

Entwicklung und Modellierung von Entsorgungswegen für WDVS-Abfälle

Niklas Heller und Sabine Flamme

1.	Wärmedämmverbundsysteme.....	362
2.	Entsorgungssituation	363
2.1.	Abfallmengen und -zusammensetzung.....	363
2.2.	Aktuelle Entsorgungssituation	364
2.3.	Einschränkungen durch das Flammschutzmittel HBCD	365
3.	Alternative Entsorgungskonzepte	365
3.1.	Mögliche Verwertungsverfahren	366
3.2.	Prozesskette.....	366
4.	Modellkonzeption	367
4.1.	Ziel der Modellierung und Vorgehensweise	367
4.2.	Komponenten im System	368
4.3.	Datenerhebung der Systemkomponenten	369
4.3.1.	Beispiel Systemkomponente Rückbau.....	369
4.3.2.	Beispiel Systemkomponente Aufbereitung.....	372
5.	Fazit und Ausblick	374
6.	Literatur.....	374

Aufgrund steigender energetischer Anforderungen an Gebäude werden Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) seit den 1960er Jahren bei Alt- und Neubauten zur Dämmung von Gebäudefassaden verwendet. Beim Dämmstoff wurde zumeist auf das leicht zu verarbeitende und kostengünstige expandierte Polystyrol (EPS) zurückgegriffen. Aufgrund der Langlebigkeit dieser Verbundstoffe gibt es bisher nur vereinzelt Rückbaumaßnahmen. Die dabei noch in geringer Menge anfallenden Abfälle werden hauptsächlich in Abfallverbrennungsanlagen (MVA) verbrannt. Aufgrund technischer Einschränkungen – unter anderem wegen des hohen Heizwertes – ist dieser Entsorgungsweg als einziger bei steigenden Abfallmengen nicht geeignet.

Durch die Zunahme gedämmter Gebäude und die Umnutzung oder den Abriss derselben, wird es in den nächsten Jahrzehnten zu deutlich steigenden Abfallmengen kommen, sodass alternative Verwertungswege an Bedeutung gewinnen werden.

Im Gegensatz zum Einsatz in MVA stellen alternative Wege an die jeweilige Verwertung angepasste Anforderungen an den Abfallstrom. Daher müssen Entsorgungskonzepte, beginnend auf der Baustelle, entwickelt werden, welche die entsprechenden Anforderungen bei unterschiedlichen Randbedingungen sicherstellen.

Aufgrund der Vielzahl an denkbaren Szenarien zur Entsorgung des heterogenen Abfallstroms, soll mit einer Modellierung der Entsorgungskette von der Baustelle bis zur Verwertungsanlage eine Bewertung unterschiedlicher Ansätze hinsichtlich ihrer technischen Eignung sowie ökonomischen und ökologischen Aufwendungen ermöglicht werden.

Im Folgenden werden mögliche zukünftige Verwertungswege aufgezeigt und die daraus entwickelte Modellkonzeption beschrieben sowie erste empirische Ergebnisse dargestellt.

1. Wärmedämmverbundsysteme

WDVS bestehen, wie in Bild 1 dargestellt, aus mehreren miteinander verbundenen Schichten aus unterschiedlichen Materialien, deren wesentlicher funktioneller Bestandteil die Dämmung darstellt. Je nach Untergrundbeschaffenheit können die Dämmplatten mittels Baukleber oder mechanisch mit Dübeln auf dem Untergrund befestigt werden. Meistens erfolgt eine großflächige Verklebung mit zusätzlicher mechanischer Befestigung. Auf der Dämmplatte ist ein Unterputz mit innenliegendem Armierungsgewebe, meistens Glasfasergewebe mit Appretur, aufgebracht. Als Schlussbeschichtung kommen eine Vielzahl verschiedener mineralisch und organisch gebundener Putze sowie Flachverblender, Klinkerriemchen, Glas oder auch Natursteine zum Einsatz.

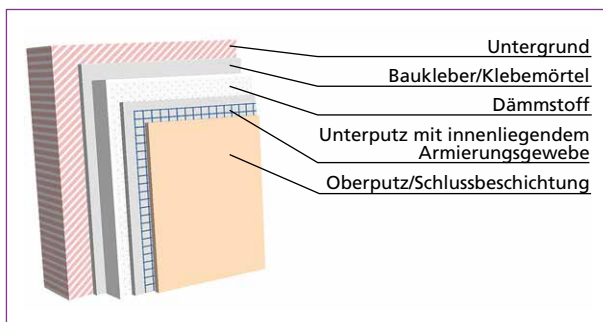


Bild 1:

Schematischer Aufbau eines Wärmedämmverbundsystems

Den überwiegenden Marktanteil bei den verwendeten Dämmstoffen haben mit aktuell etwa 66 Prozent Dämmplatten aus EPS [2]. Bei erhöhten Brandschutzanforderungen (z.B. bei öffentlichen Gebäuden) kommen häufig auch Mineralwolleprodukte zum Einsatz. Sonstige Dämmstoffe sind z.B. Polyurethan-Hartschaum oder Dämmplatten aus nachwachsenden Rohstoffen wie Holzweichfaser.

Für jede funktionale Schicht im WDVS umfasst die Produktpalette eines Herstellers in der Regel mehrere Produkte mit unterschiedlichen Mixturen, welche sich über die Zeit häufig auch geändert haben. Darüber hinaus variieren die Produktpaletten von

Hersteller zu Hersteller sodass in aktuell eingesetzten Verbundsystemen eine Vielzahl an Materialien und Inhaltsstoffen verbaut ist.

Aufgrund steigender energetischer Anforderungen an die Gebäude, unter anderem bedingt durch die Energieeinsparverordnung (EnEV), sind die Dämmstoffstärken über die letzten Jahre deutlich angestiegen und betragen aktuell durchschnittlich etwa 13 cm [2]. Die Dämmstärke bei einem Passivhaus beträgt in Abhängigkeit vom sonstigen Wandaufbau über 20 cm.

