

Werkstoffliche Aufbereitung von Wärmedämmverbundsystemen

Thomas Fehn* und Ulrich Teipel

DOI: 10.1002/cite.201900124

 This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Aufgrund steigender energetischer Anforderungen an Gebäude, werden Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) seit den 1970 Jahren zur Dämmung von Gebäudefassaden verwendet. Angesichts der Langlebigkeit dieser Kompositmaterialien fallen seit den letzten Jahren vermehrt WDVS-Abfälle an. Eine werkstoffliche Verwertung dieser Systeme existiert aktuell noch nicht, wodurch ein enormes Ressourceneffizienzpotenzial verloren geht. Aufgrund der Komplexität dieser Kompositmaterialien wurden im Rahmen dieser Arbeit Wärmedämmverbundsysteme durch verfahrenstechnische Prozessschritte aufbereitet.

Schlagwörter: Partikelgrößenverteilung, Recycling, Wärmedämmverbundsysteme, Zerkleinerung

Eingegangen: 30. August 2019; *revidiert:* 04. Februar 2020; *akzeptiert:* 10. Februar 2020

Preparation of Thermal Insulation Composite Systems

Due to increasing energy requirements for buildings, thermal insulation composite systems (TICS) have been used to insulate building facades since the 1970s. In view of the longevity of these composite materials, there has been an increased amount of TICS waste in recent years. Since there is no current recycling concept for these systems, an enormous resource efficiency potential remains unused. Due to the complexity of composite materials this study focuses on the pretreatment and discusses different processing steps in detail.

Keywords: Comminution, Particle size, Recycling, Thermal insulation composite systems

1 Einleitung

In der Bundesrepublik Deutschland nimmt die Energieeinsparung sowie Energie- und Ressourceneffizienz eine zentrale Rolle in baugewerblichen Bereichen ein. Einen wesentlichen Beitrag zur Energieeinsparung im Gebäudebestand leistet die Verringerung des Transmissionswärmeverlustes durch Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) an den Gebäudefassaden. Seit den 1970 Jahren wurde ca. 900 Mio. m² WDVS an Fassaden von Wohnhäusern angebracht [1]. Diese komplexen Kompositmaterialien zeichnen sich durch einen mehrschichtigen Aufbau aus, der aus einer Dämmschicht, einer gewebearmierten Unterputzschicht und einer Oberputzschicht besteht [2] (Abb. 1). In WDVS kommen die verschiedensten Dämmstoffe wie expandiertes und extrudiertes Polystyrol (EPS/XPS) sowie Stein- und Glaswolle zum Einsatz. Aufgrund der geringeren Wärmeleitfähigkeit im Gegensatz zu anderen Dämmstoffen und der vergleichsweise kostengünstigen Herstellung wird überwiegend EPS/XPS als Dämmmaterial verwendet [3, 4].

Die ersten WDVS haben in den kommenden Jahren ihre Nutzungsdauer erreicht und stellen zukünftig einen nicht

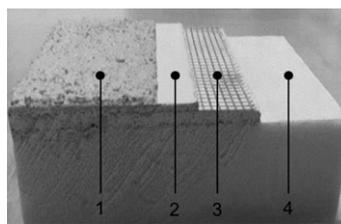


Abbildung 1. Aufbau eines WDVS (1 Oberputz; 2 Armierungsputz; 3 Armierungsgewebe im Armierungsputz; 4 Dämmstoffmaterial).

unerheblichen Abfallstrom dar. Aufgrund ihres vielseitigen Anwendungsspektrums besitzen sie eine breite Rohstoffbasis. Angesichts dessen müssen Strategien und technolo-

Thomas Fehn, Prof. Ulrich Teipel
thomas.fehn@th-nuernberg.de
Technische-Hochschule Nürnberg, Fakultät Verfahrenstechnik,
Fraunhofer Forschungsgruppe Partikeltechnologie und Rohstoff-
innovation (FPR), Wassertorstraße 10, 90489 Nürnberg, Deutsch-
land.

gische Möglichkeiten für eine werkstoffliche Aufbereitung des anfallenden Abfallstroms entwickelt werden. Weiterhin enthalten die meisten Dämmmaterialien, überwiegend EPS/XPS, das seit 2013 verbotene und umweltgefährdende Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD), was die Verwertung von WDVS zusätzlich erschwert [5]. Aktuell werden WDVS überwiegend thermisch verwertet [6]. Die Aufbereitung von dämmstoffhaltigen Kompositmaterialien stellt aufgrund ihrer Materialvielfalt hohe Anforderungen an den Recyclingprozess. Somit ist ein wesentlicher Aspekt bei der Aufbereitung von Recyclingprodukten der Zerkleinerungsprozess. Er stellt bei Recyclingprozessen mit den energieaufwendigsten Prozessschritt dar, wodurch dieser in Bezug auf die geforderte Partikelgröße so ökonomisch wie möglich durchgeführt werden sollte [7,8]. Die Partikelgröße besitzt ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Wiederverwertbarkeit der erhaltenen Materialfraktionen. Je nach Einsatzgebiet der rückgewonnenen Rohstoffe werden an die erhaltenen aufbereiteten Fraktionen unterschiedliche Anforderungen in Bezug auf ihre partikulären Eigenschaften gestellt. Breite Partikelgrößenverteilungen (PGV) werden zur Erhöhung der Packungsdichte bei Füllstoffen bevorzugt. Enge Verteilungen sind bei der Herstellung von Recycling-Ziegeln und Beton gewünscht, wo hohe Festigkeitskennwerte oder spezifische Körnungen angestrebt werden [9–11].

Aufgrund der unterschiedlich anfallenden Partikelkollektive stellt die Analyse der individuellen Fraktionen eine große Herausforderung dar. Da überwiegend in allen Materialfraktionen Glasfasergewebe, Putzpartikel, Dämmstofffasern sowie grobe und feine Partikelfraktionen anfallen, sind herkömmliche Analysemethoden oft für eine Charak-

terisierung ungeeignet. Zur genauen Charakterisierung der erhaltenen Partikelkollektive bietet sich die dynamische Bildanalyse an, um die charakteristischen Partikelgrößen und Partikelformen effizient bestimmen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Recyclingstrategie entwickelt, um verwertbare Sekundärrohstoffe aus den Kompositen rückzugewinnen. Aufgrund der Komplexität der WDVS-Abfälle wurden in einem ersten Schritt WDVS-Modellsysteme aus EPS und XPS entworfen, um die entwickelte Recyclingstrategie zu verifizieren.

2 Recyclingstrategie für WDVS-Abfälle

Die WDVS-Abfälle sollen im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) und in Bezug auf ökonomische sowie ökologische Aspekte aufbereitet werden. Im Sinne dessen wurde eine Recyclingstrategie entwickelt (Abb. 2). So können aus den komplexen Kompositen Materialströme erzeugt werden, die erneut als Sekundärrohstoff am Markt etabliert werden können [12].

