich ein Abfräsen der einzelnen Lagen des WDVSs möglich ist. Auch ein gleichzeitiges Abfräsen des Materialverbundes mit einer nachgeschalteten Sichtung in die einzelnen Fraktionen erscheint erfolgversprechend.



Bild 28:
Abfräsen eines WDVS mit einer Handfräse (links) und die dabei erhaltenen Materialfraktionen (rechtes Bild von links nach rechts: Mischfraktion aus EPS und Putz, EPS, Putz, Gewebefasern).

Zu lösende Aufgaben sind:

- 100 % Sichtung in einzelne Fraktionen, z. B. mittels einer Windsichtung oder einer Dichtentrennung.
- Verhinderung einer Kontamination der organischen Fraktion mit mineralischem Staub
- Arbeits- und sicherheitstechnische Aspekte bei der Arbeit mit rotierenden Werkzeugen auf Baustellen

Als Ausgangspunkt für die Werkzeugentwicklung oder Werkzeugoptimierung können alle spanabhebenden Verfahren dienen, z. B. Holzbearbeitungsmaschinen oder Wurzel- bzw. Baumstockfräsen.

4.1.4 Thermisches Entschichten

Neben dem manuellen und maschinellen Abschälen wurde auch das thermische Entschichten untersucht. Dieses Verfahren nutzt das Schrumpfen von expandiertem Polystyrol unter Wärmeeinwirkung zur Trennung entlang der Grenzfläche Dämmstoff/Armierungsmörtel. Bild 29 zeigt beispielhaft diese Grenzfläche nach der Temperaturbehandlung. Für eine ökonomische und ökologische Umsetzung erfordert diese Methode noch weitere Entwicklungsschritte. Momentan ist die Zeit, bis die Temperatur von ca. 100 °C an der Grenzfläche zwischen Armierungsmörtel und Polystyrol erreicht ist, der limitierende Faktor. Folgende Größen sind hier von Bedeutung:

- Systembedingte Einflussgrößen
 - Je dicker die Decklage bestehend aus Oberputz, Armierungsmörtel und Armierungsgewebe ist, umso länger dauert der Aufheizvorgang.
 - Eine geringe Wärmeleitfähigkeit der Decklage führt ebenfalls zu einer Verlängerung des Aufheizvorgangs.
- Umgebungsbedingungen
 - Die Verdunstung der in der Putzschicht enthaltenen Wassermenge verzögert den Wärmeübergang zum Polystyrol und damit den Schrumpfungsprozess.
 - Bei niedrigen Außentemperaturen verlängert sich der Aufheizvorgang.



Bild 29:
Beispiel für das thermische Entschichten vom Oberputz / Armierungsmörtel-Verbund.

4.1.5 Versuchsweiser Rückbau eines Gebäudes

Bei dem dokumentierten maschinellen Rückbau des WDVS (Gebäude Ligustergang, Ludwigshafen) kratzte ein radmobiler Bagger mit einem hydraulischen Sortiergreifer den gesamten Materialverbund inklusive Dübel von der Wand. Das Abschaben der Wandfläche (ca. 500 m²) dauerte 2,5 Stunden. Die Entsorgung des Gemisches aus Dämmstoff, Kleber, Armierungsgewebe, Armierungsmörtel und Oberputz erfolgte gesetzeskonform als Baumischabfall mit der Abfallschlüsselnummer 17 09 04 gemäß der Abfallverzeichnis-Verordnung (AVV). Beim Rückbau entstanden 4230 kg Baumischabfall. Der berechnete Massenanteil an Dämmstoff lag bei 450 kg, bezogen auf die Fläche von ca. 500 m², die Dämmstoffdicke von 6 cm und die Dichte von 15 kg/m³. Das entspricht einem Masseverhältnis Dämmstoff zu mineralischer Fraktion von 1 zu 8,5. Die Trennung der einzelnen Fraktionen erfolgte bei einem zertifizierten Entsorger. Die einzelnen Fraktionen wurden anschließend einer energetischen Verwertung über eine kommunale Mühlverbrennungsanlage zugeführt.



Bild 30:
Rückbau eines Gebäudes (Ligustergang, Ludwigshafen).

5 Bewertung

An WDVS werden unterschiedlichste Anforderungen hinsichtlich Funktionalität, Dauerhaftigkeit und Recyclingfähigkeit gestellt (Bild 31). So sollen WDVS bei geringer Materialstärke und geringem Gewicht gute Dämmeigenschaften aufweisen und zur Verhinderung von Feuchteschäden vollflächig am Mauerbildner anliegen. Der verwendete Dämmstoff soll durch den Aufbau des Putzsystems langzeitbeständig sein, d. h. der Putzaufbau muss den Dämmstoff gegen Umwelteinflüsse wie z. B. UV-Strahlung schützen. Gleichzeitig soll aber ein WDVS im Fall des Rückbaus einfach in seine Komponenten aufzutrennen sein, um ein Recycling oder zumindest eine teilweise Verwertung zu ermöglichen.

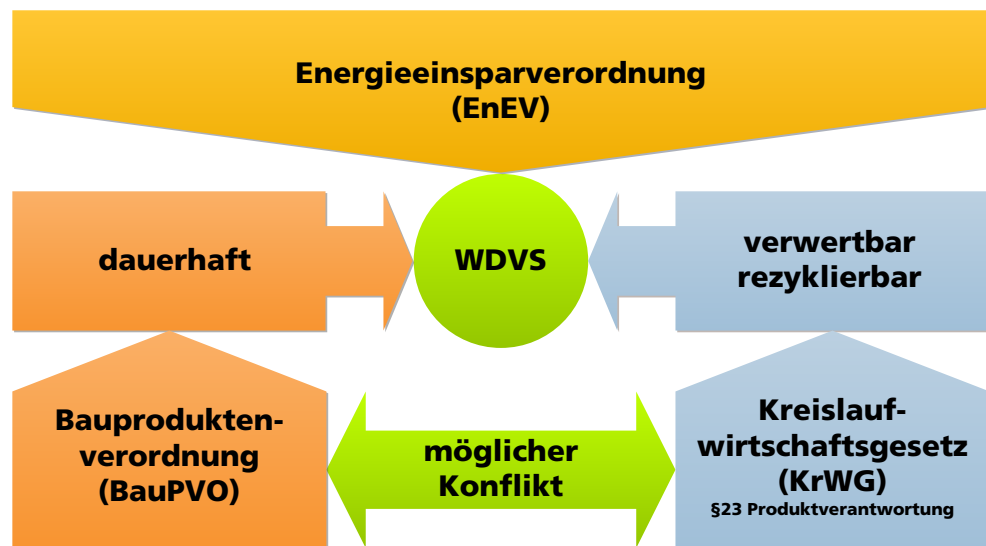


Bild 31:
WDVS im Spannungsfeld der Rahmenbedingungen und Anforderungen.

Neben den rein technischen Möglichkeiten für Rückbau, Recycling und Verwertung steht immer auch die Frage nach deren ökologischen Aspekten und der Übereinstimmung mit gesetzlichen Erfordernissen und übergeordneten politischen Zielen wie z. B. der Verringerung des Energie- und Ressourcenverbrauchs, der Nachhaltigkeit und des Umweltschutzes sowie der Ausschleusung von POPs aus dem Stoffkreislauf im Raum. In diesem Kapitel werden unterschiedliche Vorgehensweisen unter Berücksichtigung der vielfältigen Anforderungen bewertet. Aus der Bewertung werden Handlungsempfehlungen abgeleitet, sowie ein Forschungs- und Entwicklungsbedarf aufgezeigt.

Eine Überarbeitung bzw. ein Rückbau von WDVS kann u. a. aus folgenden Gründen notwendig werden:

- Anpassung der Wärmedämmung an aktuelle Anforderungen (EnEV),
- Reparatur eines beschädigten WDVS (Hagel-, Sturm-, Wasserschaden),
- Änderungen in der Kubatur oder
- Rückbau des Gebäudes.

Damit ist ersichtlich, dass die Frage nach der Wiederverwendung bzw. der Entsorgung von WDVS bzw. WDVS-Komponenten keine ausschließlich Frage des Nutzungsendes ist, sondern insbesondere auch die Weiter- und Umnutzung von Gebäuden betrifft.

5.1 Rahmenbedingungen

Die Abfallhierarchie des Kreislaufwirtschaftsgesetzes gibt die Rangfolge der einzelnen Verwertungsmaßnahmen [9] vor, die in Bild 4 auf Seite 19 grafisch dargestellt sind. Im Gesetzestext [7] hingegen werden die einzelnen Verwertungsmaßnahmen gleichrangig behandelt. Maßnahmen, die einen möglichen Schaden von Mensch und Umwelt abwenden, sind vorrangig. Für WDVS bedeutet dies, dass stoffliche, werkstoffliche und energetische Verwertung als gleichrangig anzusehen sind.

Die Abfallvermeidung steht in der fünfstufigen Abfallhierarchie an der obersten Stelle, sie wurde deshalb im Rahmen dieser Studie mit berücksichtigt. Die Abfallvermeidung setzt am Übergang zwischen Produkt und Abfall an. Fällt - z. B. durch direkte Weiterverwendung - kein Abfall an, greift das Kreislaufwirtschaftsgesetz nicht. Das Produkt bleibt als solches erhalten. Aus rein ökologischer Sicht auf die Stoff- und Energieströme stellt dies die nachhaltigste Vorgehensweise dar, da hier ein Produkt ohne zusätzlichen Ressourcenverbrauch und der damit einhergehenden Umweltbelastung weiter verwendet wird.

5.2 Aufdoppeln

Im Fall der WDVS bedeutet Abfallvermeidung, dass der Materialverbund nicht rückgebaut wird, sondern durch eine weitere Materiallage aus Kleber, Dübeln, Dämmstoff, Armierungsputz mit Armierungsgewebe und Deckputz ergänzt wird, um die zum Zeitpunkt der Überarbeitung aktuellen energetischen Anforderungen zu erfüllen. Durch das Aufdoppeln wird die Nutzungsphase des WDVS verlängert und die Forderung des KrWG nach Abfallvermeidung für den weiteren Nutzungszeitraum erfüllt. Im Sinne der Nachhaltigkeit wird die vorhandene Dämmstofflage weiter genutzt. Die Nutzungsdauer des WDVS kann damit auf einen Zeitraum von insgesamt 40 bis 120 Jahren ausgedehnt werden. Es ist aber davon auszugehen, dass in oder nach diesem Zeitraum ein Rückbau ansteht, ausgelöst vom Zustand der gesamten Bausubstanz, eingetretenen Schäden, beabsichtigten Nutzungsänderungen oder den veränderten Ansprüchen der Nutzer an ein Gebäude. Das Aufdoppeln ist eine häufig angewandte Sanierungsmethode von WDVS. Sie verhindert jedoch den späteren Rückbau nicht.

Die Entwicklung von Verfahren für

- rückbaufreundliche Befestigungssysteme,
- Aufdopplung und
- eindeutige Kennzeichnung unterschiedlicher EPS-Generationen

ist deshalb wünschenswert.

Das durch eine Aufdopplung entstehende WDVS erfordert andere, mehrstufige Rückbauverfahren, die in der Lage sein müssen, mit diesen mehrlagigen Aufbauten umzugehen. Beim selektiven Rückbau von aufgedoppelten Systemen

müssen vier anstatt zwei Materiallagen abgeschält und getrennt werden. Das Aufdoppeln und das im Rückbaufall nötige Abschälen und Trennen der Komponenten verlangen nach Alternativen zum derzeit üblichen Kleben, die nicht nur beim Anbringen von WDVS generell einsetzbar sind, sondern auch beim Aufdoppeln.

Unter dem Gesichtspunkt des Vermischungsverbots und einer möglichst weitgehenden stofflichen Verwertung (Recycling) ist es nötig, dass HBCD-haltige und HBCD-freie Dämmstoffe auch unter den auf einer Baustelle üblichen Bedingungen schnell und sicher unterschieden werden können. Als einfachste Methode für eine Positivkennzeichnung bietet sich eine eindeutige farbliche Markierung der HBCD-freien EPS-Dämmstoffe an. Diese Kennzeichnung muss auch nach dem Entschichtungsprozess noch eindeutig erkennbar sein. Eingefärbtes EPS ist bereits am Markt erhältlich. Für Lebensmittelverpackungen bietet die Firma Sunpor unterschiedlich farbige EPS-Granulate an.

