

Projektverbund für mehr Ressourceneffizienz in der bayerischen Wirtschaft  
insbesondere für KMU und Handwerk – **ForCYCLE II**

## Abschlussbericht

### Projektleiter und durchführende Hochschule

Prof. Dr. Ulrich Teipel

Technische Hochschule Nürnberg

Forschungsgruppe für Partikeltechnologie und Rohstoffinnovation/

Fakultät Verfahrenstechnik/ Mechanische Verfahrenstechnik

Wassertorstraße 10, 90489 Nürnberg

Tel. 0911 5880 1471, Fax 0911 5880 5475

E-Mail: ulrich.teipel@th-nuernberg.de

### Projektmitarbeiterinnen und -mitarbeiter

M.Sc. Thomas Fehn, THN/ FPR/ VT

M. Sc. Beate Wailersbacher, THN/ FPR/ VT

Swetlana Wagner, Fraunhofer IVV

### Berichtszeitraum

01. Juli 2019 bis 30. Juni 2022

### Projektlaufzeit

01. Juli 2019 bis 30. Juni 2022

Nürnberg, im Oktober 2022

---

## **Abstract (Kurzzusammenfassung)**

In den vergangenen 50 Jahren wurden ca. 900 Mio. m<sup>2</sup> Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) in der Bundesrepublik Deutschland verbaut. Im Zuge der energetischen Sanierungsarbeiten werden immer weitere Systeme an Fassaden von Gebäuden appliziert, um den Transmissionswärmeverlust über die Außenwände deutlich zu reduzieren. Jedoch haben nun die ersten Systeme ihre maximale Standzeit erreicht und stellen somit bereits einen gegenwärtigen und immer weiter ansteigenden Abfallstrom dar. Durch mangelnde Aufbereitungstechnologien zum sortenreinen Recycling von komplexen Kompositmaterialien wie Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) geht aktuell in der Bundesrepublik Deutschland ein erhebliches Ressourceneffizienzpotential verloren. Überwiegend werden diese Systeme thermisch verwertet, da aktuell keine etablierte Recyclingstrategie zur werkstofflichen Aufbereitung zur Verfügung steht. Im Rahmen des Verbundvorhabens ForCYCLE II konnte von der TH-Nürnberg und den Projektpartnern ein Recyclingweg zur sortenreinen Aufbereitung von unterschiedlich anfallenden WDVS-Abbruchmaterialien entwickelt und im Labormaßstab umfangreich getestet bzw. validiert werden. Durch verfahrenstechnische Prozessschritte konnte der Verbund aufgeschlossenen, die jeweiligen Werkstoffe in hoher Reinheit rückgewonnen und neue Verwertungswege für die Sekundärrohstoffe identifiziert werden. Somit soll der Stoffkreislauf von anfallenden WDVS-Abbruchmaterialien langfristig und nachhaltig vollständig geschlossen werden.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract (Kurzzusammenfassung)</b> .....	<b>1</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Hintergrund, Aufgabenstellung und Zielsetzung</b> .....	<b>4</b>
1.1 Hintergrund und Stand der Technik .....	4
1.2 Aufgabenstellung .....	6
1.3 Zielsetzung.....	6
1.4 Lösungsansatz und Arbeitsplan .....	7
<b>2 Planung und Ablauf der Arbeiten</b> .....	<b>9</b>
2.1 Beschaffung und Charakterisierung .....	9
2.2 Analyse des Flammschutzmittels HBCD .....	11
2.3 Entwicklung einer Recyclingstrategie .....	14
2.4 Zerkleinerungsprozess .....	15
2.5 Charakterisierung der Partikelgrößen der Zerkleinerungsprodukte.....	21
2.6 Aufbereitung der individuellen Zerkleinerungsprodukte .....	30
2.7 Charakterisierung der partikulären Eigenschaften der rückgewonnenen Sekundärrohstoffe .....	34
2.8 Bestimmung der Sortenreinheit der individuell rückgewonnenen Sekundärrohstoffe .....	39
2.9 Bestimmung von Inhaltsstoffen und der mineralogischen Zusammensetzung der rückgewonnenen Sekundärrohstoffe .....	41
2.10 Extraktion des Flammschutzmittels HBCD .....	47
2.11 Chemische Separation .....	50
2.12 Zerkleinerungsmodell für elastische Dämmstoffmaterialien.....	53
2.13 Konzeption der Technologie zum Recycling von WDVS .....	59
<b>3 Darstellung, Bewertung und Anwendbarkeit der erzielten Ergebnisse</b> .....	<b>62</b>
<b>4 Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts</b> .....	<b>63</b>
<b>5 Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern und im Projektverbund</b> .....	<b>64</b>
<b>6 Zusammenfassung</b> .....	<b>64</b>