Die Verwertungsstrategie beinhaltet verfahrenstechnische Prozessschritte, wie die Zerkleinerung, Sieb- und Strömungsklassierung sowie der Partikelgrößencharakterisierung. Nach dem Abbruch der WDVS befinden sich an den Systemen Befestigungsmaterialien wie Metallschienen, Holzdübel und weitere Störstoffe. Diese müssen vor einer sortenreinen Aufbereitung überwiegend entfernt werden. Da die Abfälle vorwiegend in großen Segmenten anfallen, wird mit einer Vorzerkleinerung begonnen. Hierdurch werden erste Teilkomponenten aus dem Komposit abgeschlossen. Anschließend können Zerkleinerungsprozesse

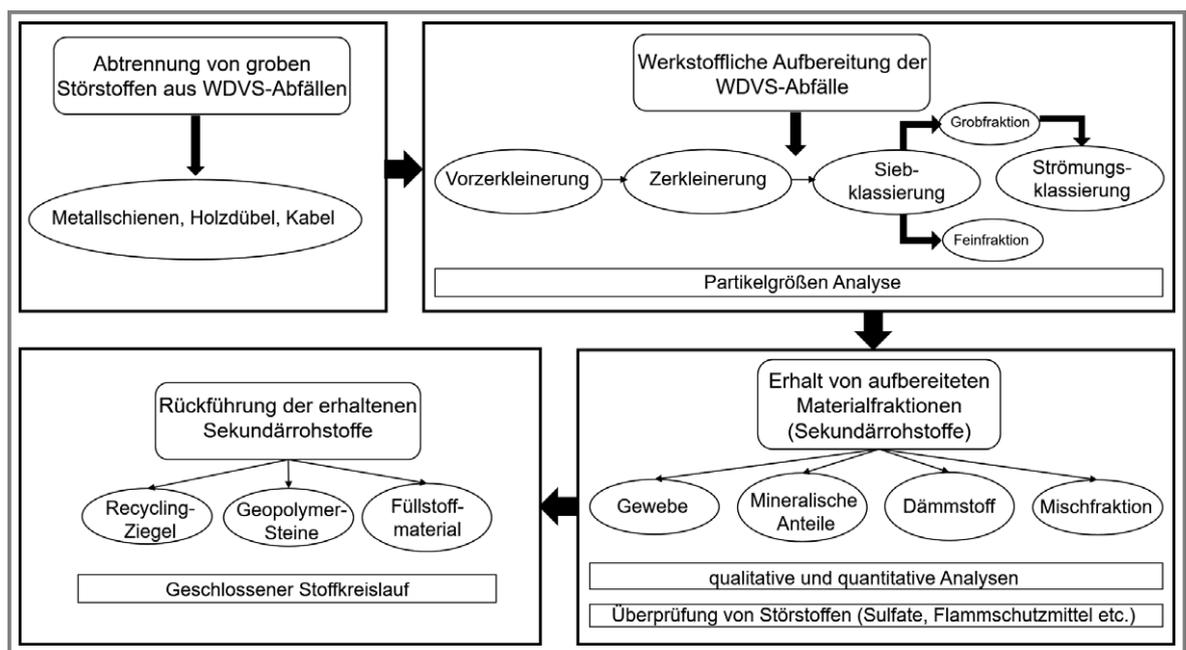


Abbildung 2. Recyclingstrategie zur Aufbereitung von WDVS-Abfällen.

mit variierenden Massenströmen \dot{m} und Rostmaschenweiten w_{Ein} durchgeführt werden. Somit kann der Einfluss auf die Partikelgröße des Zerkleinerungsproduktes untersucht werden. In vorangegangenen Versuchen wurde unter Zuhilfenahme unterschiedlicher Zerkleinerungsmaschinen (Hammermühle, Schneidmühle, Stiftmühle sowie einer Kugelmühle) versucht, den komplexe Verbund von WDVS zu lösen. Mit der Hammermühle konnte der Verbund am besten aufgeschlossen werden, weshalb diese auch für die folgenden Untersuchungen eingesetzt wurde. Üblicherweise bestehen Zerkleinerungsprodukte von Kompositmaterialien aus breiten PGV mit hohem Feingutanteil, da diese eine breite Rohstoffbasis besitzen. Aus diesem Grund wurde als nächster Prozessschritt eine Siebklassierung implementiert. Anschließend können mittels Strömungsklassierung aus den erhaltenen Fraktionen Stoffströme generiert werden, die überwiegend für eine Wiederverwertung geeignet sind.

3 Materialien und Methoden

3.1 Materialien

Die vom Rückbau anfallenden WDVS-Abfälle weisen in den meisten Fällen keine Sortenreinheit auf. So befinden sich an den WDVS Befestigungsmaterialien wie Dübel, Metallschienenverbindungen und Klebstoffe. Des Weiteren weist der Dämmstoff (überwiegend EPS/XPS) oft starke Verunreinigungen wie Witterungsspuren, Schimmel etc. auf. Abb. 3 zeigt die erwähnten Störstoffe bzw. Witterungsschäden an WDVS-Abfällen.

Aufgrund der Vielfalt der in den letzten 50 Jahren verbauten Materialien sowie der komplexen Bauweise und Verunreinigungen/Störstoffe der anfallenden WDVS-Abfälle wurden im Rahmen dieser Arbeit damit begonnen, WDVS im Labormaßstab zu entwerfen. Hierbei wurden die eben erwähnten Faktoren wie Befestigungsvarianten und Witterungseinflüsse nicht mit einbezogen. Die eingesetzten Massen der individuell verwendeten Materialien für die Modellsysteme waren bekannt. Im Anschluss kann über eine Massenbilanz festgestellt werden, welcher Anteil der jeweiligen Materialien Rückgewonnen werden konnte. Der Verwertungsweg konnte so bilanziert werden. Für die Konstruktion der Systeme wurde als Dämmstoffmaterial EPS und XPS verwendet,

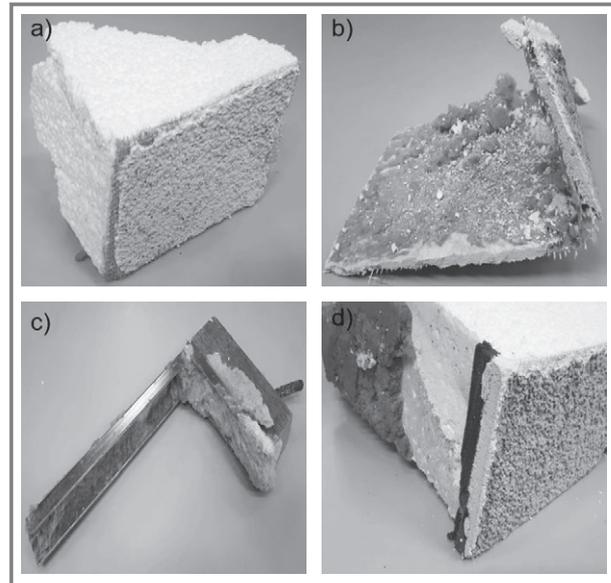


Abbildung 3. Ausgewählte WDVS-Abfälle: a) WDVS-Segment, b) Schimmelbefall am WDVS, c) Metallschienenverbindung mit Holzdübeln und d) Polyurethanschaum für die Befestigung von WDVS an der Fassade.

da diese Dämmstofftypen am häufigsten in Deutschland verbaut werden bzw. wurden und somit häufig im Abfallstrom anfallen. Die relevanten technischen Daten der eingesetzten Baustoffe befinden sich in Tab. 1.

Die Dämmstoffe (EPS/XPS) wurden in äquivalente Segmente (5 cm × 5 cm × 5 cm) unterteilt, da dies die maximale Aufgabegutgröße darstellt, mit der die verwendete Hammermühle beschickt werden kann. Anschließend wurde der

Tabelle 1. Technische Daten der eingesetzten Baustoffe zur Konstruktion der WDVS.