5.3 Rückbau

Das WDVS wird durch den Rückbau zum Abfall. Durch diesen Statuswechsel fällt das rückgebaute WDVS unter das Regime des KrWG. Der Rückbau kann dabei sowohl durch eine Sanierungs- oder Erweiterungsmaßnahme als auch durch den Komplettrückbau des Gebäudes notwendig werden. Der Rückbauprozess gliedert sich – unabhängig davon, ob es sich um ein aufgedoppeltes oder ein nicht aufgedoppeltes System handelt in drei Schritte:

- Abnehmen des WDVS und seiner Bestandteile vom Wandbildner,
- Trennen von WDVS-Bestandteilen und
- Verwerten bzw. Beseitigen des WDVS oder seiner Bestandteile.

5.3.1 Nicht aufgedoppelte WDVS

Möglichkeiten für die Entfernung des WDVS vom Wandbildner und für die Entschichtung des Systems sind in 3.4 und 4 beschrieben. Hier besteht noch Bedarf an technischen Weiterentwicklungen im Bereich der Baumaschinen. Bei nicht aufgedoppelten Systemen ist auf der Baustelle nicht mit einer Vermischung von HBCD-haltigem und HBCD-freien EPS-Dämmstoff zu rechnen, solange der Dämmstoff aus dem WDVS getrennt von anderen Dämmstoffen gesammelt wird. Erst bei der Verwertung muss sichergestellt sein, dass es zu keiner Vermischung beider EPS-Typen kommt.

5.3.2 Aufgedoppelte WDVS

Bei aufgedoppeltem WDVS können im Hinblick auf den EPS-Dämmstoff drei Szenarien auftreten:

- Szenario 1: WDVS 1 mit HBCD-haltigen Dämmstoffen, aufgedoppelt mit WDVS 2 mit ebenfalls HBCD-haltigen Dämmstoffen

- Szenario 2: WDVS 1 mit HBCD-haltigen Dämmstoffen, aufgedoppelt mit WDVS 2 mit HBCD-freien Dämmstoffen
- Szenario 3: WDVS 1 mit HBCD-freien Dämmstoffen, aufgedoppelt mit WDVS 2 mit HBCD-freien Dämmstoffen (Eine Möglichkeit, die frühestens in 30 – 40 Jahren zum Tragen kommt).

Beim Szenario 2 kommt es zur Vermischung von Dämmstoffen mit HBCD (POP-Stoff) und dem neuen polymeren Flammschutzmittel. Folglich ist sicherzustellen, dass beim Rückbau eines aufgedoppelten Systems nach Szenario 2 eine Trennung beider Dämmstoffsorten erfolgen kann.

Die Szenarien 1 und 3 sind von der Handhabung auf der Baustelle identisch. Erst bei der werkstofflichen Verwertung muss sichergestellt sein, dass es zu keiner Vermischung beider EPS-Typen kommt.

Bei einer Kombination von HBCD-freiem und HBCD-haltigem EPS wäre eine Kennzeichnung des neuen EPS vorteilhaft. Durch eine Kennzeichnung des HBCD-freien EPS Dämmstoffs kann eine Unterscheidung erreicht werden, die beim Rückbau eine Vermischung beider EPS Dämmstoffe verhindert.

Die Kennzeichnung sollte als eine branchenübergreifende Positivkennzeichnung erfolgen. Für eine Rohstoffkennzeichnung eignen sich Farbstoffe oder Pigmente, die eine eindeutige Identifizierung im sichtbaren oder unsichtbaren Wellenlängenbereich erlauben.

Ein robuster Schnelltest auf HBCD in der EPS-Matrix stellt eine alternative Möglichkeit dar, EPS mit unterschiedlichen Flammschutzmitteln zu erkennen. Bei einem positiven Befund auf HBCD wird der Dämmstoff einer kontrollierten energetischen oder einer ggf. stofflichen Verwertung in Kombination mit einem Verfahren zur Brom-Rückgewinnung zugeführt. Untersuchungen zur Entwicklung eines derartigen Schnelltests laufen. HBCD-freier Dämmstoff kann nach einem Test direkt einer Verwertung zugeführt werden.

Eine Weiterentwicklung der Füge-technik als Alternative zum Kleben kann den Rückbau erleichtern und die Gefahr einer Vermischung verringern. Für die Hersteller ergeben sich Möglichkeiten, Systeme auf dem Markt zu platzieren, die nicht nur leicht von der ersten WDVS-Lage zu entfernen sind, sondern die auch so konzipiert sind, dass eine einfache Unterscheidung des HBCD-freien EPS möglich ist.

Die Möglichkeit beide Systeme teilelektiv rückzubauen und einer energetischen Verwertung zuzuführen, existiert weiterhin. Diese Option gewährleistet, dass HBCD-haltige EPS-Systeme aus dem Stoffkreislauf ausgeschleust werden. Zusätzlich findet kein Recycling (Riskycling) von HBCD-haltigem EPS statt.

5.4 Verwertung und Beseitigung

Bis zum Inkrafttreten des Verbotes wird HBCD als Flammschutzmittel in Hartschaumstoffen aus Polystyrol eingesetzt. Von 1960 bis 2012 wurden ca. 5.000 kt an EPS Hartschaum für den Bausektor produziert, davon ca. 20 % bis 25 % für die Verwendung als Dämmstoff in WDVS. Bislang konnten Abfälle aus HBCD-haltigen EPS Dämmstoffplatten sowohl werkstofflich als auch stofflich verwertet werden. Durch die Einstufung von HBCD als besorgniserregenden Stoff muss gewährleistet werden, dass rückgebaute EPS-Dämmplatten, die dieses Flammschutzmittel enthalten, separat von Verpackungs-EPS gelagert und einer energetischen Verwertung zugeführt werden. Die Verwertungsmaßnahme muss in der Lage sein, das besorgniserregende Flammschutzmittel auszuscheiden oder zu zerstören. Die Mitverbrennung von EPS-Abfall aus dem Sektor Bau stellt nach dem momentanen technischen Entwicklungsstand die sicherste Methode der Verwertung dar.

Werkstoffliche Verwertung

Einer werkstofflichen Verwertung von rückgebautem EPS stehen derzeit noch entgegen:

- **Fehlende Logistik**
Wegen der fehlenden Logistik werden derzeit nur geringe Mengen an EPS von Baustellen oder vom Rückbau von WDVS zurückgeführt.
- **Nachfrage nach Dämmplatten aus rezykliertem EPS**
Im Moment sind die Mengen und Nachfragen nach Recyclingplatten noch gering.
- **Mangelnde Wirtschaftlichkeit**
Zurzeit sind die EPS-Recyclingplatten wegen des relativ geringen Preisunterschieds zwischen neuem Rohstoff und den Kosten für die Aufarbeitung des Recyclingmaterials nicht wirtschaftlich herstellbar.
- **HBCD**
Das Flammschutzmittel HBCD muss aus der Umwelt entfernt werden.

Für eine werkstofflich Verwertung sprechen:

- Die regionale Verteilung und technische Ausstattung der Schäumbetriebe, mit deren Möglichkeiten zur Aufarbeitung von EPS-Abfällen.
- Steigende Rohstoffpreise und zunehmendes EPS-Abfallaufkommen

Rohstoffliche Verwertung

Die selektive Extraktion von expandiertem Polystyrol mit dem CreaSolv®-Verfahren ist noch kein kommerzielles Verfahren. Die Technikumsanlage des Fraunhofer IVV zeigt jedoch, wie die Rückführung von Abfällen aus dem Polymer Polystyrol in den Stoffkreislauf zukünftig aussehen kann. Das rückgewonnene Polystyrol kann nach dem Durchlaufen des CreaSolv®-Prozesses wieder als

Rohstoff für die Herstellung von Produkten aus Polystyrol eingesetzt werden, was einem Recycling im ursprünglichen Sinne entspricht. Neben der Rückgewinnung des Polymers können mit diesem Verfahren auch Schad- und Störstoffe wie das Flammschutzmittel HBCD ausgeschleust werden. Ein großes Hemmnis für die Durchsetzung dieses Verfahrens auf dem Markt stellt die fehlende Nachfrage nach Produkten aus recyceltem Polystyrol dar. Derzeit ist es schwer einzuschätzen, in wieweit ein prinzipiell gut geeigneter Verfahrensansatz sich über die kommenden Jahre und Jahrzehnte unter technischen und ökonomischen Bedingungen durchsetzen wird.

Energetische Verwertung

Zurzeit kann nur mit der energetischen Verwertung von WDVS- Abfällen die Forderung des Stockholmer Übereinkommens erfüllt werden, nach der POP-haltige Abfälle so verwertet oder beseitigt werden müssen, dass die in ihnen enthaltenen Schadstoffe zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden. Ausgehend von der Jahreskapazität aller Müllverbrennungsanlagen in Deutschland von 20.000 kt und einer Mitverbrennungsquote an EPS-Abfall von 1 Gew.-% bis 2 Gew.-%, könnten zur Zeit jährlich 200 kt bis 400 kt an POP-haltigen EPS-Abfall energetisch verwertet werden.

Weitere Vorteile der energetischen Verwertung sind:

- geringe Transportentfernung bei der Nutzung von Anlagen zu kommunalen Müllverbrennung
- Geringe Anforderungen an Sauberkeit und Fremdstoffgehalt des WDVS-Abfalls
- Ökologisch vorteilhaft wegen Energierückgewinnung und Schadstoffsenske

5.5 Abfallaufkommen

Die Recherchen im Rahmen dieser Studie haben gezeigt, dass das Abfallaufkommen von EPS aus dem Bereich WDVS sehr gering ist und von keiner Statistik direkt erfasst wird. Grund hierfür sind die Lebenszyklen von > 40 Jahre der bisher verlegten WDVS Systeme. Ein Rückbau der verlegten WDVS wird jedoch definitiv in der nahen Zukunft stattfinden. Im Kapitel 5.6 sind Prognosen, wie sich das EPS-Abfallaufkommen aus WDVS in Zukunft entwickeln kann, dargestellt. Die prognostizierten EPS-Abfallmengen sind mit den vorhandenen Verwertungsverfahren beherrschbar.

In der Abfallstatistik des Statistischen Bundesamts [43] werden EPS-Hartschaumdämmstoffe aus der Bauanwendung gemeinsam mit weiteren Dämmstoffen wie z. B. aus Mineralwolle, Polyurethanschaumstoff oder Holzwole unter dem Begriff Dämmmaterial (17 06 04) zusammengefasst. Die genannte Abfallmenge von 85 kt an Dämmmaterial erlaubt keine nachträgliche Zuordnung.

Von der Consultic Studie [4] werden u. a. die Produktions- und Abfallmengen von expandierten Polystyrol erfasst. Es findet eine Unterscheidung in die Haupt-

anwendungen Verpackung und Bau statt. Laut dieser Studie lag das Abfallaufkommen an expandierten Polystyrol im Jahr 2011 in Deutschland bei 60 kt für den Bereich Verpackung und bei 42 kt für den Bereich Bau. Das genannte Abfallaufkommen an EPS im Baubereich gesamt liefert keinen Rückschluss auf die Abfallquoten aus einzelnen Anwendungsfällen, z. B. EPS für WDVS.

Nach Angaben des FV-WDVS [29] wurden im Jahr 2012 ca. 50.000 m² WDVS auf EPS-Basis rückgebaut. In dieser Zahl sind sowohl der Rückbau von energetisch gedämmten Gebäuden als auch die Sanierung von WDVS, die durch Umwelteinflüsse wie Sturm, Hagel und Hochwasser zerstört wurden, enthalten. Die genannte rückgebaute Fläche entspricht in etwa 75 Tonnen an EPS-Abfall bzw. 750 Tonnen WDVS-Abfall.

Entsorger nennen eine jährliche Abfallquote aus dem Bereich WDVS von 1000 Tonnen [64]. Da WDVS als Baumischabfall nach der Abfallschlüsselnummer 17 09 04 entsorgt werden, kann aus dieser Nennung der Dämmstoffanteil nur geschätzt werden. Bei einem Massenverhältnis der organischen (hauptsächlich Dämmstoff) zur anorganischen Fraktion (Kleber, Putz und Armierung) von 1:9 entfallen ca. 100 Tonnen Abfall auf den Dämmstoff. Die von Entsorgern und Verbänden genannten Zahlen stimmen bezogen auf den reinen EPS-Dämmstoffabfall im Wesentlichen überein. Dies spiegelt sich auch in den Aussagen der Rückbauunternehmen wider. Der Rückbau von wärmedämmten Gebäuden ist derzeit noch eine Ausnahme.

Die Tabelle 9 fasst die Angaben der recherchierten Quellen zusammen.

Tabelle 9:

Gegenüberstellung der in unterschiedlichen Quellen genannten Abfallmengen aus dem Rückbau von Dämmmaterialien.