Laut Angaben des Fachverbandes Wärmedämm-Verbundsysteme, veröffentlicht in einer Studie des Fraunhofer IBP [1], wurden in Deutschland von 1960 bis 2012 insgesamt 900 Millionen m² WDVS verbaut. Davon fallen 720 Millionen m² auf WDVS mit EPS als Dämmstoff, was einer Masse von über 9 Millionen Tonnen entspricht. Allein im Jahr 2015 wurden weitere 21 Millionen m² Fassade mit EPS-basierten WDVS gedämmt [nach 2].

2. Entsorgungssituation

Im Vergleich zur verbauten Menge an WDVS werden aktuell noch wenige Systeme zurückgebaut. Wie folgend dargelegt wird, stellen aber bereits die heutigen noch Abfallmassen eine Herausforderung für die Entsorgung dar.

2.1. Abfallmengen und -zusammensetzung

WDVS-Abfallmengen aus dem Rückbau werden aber zurzeit statistisch nicht separat, sondern nur zusammen mit anderen Abfällen aus dem Bau- und Dämmstoffbereich erfasst, daher können die entsprechenden Massen nur abgeschätzt werden. Da diese Abschätzungen auf verschiedenen Grundlagen beruhen, weisen Angaben zum Abfallaufkommen aus WDVS eine hohe Bandbreite auf.

Laut Fachverband-WDVS, zitiert in zuvor genannter Fraunhofer Studie [1], betrug die Rückbaumenge im Jahr 2012 etwa 50.000 m² bzw. 75 Tonnen EPS aus WDVS. Eine andere Berechnung in gleicher Studie geht von bis zu 9.400 Tonnen EPS-Abfall aus WDVS für das Jahr 2011 aus.

Für das Jahr 2050 werden etwa 50.000 t/a EPS-Abfälle aus WDVS prognostiziert. Dazu wird eine mittlere WDVS-Lebensdauer von 40 bis 50 Jahren angenommen, wobei der Rückbau über einen Zeitraum von ± 20 bzw. ± 25 Jahren erfolgt [1]. Aufgrund der großen Unsicherheit der Daten zu aktuellen und zukünftigen Abfallmengen sind diese Zahlen auf Plausibilität zu prüfen bzw. mit aktuellen Datensätzen neu zu erheben.

Da sich diese Zahlen nur auf den EPS-Anteil des Abfalls beziehen, stellen sie nicht die gesamte anfallende WDVS-Abfallmenge dar. Die EPS-Dämmschicht hat im Verbundsystem zwar den größten Volumenanteil. Aufgrund der geringen Dichte der Polystyrol-Dämmplatten (meist 15 bis 20 kg/m³) tragen diese aber kaum zur Masse des Abfallstroms bei. Bild 2 zeigt exemplarisch die Verhältnisse zwischen Volumen und Masse bei einem WDVS mit 6 cm und 16 cm EPS-Dämmplatten.

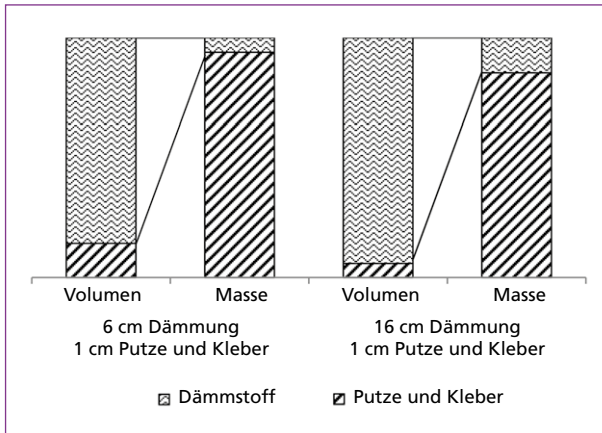


Bild 2:

Volumen- und Massenverhältnis bei unterschiedlichen Dämmstoffstärken

Je nach Ausführung des Systems beträgt die Masse der Putze und Kleber das Fünf- bis mehr als das Zwölfwache der EPS-Masse, sodass diese Stoffströme bei der Entwicklung von abfallwirtschaftlichen Konzepten eine große Rolle spielen.

Hinzu kommen noch Dübel, das Armierungsgewebe sowie sonstige Bestandteile, wie Kantenschutzleisten oder ähnliche, die aber insgesamt nur eine geringe Masse besitzen.

Um effiziente Entsorgungswege entwickeln und bewerten zu können, muss die Zusammensetzung des WDVS-Abfallstroms charakterisiert werden. Ein Ansatz ist die Betrachtung der bisher verbauten WDVS-Massen und deren Anteile. Die von 1960 bis 2012 verbauten Massen der Komponenten von mit EPS gedämmten WDVS wurden bereits in der Untersuchung von [1] hochgerechnet (aggregiert dargestellt in Tabelle 1).

Tabelle 1: Berechnete Massen der von 1960 bis 2012 verbauten Massen in WDVS mit EPS als Dämmstoff

Komponente	Masse	Anteil
	t	%
Kleber	2.822.400	30,9
EPS	1.080.000	11,8
Dübel	53.568	0,6
Armierungsmörtel	2.880.000	31,6
Armierungsgewebe	130.680	1,4
Oberputz	2.160.000	23,7
Gesamt	9.126.648	100,0

Quelle: nach Albrecht, W.; Schwitalla, C.: 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. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2014, ISBN 978-3-8167-9411-0

2.2. Aktuelle Entsorgungssituation

Die aktuell beim WDVS-Rückbau anfallenden Abfälle werden in der Regel in MVA entsorgt. Der Heizwert von Polystyrol liegt mit 38 kJ/t weit über dem Heizwert, für den die Anlagen üblicherweise ausgelegt sind (8 bis 12 kJ/t). Nach Mark et al. [4] verursacht ein EPS-Anteil im Input einer MVA von zwei Masse-Prozent eine Erhöhung des Heizwertes im Gesamtinput um etwa 6 Prozent. Daher sollen EPS-Abfällen möglichst nicht in Monofractionen oder als Plattenpakete angeliefert werden.