Baustoff	Firma	Technische Daten	
EPS	BACHL Dämmtechnik	Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]	0,035
		Dichte ρ [kg m^{-3}]	20
		Fläche Dämmstoffplatte A [m^2]	0,5
XPS	BACHL Dämmtechnik	Wärmeleitfähigkeit λ [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]	0,045
		Dichte ρ [kg m^{-3}]	45
		Fläche Dämmstoffplatte A [m^2]	0,8
Armierungsputz	SAKRET	Partikelgröße x [mm]	1
		Rohdichte ρ [kg m^{-3}]	900
		Druckfestigkeit σ [N mm^{-2}]	1,5–5
Oberputz	SAKRET	Partikelgröße x [mm]	2
		Rohdichte ρ [kg m^{-3}]	1300
		Druckfestigkeit σ [N mm^{-2}]	1,5–5
Armierungsgewebe	BAUFAS	Gewicht m [g m^{-2}]	145
		Maschenweite [mm]	4 × 4

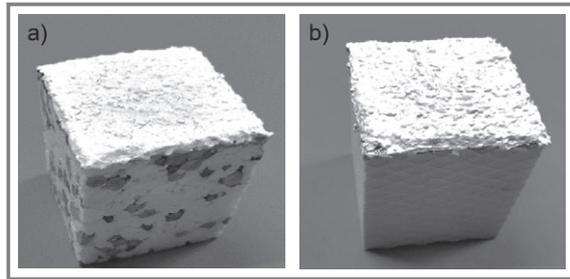


Abbildung 4. WDVS-Modellsysteme mit a) EPS und b) XPS als Dämmstoffmaterial.

Armierungsputz auf die Dämmstoffsegmente aufgetragen und währenddessen das Armierungsgewebe eingebettet. Nach dem Aushärten konnte der Oberputz aufgetragen werden. Abb. 4 zeigt die beiden entwickelten WDVS-Typen. In Tab. 2 sind die jeweiligen Volumen- bzw. Massenanteile der verwendeten Werkstoffe in den jeweiligen WDVS-Modellsystemen aufgeführt.

Tabelle 2. Volumen und Massenanteile der eingesetzten Materialien für die WDVS-Modellsysteme.

Werkstoff	EPS-Systeme		XPS-Systeme	
	Massenanteil [%]	Volumenanteil [%]	Massenanteil [%]	Volumenanteil [%]
Dämmstoff	49	99,2	68	99,2
Putz	44	0,7	25	0,7
Gewebe	7	< 0,1	7	< 0,1

3.2 Methoden

3.2.1 Hammermühle

Zur Vor- und Nachzerkleinerung der WDVS wurde eine Hammermühle der Firma Siebtechnik vom Typ HM1 eingesetzt. Durch 16 gelagerte, rechteckige (65 mm × 15 mm × 30 mm) Hämmer wird das aufgegebene Material durch Schlag- und Scherbeanspruchung zerkleinert. Der Mahlraum der verwendeten Hammermühle ist mit Hartmetall ausgekleidet. Der Zerkleinerungseffekt des Produktes wird durch den Abstand zwischen Schlagkreis und Mahlbahn von 1 mm sowie dem klassierenden Rostsieb w_{Ein} bestimmt. Bei den durchgeführten Laborversuchen wurde eine Einlegrostmaschenweite von $w_{\text{Ein}} = 10$ und 8 mm eingesetzt. Die verwendete Hammermühle besitzt eine Motorleistung von $P = 1,5$ kW, mit einer Drehzahl von $n = 2445 \text{ min}^{-1}$ bei einer Umfangsgeschwindigkeit von $u = 26,6 \text{ m s}^{-1}$. Das Aufgabegut kann ab einem Partikelmedianwert von $x_{50} = 80$ mm über eine Vibrationsrinne aufgegeben werden. Die für die Zerkleinerung benötigte elektrische Leistung wurde mittels eines Fluke Power Quality and Energy Analyser (Typ 435 Series II) gemessen und mithilfe eines Messrechners aufgezeichnet. Durch die aufgenommene Leistung

kann die spezifische Zerkleinerungsenergien $E_{\text{spez.}}$ (Gl. (1)) für die jeweiligen WDVS-Typen und variierenden Massenströmen \dot{m} bzw. Einlegrostmaschenweiten w_{Ein} bestimmt werden.

$$E_{\text{spez.}} = \frac{1}{m} \int_{t_0}^t (P - P_0) dt \quad (1)$$

Darin stellt m die Masse des Zerkleinerungsproduktes, P die Gesamtleistung und P_0 die Leerlaufleistung dar [13].

3.2.2 Sieb- und Strömungsklassierung

Für die durchgeführte Siebklassierung kam eine Siebmaschine der Firma Retsch vom Typ AS 200 control zum Einsatz. Für alle Siebungen waren die Amplitude von 1,5 mm und die Intervallzeit von 10 s identisch. Damit die Reproduzierbarkeiten der Ergebnisse gewährleistet war, wurde für jede Siebklassierung die Siebzeit nach DIN 66165 [14] bestimmt. Ziel ist es, das Materialgemisch des erzeugten Zerkleinerungsproduktes in sortenreine Stoffströme aufzubereiten. Aufgrund des hohen Dichteunterschieds der individuellen Werkstoffe ist dies in gewissen Grenzen mittels der Methode der Strömungsklassierung möglich. Es wurde eine Zickzacksichterapparatur der Firma Alpine vom Typ 1-40 MZN verwendet, in der Gasgeschwindigkeiten (Luft) von $v_{\text{Luft}} = 0,25 \text{ m s}^{-1}$ bis $12,7 \text{ m s}^{-1}$ realisiert werden können.

3.2.3 Partikelcharakterisierung mittels dynamischer Bildanalyse

Um die unterschiedlichen Partikelkollektive hinreichend charakterisieren zu können, wurden diese mit einem optoelektronischen Messgerät zur dynamischen Bildanalyse der Firma Retsch vom Typ Camsizer vermessen. Zur Charakterisierung der Partikelkollektive werden die erhaltenen Proben über eine integrierte Vibrationsrinne an einer weiß erleuchteten Glasplatte vorbeigeführt und währenddessen die Partikel von zwei Kameras detektiert. Die Basic-Kamera registriert hierbei grobe Partikel ($x \geq 16$ mm), wohingegen die Zoom-Kamera alle feineren Partikel erfasst. Hierdurch können Partikel in einem Größenbereich von 30 μm bis 90 mm präzise bestimmt werden. Durch die Partikelgrößenanalyse mittels des Camsizers lassen sich die von den Kameras aufgenommenen Projektionsflächen der Partikel, verschiedene charakteristische Längen wie der Feret-Durchmesser oder der Martin-Durchmesser sowie deren Maxima und Minima bestimmen. Zur Bestimmung der PGV wurde, mit Ausnahme von dem Glasfasergewebe, $x_{c,\text{min}}$ herangezogen. Als x_c wird die maximale Sehne der Projektionsfläche senkrecht zur Messrichtung bezeichnet. Die Kenngröße $x_{c,\text{min}}$ bezeichnet die kürzeste aller maximalen gemessenen Sehnen x_c an der Projektionsfläche eines Partikels. Diese Kenngröße eignet sich gut für den Vergleich von Siebanalyse mit dynamischer Bildverarbeitung. Für die Längenver-

teilung von Fasern eignet sich die Kenngröße $x_{\text{länge}}$. Dieser kann mit Gl. (2) bestimmt werden.

$$x_{\text{länge}} = \sqrt{x_{\text{Fe,max}}^2 - x_{\text{Ma,min}}^2} \quad (2)$$

Der Feret-Durchmesser beschreibt den Abstand zweier an die Projektionsfläche des Partikels angelegten Tangenten in Messrichtung. Die Formkenngroe $x_{\text{Fe,max}}$ beschreibt den grotesten Feret-Durchmesser eines Partikels, ermittelt aus verschiedenen Messrichtungen. Der Martin-Durchmesser gibt die Länge des Durchmessers durch den Flächenschwerpunkt in Messrichtung an. Somit entspricht $x_{\text{Ma,min}}$ dem kürzesten Martin-Durchmesser aller gemessenen Martin Durchmesser einer Partikelprojektion.