WDVS-Hersteller [29]	Entsorger [64]	Consultic [4]	Statistisches Bundesamt [43]
0,1 kt (EPS)	1 kt (WDVS)	42 kt (EPS/XPS)	85 kt (Dämmmaterial 17 09 04)

Bezogen auf das Abfallaufkommen der „übrigen Bau- und Abbruchabfälle“ mit 15.759 kt in Deutschland bewegen sich die von der Statistik und von der Studie erfassten Abfallmengen an Dämmmaterial mit 0,5 % bzw. EPS-Abfall mit 0,2 % in einem geringen Bereich.

Nach Angaben von Consultic [4] wurden im Jahr 2011 insgesamt 315 kt an EPS hergestellt. 271 kt fanden im Baubereich Verwendung und 41 kt in der Verpackungsindustrie (Bild 32). Die verbleibenden 3 kt wurden für sonstige Anwendungen eingesetzt. Nach den Recherchen von Consultic entstanden im Jahr 2011 in Deutschland 102 kt EPS-Abfall. Davon entfallen 60 kt auf den Verpa-

ckungssektor und 42 kt auf den Bausektor. Die mittlere Produktionsmenge an EPS für den Bereich der WDVS lag in den letzten 5 Jahren bei ca. 60 kt/a; dies entspricht einem Anteil von 23,5 % der gesamten Jahresproduktionsmenge (277 kt) des Jahres 2011. Geht man bei der Abschätzung des EPS-Abfalls von gleichen Verhältnissen aus, so ergibt sich bei einer gesamten EPS/XPS-Abfallmenge von 42 kt eine EPS-Abfallmenge aus dem Bereich WDVS, die bei 9,4 kt liegt. Diese Berechnung berücksichtigt die Langlebigkeit und die Nutzungsphase für WDVS von 40 bis 60 Jahren nicht und stellt somit ein worst-case Szenario für eine mögliche Rückbauquote des Jahres 2011 dar.

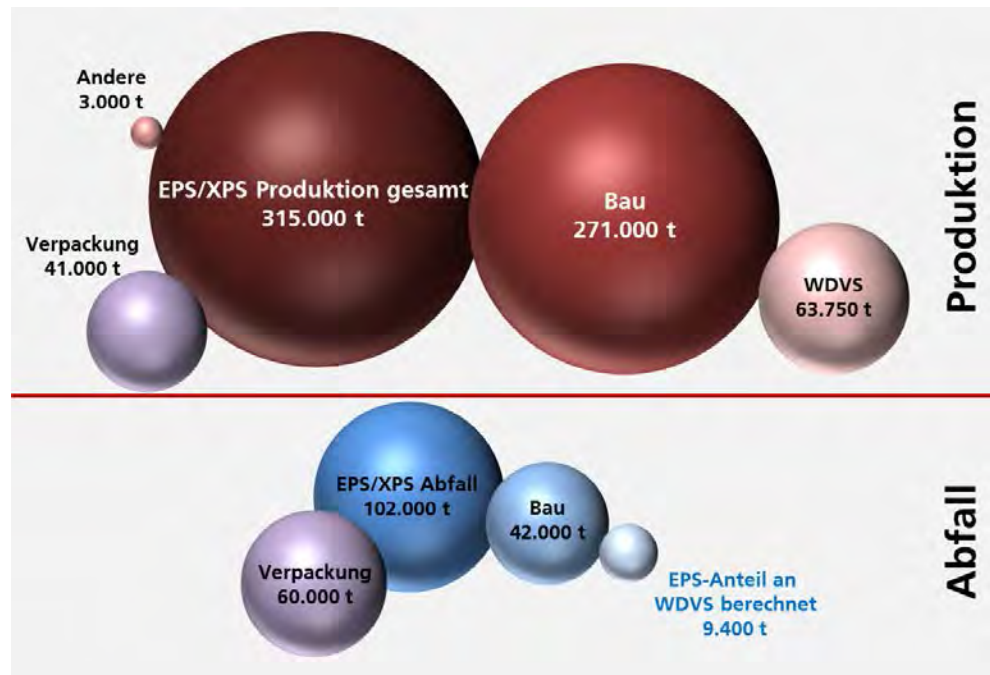


Bild 32:

Gegenüberstellung der EPS/XPS Produktion und des EPS/XPS Abfallaufkommens in Deutschland (Stand 2011); Der WDVS-Abfallanteil wurde aus dem Produktionsverhältnis Anteil Bau zu Anteil WDVS abgeschätzt. Der WDVS-Anteil am Abfallaufkommen beträgt bei diesem worst-case Szenario 23,5 % [44].

Für die Betrachtung des Abfallaufkommens aus dem Bereich WDVS in Deutschland wurden auch Daten des Statistischen Bundesamts herangezogen [43]. Aus diesen Daten konnte kein direkter Rückschluss auf Abfallmengen von EPS aus WDVS gewonnen werden. Abfälle, die beim Rückbau von WDVS anfallen, können nach der gültigen AVV [10] zwei Kategorien zugeordnet werden. Zum einen kann der gesamte WDVS-Abfall als Baumischabfall (17 09 04) entsorgt werden oder die Fraktion der Dämmmaterialien, unter die der Dämmstoff EPS fällt, wird unter dem Abfallschlüssel 17 06 04 entsorgt. In beiden Fällen kann aus den kumuliert erfassten Daten kein Rückschluss auf die EPS-Abfallmenge gezogen werden. Die Abfallschlüsselnummer 17 09 04 erfasst das gesamte Gemenge aus Dämmstoff, Kleber, Dübel, Putz, Armierungsmörtel und Armierungsgewebe und alle anderen Baustoffe, die in dem spezifischen Container gesammelt wurden. Die Abfallschlüsselnummer 17 06 04 unterscheidet nicht

zwischen mineralischen Dämmmaterialien wie z. B. Mineralwolle und organischen Dämmmaterialien wie Polystyrol- oder Polyurethanschaumstoff. In Bild 33 sind die angefallenen Abfallmengen an Dämmmaterial für die Jahre 2006 bis 2012 dargestellt. Die unter der Abfallschlüsselnummer 17 06 04 erfassten Abfallmengen bewegen sich zwischen 50 kt und 90 kt Dämmmaterial Abfall pro Jahr.

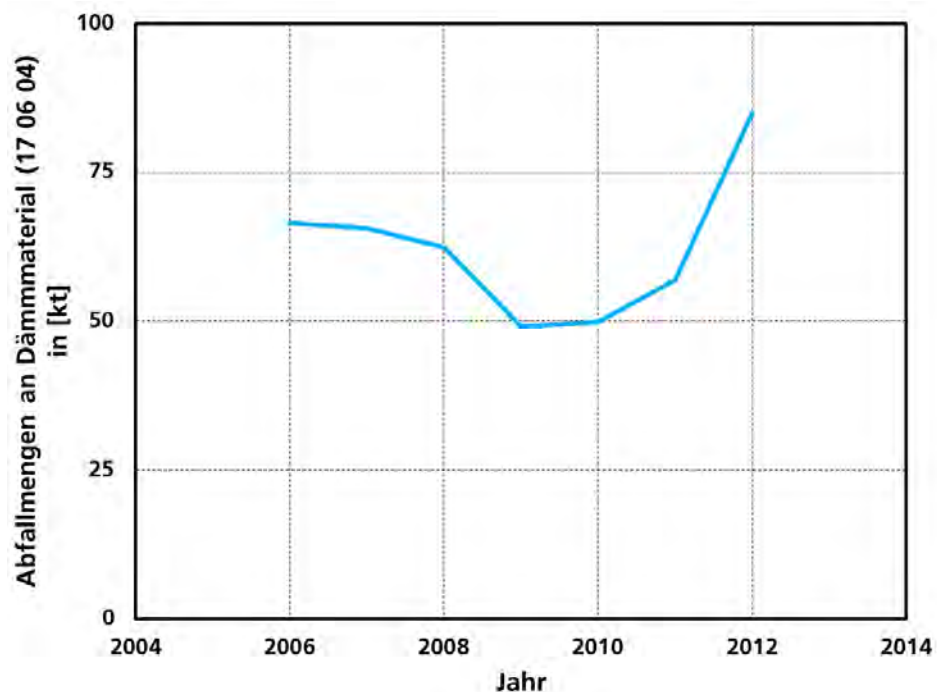


Bild 33:
Abfallmengen an Dämmmaterial laut Abfallschlüsselnummer 17 06 04 in Deutschland [43].

Problematisch bei der Erfassung des Abfallaufkommens sind die Annahmen, die getroffen werden müssen. Im Bereich der Entsorgung wird der Abfall in der Masseinheit Tonne erfasst. Das WDVVS produzierende Gewerbe erfasst seine Zahlen in Quadratmeter (m^2) an verbauter Fläche. Bereits durch die Annahmen bezüglich der Plattendicke und des Raumgewichts von verbauten Dämmstoffplatten kann es zu einer Unschärfe von nahezu 100 % kommen. Außerdem kann nicht ausgeschlossen werden, dass in einzelnen Fällen eine Doppelerfassung der Abfallmengen, zum Beispiel aufgrund des Abfallschlüssels, erfolgt.

Für den Verwerter ist es nicht erkennbar, aus welchem Bereich des Gebäudes der EPS-Dämmstoffabfall stammt. Daher sind EPS-Hersteller in enger Abstimmung mit EPS-verarbeitenden Gewerken gefragt, Systeme für eine geregelte Sammlung und Entsorgung von EPS-Abfall zu erarbeiten und zu etablieren, so wie die die Abfallströme zu bündeln und die Transportkosten zwischen Baustelle und Verwerter zu minimieren. Erfahrungen aus dem Rückbau von WDVVS können dann auch auf andere Bereiche, in denen EPS- oder XPS-Dämmstoffe eingesetzt werden, wie am Dach oder Keller, übertragen werden.

5.6 Prognose

Keine der im Kapitel 5.5 vorgestellten Quellen liefert eine belastbare Aussage über das tatsächliche Abfallaufkommen von EPS aus WDVS. Die durchgeführten Berechnungen, um aus den erfassten Summenparametern z. B. der Consul-tic Studie [4] auf die Abfallmengen von EPS aus einer Bauanwendung hier WDVS rückzurechnen, sind nur unter diversen Annahmen möglich und somit mit großen Unsicherheiten behaftet.

Für die Erstellung von Prognosen, wie sich das Abfallaufkommen von EPS aus allen Bauanwendungen und aus WDVS in Zukunft entwickeln wird, sind diese Zahlen deshalb ungeeignet.

Die Abfallmengen an EPS-Hartschaumstoffen bestimmen die zukünftige Entwicklung von Verfahren, mit denen der Rückbau und die Verwertung ökonomisch und ökologisch zu betreiben sind.

Nachfolgend sind die Prognosen für die Rückbauquoten an EPS aus WDVS und für EPS insgesamt dargestellt. Als Basis für diese Prognosen wurden die jährlichen EPS-Absatzmengen für WDVS für den Zeitraum von 1977 bis 2012 und für alle Bauanwendungen für den Zeitraum von 1960 bis 2012 herangezogen. Für die Abschätzung wurde eine mittlere Lebensdauer von EPS von 40 bzw. 50 Jahren angenommen. Der angenommene Rückbau erfolgt über ± 20 Jahre respektive ± 25 Jahre.

Für die Berechnung der Rückbaumengen wurden zwei Modelle verwendet:

- a) Rückbau mit einer konstanten Rückbaurate r über einen Zeitraum z
- b) Rückbau, der einer Normalverteilung entspricht.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times \sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

x Jahr, in dem der Rückbau beginnt

μ Lebensdauer des WDVS in [a]

σ Standardabweichung der Lebensdauer in [a]

Für die Berechnung der zukünftigen Rückbauquoten nach Modell (a) wurden Rückbauraten von 2 % über einen Zeitraum von 50 Jahren und eine Rückbauquote von 2,5 % über einen Zeitraum von 40 Jahren angenommen.

Die Berechnung der zu erwartenden Rückbaumengen nach Modell (b) erfolgte unter den folgenden Annahmen:

- I) $\mu = 50, \sigma = 8,33$ (Bild 34)
- II) $\mu = 50, \sigma = 12,75$ (Bild 35)
- III) $\mu = 40, \sigma = 6,67$ (Bild 36)

Das mögliche Rückbauaufkommen wurde für eine Lebensdauer von 40 Jahren von EPS bis zum Jahr 2032 berechnet. Bei einer Lebensdauer von 50 Jahren kann eine Prognose, basierend auf den Produktionsmengen bis 2012, nur bis zum Jahr 2037 dargestellt werden.

Je länger die betrachtete Zeitspanne ist, umso stärker gleichen sich die Verläufe der prognostizierten Rückbauquoten nach den beiden gewählten Modellen an. Tendenziell ergeben sich nach Modell (a) höhere jährliche Rückbauquoten wie nach Modell (b).