---

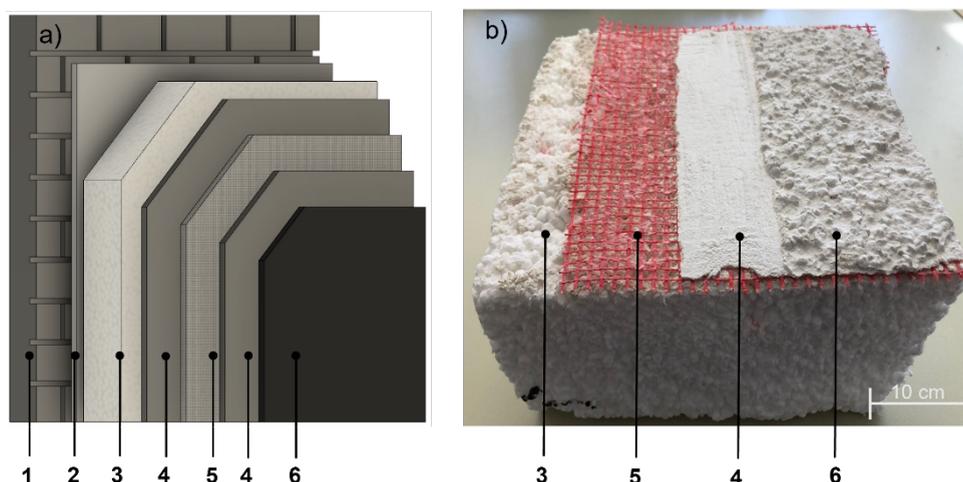
<b>7</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>66</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>67</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>71</b>
	Anlage 1: Abkürzungsverzeichnis.....	71
	Anlage 3: Auflistung der Kooperationspartner aus der Wirtschaft .....	71

---

# 1 Hintergrund, Aufgabenstellung und Zielsetzung

## 1.1 Hintergrund und Stand der Technik

Im Rahmen der Energiewende wurde 2012 das Ressourceneffizienzprogramm, Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen (ProgRess), der Bundesrepublik Deutschland verabschiedet, welches 2016 und 2020 mit ProgRess II und III fortgeschrieben wurde. Einen zentralen Punkt nimmt die Kreislaufwirtschaft sowie die Energieeinsparung in baugewerblichen Bereichen ein [1–3]. Einen wesentlichen Beitrag zur Energieeinsparung im Gebäudebestand leistet die Verringerung des Transmissionswärmeverlusts durch Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) an den Gebäudewänden. Neben der Eigenschaft der Wärmedämmung, besitzen WDVS weitere Anwendungsmöglichkeiten. Somit dienen sie einerseits als Feuchtigkeits-, Schall- und Brandschutz, andererseits erhöhen sie die Stand- und Stoßfestigkeit von Gebäuden. Üblicherweise gliedert sich der Aufbau eines WDVS in fünf Schichten. Die erste Schicht im WDVS stellt die Befestigung dar. Überwiegend werden WDVS mit Hilfe von Klebstoffen, Dübeln oder Metallschienenverbindungen an die Hauswand angebracht. Auf die zweite Schicht, welche das Dämmstoffmaterial repräsentiert, wird eine Schicht Armierungsputz – auch Unterputz genannt – aufgetragen. In diesen Armierungsputz wird ein Armierungsgewebe eingebettet, welches üblicherweise aus kunststoffummantelten Glasfasern besteht. Dies dient vorrangig der Stabilität der Systeme und verhindert somit die Rissbildung am WDVS bzw. der Fassade. Als letzte Schicht folgt der Oberputz, welcher dem Witterungsschutz dient und somit das System vor äußeren Einflüssen schützen soll [4; 5]. Abbildung 1.1 zeigt den typischen Aufbau eines WDVS, welches jedoch in der Praxis in Bezug auf unterschiedliche Gewebe- und Putzschichten, Befestigungsmaterialien und deren jeweilige Schichtstärken variieren kann.