Stattdessen werden Bruchstücke, gemischt mit anderen Baustellenabfällen bevorzugt. Sofern die WDVS-Abfälle als Gesamtsystem verbrannt werden, senken zwar die massenmäßig überwiegenden Anteile an Putzen und Kleber im WDVS-Abfall den Heizwert des Gemisches. Gleichzeitig weisen diese Stoffe aber einen für Betreiber von Abfallverbrennungsanlagen unerwünscht hohen Aschegehalt auf.

2.3. Einschränkungen durch das Flammschutzmittel HBCD

EPS-Dämmplatten aus heutigen Rückbauvorhaben enthalten in der Regel das Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD). Dies gilt ebenso für Platten aus extrudiertem Polystyrol-Hartschaum (XPS), welche im Bereich der Perimeter- und Flachdachdämmung eingesetzt werden. Seit Mai 2013 gilt HBCD als persistenter organischer Schadstoff (Persistent Organic Pollutant, kurz POP) und seit März 2016 dürfen Produkte mit einem Gehalt von mehr als 100 mg/kg HBCD in der EU nicht mehr hergestellt oder in Verkehr gebracht werden. Daher werden seit Ende 2014 in Deutschland EPS-Dämmstoffe mit dem neuen Flammschutzmittel Polymer-FR produziert [3].

In Deutschland existiert in der Abfallverzeichnisverordnung (AVV, Nr. 2.2.3 der Einleitung) ein dynamischer Querverweis auf die EU-POP-Verordnung. Bei Überschreitung dort definierter Konzentrationsgrenzen sind Abfälle als *gefährlich* zu deklarieren. Somit wurden ab 30.09.2016 Abfälle mit einem HBCD-Gehalt von über 1.000 mg/kg als gefährlicher Abfall eingestuft. Der HBCD-Gehalt in EPS Dämmplatten liegt in der Regel bei mindestens 7.000 mg/kg. Mit der Einstufung als gefährlicher Abfall und den daraus resultierenden Pflichten zur Getrennthaltung und Behandlung dieser Stoffströme in speziell dafür zugelassenen Anlagen entstand ein Entsorgungseingpass. Im Dezember 2016 bestätigte das Bundeskabinett einem Beschluss des Bundesrats für ein für das Jahr 2017 befristetes Moratorium für HBCD, sodass die Abfälle übergangsweise wieder als *nicht gefährlicher* Abfall entsorgt werden dürfen [3]. Fachgremien von Bund und Ländern arbeiten derzeit an Vorgaben für eine geeignete und rechtskonforme Entsorgung.

Vor dem Hintergrund der auf ein Jahr befristeten Übergangsregel sowie zukünftig deutlich steigender Mengen bei WDVS-Abfällen aus dem Rückbau, den rechtlichen und technischen Anforderungen bei der Entsorgung sowie den Zielen der Kreislaufwirtschaft, ist es notwendig, zeitnah alternative Entsorgungsstrategien für EPS-basierte Wärmedämmverbundsysteme zu entwickeln und zu bewerten.

3. Alternative Entsorgungskonzepte

Zurzeit existieren in der Praxis noch keine Alternativen zur Verbrennung der WDVS-Abfälle aus dem Rückbau in MVAs. Nachfolgend werden mögliche Verwertungsverfahren dargelegt, mit denen entweder ein EPS-reicher Bestandteil des zuvor beschriebenen Abfallstroms oder der komplette WDVS-Abfall verwertet werden kann. Darüber hinaus müssen für die EPS-fremden Bestandteile des Abfallstroms geeignete Verwertungsverfahren identifiziert werden. Dieses wird in einer anschließenden Modellierung untersucht.

3.1. Mögliche Verwertungsverfahren

Gemäß der fünfstufigen Abfallhierarchie (§ 6 KrWG) ist nach der Vermeidung und Vorbereitung zur Wiederverwendung das Recycling die zu priorisierende Verwertungsform.

Dämmstoffverschnitt, der bei der Produktion im EPS-Werk anfällt, wird zum Teil wieder dem Rohstoff zugegeben – als anlageninterne Kreislaufführung handelt es sich hierbei nach § 3 KrWG um **Abfallvermeidung**. Hier sind zukünftig aber keine weiteren Potenziale zur Entsorgung von EPS-Abfällen zu erwarten, da der maximale Recyclinganteil von fünf bis zwanzig Prozent bereits durch die internen Verschnitte ausgereizt ist. Ein höherer Anteil führte zu einer sinkenden technischen Qualität in der Neuware, sodass hieraus keine neuen Fassadendämmstoffe produziert werden könnten.

Werkstoffliches EPS-Recycling ist heute bereits etabliert. Aus reinem Verpackungsmaterial sowie Dämmstoffverschnitt von der Baustelle werden EPS-Perlen und Polystyrol-Regrenulat gewonnen. Diese Abfälle weisen eine hohe Sortenreinheit ohne Fremdbestandteile wie Putz usw. auf und in den Abschnitten des derzeit produzierten Dämmmaterials ist kein HBCD enthalten. EPS-Abfälle aus dem klassischen Rückbau können aufgrund der Verunreinigungen und der rechtlichen Notwendigkeit, das HBCD zu zerstören, nicht werkstofflich verwertet werden. Sortenrein getrenntes, HBCD-freies EPS aus dem WDVS-Rückbau könnte hingegen für ein Recycling geeignet sein.