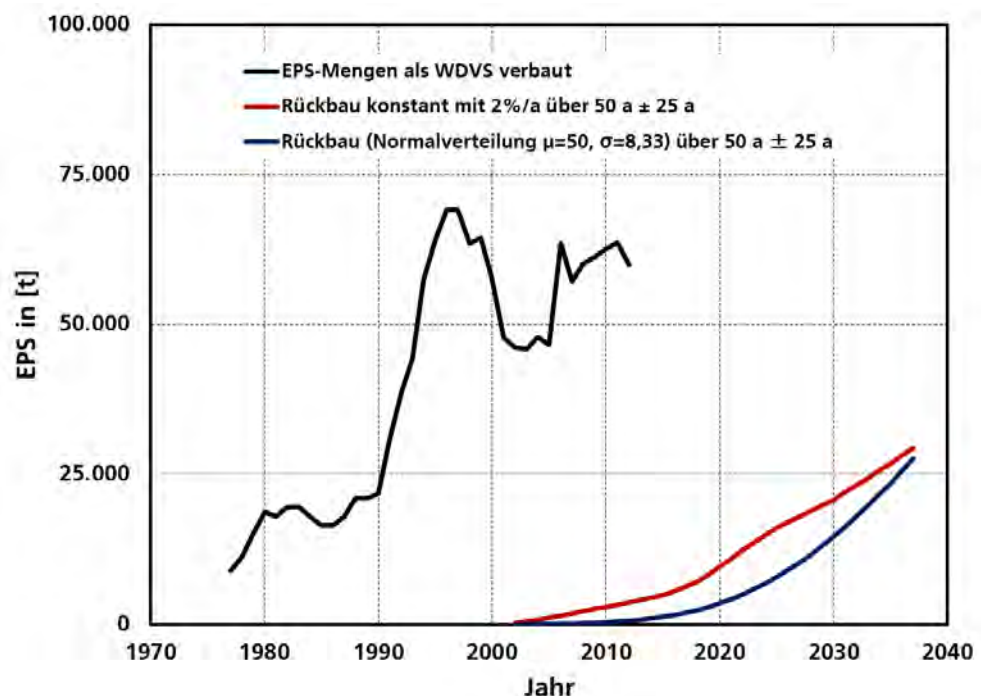


Bild 34:

EPS-Absatzmengen im Bereich WDVS und Prognosen für Rückbau: a) Normalverteilung mit $\mu = 50$ und $\sigma = 8,33$; b) Rückbau konstant mit 2 % über 50 Jahre.

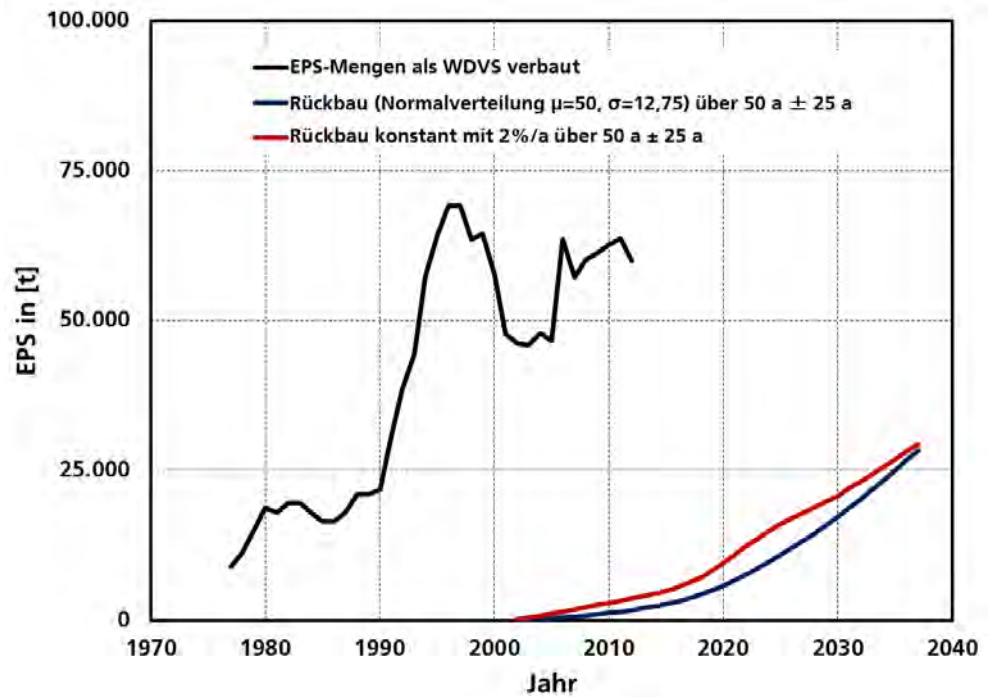


Bild 35:
EPS-Absatzmengen im Bereich WDVS und Prognosen für Rückbau: a) Normalverteilung mit $\mu = 50$ und $\sigma = 12,75$; b) Rückbau konstant mit 2 % über 50 Jahre.

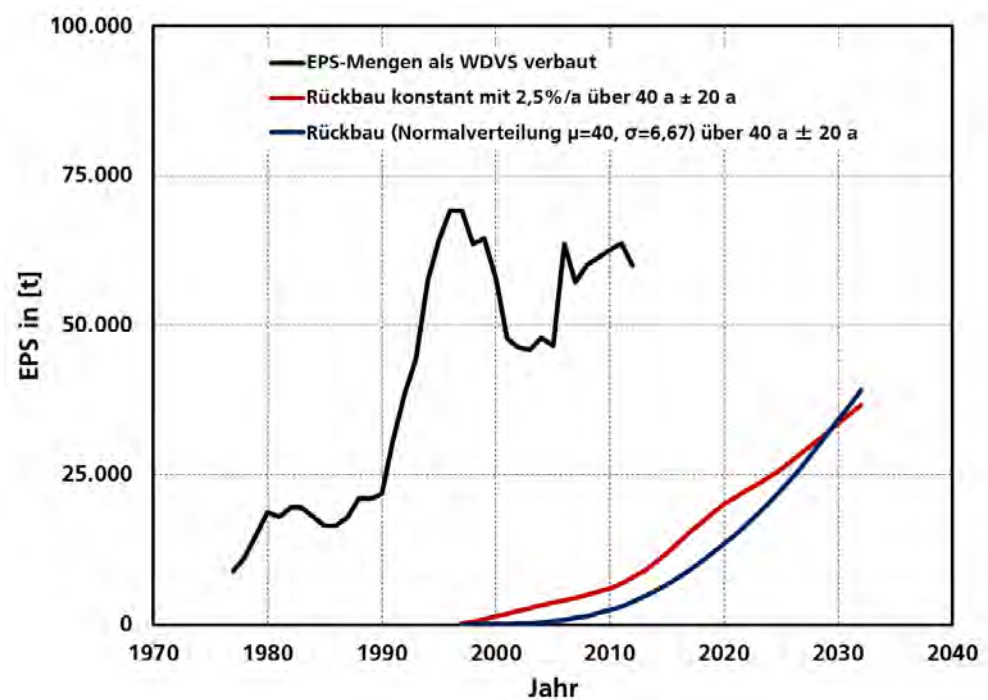


Bild 36:
EPS-Absatzmengen im Bereich WDVS und Prognosen für Rückbau: a) Normalverteilung mit $\mu = 40$ und $\sigma = 6,67$; b) Rückbau konstant mit 2,5 % über 40 Jahre.

Zur Vervollständigung wurden unter Einbeziehung der o. g. Modelle Prognosen für den Rückbau von EPS aus den Bauanwendungen berechnet (Bild 37). Für die Jahre 2009 und 2011 stimmen die nach beiden Modellen berechneten Daten gut mit denen der Consultic-Studien [4] überein.

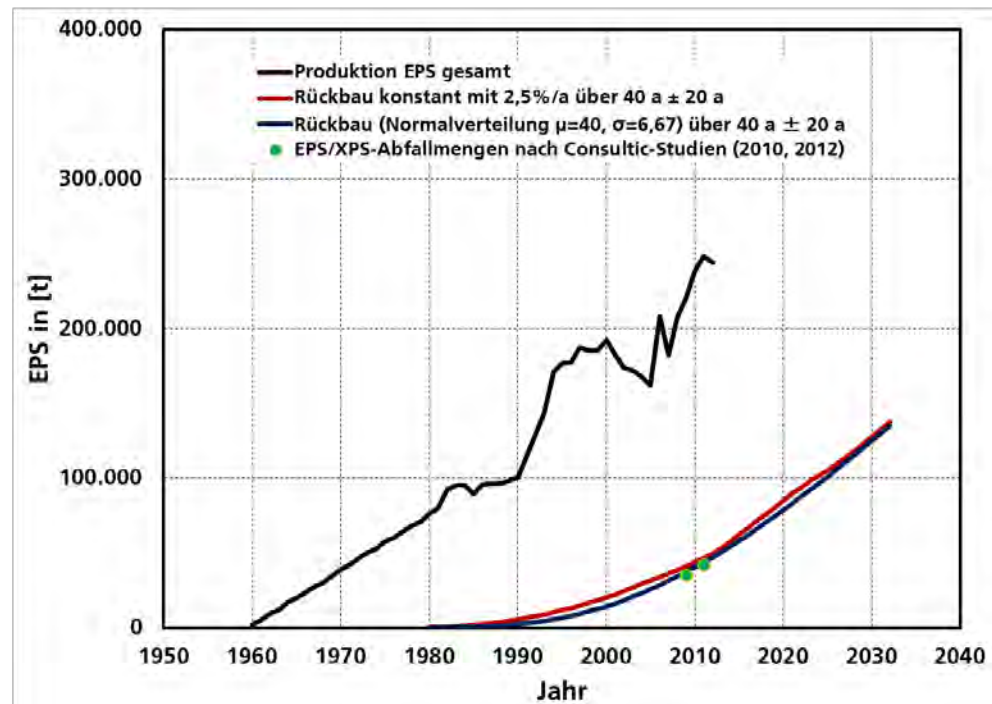


Bild 37:
EPS-Absatzmengen für Bauanwendungen und prognostizierte Rückbaumengen.

Die Rückbauprognose von EPS aus WDVS nach dem Modell (b) mit $\mu = 50$ und $\sigma = 8,33$ zeigt gute Übereinstimmung mit den Rückbaumengen an EPS aus WDVS, die von den Entsorgern und dem FV-WDVS genannt werden (Bild 38).

Die Bandbreite der Nutzungsdauer von EPS-Produkte im Bau reicht von ca. 20 Jahren bei Flachdachdämmungen bis zu 50 Jahren oder mehr für WDVS. Dies spiegelt sich in der guten Übereinstimmung der Rückbauquoten nach Consultic und den berechneten Rückbaumengen nach einer Nutzungsdauer von 40 Jahren wieder.

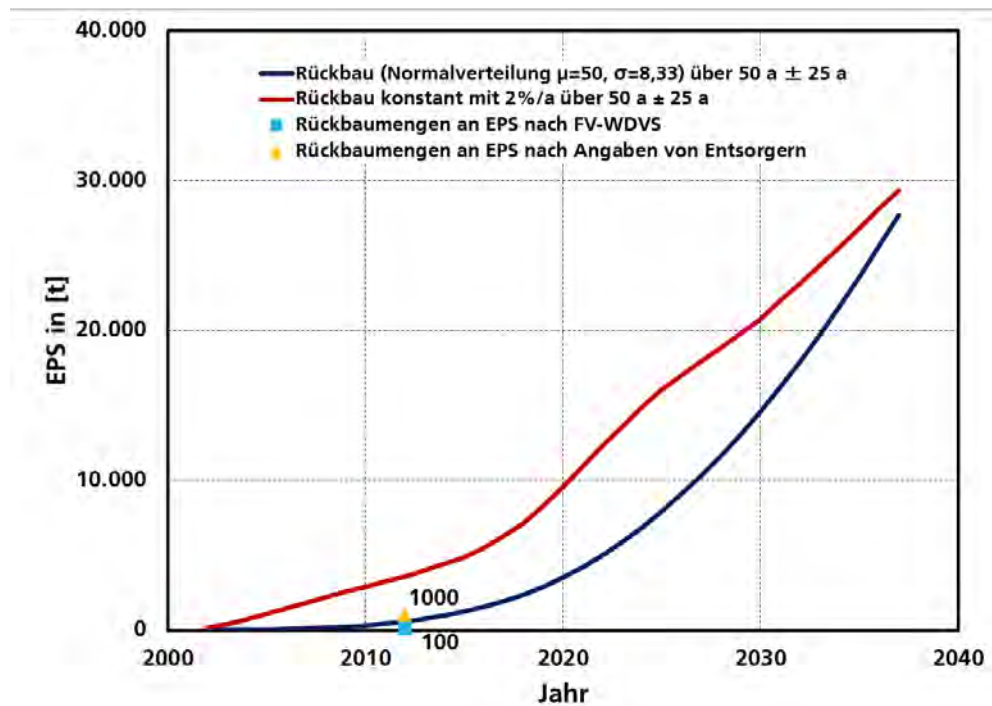


Bild 38:
Prognosen für EPS Rückbau: a) Normalverteilung mit $\mu = 50$ und $\sigma = 8,33$; b) Rückbau konstant mit 2 % über 50 Jahre; Rückbaumengen an EPS für das Jahr 2012 nach den Informationen des FV-WDVS und von Entsorgern.