4 Experimenteller Teil

4.1 Zerkleinerungsprozess

Für die Vorzerkleinerung in der Hammermühle wurde jeweils eine Aufgabegutmasse von $m_A = 700 \text{ g}$ der jeweiligen WDVS-Typen (EPS/XPS) verwendet. Da es durch die Groe der Systeme mit einem Einlegerost zu Überladungen in der Hammermühle kam, wurden die Versuche ohne Rost durchgeführt. Es wurde für die Vorzerkleinerung Massenströme im Bereich von $\dot{m} = 100 \text{ g min}^{-1}$ bis 1000 g min^{-1} realisiert. Es konnte festgestellt werden, dass die ermittelten Massenströme von $\dot{m}_{\text{EPS}} = 347 \text{ g min}^{-1}$ und $\dot{m}_{\text{XPS}} = 492 \text{ g min}^{-1}$ die maximalen Massenströme darstellen, bei denen die Werkstoffe bestmöglich aus dem komplexen Verbund herausgelöst werden konnten. Durch diesen Schritt kann anteilig der Putz vom Komposit abgetrennt und der Dämmstoff teilweise vorzerkleinert werden. Die mittels Camsizer bestimmten Medianwerte der PGV $x_{\text{c,min,50}}$ der EPS-WDVS liegen bei $x_{\text{c,min,50}} = 25,56 \text{ mm}$ und bei den XPS-WDVS bei $x_{\text{c,min,50}} = 27,46 \text{ mm}$. Es konnte hierbei nur ein geringer Zerkleinerungsgrad realisiert werden. Dies ist auf die geringen Massen und die niedrigen Sprodigkeiten des Dammstoffmaterials sowie das Fehlen eines Einlegerosts zurückzuführen. Im Anschluss dieser Vorzerkleinerung wurde mit dem erhaltenen Zerkleinerungsprodukt eine Nachzerkleinerung in der Hammermühle durchgeführt. Es wurde der Massenstrom zwischen $\dot{m} = 50 \text{ g min}^{-1}$ und 145 g min^{-1} variiert. Dabei wurden Einlegerostmaschenweiten von $w_{\text{Ein.}} = 10 \text{ mm}$ und 8 mm verwendet. Abb. 5 zeigt den Einfluss der Parameter auf die spezifische Zerkleinerungsenergie.

Der Zusammenhang zwischen spezifischer Zerkleinerungsenergie $E_{\text{spez.}}$, dem Massenstrom

\dot{m}_{EPS} bzw. \dot{m}_{XPS} und der Einlegerostmaschenweite $w_{\text{Ein.}}$ zeigt eine Potenzfunktion. Bei der Zerkleinerung der EPS-Systeme (Abb. 5a) nimmt die spezifische Zerkleinerungsenergie $E_{\text{spez.}}$ bei den Einlegerostmaschenweiten von $w_{\text{Ein.}} = 10$ und 8 mm ab: bei $w_{\text{Ein.}} = 10 \text{ mm}$ von $E_{\text{spez.}} = 12,16 \text{ kWh t}^{-1}$ auf $2,87 \text{ kWh t}^{-1}$, bei $w_{\text{Ein.}} = 8 \text{ mm}$ von $E_{\text{spez.}} = 13,54 \text{ kWh t}^{-1}$ auf $3,26 \text{ kWh t}^{-1}$. Beide Funktionen deuten darauf hin, dass sich die spezifische Zerkleinerungsenergie $E_{\text{spez.}}$ asymptotisch einem Grenzwert annähert. Im Vergleich zu der Zerkleinerung der XPS-Systeme (Abb. 5b) nimmt die spezifische Zerkleinerungsenergie $E_{\text{spez.}}$ ebenfalls bei höherem Massenstrom \dot{m} bei $w_{\text{Ein.}} = 10$ und 8 mm ab: $w_{\text{Ein.}} = 10 \text{ mm}$ von $E_{\text{spez.}} = 45,8 \text{ kWh t}^{-1}$ auf $29,6 \text{ kWh t}^{-1}$, bei $w_{\text{Ein.}} = 8 \text{ mm}$ von $E_{\text{spez.}} = 50,58 \text{ kWh t}^{-1}$ auf $35,74 \text{ kWh t}^{-1}$. Die Funktionen deuten erneut darauf hin, dass diese asymptotisch auf einen Grenzwert zu laufen. Bei den jeweiligen Zerkleinerungen konnte eine höhere spezifische Zerkleinerungsenergie

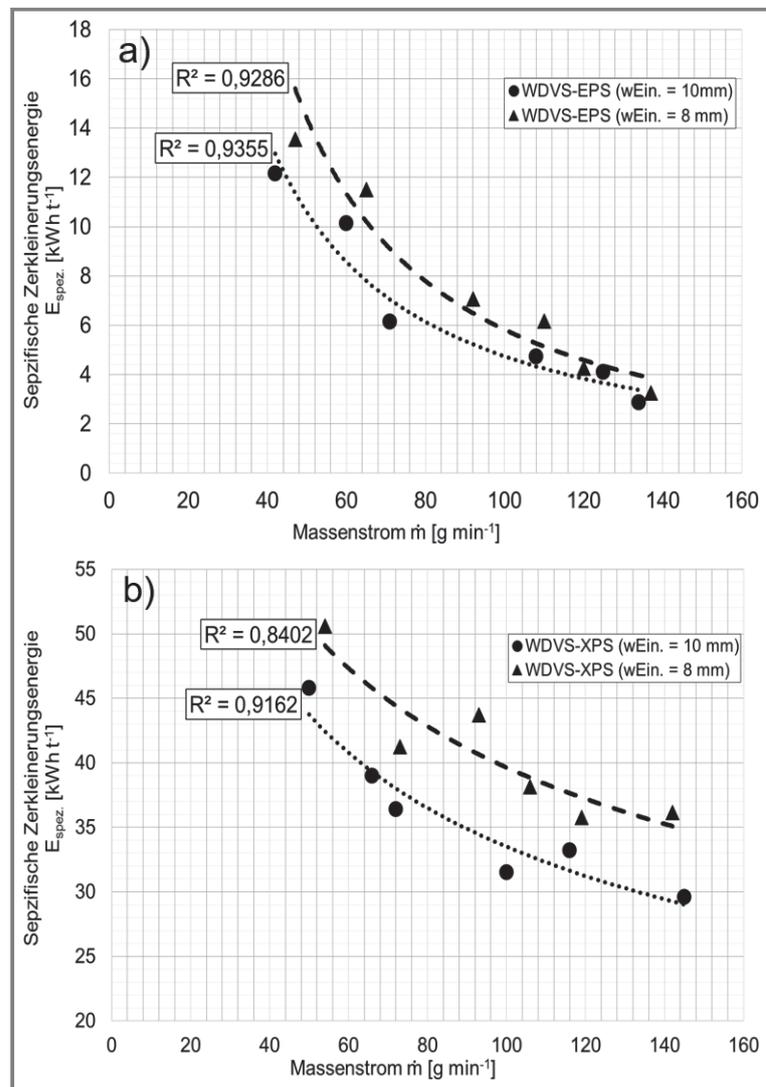


Abbildung 5. Spezifische Zerkleinerungsenergie $E_{\text{spez.}}$ in Abhängigkeit des Massenstroms und der Einlegerostmaschenweite $w_{\text{Ein.}}$ für die WDVS mit den Dämmstoffen EPS (a) und XPS (b).

$E_{\text{spez.}}$ bei abnehmender Einlegrostmaschenweite $w_{\text{Ein.}}$ festgestellt werden. Aufgrund der jeweiligen Dichte und Materialzusammensetzung der Dämmstoffmaterialien ($\rho_{\text{EPS/XPS}} \sim 20/45 \text{ kg m}^{-3}$) wird für die Zerkleinerung der XPS-Systeme eine höhere spezifische Zerkleinerungsenergie $E_{\text{spez.}}$ als für die EPS-Systeme benötigt. Während des Nachzerkleinerungsprozesses konnten sämtliche Materialien aus dem komplexen Verbund aufgeschlossen werden. Dies konnte bei allen Massenströmen \dot{m} bzw. Einlegrostmaschenweiten $w_{\text{Ein.}}$ für die jeweiligen WDVS-Typen erreicht werden. Mittels dynamischer Bildanalyse wurden von den individuellen Zerkleinerungsprodukten die PGV bestimmt und den Ergebnissen der Vorzerkleinerung gegenübergestellt (Abb. 6).