Mit dem auf Solvolyse basierenden CreaSolv Verfahren soll eine **rohstoffliche Verwertung** für HBCD-haltiges EPS aus Wärmedämmverbundsystemen und sonstigen Herkunftsbereichen erreicht werden. Dabei wird EPS in einem Lösemittel gelöst und Styrol sowie Brom (aus dem Flammschutzmittel) zurückgewonnen. Nach Aussagen der Entwickler könnten hierbei auch verunreinigte WDVS-Abfälle eingesetzt werden. Aufgrund der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung sollten die EPS-fremden Bestandteile aber auf einen geringen Anteil begrenzt werden. Eine Pilotanlage mit einem Durchsatz von etwa 3.000 t/a soll bis 2018 in den Niederlanden entstehen. [6]

Ein weiterer perspektivischer Verwertungsansatz ist die **stofflich-energetische Verwertung** in Zementwerken. Während die oben genannten Verfahren sich ausschließlich auf den EPS-Dämmstoff beziehen, könnten in Zementwerken, neben der energetischen Verwertung des heizwertreichen EPS, auch die weitgehend mineralischen Bestandteile eines WDVS, wie Putze und Kleber, stofflich verwertet werden. Aus verfahrenstechnischen Gründen wären die beiden Fraktionen aber getrennt aufzugeben. Das EPS könnte in der Primärfeuerung des Zementwerks als Ersatzbrennstoff eingesetzt werden und müsste dazu noch zu spezifizierende Anforderungen an Dichte und Korngröße einhalten. Bei geeigneter Zusammensetzung könnten die weitgehend mineralischen Putze und Kleber als Rohstoffersatz über die Sekundärfeuerung aufgegeben werden.

Die speziellen quantitativen Anforderungen der oben genannten Verwertungsverfahren sind noch umfanglich zu definieren.

3.2. Prozesskette

Im Gegensatz zu der Behandlung in einer MVA stellen die dargestellten Verwertungsansätze weitergehende spezifische Anforderungen an die Beschaffenheit der eingesetzten Abfallprodukte, wie Sortenreinheit, Korngröße oder Dichte. Dies macht eine vorgeschaltete Prozesskette, wie in Bild 3 dargestellt, notwendig.



Bild 3:

Prozesskette der Entsorgungskonzepte

Die Anforderungen eines speziellen Verwertungsverfahrens an das Inputmaterial müssen in einer vorgeschalteten Prozesskette sichergestellt werden. Die Komponenten innerhalb der Prozesskette lassen sich den Handlungsfeldern Baustelle, Logistik und Aufbereitung zuordnen. Die Ausgestaltungen in diesen Handlungsfeldern bestimmen die stofflichen Eigenschaften der Stoffströme sowie die ökonomischen und ökologischen Aufwendungen der Prozesskette und damit auch die Eignung des gesamten Entsorgungskonzeptes. Die Komponenten innerhalb der Prozesskette sind bei jedem Verwertungsverfahren unterschiedlich, da für jedes Verfahren spezifische Anforderungen eingehalten werden müssen.

Um die Anforderungen eines spezifischen Verwertungsverfahrens einzuhalten, können aber unterschiedliche Komponentenabfolgen innerhalb der Prozesskette entwickelt werden, da die Handlungsfelder untereinander in Abhängig stehen und sich gegenseitig beeinflussen. Eine Verdichtung des Abfalls auf der Baustelle kann sowohl Einfluss auf den Transportaufwand (durch Volumenreduzierung) als auch auf den Umfang der Aufbereitung haben (stärkerer Verbund der Komponenten im Abfallgemisch).

4. Modellkonzeption

Aufgrund der Vielzahl und Komplexität der Szenarien und Verwertungsverfahren, soll eine kombinierte Modellierung der Entsorgungskonzepte stattfinden.

4.1. Ziel der Modellierung und Vorgehensweise

Ziel der Simulation ist die Identifikation effizienter Prozessketten zur Verwertung von WDVS-Abfall, bei Einhaltung zuvor definierter Anforderungen der möglichen EPS-Verwertungsverfahren. Die Betrachtung der Komponentenabfolgen erfolgt zunächst separat für jedes ausgewählte EPS-Verwertungsverfahren. Dabei werden verschiedene Ausführungen bzw. Szenarien entwickelt, modelliert und auf Basis der Simulationsergebnisse bewertet. So wird für jedes EPS-Verwertungsverfahren die effizienteste Anordnung an Komponenten identifiziert.

Die ausgewählten effizienten Szenarien zu verschiedenen Verwertungsverfahren werden in einem übergreifenden Modell zusammengeführt, sodass die Verwertung von EPS-Teilströmen in unterschiedlichen Verwertungsverfahren simuliert werden kann. Durch Sensitivitätsanalysen sowie Modifikation von Systemparametern, z.B. Abfallzusammensetzung, Transportentfernungen, Rohstoff- und Energiepreisen, wird ermittelt, welches oder welche Verwertungsverfahren mit welchem Prozess-Szenario unter welchen Randbedingungen ökologisch und ökonomisch geeignet ist.

Konkrete Fragestellungen lauten z.B.:

- Welche Fraktionen aus aufbereiteten WDVS-Abfällen eignen sich für welche Verwertungsverfahren?

- Wie stellt sich eine dezentrale Aufbereitung auf der Baustelle im Vergleich zur zentralen Aufbereitung in einer Anlage dar?

Zudem soll das Modell eine Hilfestellung für Anwender geben, um bei definierbaren Randbedingungen, wie Transportentfernungen zu Verwertungsanlagen, entscheiden zu können, welche verfügbaren Verwertungswege sich für WDVS-Abfälle aus konkreten Rückbauprojekten vor dem Hintergrund der technischen Machbarkeit sowie den ökonomischen und ökologischen Aufwendungen, am besten eignen.