Für die Abschätzung der Rückbauquoten über das Jahr 2035 hinaus wurde ein gleitender Mittelwert über 40 Jahre bzw. 50 Jahre berechnet. Aus dieser Berechnung ergeben sich ab dem Jahr 2050 EPS-Rückbaumengen in der Größenordnung von 50 kt/a für den Bereich WDVS (Bild 39) und 150 kt/a für den gesamten Bausektor (Bild 40). Die ab dem Jahr 2050 prognostizierten Rückbaumengen bewegen sich in der Größenordnung der zu erwartenden Jahresproduktionsmengen an EPS für WDVS.

Die Kurve der prognostizierten Rückbaumengen flacht in den Jahren nach 2050/2060 deutlich ab, da in den nächsten Jahren nicht mit steigenden EPS-Produktionsmengen für den Bereich WDVS zu rechnen ist. Ein Grund liegt darin, dass viele unkompliziert zu dämmende Gebäude bereits gedämmt sind und das Handwerk nicht die Montagekapazitäten hat oder kurzfristig aufbauen kann, um deutlich mehr WDVS anzubringen. Die vorhandenen Gebäude mit WDVS werden aber weitergenutzt werden, so dass sich der Rückbau weiter in die Zukunft verschiebt.

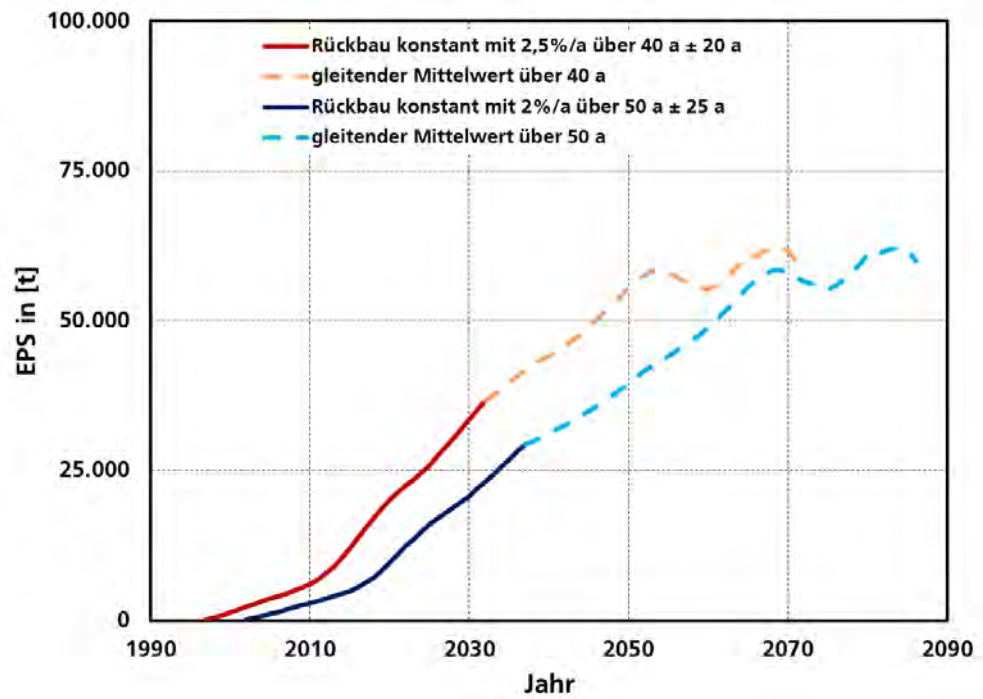


Bild 39:
Prognostizierte Rückbaumengen an EPS aus WDV.

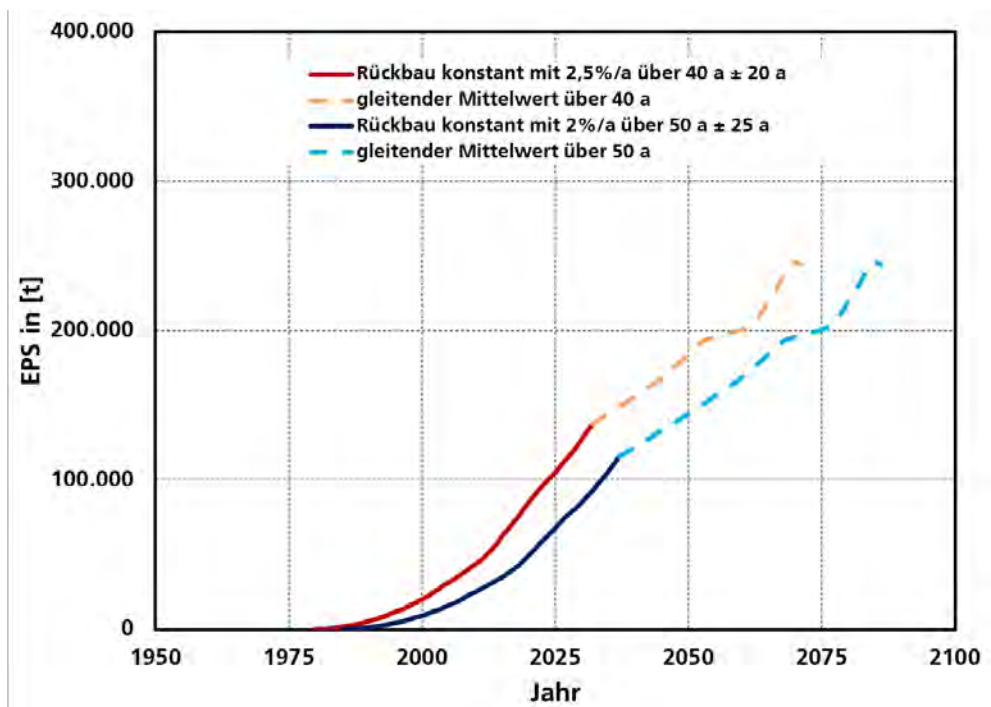


Bild 40:
Prognostizierte Rückbaumengen an EPS aus Bauanwendungen.

6 Handlungsempfehlungen und Forschungsbedarf

Für die nahe Zukunft (Zeitraum bis max. 20 Jahre) stellt die energetische Verwertung bezogen auf die zu erwartende Mengen an EPS aus dem Rückbau von Gebäuden sowie die Ausschleusung des Flammenschutzmittels HBCD eine ökologische und ökonomische Verwertungsmethode dar.

Längerfristig (Zeitraum > 40 Jahre) werden auch andere Verwertungsmaßnahmen aus ökologischer und ökonomischer Sicht interessant, vor allem dann, wenn der Rückbau von EPS-Dämmstoffen nicht eingeschränkt auf WDVS-Dämmstoffe (gewerkspezifisch) betrachtet wird.

Ertüchtigung

Das Aufdoppeln von bestehenden WDVS stellt im Bereich der Anpassung von WDVS an aktuelle Vorgaben zur Energieeinsparung die Methode mit dem geringsten Abfallaufkommen dar. Für den Gesetzgeber hat die Abfallvermeidung die höchste Priorität, gefolgt von der Minimierung schädlicher Auswirkungen auf die Umwelt und die menschliche Gesundheit. **Somit stellt die Aufdoppelung von bestehenden WDVS hinsichtlich der Abfallvermeidung die Methode der Wahl dar.** Damit auch das umweltpolitische Ziel der Ausschleusung von HBCD umgesetzt werden kann, werden folgende Maßnahmen empfohlen:

- Einführung einer **herstellerübergreifenden Positivkennzeichnung** von HBCD-freiem EPS zur sicheren Unterscheidung von HBCD-haltigem und HBCD-freiem EPS
- die Entwicklung und **Einführung eines Schnelltestverfahrens** für HBCD-haltige EPS-Dämmstoffe, das auch unter den Bedingungen auf der Baustelle oder beim Verwerter eine zuverlässige Identifikation ermöglicht
- Entwicklung neuer Fügetechniken und Befestigungsmethoden für WDVS als Alternativen zum derzeit üblichen Kleben
- **Entwicklung fortgeschrittener Techniken und Werkzeuge für den selektiven Rückbau** von aufgedoppelten WDVS wie z. B. Schälwerkzeugen als Modulkomponenten für z. B. Hydraulikbagger.

Rückbau

Der Rückbau der WDVS soll selektiv erfolgen, um die einzelnen Komponenten einer spezifischen Verwertung zuführen zu können. Das setzt beim WDVS voraus:

- einen selektiven Abtrag der einzelnen WDVS-Lagen,
- alternative Fügetechniken als Ersatz für die Klebetechnik wie temporäre Klebstoffe, leicht zu lösende Klebstoffe wie z. B. PSA-Kleber (pressure sensitive adhesive) oder textile Fügetechniken (Klettverschluss),
- Werkzeuge für das Abschälen der WDVS-Bestandteile auf der Baustelle, z. B. für die thermische Entschichtung,
- die **Verwendung von maschinellen Entschichtungsverfahren mit Staubabsaugung** für die Bearbeitung großer Flächen,

- die Entwicklung von Handwerkszeugen mit Staubabsaugung für die Bearbeitung von Flächen, die mit baustellenüblichen Großgeräten nicht bearbeitet werden können,
- die **Reduzierung der Staubentwicklung und der damit einhergehenden Verfrachtung** von HBCD-haltigen EPS-Stäuben (freies HBCD als Stoff unwahrscheinlich, muss jedoch geprüft werden) beim Entschichten durch die Verwendung von Absaugvorrichtungen,
- Fahrzeugaufbauten für den volumenoptimierten Transport von abgeschältem EPS-Dämmstoff
- Abstandssensoren bzw. Assistenzsysteme für die Baumaschinen zur Unterstützung des Personals beim Abschälvorgang
- **Separieren und getrenntes Lagern von HBCD-freien** (Verpackungs-EPS und Bau-EPS mit dem PolyFR) **und HBCD-haltigen EPS-Abfällen** bereits auf der Baustelle.

Verwerten

Grundsätzlich kommen für EPS-Abfälle alle Verwertungsverfahren in Frage. POP-haltige EPS-Abfälle müssen so verwertet oder ggf. beseitigt werden, dass die in ihnen enthaltenen Schadstoffe wie z. B. HBCD zerstört oder unumkehrbar umgewandelt werden.

- HBCD-haltiges EPS kann stofflich nur nach der Abtrennung von HBCD verwertet werden.
- Ist eine Abtrennung von HBCD nicht möglich, sind diese **EPS-Abfälle energetisch zu verwerten** (kommunale Müllverbrennung).
- Die Kapazität kommunaler Müllverbrennungsanlagen in Deutschland reicht aus, um auch die prognostizierten Abfallmengen an EPS energetisch zu verwerten.
- Bei einer stofflichen Verwertung der EPS-Abfälle sind ein kontinuierlicher Massenstrom an verwertbarem EPS und die Abnahme des PS-Rezyklats zu kostendeckenden Preisen sicherzustellen.
- Die **Weiterentwicklung von rohstofflichen Verwertungsverfahren** wie z. B. der selektiven Extraktion ist voranzutreiben.

Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Langfristig ist mit steigenden Erdölpreisen zu rechnen. Erdöl ist der maßgebliche Rohstoff für die Produktion von EPS. Die Schonung der natürlichen Ressourcen durch Recycling bildet gemeinsam mit der Reduzierung des CO₂-Ausstosses wichtige gesellschaftspolitische Herausforderungen. Um auf diese Anforderungen vorbereitet zu sein und mittelfristig einen Stoffkreislauf bei der Herstellung von EPS-Dämmstoff für Bauanwendungen etablieren zu können, sind weitere Investitionen in Forschungs- und Entwicklungsprojekte notwendig, die alle Bereiche des Lebenszyklus von WDVS betreffen. Bei all diesen F & E-Projekten ist zu berücksichtigen, inwieweit die entwickelten Techniken, Verfahren und Geräte auch für andere Dämmstofftypen und WDVS-Aufbauten einsetzbar sind. Der F & E-Bedarf erstreckt sich auf drei Bereiche, nämlich Befestigungstechnik, Aufdopplung und Rückbau, Kennzeichnung, Er-

kennung und Analyse von HBCD und die Weiterentwicklung des Rezyklierungsverfahrens.