Durch die Variation des Massenstroms \dot{m} in der Nachzerkleinerung konnte kein signifikanter Einfluss auf die PGV festgestellt werden. Dieser stellt somit keinen Einflusspara-

meter auf die Produktgröße dar. Der Medianwert $x_{c,\text{min},50}$ nimmt bei den EPS-Systemen bei einem Massenstrom $\dot{m} = 145 \text{ g min}^{-1}$ mit den Einlegrostmaschenweiten $w_{\text{Ein.}} = 10 \text{ mm}$ und 8 mm von $x_{c,\text{min},50} = 5,07 \text{ mm}$ auf $4,69 \text{ mm}$, bei den XPS-Systemen von $x_{c,\text{min},50} = 5,90 \text{ mm}$ auf $5,16 \text{ mm}$ ab (Abb. 6b). Für einen Massenstrom $\dot{m} = 45 \text{ g min}^{-1}$ liegt der Medianwert $x_{c,\text{min},50}$ bei den EPS-Systemen mit den Einlegrostmaschenweiten $w_{\text{Ein.}} = 10 \text{ mm}$ und 8 mm bei $x_{c,\text{min},50} = 5,04 \text{ mm}$ und $4,72 \text{ mm}$, bei den XPS-Systemen $x_{c,\text{min},50} = 5,91 \text{ mm}$ und $5,14 \text{ mm}$.

Bei den XPS-Systemen konnte eine höherer Volumenanteil in der Feinfraktion im Zerkleinerungsprodukt ($0,1 \text{ mm} \leq x_{c,\text{min}} \leq 1 \text{ mm}$) als bei den EPS-Systemen festgestellt werden. Dies resultiert aus der Sprödigkeit des Dämmstoffmaterials XPS, wodurch während des Zerkleinerungsprozesses mehr Abrieb am Material als bei den EPS-Systemen vorliegt. Dies lässt sich ebenfalls in der

Summenverteilungsfunktion der Vorzerkleinerung (Abb. 5a) in einem Partikelgrößenbereich ($0,1 \text{ mm} \leq x_{c,\text{min}} \leq 5 \text{ mm}$) feststellen. Es konnte gezeigt werden, dass sich die spezifische Zerkleinerungsenergien $E_{\text{spez.}}$ bei beiden Dämmstofftypen bei zunehmenden Massenstrom einem asymptotischen Wert annähern. Bei abnehmender Einlegrostmaschenweite $w_{\text{Ein.}} = 10 \text{ mm}$ und 8 mm kommt es zu einer Zunahme der spezifischen Zerkleinerungsenergie $E_{\text{spez.}}$. Durch die Partikelgrößencharakterisierung mittels dynamischer Bildanalyse konnte für beide WDVS-Typen festgestellt werden, dass der gemittelte Medianwert $x_{c,\text{min},50}$ bei kleinerer Einlegrostmaschenweite $w_{\text{Ein.}}$ abnimmt. Die in dieser Arbeit gewählten Massenströme \dot{m} , mit denen die Hammermühle beschickt wurde, haben keinen Einfluss auf die Partikelgröße. Aus diesem Grund ist es möglich, die Summenverteilung gemittelt zu betrachten. Da die Massenströme \dot{m} mit den verwendeten Laborapparaturen nicht erhöht werden konnten, kann nur für den gewählten Bereich diese Aussage getroffen werden. Bei zu hohen Massenströmen $\dot{m} \geq 160 \text{ g min}^{-1}$ kann es zu einer Überladung der verwendeten Hammermühle kommen.

4.2 Siebklassierung

Die entwickelte Recyclingstrategie (Abb. 2) beinhaltet als nächsten Prozessschritt eine Siebklassierung. Abb. 6b zeigt einen hohen Feingutanteil des Partikelkollektives der XPS-Systeme in einem Bereich von $0,1 \text{ mm} \leq x_{c,\text{min}} \leq 1 \text{ mm}$. Bei den EPS-Systemen fiel dieser Anteil geringer aus. Eine breite PGV von Mehrkomponentengemischen mit hohem Feingutanteil ist für die

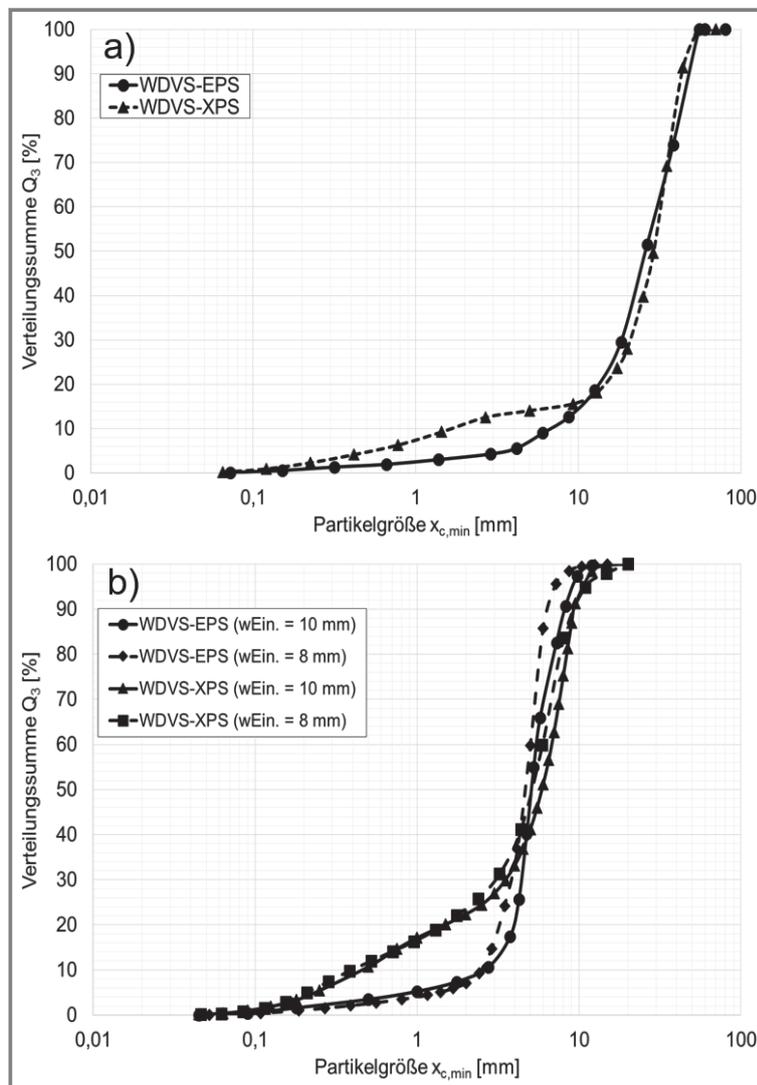


Abbildung 6. Gemittelte Verteilungssummen für die charakteristische Partikelgröße $x_{c,\text{min}}$ für die a) Vorzerkleinerung und b) Nachzerkleinerung der WDVS mit den Dämmstoffen EPS und XPS.

Strömungsklassierung überwiegend ungeeignet. So wurde die Feinfraktion, mittels eines Siebes mit 1 mm, für alle Zerkleinerungsprodukte abgetrennt und anschließend mittels dynamischer Bildanalyse charakterisiert (Abb. 7). Durch den Prozessschritt der Siebklassierung wird eine Feinfraktion ($x_{c,min} < 1$ mm) und Grobfraktion ($x_{c,min} \geq 1$ mm) erhalten.