4.2. Komponenten im System

In Bild 4 sind die zu modellierenden Systemkomponenten dargestellt. Diese werden den Systemgrenzen Stoffstrom (A), Kosten und Erlöse (B) und CO₂-äquivalente Emissionen (C) zugeordnet.

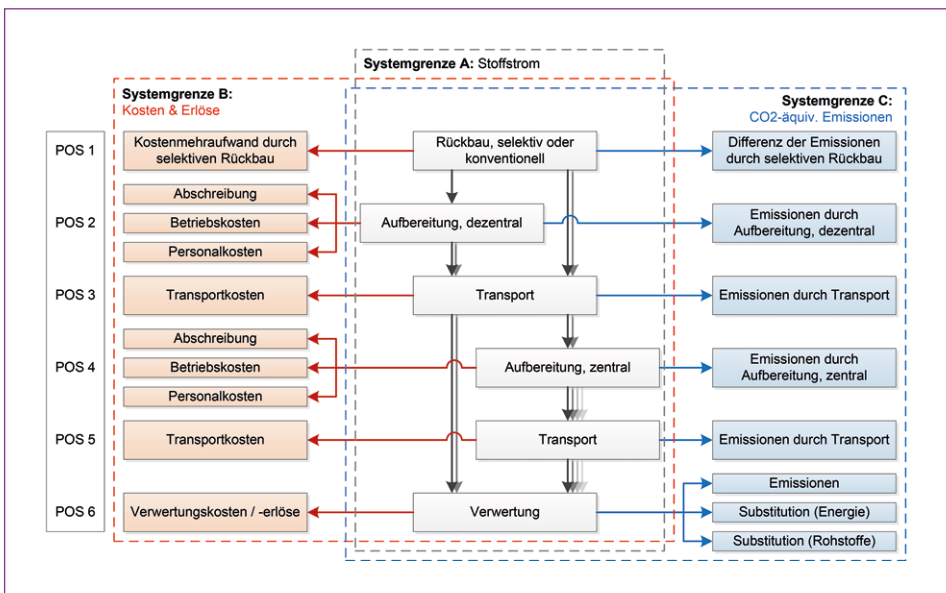


Bild 4: Systemkomponenten und -grenzen

Das Stoffstrommodell beginnt mit dem Rückbau auf der Baustelle, dargestellt in POS 1A. Als Modellinput werden Stoffgruppen definiert, welche ausgewählte unterschiedliche Ausführungen von Wärmedämmverbundsystemen abdecken. Dabei wird maßgeblich zwischen verschiedenen Dämmstoffstärken und Putzausführungen unterschieden. Die Kosten, die für einen konventionellen Rückbau anfallen, liegen in diesem ersten Ansatz außerhalb der hier betrachteten Systemgrenzen. Der finanzielle Mehraufwand, der sich durch einen selektiven Rückbau ergibt, wird in POS 1B berücksichtigt. Dabei entstehende (oder eingesparte) Emissionen der Maschinen und Arbeitsgeräte werden in POS 1C modelliert.

Sofern im Szenario eine dezentrale Aufbereitung – z.B. eine grobe Stofftrennung oder Verdichtung – auf der Baustelle oder auf dem Hof des Rückbauunternehmers vorgesehen ist, wird der Einfluss auf den Stoffstrom – Teilung oder Veränderung der Stoffeigenschaften – in POS 2A modelliert. Die zugehörigen Aufbereitungskosten werden als Kosten für die Abschreibung der Aggregate, die Betriebskosten (Energie und Verbrauchsmaterial) sowie Personalkosten (zur Bedienung der Aggregate) in POS 2B aufgeschlüsselt. Die Emissionen aus dem Diesel- oder Stromverbrauch werden in POS 2C simuliert.

Diese Vorgehensweise gilt analog für eine zentrale Aufbereitung der Abfälle, welche in den Positionen 4A bis C modelliert werden.

Beim Transport findet keine Veränderung des Stoffstroms statt (POS 3A und 5A). Dafür fallen, in Abhängigkeit der Fahrzeugart und Transportentfernung, Transportkosten an (POS 3B und 5B). Darin sind sämtliche Kosten für Personal, Abschreibung, Betrieb usw. enthalten. Durch den Dieserverbrauch entstehende Emissionen werden in POS 3C und 5C modelliert.

Das Stoffstrommodell endet beim Verwertungsverfahren (POS 6A). Aus der Verwertung resultierende Output-Massenströme (z.B. Polystyrol-Recyclat oder Verbrennungsschmelze) werden in diesem Stoffstrommodell nicht betrachtet. Dadurch eingesparte CO_2 -äquivalente Emissionen durch Substitution von Energie oder Rohstoffen sowie direkt bei der Verwertung entstehende Emissionen werden hingegen in POS 6C betrachtet. Die Verwertungskosten (POS 6B) entsprechen den Annahmekosten (oder Erlösen) der Betreiber der Verwertungsverfahren, die die Reststoffentsorgung beinhalten.

4.3. Datenerhebung der Systemkomponenten

Bisher werden WDVS-Abfälle nicht gezielt aufbereitet, sodass hier nicht auf Angaben aus der Literatur zurückgegriffen werden kann. Die Komponenten des Stoffstrommodells müssen daher weitgehend empirisch erhoben werden. In Versuchen werden zunächst die Eignung von Aggregaten geprüft sowie stoffstromrelevante Parameter wie Transferkoeffizienten, Zusammensetzungen der Teilströme sowie physikalische Eigenschaften erhoben. Zudem stellen Erhebungen über Leistungsdaten (z.B. Durchsatz und Energieverbrauch) die Grundlage für die Modelle zur Simulation der Kosten und CO_2 -äquivalenten Emissionen. Zusammen mit Kenngrößen, welche weitgehend auf Basis von Literatur sowie Abfragen bei Unternehmen erhoben werden, lassen sich die Modelle komplettieren.