Befestigungstechnik, Aufdopplung und Rückbau

- Im Rahmen eines Forschungsvorhabens sind **Rückbaumaßnahmen von unterschiedlichen WDVS-Typen** sowohl im Geschößwohnungsbau als auch bei Ein- und Mehrfamilienhäusern **wissenschaftlich zu begleiten**. Aus den dabei gewonnenen Erkenntnissen ergeben sich Ansätze für die Entwicklung von neuen Befestigungs- und Klebetechniken, sowie für Anbauaggregate an Baumaschinen und Handgeräte.
- Ebenfalls an realen Fassaden sind **Aufdopplungen**, u. a. zur Erprobung der neu entwickelten Befestigungstechniken, vorzunehmen. Die aufgedoppelten WDVS sind dann wieder mit unterschiedlichen Rückbaumethoden zu entschichten.
- Der Rückbau von WDVS durch das Abschälen des WDVS vom Mauerbildner ist mit den üblichen Baumaschinen bereits heute möglich. Sobald die Rückbauquote ansteigt bzw. der Recycling-Prozess höhere Anforderungen an die Reinheit des angelieferten EPS stellt, wird die Nachfrage nach **optimierten Rückbaumethoden** zunehmen. Das hat zur Folge, dass dann Anbauaggregate für einen **schnelleren und exakteren Entschichtungsvorgang** entwickelt werden müssen. Ansätze dafür sind neu zu entwickelnde Anbauaggregate an übliche Baumaschinen wie Hydraulikbagger und Steiger. Insbesondere für diese Großgeräte sind Assistenzsysteme (z. B. mit Abstandssensoren auf optischer oder mechanischer Basis) zu entwickeln, die ein schnelleres und exakteres Abschälen der einzelnen WDVS-Schichten ermöglichen. Für das Entschichten von mit Großgeräten nicht zugänglichen Fassadenbereichen (z. B. zurückgesetzte Balkone, Penthäuser, etc.) sind Entschichtungsmaschinen für den manuellen Einsatz zu entwickeln.
- Mit ersten Handversuchen konnte gezeigt werden, dass das **thermische Entschichten** einen vielversprechenden Ansatz für die Trennung von Putzsystem und EPS-Dämmstoff darstellt. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens sind die Möglichkeiten und Grenzen speziell unter dem Gesichtspunkt des Energiebedarfs dieses Verfahren sowie seine Umsetzbarkeit für eine Anwendung auf der Baustelle zu untersuchen.
- Ein wesentlicher Aspekt für eine erleichterte Rückbaubarkeit ist die **Entwicklung neuer Befestigungstechniken** sowohl des Systems auf dem Mauerbildner als auch der einzelnen WDVS-Lagen aufeinander. Dübel mit Sollbruchstellen (Einfluss auf Windsoglasten), die beim Rückbau leicht abzuscheren sind und klettverschlussähnliche Befestigungen oder Systeme z. B. auf der Basis von mechanisch leicht zu lösenden **pressure sensitive adhesives (PSA)** anstatt der üblichen Klebeverbindungen sind Ansätze, deren Entwicklung in diesem Zusammenhang vorangetrieben werden soll.
- Mit der Einführung neuer Befestigungs- und Rückbautechniken ergibt sich zwangsläufig ein **Schulungs- und Ausbildungsbedarf für die Verarbeiter**.

Positivkennzeichnung, Erkennung und Analyse von HBCD

- Sobald nach dem Produktionsverbot für HBCD die Lagerbestände an EPS mit dem Flammschutzmittel HBCD abverkauft sind, ergibt sich die Notwendigkeit, HBCD-haltiges und HBCD-freies EPS eindeutig unterscheiden zu können. Für eine sichere Unterscheidung wird eine **herstellerübergreifende Positivkennzeichnung (Farbkennzeichnung)** des HBCD-freien EPS/XPS vorgeschlagen. Geeignete Farbstoffe sind auszuwählen und auf ihre Verwendbarkeit für den Einsatz in EPS für WDVS zu prüfen. Ein wesentlicher Punkt hierbei ist die Verarbeitbarkeit von gefärbtem EPS im gängigen Produktionsprozess. Ein möglicher Einfluss des Farbstoffs auf die zulassungsrelevanten bauphysikalischen Eigenschaften des Dämmstoffs ist zu beschreiben und zu quantifizieren.
- Das Vermischungsverbot des Kreislaufwirtschaftsgesetzes soll eine Verdünnung von Schadstoffen durch die Vereinigung schadstoffhaltiger und schadstofffreier Materialien verhindern, da diese Vermischung der Ausschleusung von Schad- oder Gefahrstoffen aus dem Stoffkreislauf zuwiderläuft. Für einen Rezyklierungsprozess bedeutet dies, dass HBCD-haltige und HBCD-freie Ausgangsprodukte getrennt zu lagern und aufzuarbeiten sind. Daher ist die **Entwicklung von Untersuchungsverfahren für die schnelle und zuverlässige Detektion von HBCD-haltigem EPS** auf der Baustelle oder beim Verwerter notwendig.

Tabelle 10:

Zusammenstellung von Zielen, Maßnahmen und Empfehlungen hinsichtlich der Abfallvermeidung und der Wiederverwertung beim Rückbau EPS-haltiger WDVS.

Ziel	Maßnahme	Problematik	Empfehlung
Umsetzung des obersten Ziels des Kreislaufwirtschaftsgesetzes: Abfallvermeidung	Aufdoppeln von WDVS als Alternative zum Rückbau	Gefahr der Vermischung von EPS-Dämmstoffplatten mit und ohne HBCD beim späteren Rückbau	Farbliche Kennzeichnung der HBCD-freien EPS-Dämmstoffplatten zur vereinfachten Erkennung bei Rückbau und Verwertung
			Einführung einer neuen Marke für den komplett oder partiell eingefärbten EPS-Dämmstoff
			Entwicklung eines Schnelltestverfahrens zur sicheren Erkennung von HBCD
		Hoher zeitlicher Aufwand beim selektiven Rückbau von geklebten WDVS, da eine Entscheidung Lage für Lage erforderlich ist	Entwicklung von alternativen Halte- und Haftsystemen zum Kleben, die einen schnellen und einfachen Rückbau der zweiten WDVS-Lage erlauben
		Verlagerung der Rückbauproblematik in die Zukunft	Betonung der Verlängerung der Gesamtlebensdauer des WDVS

Ziel	Maßnahme	Problematic	Empfehlung
Selektiver Rückbau	Abschälen des WDVS	Zeitaufwand	Entwicklung von Werkzeugen zur Verwendung an üblichen Baumaschinen
		Trennen der WDVS-Bestandteile auf der Baustelle	Farbliche Kennzeichnung der HBCD-freien EPS-Dämmstoffplatten
			Entwicklung eines Schnelltestverfahrens zur sicheren Erkennung von HBCD
			Schulung des Personals von Rückbauunternehmen in Methoden des selektiven Rückbaus
			Getrennte Lagerung von EPS mit HBCD und ohne nach dem Rückbau auf der Baustelle (zwei voneinander unterscheidbare Container)
		Transportvolumen des auf der Baustelle abgetrennten EPS	Entwicklung von Fahrzeugaufbauten zur Komprimierung des EPS-Abfalls

Ziel	Maßnahme	Problematic	Empfehlung
Verwertung von EPS- Abfällen aus Dämmstoffen	werkstoffliche Verwertung	Ausschleusen von HBCD	Die werkstoffliche Verwertung kann nur bei HBCD-freien EPS-Dämmstoffplatten angewendet werden
		Kontamination mit Rückständen und Stäuben beim Rückbau	Selektiver großflächiger Rückbau der einzelnen WDVS-Lagen durch maschinelles Entschichten oder durch thermisches Entschichten. Reduzierung von Staubbildung. Nachreinigung und Trennen von Fremdpartikeln durch Sichten und Waschen.
			Verwendung der selektiven Extraktion zur Reinigung und Entfernung von Störstoffen
	Energetische Verwertung	Ausschleusen von HBCD	Momentan einziges Verwertungsverfahren, mit dem HBCD-haltige EPS-Abfälle sicher behandelt werden können
			Als Zwischenlösung, bis die Entwicklung von alternativen Verfahren abgeschlossen ist
			Verwendung bei geringen Abfallaufkommen und langen Transportwegen
			Verwertungsmöglichkeit von EPS-Abfall-Gemischen die nur schwer trennbar oder stark verschmutzt sind

Ziel	Maßnahme	Problematic	Empfehlung
Steigerung der Nachfrage nach EPS-Rezyklaten	Steuerung durch Anreiz oder Verbot	Eigenschaften der Rezyklate unterscheiden sich oftmals von denen des Ausgangsmaterials	Keine Substitution von Rohmaterialien durch Rezyklate sondern gezielte Entwicklung von Produkten basierend auf dem Eigenschaftsbild der Rezyklate
			Darüber hinaus sollten im Baubereich zukünftig auf eine Getrennterfassung von Baustellenabfällen aus Verlege- und Installationsarbeiten sowie Abfällen aus Sanierungs- und Rückbauarbeiten erfolgen um den Eintrag von HBCD-haltigen Flammenschutzmitteln in den „allgemeinen“ Stoffkreislauf zu unterbinden.
Erkennung von HBCD haltigen Systemen beim Rückbau und bei der Verwertung	Kennzeichnung	Vermischung von EPS Verpackungsabfällen und Bauabfällen durch „gemeinschaftlich“ genutzte Erfassungswege.	Getrennte Lagerung von EPS mit HBCD und ohne nach dem Rückbau auf der Baustelle (zwei voneinander unterscheidbare Container)
		Von besonderer Relevanz sind hier relativ saubere Baustellenabfälle, die kaum unterscheidbar mit Verpackungsabfällen entsorgt werden könnten.	
		Unterscheidung anhand des Abfallschlüssels nicht möglich	

7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Studie wurden die Weiterverwendungs- und Verwertungsmöglichkeiten sowie eine ggf. nötige Beseitigung von EPS-Abfall aus dem Rückbau von WDVS betrachtet.

Die Recherchen im Rahmen dieser Studie haben gezeigt, dass das Abfallaufkommen von EPS aus dem Bereich WDVS derzeit sehr gering ist und von keiner Statistik direkt erfasst wird. In der Abfallstatistik des Statistischen Bundesamts [43] werden EPS-Hartschaumdämmstoffe aus der Bauanwendung gemeinsam mit weiteren Dämmstoffen wie z. B. aus Mineralwolle, Polyurethan oder Holz- wolle unter dem Begriff Dämmmaterial zusammengefasst. Die genannte Abfallmenge von 85 kt an Dämmmaterial erlaubt keine nachträgliche Zuordnung.

Von der Consultic Studie [4] werden u. a. die Produktions- und Abfallmengen von expandierten Polystyrol erfasst. Es findet eine Unterscheidung in die Hauptanwendungen Verpackung und Bau statt. Laut dieser Studie lag das Abfallaufkommen an expandiertem Polystyrol im Jahr 2011 in Deutschland bei 60 kt für den Bereich Verpackung und bei 42 kt für den Bereich Bau. Das genannte Abfallaufkommen an EPS im Baubereich insgesamt liefert keinen Rückschluss auf die Abfallquoten aus einzelnen Anwendungsfällen, z. B. EPS für WDVS.

Bezogen auf das Abfallaufkommen der „übrigen Bau- und Abbruchabfälle“ in Höhe von 15.759 kt in Deutschland bewegen sich die von der Statistik und von der Studie erfassten Abfallmengen an Dämmmaterial mit 0,5 % bzw. EPS-Abfall aus dem Bereich Bau mit 0,2 % in einem sehr geringen Bereich.

Wirklich belastbare Zahlen über das Abfallaufkommen im Bereich WDVS existieren nicht. Berechnungen auf der Grundlage dieser Zahlen dienen zur Abschätzung von worst-case-Szenarien. Sie sind jedoch mit Unsicherheiten behaftet und bilden nicht die Realität ab.

Für die Berechnung von Abschätzung und Prognosen eignen sich die Produktionsdaten von EPS im Bau und die Daten über die Mengen an verbauten WDVS. Diese Daten sind zumindest für den Zeitraum 1981 bis 2012 belastbar. Zeiträume vor 1981 können nur durch Schätzungen abgebildet werden.

Die auf Basis dieser Mengengerüste abgeleiteten Prognosen bezüglich der Rückbaumengen gehen von einer Lebensdauer des WDVS von 40 bis 50 Jahren. Längere Lebenszyklen blieben unberücksichtigt.