Durch diesen Prozessschritt konnte erfolgreich die Probe klassiert werden. In der Grobfraktion (Abb. 7a) konnten überwiegend Partikelgrößen von $x_{c,min} \geq 1$ mm festgestellt werden. Der gemittelte Medianwert $x_{c,min,50}$ der Partikelkollektive der EPS-Systeme mit den Einlegrostmaschenweiten $w_{Ein.} = 10$ und 8 mm liegt bei $x_{c,min,50} = 5,21$ mm und 4,89 mm, für die XPS-Systemen bei $x_{c,min,50} = 6,68$ mm und 5,65 mm. Alle Verteilungssummenfunktionen der Grobfrak-

tion zeigen eine enge Verteilungsfunktion. Die PGV der Feinfraktion (Abb. 7b) zeigen eine breitere Verteilung. Der gemittelte Medianwert für die EPS-Systeme liegt mit den Einlegrostmaschenweiten 10 und 8 mm bei $x_{c,min,50} = 0,310$ mm und 0,259 mm, für die XPS-Systemen bei $x_{c,min,50} = 0,382$ mm und 0,353 mm. Das Massenverhältnis der Fein- und Grobfraktion der EPS-Systeme liegt bei 72 Gew.-% zu 28 Gew.-% und bei den XPS-Systemen 69 Gew.-% zu 31 Gew.-%.

Die Siebklassierung hat gezeigt, dass das Zerkleinerungsprodukt erfolgreich in eine Fein- und Grobfraktion separiert werden kann. Sowohl das in Fasern vorliegende Armierungsgewebe als auch das kugelige Dämmstoffmaterial reichert sich in der Grobfraktion an. Auch einige Putzpartikel befinden sich in dieser Fraktion. Ein Großteil des Putzes reichert sich jedoch in dieser Feinfraktion an. Ebenfalls befinden sich in der Fraktion feine Dämmstofffasern des EPS/XPS und Glasfaserreste.

4.3 Strömungsklassierung

Die durch die Siebklassierung erhaltenen Grob- und Feinfraktionen der EPS- und XPS-Systeme können im Anschluss mittels der Methode der Strömungsklassierung und dem Einsatz eines Zickzacksichters in verwertbare Stoffströme separiert werden. Die Strömungsgeschwindigkeit v_{Luft} wurde zwischen $v_{Luft} = 0,76$ m s⁻¹ und 6,3 m s⁻¹ variiert, um das bestmögliche Klassierungsergebnis für die individuellen Sichterdurchgänge zu erhalten. Im Anschluss wurden die erhaltenen Fraktionen mittels dynamischer Bildanalyse vermessen (Abb. 8).

Für die Grobfraktion der EPS-Systeme wurde mit den Einlegrostmaschen 10 mm und 8 mm im ersten Sichterdurchgang eine Gasgeschwindigkeit von $v_{Luft} = 1,8$ m s⁻¹ eingestellt. Durch die verwendete Gasgeschwindigkeit v_{Luft} kann eine Putzfraktion in der Schwerfraktion und eine Mischfraktion aus Dämmstoffmaterial und Glasfasergewebe in der Leichtfraktion erzeugt werden. Durch einen zweiten Sichterdurchgang konnte mit einer Gasgeschwindigkeit von $v_{Luft} = 1,2$ m s⁻¹ das Glasfasergewebe überwiegend vom Dämmstoffmaterial abgetrennt werden. Die erhaltenen Dämmstofffraktion besitzt einen gemittelten Medianwert $x_{c,min,50}$ für $w_{Ein.} = 10$ mm und 8 mm von $x_{c,min,50} = 5,45$ mm und 4,94 mm, die erhaltene Putzfraktion $x_{c,min,50} = 1,54$ mm und 1,42 mm und das rückgewonnene Glasfasergewebe $x_{länge,50} = 38,9$ mm und 37,3 mm. Für die Grobfraktion der XPS Systeme wurde für den ersten Sichterdurchgang eine Gasgeschwindigkeit von

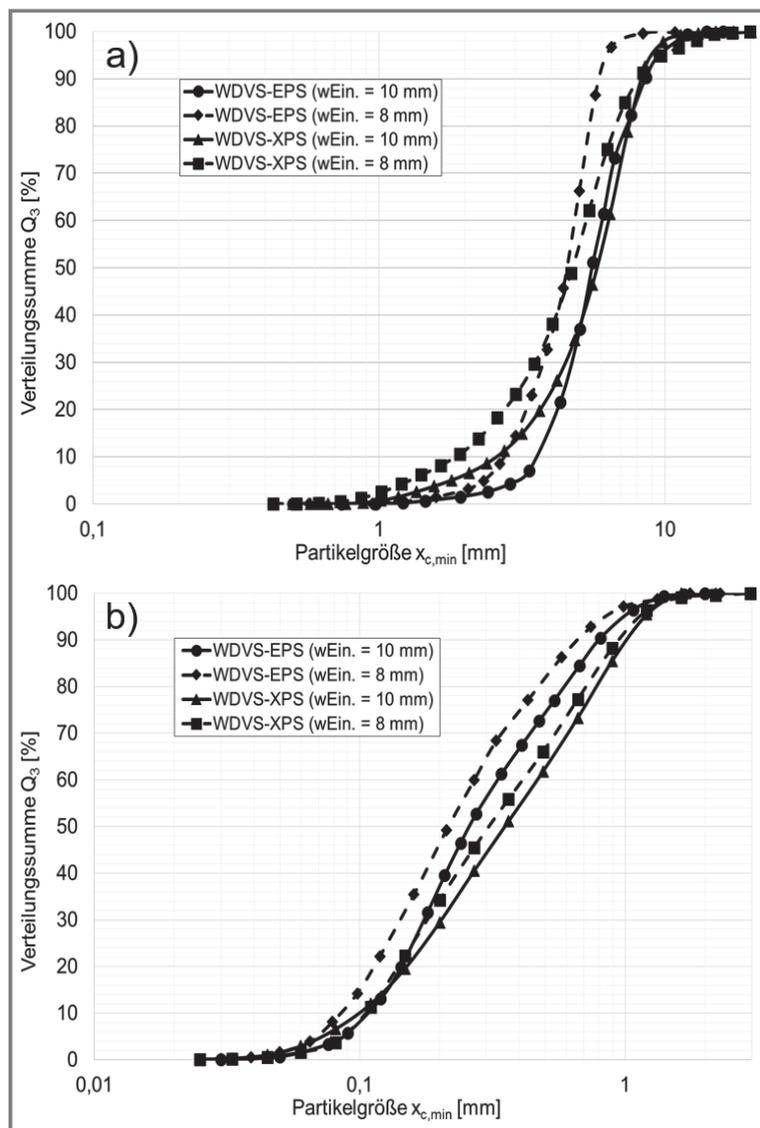


Abbildung 7. Gemittelte Verteilungssummen für die charakteristische Partikelgröße $x_{c,min}$ für die Siebklassierung der Fraktionen $x_{c,min} \geq 1$ mm (a) und $x_{c,min} < 1$ mm (b) der WDVS mit den Dämmstoffen EPS und XPS.