Im Folgenden werden erste Erhebungen für die Komponenten Rückbau und Aufbereitung dargestellt.

4.3.1. Beispiel Systemkomponente Rückbau

Die anwendbare Rückbautechnik hängt von der Art des verbauten WDVS, der weiteren Nutzung des Gebäudes sowie dem geplanten Entsorgungsweg der Abfälle ab. Grundsätzlich kann zwischen konventionellen Rückbauvarianten und dem (teil-)selektiven Rückbau unterschieden werden.

Rückbautechniken

Beim konventionellen Rückbau findet auf der Baustelle kein getrennter Abtrag einzelner WDVS-Bestandteile statt und das WDVS fällt als gemischter Abfall an. Eine Rückbaumethode ist das maschinelle Abkratzen des Dämmsystems von der Wand mit Hilfe eines Baggers. Aufgrund der Gefahr die Bausubstanz unter dem WDVS zu beschädigen, wird diese Methode in der Regel nur angewandt, wenn das Gebäude in der Folge auch abgerissen werden soll. Zudem ist der Einsatz eines Baggers durch die Gebäudehöhe begrenzt.

Der (teil-)selektive Rückbau findet hauptsächlich manuell statt. Die konkrete Vorgehensweise beim Rückbau ist dabei abhängig vom verwendeten Putzsystem im WDVS. Sind organische Oberputze verbaut, werden diese z.B. mit einem Winkelschleifer in Streifen geschnitten. Anschließend kann der Putz inkl. Armierung vom Dämmstoff geschält werden. Dieser Vorgang wird häufig auch *Strippen* genannt. Diese Technik ist nur bei organischen Putzsystemen anwendbar, da diese dünn-schichtig und zäh sind. Flachverblander, Klinkerriemchen oder sonstige Steine, die auf den Dämmstoff geklebt werden, können mechanisch mittels Hammer abgeschlagen werden (Bild 5).



Bild 5:

Abschlagen von Klinkerriemchen mit einem Hammer

Nach Abtrag der oberen Putzschichten wird der Dämmstoff mit Werkzeugen, wie Spaten, von der Wand entfernt. Je nach Art der eingesetzten Produkte sowie der Rückbautechnik, verbleiben Kleberreste am Dämmstoff und Dämmstoffreste an der Oberbeschichtung.

Auswertung von konkreten Rückbauvorhaben

Es wurden zwei Rückbauvorhaben über mehrere Tage wissenschaftlich begleitet und ausgewertet, um erste orientierende Parameter für das Modell zu erhalten, die den Unterschied zwischen konventionellen und selektiven Rückbau wiedergeben.

Das konventionell zurückgebaute WDVS bestand aus 60 mm starken EPS-Dämmplatten mit einem organischen Putzsystem. Es wurde mit Hilfe eines Baggers mit scharfkantigem Greifer von der Wand gekratzt und fiel damit als eine gemischte Abfallfraktion an (Fall A). Das Gebäude wurde im Anschluss abgerissen.

Bei dem selektiv zurückgebauten System handelte es sich um ein WDVS mit 200 mm dicken EPS-Platten und Klinkerriemchen als äußerste Schicht (Fall B). Die Riemchen wurden inkl. Kleber bis zum Armierungsgewebe mit Hämmern abgeschlagen. Anschließend wurde das Armierungsgewebe abgezogen und der Dämmstoff mit Werkzeugen wie Spaten und Heugabel abgebrochen. Da das Gebäude saniert wurde, wurde die Wandoberfläche zudem von verbliebenen Kleberesten gesäubert.

Auswirkungen der Rückbautechnik auf das Stoffstrommodell

Die Auswahl der Rückbautechnik hat direkt Auswirkungen auf das Stoffstrommodell. Während beim konventionellen Rückbau nur ein Abfallstrom anfällt, sind es beim selektiven Rückbau (mindestens) zwei Teilströme.

Beim begleiteten selektiv zurückgebauten WDVS (Fall B) fielen die abgeschlagenen Klinkerriemchen, welche etwa 60 Prozent der Masse dieses WDVS ausmachten, als separater und weitgehend sortenreiner Stoffstrom an und ließen sich als Bauschutt entsorgen.

Der mineralische Kleber, mit dem die EPS-Dämmplatten auf dem Untergrund aufgebracht wurden, verblieb beim Rückbau teils auf der Wand und teils auf der Dämmplatte (Bild 6). Dabei war die Masse des auf den Dämmplatten anhaftenden Klebers oft größer als die Masse des Dämmstoffs selbst.

Aufgrund der heterogenen Materialzusammensetzung dieses Stoffstroms, wäre eine Verwertung des EPS aus dem Stoffstrom nicht direkt möglich, falls dazu ein weitgehend sortenreiner EPS-Abfall gefordert ist.



Bild 6: Putz und Kleberreste am Dämmstoff

Auswirkungen der Rückbautechnik auf das Kostenmodell



Bild 7: WDVS-Rückbau mit Bagger

Rückbaukosten hängen maßgeblich von Personalkosten sowie den Betriebskosten für große Maschinen ab. Der konventionelle Abbruch (Fall A) beanspruchte lediglich 1,6 min je Person und Quadratmeter (reine Abbruchzeit, keine Aufwendungen für Zusammenkehren und Aufsammeln des Abfalls inbegriffen). Dabei wurde ein Bagger eingesetzt. In vergleichbaren Untersuchungen des Fraunhofer IBP [1] wurden für das Abschaben einer 500 m² großen Wandfläche 2,5 Stunden benötigt, was etwa 3,3 Minuten pro Quadratmeter entspricht.