**Abbildung 1.1:** Schematischer Aufbau eines (a) üblich verbauten Wärmedämmverbundsystems (WDVS) an der Fassade eines Gebäudes, sowie (b) eines WDVS, das im Zuge eines Rückbaus abgebrochen wurde. Benennung der individuellen Werkstoffe im WDVS: 1- Fassade, 2-Befestigung, 3-Dämmstoffmaterial, 4-Armierung- bzw. Unterputz, 5- Armierungsgewebe und 6-Außenhaft- bzw. Oberputz

Seit den 1970er Jahren wurden in Deutschland nahezu 900 Mio. m<sup>2</sup> WDVS an Fassaden appliziert. Jährlich werden ca. 50.000 - 70.000 t expandiertes und extrudiertes Polystyrol (EPS und

---

XPS) verbaut [5–8]. Der Marktanteil von EPS als Dämmstoff in WDVS beträgt ca. 66 % [8]. Die WDVS erreichen in naher Zukunft ihre maximale Standzeit und stellen zukünftig einen neuen, nicht unerheblichen und stetig steigenden Abfallstrom dar. Gegenwärtig fallen in Deutschland jährlich ca. 14,4 Mio. t Baustellenabfälle (Stand 2018) an, wovon 230.000 t Dämmstoffmaterialien sind [9]. In den vergangenen Jahren hat sich gezeigt, dass hinsichtlich des Recyclings von WDVS große Probleme in der Abfallwirtschaft bestehen. Dies resultiert aus den komplexen Werkstoff-Verbänden und darin enthaltenen Schad- sowie groben Störstoffen. Es gibt bis heute keine etablierte Aufbereitungstechnologie zur stofflichen Trennung der in WDVS enthaltenen Materialien, wodurch ein erhebliches Recyclingpotential verloren geht und damit die Ziele der Kreislaufwirtschaft nicht erreicht werden. Aktuell werden WDVS-Abbruchmaterialien in Deutschland überwiegend thermisch verwertet [10; 11]. Die am häufigsten in WDVS verbauten Dämmstoffmaterialien EPS und XPS besitzen einen Heizwert von ca.  $38 \text{ MJ kg}^{-1}$ . Gewöhnliche Rest- und Gewerbeabfälle besitzen einen Heizwert von ca.  $13 \text{ MJ kg}^{-1}$ . Da in typischen Müllverbrennungsanlagen die Kessel auf  $20 \text{ MJ kg}^{-1}$  ausgelegt sind, können nur ca. 6 wt.-% EPS und XPS dem herkömmlichen Abfallstrom zugeführt werden [12]. Zusätzlich sind die mineralischen Komponenten für die thermische Verwertung ungeeignet. Durch eine komplett thermische Verwertung von WDVS geht ein enormes Ressourcenpotential verloren.

Erschwerend enthält das EPS und XPS das seit 2016 verbotene und gesundheitsschädliche Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD) [13]. HBCD ist in Dämmplatten auf Basis von Polystyrol nach jetzigem Stand fest eingebunden und kann nicht ausgewaschen werden oder durch mechanische Beanspruchung austreten. Der Verbrauch des Flammschutzmittels HBCD lag im Jahr 2001 weltweit bei 16,7 Mio. Tonnen, wovon allein in Europa 9.500 Mio. Tonnen verwertet wurden [14]. HBCD konnte bereits im Wasser und in Böden, sowie in Sedimenten, Klärschlamm und Fischbeständen nachgewiesen werden und ist damit vor allem toxisch für Gewässerorganismen wie Krebstiere und Algen. Weiterhin wurde HBCD aufgrund seiner Langlebigkeit und schlechten Abbaubarkeit als persistent eingestuft [15–17]. Im Jahr 2008 wurde es als persistenter, bioakkumulativer und toxischer Stoff (PBT-Stoff) klassifiziert. 2013 wurde das Flammschutzmittel in die Liste der persistenten organischen Schadstoffe (POP) aufgenommen. Seit 2016 gilt für HBCD ein weltweites Herstellungs- und Anwendungsverbot.

Die Bestimmungen von HBCD im Anhang I der POP-Verordnung wurden mit der europäischen Verordnung (EU) 2016/293 von März 2016 festgelegt [18]. Daraus ergibt sich ein schrittweises Verbot der Verwendung und des Inverkehrbringens von HBCD in Gemischen oder Erzeugnissen, in denen der Gehalt mehr als  $100 \text{ mg kg}^{-1}$  beträgt. Zusätzlich regelt die POP-Verordnung in Anhang IV die Obergrenze des Gehaltes von POP-Stoffen, bei deren Überschreiten ein Material im Abfall zerstört werden muss und nicht mehr recyclingfähig ist. In Anhang IV der POP-Verordnung wurde mit der europäischen Verordnung (EU) 2016/460 vom März 2016 festgelegt, dass HBCD-haltige Materialien mit einem Gehalt von  $1000 \text{ mg kg}^{-1}$  ab dem 30. September 2016 aus jedwedem Recyclingprozess ausgeschleust werden müssen [19]. So kam es in der Bundesrepublik Deutschland zu einer Deklaration von HBCD-haltigem EPS als „gefährlicher Abfall“, wodurch eine thermische Verwertung blockiert wurde [20]. Als Konsequenz ergab sich ein „Entsorgungsnotstand“ beim Anfall HBCD-haltiger Dämmstoffabfälle. Aufgrund dieses „Notstandes“ werden HBCD-haltige Abfälle nach der Entscheidung des Bundesrates vom 7. Juli 2017 vorerst als nicht „gefährlicher Abfall“ eingestuft; diese Einstufung gilt erst ab einem HBCD-Gehalt von