Auf der Basis von Produktionsdaten und Abfalldaten der Consultic-Studie und des Statistischen Bundesamtes konnten worst-case Szenarien ausgearbeitet werden. Es handelt sich dabei um Abschätzungen, die mit diversen Unsicherheiten behaftet sind. Sie liefern keine direkte Aussage über das tatsächliche Abfallaufkommen von EPS-Dämmstoffen aus dem Verwendungszweck WDVS.

Das Abfallaufkommen an EPS ist momentan gering, wird aber in den nächsten Dekaden ansteigen. In der Übergangsphase, bis sich andere Verwertungsverfahren etabliert und den Nachweis für ein sicheres Ausschleusen von HBCD erbracht haben, sollte auf die energetische Verwertung zur Ausschleusung von HBCD haltigen EPS z. B. in einer kommunalen Müllverbrennungsanlage zurückgegriffen werden. Durch die große Anzahl der kommunalen Müllverbrennungsanlagen, zurzeit ca. 80 Anlagen, die über die gesamte Bundesrepublik verteilt sind, kann die Zerstörung von HBCD sicher und ohne großen Transportaufwand bewerkstelligt werden. Aufgrund der hohen Kapazität der Anlagen (> 20 Mio. Tonnen pro Jahr) können auch die in der Zukunft zu erwartenden Mengen an EPS-Abfall verwertet werden.

Eine technische, jedoch noch nicht kommerzielle Möglichkeit zur Rezyklierung von Polystyrol aus EPS-Abfällen stellt die selektive Extraktion, z. B. in Form des CreaSolv®-Verfahrens dar. Mit diesem Verfahren ist nicht nur eine stoffliche Verwertung des Polystyrols möglich, sondern auch die Ausschleusung des bromierten Flammschutzmittels HBCD. Zusätzlich könnte hier eine Rückgewinnung des Rohstoffs Brom möglich sein. Die Qualität der Rezyklate, die mit dem CreaSolv®-Verfahren rückgewonnen werden, entspricht der von synthetisch hergestelltem Polystyrol.

Das Abfallregime in Deutschland priorisiert die Abfallvermeidung. Bei WDVS bedeutet dies, bestehende Systeme, wo dies technisch möglich und ökonomisch und ökologisch sinnvoll erscheint, aufzudoppeln.

Ist ein Rückbau unvermeidlich, so ist derzeit die energetische Verwertung in kommunalen Müllverbrennungsanlagen das Verfahren der Wahl. Dieses Vorgehen erlaubt sowohl die Nutzung des hohen Brennwertes des Polystyrols als auch die Ausschleusung des Flammschutzmittels HBCD. Angesichts der in Zukunft wohl weiter steigenden Rohölpreise und einem zunehmenden Aufkommen von EPS-Abfällen aus dem Baubereich, gewinnen alternative, stoffliche Verwertungsverfahren an Bedeutung. Diese Verwertungsverfahren setzen eine Mindestqualität des angelieferten EPS-Abfalls voraus. Daher werden effiziente und ökonomische Entschichtungsverfahren benötigt, mit denen eine Trennung der einzelnen WDVS-Komponenten bereits auf der Baustelle möglich ist. Die mechanische Entschichtung mittels Anbauaggregaten an übliche Hydraulikbagger in Kombination mit einer leistungsfähigen Staubabsaugung stellt hierfür eine Option dar. Für die Anbauaggregate bedarf es noch einer technischen Optimierung und Weiterentwicklung.

8 Literatur

- [1]. VERORDNUNG (EU) Nr. 305/2011 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 9. März 2011 zur Festlegung harmonisierter Bedingungen für die Vermarktung von Bauprodukten und zur Aufhebung der Richtlinie 89/106/EWG des Rates. *Amtsblatt der Europäischen Union*. 4.4.2011. Bde. L 88/5 - 43.
- [2]. RICHTLINIE 2008/98/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. *Amtsblatt der Europäischen Union*. 22.11.2008. Bde. L 312/3 - 30.
- [3]. DESTATIS Statistisches Bundesamt. *Umwelt*. [Online] [Zitat vom: 27. August 2014.] <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/Umwelt.html>.
- [4]. Lindner, C. *Produktion, Verarbeitung und Verwertung von Kunststoffen in Deutschland 2011*. Alzenau : Consultic Marketing & Industrieberatung GmbH, 2012.
- [5]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. *Stockholmer Übereinkommen über persistente organische Schadstoffe*. [Online] Mai 2013. [Zitat vom: 29. August 2014.] http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/pop_konvention.pdf.
- [6]. BayLfU. Arbeitshilfe „Kontrollierter Rückbau: Kontaminierte Bausubstanz – Erkundung, Bewertung, Entsorgung“. [Hrsg.] Bayerisches Landesamt für Umweltschutz. 2003.
- [7]. Verlag, Bundesanzeiger, [Hrsg.]. Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG). *Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch § 44 Absatz 4 des Gesetzes vom 22. Mai 2013 (BGBl. I S. 1324) geändert worden ist*. 22. Mai 2013. Bd. I, S. 1324.
- [8]. BMUB. BMUB - Abfallwirtschaft - Abfallpolitik - Kreislaufwirtschaft. *Eckpunkte des neuen Kreislaufwirtschaftsgesetzes*. [Online] 01. März 2012. [Zitat vom: 11. Dezember 2013.] <http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/abfallpolitik/kreislaufwirtschaft/eckpunkte-des-neuen-kreislaufwirtschaftsgesetzes/>.
- [9]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Kreislaufwirtschaft: Abfall nutzen – Ressourcen schonen*. [Broschüre] [Hrsg.] Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU). Berlin : s.n., Juli 2011. http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/broschuere_kreislaufwirtschaft_bf.pdf.
- [10]. AVV. Abfallverzeichnis-Verordnung vom 10. Dezember 2001 (BGBl. I S. 3379), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 22 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist.

- [11]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Wecobis - Ökologisches Baustoffinformationssystem. [Online] 2014. [Zitat vom: 05. März 2014.] <http://www.wecobis.de/service/lexikon/abfallschlüssel-lex.html>.
- [12]. Richtlinie 89/106/EWG des Rates vom 21. Dezember 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte. *Amtsblatt*. 11. Februar 1989, Bd. L 040 , S. 0012 - 0026.
- [13]. VERORDNUNG (EG) Nr. 1907/2006 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 18. Dezember 2006 zur Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe (REACH), zur Schaffung einer Europäischen Agentur für chemische Stoffe, zur Änderung der Richtlinie 1999/45/EG und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 793/93 des Rates, der Verordnung (EG) Nr. 1488/94 der Kommission, der Richtlinie 76/769/EWG des Rates sowie der Richtlinien 91/155/EWG, 93/67/EWG, 93/105/EG und 2000/21/EG der Kommission. *Amtsblatt der Europäischen Union*, 30. Dezember 2006. Bd. L 396/1.
- [14]. VERORDNUNG (EG) Nr. 850/2004 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 29. April 2004 über persistente organische Schadstoffe und zur Änderung der Richtlinie 79/117/EWG. *Amtsblatt der Europäischen Union*, 30. April 2004. S. L 158/7.
- [15]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzstoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material. *Entwurf der Mantelverordnung*. [Online] Stand 31.10.2012, 31. Oktober 2012. [Zitat vom: 29. August 2014.] http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/entw_mantelverordnung.pdf.
- [16]. Neumann, Hans-Hermann. *Praxis-Handbuch Wärmedämm-Verbundsysteme*. Köln : Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, 2009. S. 23. ISBN 978-3-481-02154-2.
- [17]. European Organisation for Technical Approvals. ETAG Nr. 004, Ausgabe März 2000, Leitlinie für Europäische Technische Zulassungen für außenseitige Wärmedämm-Verbundsysteme mit Putzschicht. EOTA, Kunstlaan 40, Avenue des Arts – B-1040 Brüssel/Belgien, 2000.
- [18]. DIBt. DIBt - Deutsches Institut für Bautechnik. [Online] [Zitat vom: 12. Dezember 2013.] https://www.dibt.de/de/Fachbereiche/Referat_II1.html.
- [19]. Riedel, W., et al. *Wärmedämm-Verbundsysteme: Von der Thermohaut bis zur transparenten Wärmedämmung*. Baulino Verlag GmbH, Fraunhofer IRB Verlag, 2010. ISBN 978-3-938537-12-1, 978-3-8167-8235-3, 978-3-938537-01-5.
- [20]. FV-WDVS, Baden-Baden. Persönliche Mitteilung.
- [21]. EN 13163:2002: Wärmedämmstoffe für Gebäude – werkmäßig hergestellte Produkte aus expandiertem Polystyrol. Beuth Verlag, 2002.

- [22]. DIN 4108-4:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte. Beuth Verlag, 2013.
- [23]. DIN EN 13501: 2010: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten. Beuth Verlag, 2010.
- [24]. Künzel, H., Riedl, G. und Kießl, K. Praxisbewährung von Wärmedämmverbundsystemen. *IBP-Mitteilungen* 316. 1997. 24.
- [25]. Künzel, H., Künzel, H. M. und Sedlbauer, K. Langzeitverhalten von Wärmedämm-Verbundsystemen. *IBP-Mitteilungen* 461. 2005. 32.
- [26]. Künzel, H. M., Fitz, C. und Krus, M. Feuchteschutz verschiedener Fassadensysteme. Beanspruchungen, Systemanforderungen, Langzeitbeständigkeit. [Hrsg.] Deutsches Institut für Normung e.V. *Fassadensanierung. Praxisbeispiele, Produkteigenschaften, Schutzfunktionen*. Beuth Verlag, 2011. S. 29-51. ISBN-Nr.: 978-3-410-20630-9.
- [27]. Arlt, J. und Pfeiffer, M. *Lebensdauer der Baustoffe und Bauteile zur Harmonisierung der wirtschaftlichen Nutzungsdauer im Wohnungsbau*. IRB-Verlag, 2005. Forschungsbericht F2464 des Instituts für Bauforschung Hannover.
- [28]. European Technical Approval Guideline, ETAG 004. *Schriften des Deutschen Instituts für Bautechnik*. Berlin : Deutsches Institut für Bautechnik, 2001. Reihe LL, Heft 04.
- [29]. Herr Dr. W. Setzler, FV-WDVS, Baden-Baden. Persönliche Mitteilung.
- [30]. Energieeinsparverordnung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 18. November 2013 (BGBl. I S. 3951) geändert worden ist. *Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV)*. BGBl, 18. November 2013. Bd. I.
- [31]. Domininghaus, Hans. *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. Berlin; Heidelberg : Springer Verlag, 1998. S. 328.
- [32]. Blyth, John und Hofmann, August Wilhelm. Ueber das Styrol und einige seiner Zersetzungsproducte. *Justus Liebigs Annalen der Chemie*. 1845, 53, S. 289-329.
- [33]. H. Gausepohl, R. Gellert, [Hrsg.]. *Polystyrol. Kunststoff Handbuch Band 4. Hrsg. von G. Becker, D. Brown*. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 1995. ISBN 3-446-18004-4.
- [34]. Maul, Jürgen, et al. *Polystyrene and Styrene Copolymers*. [Wiley Online Library] John Wiley & Sons, 1999-2014. ULLMANN'S Encyclopedia of Industrial Chemistry. Published Online : 15 JUL 2007, DOI: 10.1002/14356007.a21_615.pub2. Online ISBN: 9783527306732.
- [35]. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Wecobis - Ökologisches Baustoffinformationssystem. [Online] 2014. <http://www.wecobis.de/>.