Tabelle 2: Zeitaufwand bei konventionellen und selektiven Rückbauvorhaben

Konventioneller Rückbau (Bagger)		Selektiver Rückbau
Fall A: *	[Albrecht et al.]***	Fall B: **
1,6 min/m ²	3,3 min/m ²	28 min/m ²

* Fall A: 60 mm EPS, organisches Putzsystem, keine weitere Nutzung des Gebäudes

** Fall B: 200 mm EPS, Klinkerriemchen, Sanierung des Gebäudes

***Quelle: nach Albrecht, W.; Schwitalla, C.: 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. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2014, ISBN 978-3-8167-9411-0

Der Zeitaufwand für den selektiven Rückbau von einem WDVS mit Klinkerriemchen (Fall B) betrug etwa 30 Minuten pro Person und Quadratmeter.

Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen (Systemaufbau, Nachnutzung des Gebäudes, Technisierungsgrad), sind diese Werte nicht direkt miteinander zu vergleichen. Sie zeigen aber qualitativ die Spannweite des Zeitaufwandes beim Rückbau von WDVS (Tabelle 2).

Auswirkungen der Rückbautechnik auf das Emissionsmodell

Der konventionelle Rückbau wurde mit einem dieselbetriebenen Kompaktbagger mit etwa 50 kW Antriebsleistung durchgeführt. Die Arbeitsschritte beim selektiven Rückbau fanden hauptsächlich manuell, ohne maschinelle Unterstützung statt. Die Emissionsbetrachtung befindet sich in Vorbereitung.

4.3.2. Beispiel Systemkomponente Aufbereitung

Bevor empirische Modellparameter für die Systemkomponente Aufbereitung erhoben werden können, muss zunächst ein mögliches Aufbereitungsschema entwickelt werden. Zurzeit existieren keine Aufbereitungsanlagen speziell für WDVS-Abfälle. Da sich dieser Abfallstrom von seiner Zusammensetzung von anderen Abfällen unterscheidet, lässt sich das Konzept bestehender Anlagen, wie für die Aufbereitung von Baustellenabfällen, nicht direkt übertragen.

Daher wurden verschiedene Aggregate für den Aufschluss und die Sortierung der Fraktionen ausgewählt und getestet. Ziel dieser ersten Versuche war es, zunächst möglichst sortenreine Fraktionen aus WDVS-Abfällen herzustellen, um den Anforderungen an die Sortenreinheit aller Verwertungswege genügen zu können. Als Testmaterial diente das abgebrochene WDVS aus dem zuvor genannten konventionellen Rückbau. Nachfolgend werden die theoretischen Grundlagen sowie die Ergebnisse erläutert.

Zerkleinerung

Das primäre Ziel der Zerkleinerung ist der Aufschluss der Werkstoffverbindungen. Bei einem optimalen Aufschluss findet der Bruch bzw. die Trennung der Werkstoffe direkt an den Verbindungsstellen der einzelnen Werkstoffe statt. Oftmals ist die Verbindung zwischen zwei Stoffen von höherer Festigkeit als die der Werkstoffe selbst, sodass der Bruch innerhalb der einzelnen Werkstoffe auftritt [5]. Daher wird auch der Effekt der selektiven Zerkleinerung genutzt. Aufgrund der unterschiedlichen Sprödigkeit von Werkstoffen werden diese unter mechanischer Belastung verschieden stark zerkleinert. Die Aufschlusszerkleinerung und selektive Zerkleinerung findet hauptsächlich bei Druck-, Schlag- oder Prallbeanspruchung statt.

Die Verbindungen der WDVS-Komponenten sind, wie oben beschrieben, von höherer Festigkeit als die Festigkeit der Werkstoffe selbst – daher verbleiben beim selektiven Rückbau auch Dämmstoffreste am Oberputz. WDVS bestehen aber sowohl aus spröden Materialien (Putz und Kleber) als auch zähen Materialien (EPS und Armierungsgewebe). Mit einem Prallreaktor ließ sich der Abfall gut aufschließen und selektiv zerkleinern, wie die Ergebnisse der folgenden Aufbereitungsschritte zeigen.

Siebung

Aufgrund der selektiven Zerkleinerung lagen für die verschiedenen Werkstoffe im zerkleinerten Gut unterschiedliche Korngrößenverteilungen vor. Durch eine Siebklassierung ließen sich die hauptsächlich feinkörnigen Putz- und Kleberbestandteile in einer Feinfraktion aufkonzentrieren. Allein durch Siebklassierung konnten die Abfallbestandteile jedoch nicht getrennt werden, da sich die Korngrößenverteilungen der Werkstoffe zwar unterschieden, aber überschneiden. Daher wurde als weiterer Klassierungsschritt die Dichtentrennung genutzt.

Dichtentrennung

Überwiegend mineralische Werkstoffe, wie Putz und Kleber, weisen höhere Dichten auf als EPS oder Armierungsgewebe. Sofern diese Stoffe in einem Stoffgemisch separat vorliegen (erzielt durch eine Aufschlusszerkleinerung), können sie mittels einer Dichtentrennung separiert werden. Bei einer Schwimm-Sink-Trennung mit Wasser als Trennmedium lassen sich Stoffe mit einer höheren Dichte als Wasser trennscharf von Stoffen mit geringerer Dichte trennen [5]. Ein Nachteil der Schwimm-Sink-Trennung kann der erhöhte Aufwand sein, der durch die Trocknung des nassen Materials notwendig wird.

In einem Windsichter werden Partikel anhand ihrer unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeit sortiert. Die Sinkgeschwindigkeit ist abhängig von der Korngröße, der Dichte und der Umströmungseigenschaft des Partikels [5]. Bei einer genügend großen Spannweite der Dichte unterschiedlicher Materialien (z.B. EPS: $\sim 15 \text{ kg/m}^3$ und Putz: $> 1.200 \text{ kg/m}^3$), findet die Trennung maßgeblich nach der Dichte des Partikels statt.