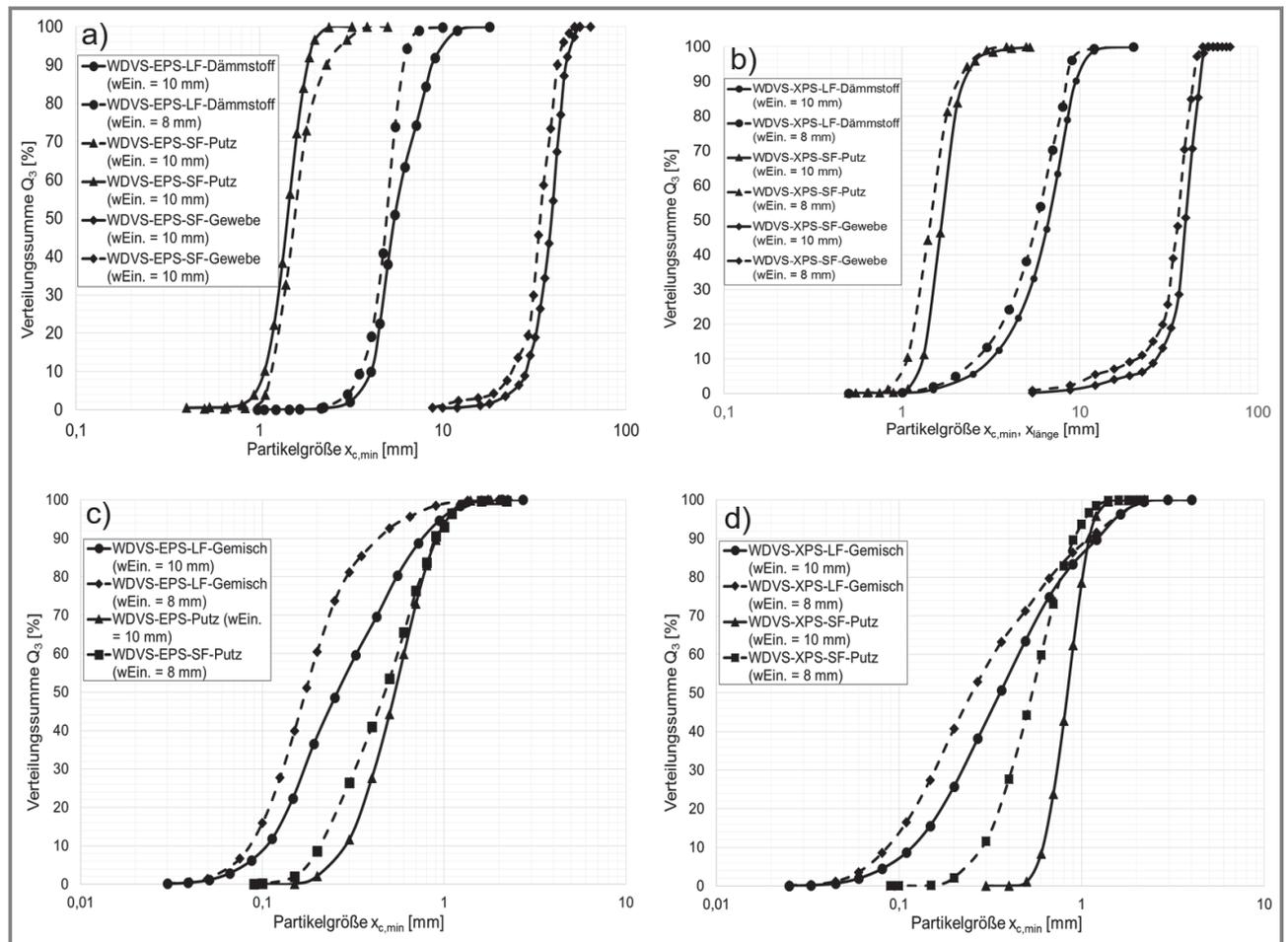


Abbildung 8. Gemittelte Verteilungssummen für die charakteristische Partikelgröße $x_{c,min}$ und $x_{länge}$ für die gesichteten Fraktionen (Leichtfraktion (LF), Schwerfraktion (SF), Putz und Gewebefraktion) $x_{c,min}, x_{länge} \geq 1$ mm (a) EPS, b) XPS sowie für die gesichteten Fraktionen $x_{c,min} < 1$ mm (c) EPS, d) XPS für die WDVS mit EPS und XPS als Dämmstoffmaterial.

$v_{Luft} = 3,0 \text{ m s}^{-1}$ eingestellt. Für den zweiten Sichterdurchgang wurde eine Gasgeschwindigkeit von $v_{Luft} = 1,8 \text{ m s}^{-1}$ realisiert. Ebenfalls können für diesen WDVS-Typ sortenreine Materialfraktionen aus der Grobfraction erzeugt werden. Der gemittelte Medianwert für die erhaltene Dämmstofffraktion, bei den Einleagrosmaschenweiten 10 mm und 8 mm, liegt bei $x_{c,min,50} = 6,67 \text{ mm}$ und $5,77 \text{ mm}$. Für die Putzfraktion konnte ein Medianwert von $x_{c,min,50} = 1,49 \text{ mm}$ und $1,43 \text{ mm}$ und für das erhaltene Glasfasergewebe $x_{länge,50} = 39,7 \text{ mm}$ und $37,8 \text{ mm}$ bestimmt werden. Im Anschluss konnten die Feinfraktionen aus der Siebklassierung mittels Strömungsklassierung in möglichst sortenreine Stoffströme separiert werden.

Um den Putz vom Materialgemisch der Feinfraktion abtrennen zu können, wurde für die EPS-Systeme eine Gasgeschwindigkeit von $v_{Luft} = 1,0 \text{ m s}^{-1}$ und für die XPS-Systeme eine Gasgeschwindigkeit von $v_{Luft} = 1,5 \text{ m s}^{-1}$ eingestellt. Für die Einleagrosmaschenweiten $w_{Ein.} = 10 \text{ mm}$ und 8 mm , für die Schwerfraktion der EPS-Systeme, liegt der gemittelte Medianwert bei $x_{c,min,50} = 0,535 \text{ mm}$ und $0,470 \text{ mm}$, für die XPS-Systeme bei $x_{c,min,50} = 0,592 \text{ mm}$ und $0,491 \text{ mm}$. Die

PGV der erhaltenen Putzfraktionen der jeweiligen WDVS-Typen liegen im selben Partikelgrößenbereich. In der Leichtfraktion sammelte sich Glasfasergewebe, Dämmstoffmaterial und Putzreste an. Es konnte keine Strömungsgeschwindigkeit v_{Luft} realisiert werden, um in der Leichtfraktion die individuellen Werkstoffe voneinander zu trennen. Das resultiert daraus, dass das Dämmstoffmaterial in der Leichtfraktion in einem faserigen Materialverbund vorliegt, in dem sich auch Glasfasergewebereste befinden.

Die Fasern konnten nicht voneinander separiert werden. Für die Materialgemische der Leichtfraktion der EPS-Systeme mit den Einleagrosmaschenweiten $w_{Ein.} = 10 \text{ mm}$ und 8 mm liegt der gemittelte Medianwert bei $x_{c,min,50} = 0,358 \text{ mm}$ und $0,254 \text{ mm}$ und für die XPS-Systeme bei $x_{c,min,50} = 0,317 \text{ mm}$ und $0,214 \text{ mm}$. Die Strömungsklassierung hat gezeigt, dass mittels des Einsatzes eines Zickzacksichters aus den Materialgemischen $x_{c,min} \geq 1 \text{ mm}$ und $x_{c,min} < 1 \text{ mm}$ überwiegend sortenreine Materialfraktionen erzeugt werden konnten. Aus beiden WDVS-Typen konnten annähernd die gleichen gemittelten Medianwerte x_{50} für das Glasfasergewebe sowie für den Putz erreicht werden.

Lediglich für das Dämmstoffmaterial zeigen sich unterschiedliche Medianwerte, was auf die unterschiedlichen Materialeigenschaften der Dämmstoffe EPS und XPS zurückzuführen ist.