- [36]. Musterbauordnung - MBO, Zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 21.09.2012. 2012.
- [37]. Bayerische Bauordnung (BayBO) in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2007 letzte berücksichtigte Änderung: mehrfach geänd. (§ 1 Nr. 177 V v. 22.7.2014, 286). *GVBl.* 2007. S. 588.
- [38]. Umweltbundesamt. Bromierte Flammschutzmittel - Schutzengel mit schlechten Eigenschaften? [Online] April 2008. [Zitat vom: 10. Januar 2014.] <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bromierte-flammschutzmittel-schutzengel-schlechten>.
- [39]. Swedish Chemicals Agency. *Risk Assessment Hexabromocyclododecane*. Swedish Chemicals Agency. Luxembourg : Office for Official Publications of the European Communities, 2008. Final report.
- [40]. ICL Industrial Products. *FR-122P*. [Online] [Zitat vom: 27. August 2014.] <http://icl-ip.com/products/fr-122p-2/#prettyPhoto>.
- [41]. Herr Dr. W. Setzler, FV-WDVS, Baden-Baden. Persönliche Mitteilung.
- [42]. IVH und FV-WDVS. HBCD-Depot durch den Einsatz des Dämmstoffes EPS in Deutschland - Datenerhebung für Expandierten Polystyrol-Hartschaumstoff, EPS. persönliche Mitteilung.
- [43]. Statistisches Bundesamt. Umwelt. *Abfallentsorgung*. Wiesbaden : Statistisches Bundesamt DESTATIS, 2003 - 2014. Bd. Fachserie 19 Reihe 1, 2001-2012.
- [44]. Lindner, Christoph. Aufkommen, Entsorgung und Verwertung von EPS (incl. XPS) Abfällen aus dem Verpackungs- und Baubereich. 2014. Präsentation, UBA Workshop 19.08.2014, Berlin.
- [45]. Bundesinstitut für Bevölkerungsforschung. <http://www.bib-demografie.de>. [Online] 24. Juli 2013. [Zitat vom: 01. September 2014.] http://www.bib-demografie.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Download/Grafik_des_Monats/2013_07_pro_kopf_wohnflaeche.pdf?__blob=publicationFile&v=3.
- [46]. Statistisches Bundesamt. *Bautätigkeit und Wohnungen - Bestand an Wohnungen*. Wiesbaden : 2012. S. 13. Fachserie 5, Reihe 3. 2050300117004.
- [47]. Rentz, O., Seemann, A. und Schultmann, F. Abbruch von Wohn- und Verwaltungsgebäuden. *Kreislaufwirtschaft*. Karlsruhe : Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, 2001. Bd. 17, S. 1-19. ISSN 1616 - 458X.
- [48]. Institut Bauen und Umwelt e. V. *Wärmedämmverbundsysteme (WDVS)*. [Online] <http://bau-umwelt.de/hp4179/WDVS.htm>.

- [49]. DIN 4108-10:2008-06 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 10: Anwendungsbezogene Anforderungen an Wärmedämmstoffe - Werkmäßig hergestellte Wärmedämmstoffe. Beuth Verlag, 2008.
- [50]. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.15-1693 vom 1. Februar 2013, ausgestellt vom Deutschen Institut für Bautechnik.
- [51]. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-23.15-1934 vom 23. August 2013, ausgestellt vom Deutschen Institut für Bautechnik.
- [52]. Kampouris, E. M., Papaspyrides, C. D. und Lekakou, C. N. A model process for the solvent recycling of polystyrene. *Polymer Engineering & Science*. 1988, 28(8), S. 534–537.
- [53]. Noguchi, Tsutomu, et al. A New Recycling System for Expanded Polystyrene using a Natural Solvent. Part 1. Development of a Prototype Production System. *PACKAGING TECHNOLOGY AND SCIENCE*. 1998, 11, S. 19-27.
- [54]. Noguchi, Tsutomu, et al. A New Recycling System for Expanded Polystyrene using a Natural Solvent. Part 2. A New Recycling Technique. *PACKAGING TECHNOLOGY AND SCIENCE*. 1998, 11, S. 29-37.
- [55]. Noguchi, Tsutomu, et al. A New Recycling System for Expanded Polystyrene using a Natural Solvent. Part 3. Life Cycle Assessment. *PACKAGING TECHNOLOGY AND SCIENCE*. 1998, 11, S. 39-44.
- [56]. Shin, C. A New Recycling Method for Expanded Polystyrene. *PACKAGING TECHNOLOGY AND SCIENCE*. 2005, 18, S. 331-335.
- [57]. Gutiérrez, Cristina, et al. The Selective Dissolution Technique as Initial Step for Polystyrene Recycling. *Waste and Biomass Valorization*. 2013, 4(1), S. 29-36.
- [58]. Bajdur, Wioletta, et al. Effective polyelectrolytes synthesised from expanded polystyrene wastes. *European Polymer Journal*. 2002, 38(2), S. 299-304.
- [59]. García, María Teresa, et al. Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process. *Waste Management*. 2009, 29, S. 1814–1818.
- [60]. Hattori, Kazuyuki, et al. Solubilization of polystyrene into monoterpenes. *Advances in Polymer Technology*. 2008, 27(1), S. 35-39.
- [61]. Zhang, Ying, Mallapragada, Surya K. und Narasimhan, Balaji. Dissolution of waste plastics in biodiesel. *Polymer Engineering & Science*. 2010, 50 (5), S. 863-870.
- [62]. Siebert, T., Schlummer, M. und Mäurer, A. Bioverpackungen wiederverwerten. *Kunststoffe*. 2013, 7, S. 79-82.

- [63]. PlasticsEurope. *Untersuchung zur energetischen Verwertung von EPS und XPS, die als Flammenschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD) enthalten, durch die Mitverbrennung in der Abfallverbrennungsanlage für kommunale Abfälle der Stadt Würzburg*. Brüssel : exiba/PlasticsEurope, 2014. Technischer Bericht (Kurzfassung).
- [64]. A.R.D. Abbruch und Recycling Dresden GmbH. Persönliche Mitteilung.

Bildverzeichnis

Bild 1: Statuswechsel: vom Produkt zu Abfall.	11
Bild 2: Schematische Darstellung des Projektgerüsts.	11
Bild 3: Abgeleitete Vorgehensweise innerhalb des Projekts.	12
Bild 4: Die fünfstufige Abfallhierarchie nach [9].	19
Bild 5: Schematischer Aufbau eines typischen Wärmedämm- Verbundsystems inklusive Gebäudeaußenwand (1), Kleber (2), Wärmedämmstoff (3), Dübel (4), Unterputz (5), Glasfasergewebe (6) und Schlussbeschichtung (7) nach FV- WDVS.	25
Bild 6: Die Vielfalt der WDVS und ihre Kombinationsmöglichkeiten.	27
Bild 7: Prinzipskizze für die Aufdopplung von WDVS, d. h. das Aufbringen einer zweiten Lage WDVS (rot) auf ein bestehendes WDVS nach FV-WDVS.	29
Bild 8: Herstellung von Ethylbenzol aus Benzol und Ethylen.	30
Bild 9: Katalytische Dehydrierung von Ethylbenzol zu Styrol.	30
Bild 10: Herstellung einer Hartschaumplatte (Fa. isoBouw, Werk Abstatt) von links nach rechts: Vorschäumen, Blockschaumherstellung, Konfektionierung und Rückführung des Zuschnitts.	31
Bild 11: Struktur von Hexabromcyclododecan HBCD.	32
Bild 12: Strukturformel des Flammenschutzmittels FR-122P nach [40].	33
Bild 13: Kunststoffproduktion 2011 nach [4] ergänzt durch den Anteil von EPS als WDVS nach FV-WDVS.	34
Bild 14: Produktionsmengen an expandiertem Polystyrol-Hartschaumstoff, EPS für den Bereich WDVS in Deutschland nach FV-WDVS.	35
Bild 15: Berechnete Massen der von 1960 bis 2012 eingebauten WDVS- Komponenten bezogen auf die in diesem Zeitraum mit EPS- Hartschaumstoff gedämmte Fassadenfläche nach Angaben des FV-WDVS.	36
Bild 16: Produktionsmengen an expandiertem Polystyrol-Hartschaumstoff in Deutschland [kt]; Basisdaten für 1981 bis 2012 nach den statistischen Erfassungen des IVH, FV-WDVS und des GDI; Daten von 1960 bis 1980 extrapoliert.	38

Bild 17: Abfallaufkommen 2012 in Deutschland Statistisches Bundesamt DESTATIS [43] ergänzt durch Abfallmengen an EPS/XPS aus dem Baubereich nach [4].	39
Bild 18: Kunststoffabfallmengen 2011 in Deutschland nach den Einsatzfeldern [4].	39
Bild 19: Kunststoffabfallmengen 2011 in Deutschland nach Kunststoffarten [4].	40
Bild 20: Beispiel für manuelles Entschichten von WDVS in der Praxis; Rückbau eines Büro- und Werkstattgebäudes im Jahr 2013 in Gräfelfing.	44
Bild 21: Zusammenfassung der geeigneten Verwertungsverfahren für EPS-Dämmstoff.	45
Bild 22: Prozessschema des CreaSolv®-Verfahrens [62].	48
Bild 23: Abschälen der Decklage ohne Berücksichtigung des Abschälwinkels.	51
Bild 24: Abschälen der Decklage ohne Berücksichtigung des Abschälwinkels.	51
Bild 25: Abschälen der Decklage ohne (links) und mit Berücksichtigung des Schälwinkels und der Schälgeschwindigkeit (Mitte, Hartschaum): Rückseite der Decklage (rechts).	52
Bild 26: Selektives Abschälen der einzelnen Lagen im IBP-Versuch, Oberputz (links), Dämmstoff (Mitte) und teilselektives Abschälen in der Praxis (rechts).	53
Bild 27: Mechanische Abschälen von WDVS mit EPS beim Rückbau eines Übergangswohnheims in Dortmund im Jahr 2009 (©Carsten Hördemann).	53
Bild 28: Abfräsen eines WDVS mit einer Handfräse (links) und die dabei erhaltenen Materialfraktionen (rechtes Bild von links nach rechts: Mischfraktion aus EPS und Putz, EPS, Putz, Gewebefasern).	54
Bild 29: Beispiel für das thermische Entschichten vom Oberputz / Armierungsmörtel-Verbund.	55
Bild 30: Rückbau eines Gebäudes (Ligustergang, Ludwigshafen).	56
Bild 31: WDVS im Spannungsfeld der Rahmenbedingungen und Anforderungen.	57

Bild 32: Gegenüberstellung der EPS/XPS Produktion und des EPS/XPS Abfallaufkommens in Deutschland (Stand 2011); Der WDVS-Abfallanteil wurde aus dem Produktionsverhältnis Anteil Bau zu Anteil WDVS abgeschätzt. Der WDVS-Anteil am Abfallaufkommen beträgt bei diesem worst-case Szenario 23,5 % [44].	64
Bild 33: Abfallmengen an Dämmmaterial laut Abfallschlüsselnummer 17 06 04 in Deutschland [43].	65
Bild 34: EPS-Absatzmengen im Bereich WDVS und Prognosen für Rückbau: a) Normalverteilung mit $\mu = 50$ und $\sigma = 8,33$; b) Rückbau konstant mit 2 % über 50 Jahre.	67
Bild 35: EPS-Absatzmengen im Bereich WDVS und Prognosen für Rückbau: a) Normalverteilung mit $\mu = 50$ und $\sigma = 12,75$; b) Rückbau konstant mit 2 % über 50 Jahre.	68
Bild 36: EPS-Absatzmengen im Bereich WDVS und Prognosen für Rückbau: a) Normalverteilung mit $\mu = 40$ und $\sigma = 6,67$; b) Rückbau konstant mit 2,5 % über 40 Jahre.	68
Bild 37: EPS-Absatzmengen für Bauanwendungen und prognostizierte Rückbaumengen.	69
Bild 38: Prognosen für EPS Rückbau: a) Normalverteilung mit $\mu = 50$ und $\sigma = 8,33$; b) Rückbau konstant mit 2 % über 50 Jahre; Rückbaumengen an EPS für das Jahr 2012 nach den Informationen des FV-WDVS und von Entsorgern.	70
Bild 39: Prognostizierte Rückbaumengen an EPS aus WDVS.	71
Bild 40: Prognostizierte Rückbaumengen an EPS aus Bauanwendungen.	71

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der wesentlichen nationalen hoheitlichen Regelungen [6].	16
Tabelle 2: Zuordnung von Abfällen und Abfallschlüsseln.	20
Tabelle 3: Mögliche Zuordnung von WDVS-Bestandteilen zu EAK-Schlüsselnummern.	21
Tabelle 4: Mögliche Putz/Dämmstoff-Kombinationen für WDVS mit Schlussbeschichtungen aus Putz oder Anstrich [16].	26
Tabelle 5: Produktionsmengen an expandiertem Polystyrol-Hartschaumstoff, EPS in Deutschland und die Mengen für enthaltenes HBCD; Basisdaten für 1981 bis 2012 nach den statistischen Erfassungen des IVH, FV-WDVS und des GDI [42].	37
Tabelle 6: Vor- und Nachteile der einzelnen Rückbauverfahren bezogen auf WDVS.	43
Tabelle 7: Vor- und Nachteile der einzelnen Abschälverfahren.	44
Tabelle 8: Verwertungsmöglichkeiten von WDVS Bestandteilen laut Abfallschlüssel [10] der Umwelt-Systemdeklarationen [48].	46
Tabelle 9: Gegenüberstellung der in unterschiedlichen Quellen genannten Abfallmengen aus dem Rückbau von Dämmmaterialien.	63
Tabelle 10: Zusammenstellung von Zielen, Maßnahmen und Empfehlungen hinsichtlich der Abfallvermeidung und der Wiederverwertung beim Rückbau EPS-haltiger WDVS.	76