Mittels einer Schwimm-Sink-Trennung mit Wasser als Medium ließ sich das EPS gut aus dem zerkleinerten und gesiebten WDVS-Abfallgemisch abtrennen. Aber auch durch die Windsichtung, zur Anwendung kam hier ein Zick-Zack-Sichter, ließ sich eine effektive Trennung erreichen. Die verbleibende Schwerfraktion, bestehend aus Putz und Kleber sowie dem Armierungsgewebe, konnte aufgrund der unterschiedlichen Dichten der Werkstoffe durch eine weitere Windsichtungsstufe getrennt werden (Bild 8).



Bild 8: EPS, Armierungsgewebe sowie Putze und Kleber nach der Aufbereitung

Die Untersuchungen mit den dargestellten Aufbereitungsaggregaten haben ergeben, dass sich sortenreine Abfallfraktionen produzieren lassen, die wahrscheinlich den Anforderungen von Verwertungsverfahren an die Sortenreinheit genügen. Im nächsten Schritt müssen diese Ergebnisse mit großtechnischen Aggregaten validiert und weitere empirische Daten für die Modellerstellung generiert werden.

5. Fazit und Ausblick

Die zukünftig steigenden WDVS-Abfallmengen erfordern im Sinne der Kreislaufwirtschaft alternative Entsorgungskonzepte von der Baustelle bis zur Entsorgungsanlage. Verwertungsverfahren stellen dabei Anforderungen an die Abfälle, die allein durch die heutige Rückbautechnik nicht erfüllt werden können, sodass eine nachgeschaltete Aufbereitung erforderlich ist, in der die Stoffströme entsprechend konfektioniert werden. Die verschiedenen Verwertungsverfahren mit den zugehörigen notwendigen Rückbau- und Aufbereitungsschritten gehen mit unterschiedlichen ökonomischen und ökologischen Aufwendungen einher. Daher wird aktuell ein Modell entwickelt, mit dessen Hilfe effiziente Entsorgungswege identifiziert und bewertet werden.

Während bei der Identifikation der Verwertungsverfahren der Fokus bisher auf dem EPS lag, müssen auch für die Fraktion der Putze und Kleber ressourceneffiziente Entsorgungswege gefunden werden. Putze und Kleber, welche bei WDVS zum Einsatz kommen, weisen einen Organikanteil (hauptsächlich in Form von Polymeren) zwischen fünf und zwanzig Prozent auf. Dies erschwert eine Kreislaufführung als rein mineralische Fraktion.

Die Modellierung sowie die Erhebung der Daten befinden sich aktuell in der Entwicklung.

Erste Versuche haben gezeigt, dass mit mechanischen Aufbereitungsschritten weitgehend sortenreine Fraktionen aus einem WDVS-Abfall gewonnen werden können. Da die Ergebnisse im Technikumsmaßstab mit dem Abfall eines einzelnen zurückgebauten Wärmedämmverbundsystems erzielt wurden, werden die Versuche mit weiteren WDVS-Abfallgemischen und weiteren ausgewählten Aggregaten validiert.

6. Literatur

- [1] Albrecht, W.; Schwitalla, C.: 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. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2014, ISBN 978-3-8167-9411-0
- [2] Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme, Statistiken zu 2015, am 23.05.2016 per E-Mail
- [3] Industrieverband Hartschaum. Im Internet: http://www.ivh.de/Auf_einen_Blick_-_Entsorgung_von_EPS_mit_HBCD_I2929.whtml (Stand 27. März 2017)

- [4] Mark, F. E. et al.: Destruction of the flame retardant hexabromocyclododecane in a full-scale municipal solid waste incinerator. In: Waste Management & Research 2015, Vol. 33(2), Seite 165–174; DOI: 10.1177/0734242X14565226
- [5] Martens, H.; Goldmann, D.: Recyclingtechnik, Fachbuch für Lehre und Praxis, 2. Auflage; Springer Vieweg, Wiesbaden 2015, Seite 31 ff, ISBN 978-3-658-02786-5
- [6] PolyStyrene Loop (2016). Im Internet: <http://www.creacycle.de/de/projekte/recycling-von-expandiertem-polystyrol-eps/polystyrene-loop-2016.html> (Stand 23. März 2017)

▶ **Modulare TWS-Nassaufbereitung mit Wasseraufbereitung aus einer Hand**



Was genau kann denn gewaschen werden?

- | | | |
|---|---|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Sand & Kies | <input checked="" type="checkbox"/> Boden | <input checked="" type="checkbox"/> Bahnschotter |
| <input checked="" type="checkbox"/> Splitt & Geröll | <input checked="" type="checkbox"/> Bauschutt | <input checked="" type="checkbox"/> Schlacke |



Welche Bestandteile kann eine modulare Anlage haben?

- | | | |
|--|---|--|
| <input checked="" type="checkbox"/> Warrior-Vorsieb | <input checked="" type="checkbox"/> Zyklon, Schöpfrad, Sandschnecke | <input checked="" type="checkbox"/> Trommelwäsche |
| <input checked="" type="checkbox"/> 2 - 3D-Waschsieb | <input checked="" type="checkbox"/> Schwertwäsche | <input checked="" type="checkbox"/> Abwasseraufbereitung |

▶ **Bewährte, erprobte Technik**

Referenzen aus Serienfertigung.

▶ **Umzug möglich**

Transport in Containern und Tiefladern in „Plug in Play“-Bauweise.

▶ **Flexibilität durch Erweiterung**

Passende Komponenten auch später einzubinden.

▶ **Abwasseraufbereitung mit dabei**

Containermobile Klärtürme mit Filterpressen und Prozeßwassertank passend dazu.



C. Christophel GmbH;

Taschenmacherstr. 31-33; 23556 Lübeck;
Tel.: 0451-8 99 47-0; Fax: 0451-8 99 47-49;
mail@christophel.com; www.christophel.com