Abb. 9 zeigt die rückgewonnenen Materialfraktionen der EPS- und XPS-Systemen. Da die eingesetzten Materialien für die Modellsysteme bekannt waren, konnte über eine Massenbilanz der Anteil an rückgewonnenen Materialien bestimmt werden. So können mit der entwickelten Recyclingstrategie 84 Gew.-% Dämmstoffmaterial, 74 Gew.-% Putz und 91 Gew.-% Glasfasergewebe aus den EPS-Systemen rückgewonnen werden. Aus den XPS-Systemen können 81 Gew.-% Dämmstoffmaterial, 73 Gew.-% Putz und 90 Gew.-% Glasfasergewebe rückgewonnen werden. Aufgrund der hohen statischen Aufladung des Dämmstoffmaterials kam es teilweise während des Mahlvorganges zu Massenverlusten. Anteile des verwendeten EPS und XPS lagerten sich häufiger an den Mahlraumwänden der verwendeten Hammermühle an und fielen somit nicht durch den verwendeten Einlegerost. Die nicht aufgeschlossene Restmenge konnte aktuell nicht weiter aufbereitet werden. Diese Fraktion kann jedoch als Füllstoffmaterial (z. B. Zuschlagstoff in der Zementindustrie), eingesetzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden in Bezug auf Störstoffe (Anhaftungen, Sulfate, Flammschutzmittel) der aufbereiteten Materialfraktionen noch keine Untersuchungen durchgeführt.

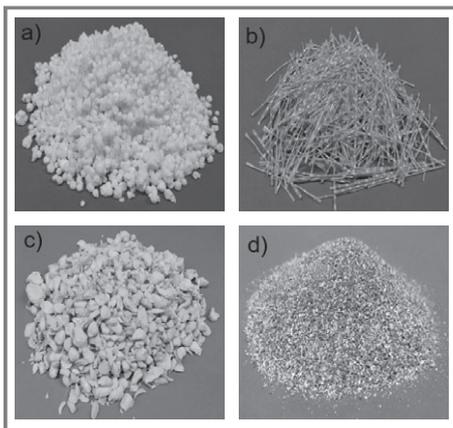


Abbildung 9. Rückgewonnene Materialfraktionen aus den WDVS mit EPS und XPS als Dämmstoffmaterial mit den Fraktionen a) EPS, b) Glasfasergewebe, c) XPS, d) Armierungs- und Oberputz.

5 Zusammenfassung

Seit den 1970 Jahren wurden ca. 900 Mio. m² Wärmedämmverbundsysteme in Deutschland verbaut und es kommen jährlich neue hinzu. Die zukünftig steigenden WDVS-Abfallmengen erfordern im Sinne der Kreislaufwirtschaft effiziente Verwertungswege. Durch den entwickelten und im Labormaßstab getesteten Verwertungsweg konnte ein erster Ansatz für einen kompletten Recyclingweg für WDVS-Abfälle aufgezeigt werden. Es konnten überwiegend sorten-

reine Fraktionen aus dem komplexen WDVS rückgewonnen werden. Somit existiert erstmals ein Verwertungsprozess für das mechanische Recycling kompletter WDVS. Die Variation der Einlegrostmaschenweite w_{Ein} in der Hammermühle hat gezeigt, dass ein direkter Zusammenhang zwischen Maschenweite w und Massenstrom \dot{m} auf die spezifische Zerkleinerungsenergie E_{spez} besteht. Durch Variation der Maschenweite konnte ebenfalls der Einfluss auf die Partikelgröße der rückgewonnenen Materialfraktionen untersucht werden. So können, je nach Anwendung der rückgewonnenen Materialien, die Abfallströme mit unterschiedlichen Parametern in der Recyclingwirtschaft aufbereitet werden. Im Laufe des Forschungsvorhabens soll der entwickelte Verwertungsweg auf Abbruchmaterialien unterschiedlicher WDVS angewandt werden und mit den bestehenden Ergebnissen der konzipierten WDVS gegenübergestellt werden. In Bezug auf die Reinheit der erhaltenen Fraktionen bzw. den Verbleib von Störstoffen und Anhaftungen sollen in zukünftigen Arbeiten Untersuchungen durchgeführt werden.

Die Autoren bedanken sich bei dem Verbund ForCYCLE II und für die finanzielle Unterstützung beim Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz.

Formelzeichen

A	[m ²]	Fläche Dämmstoffmaterial
E_{spez}	[kWh t ⁻¹]	spezifische Zerkleinerungsenergie
m	[kg]	Masse
\dot{m}	[kg s ⁻¹]	Massenstrom
m_A	[kg]	Aufgabegutmasse
n	[s ⁻¹]	Drehzahl
P_0	[m ² kg s ⁻³]	Leerlaufleistung
P	[m ² kg s ⁻³]	Gesamtleistung
u	[m s ⁻¹]	Umfangsgeschwindigkeit
v_{Luft}	[m s ⁻¹]	Gasgeschwindigkeit
w_{Ein}	[m]	Einlegrostmaschenweite
x	[m]	Partikelgröße
$x_{c,\text{min}}$	[m]	kürzeste maximale Sehne
$x_{\text{Fe},\text{max}}$	[m]	längster maximaler Feret-Durchmesser
$x_{\text{länge}}$	[m]	Länge
$x_{\text{Ma},\text{min}}$	[m]	kleinster maximaler Martin-Durchmesser
$x_{c,\text{min},50}$	[m]	Medianwert der Kenngröße

Griechische Symbole

P	[kg m ⁻³]	Feststoffdichte
σ	[N mm ⁻²]	Druckfestigkeit
λ	[W m ⁻¹ k ⁻¹]	Wärmeleitfähigkeit

Literatur

- [1] W. Riedel, H. Oberhaus, *Von der Thermohaut bis zur transparenten Wärmedämmung*, 2. Aufl., Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart **2010**.
- [2] T. Steiner, *Praxishandbuch Innendämmung. Planung-Konstruktion-Details-Beispiele*, 1. Aufl., Müller-Rudolf Verlag, Eltville **2016**.
- [3] W. Albrecht, C. Schwitalla, *Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS*, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart **2015**.
- [4] N. Heller, *Entwicklung und Modellierung von Entsorgungswegen für WDVS-Abfälle*, in 4 Konferenz für Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Berlin, Juni **2017**.
- [5] H. Fromme, B. Hilger, *Environ. Int.* **2014**, *64* (1), 61–68.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.11.017>
- [6] A. Seemann, A. Lohf, *EntsorgungsPraxis* **1997**, *15* (3), 23–27.
- [7] L. Kratky, T. Jirout, *Chem. Eng. Technol.* **2011**, *34* (3), 391–399.
DOI: <https://doi.org/10.1002/ceat.201000357>
- [8] Y. Zhu, G. S. Wang, *Chem. Eng. Sci.* **2009**, *64* (3), 474–485.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2008.09.026>
- [9] M. Eisenlauer, U. Teipel, *Chem. Ing. Tech.* **2018**, *90* (4), 521–532.
DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201700097>
- [10] W. Eden, B. Middendorf, *Eur. J. Masonry* **2009**, *13* (1), 46–49.
DOI: <https://doi.org/10.1002/dama.200990004>
- [11] T. Reschke, E. Siebel, *Beton* **1999**, *49* (12), 719–735.
- [12] T. Fehn, U. Teipel, *Recycling von Wärmedämmverbundsystemen, ReSource Abfall, Rohstoff, Energie* **2019**, *32* (4), 18–22.
- [13] L. Cadoche, G. D. Lopez, *Biol. Wastes* **1989**, *30* (2), 153–157.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0269-7483\(89\)90069-4](https://doi.org/10.1016/0269-7483(89)90069-4)
- [14] DIN 66165-1:2016-08, *Partikelgroßanalyse – Siebanalyse – Teil1: Grundlagen*, Beuth Verlag, Berlin **2016**.