---

3 Ma.- % [21]. Aufgrund der hohen umweltrelevanten Belastung und der vergangenen und zukünftigen rechtlichen Beschränkungen im Umgang mit HBCD in Dämmstoffmaterialien, werden dringend Lösungen im Bereich des schadstoffarmen Recyclings benötigt.

## 1.2 Aufgabenstellung

Ziel des beantragten Forschungsvorhabens war die sortenreine und schadstoffarme Aufbereitung der anfallenden WDVS-Abbruchmaterialien. Hierfür war es nötig, unter Berücksichtigung der gängig verwendeten Anlagentechnik in der Recyclingwirtschaft, eine verfahrenstechnische Verwertungsstrategie zu entwickeln, um diese Systeme aufbereiten zu können. Ein wesentlicher Aspekt bei der Aufbereitung ist der Zerkleinerungsprozess. Er stellt in der Recyclingkette einen der energieaufwändigsten Prozessschritte dar, wodurch dieser in Bezug auf die geforderten partikulären Eigenschaften so ökonomisch wie möglich durchgeführt werden sollte [22; 23]. Ziel bei der Zerkleinerung von Verbundmaterialien ist es, die enthaltenen Werkstoffe aufzuschließen und die partikulären Eigenschaften der individuellen Materialien so zu verändern, dass diese zielgerichtet und effizient als Sekundärrohstoffen für neue Produkte an den Markt rückgeführt werden können. Des Weiteren sind Zerkleinerungsprozesse für elastische Materialien weitgehend unerforscht, weshalb die Bruchphänomene erst untersucht werden müssen. Einen weiteren Prozessschritt stellt die Sieb- und Strömungsklassierung dar, um die erhaltenen Zerkleinerungsprodukte so aufzubereiten, dass Stoffströme der individuellen Werkstoffe mit einer hohen Reinheit generiert werden können. Aufgrund der unterschiedlichen Partikelgrößen bzw. Sehlängen der Partikel und Fasern der jeweiligen Werkstoffe entstehen große Herausforderungen, gängige Recyclingstrategien auf WDVS anzuwenden. So müssen etwaige Maschenweiten von Sieben und Strömungsgeschwindigkeiten im Sicher auf die jeweiligen Fraktionen und Partikelkollektive angepasst werden. Hierfür müssen unterschiedliche photo-optische Messverfahren eingesetzt und angepasst werden, um deren Eignung zu bestimmen.

Um die rückgewonnenen Sekundärrohstoffe in neue Bauprodukte überführen zu können, müssen etwaige Schadstoffe wie Flammschutzmittel aber auch Schwermetalle und Sulfate genauestens analysiert werden, damit diese nach den geltenden rechtlichen Bestimmungen, in den Kreislauf rückgeführt werden können. Auf diesem Weg können sie nach Analyse der unterschiedlichen Stoffströme, in neue RC-Produkte überführt werden. Ziel muss es hierbei sein, neue Produkte zu gestalten, welche gleichbleibende oder verbesserte Eigenschaften im Vergleich zu herkömmlichen Bauprodukten aufweisen. So wurde im Forschungsvorhaben ein Recyclingprozess identifiziert, quantifiziert und verifiziert, um möglichst sortenreine Stoffströme zu generieren, welche alle rechtlichen Rahmenbedingungen erfüllen, dass diese bedenkenlos als Sekundärrohstoffe im Freistaat Bayern verwendet, werden können.

## 1.3 Zielsetzung

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, Lösungswege für die Aufbereitung und mechanische Verwertung der komplexen WDVS-Abbruchmaterialien zu entwickeln. In Kooperation mit bayerischen Unternehmen sollen die Potenziale von den in WDVS vorkommenden Materialien für das Recycling detektiert und neue Anwendungen der rückgewonnenen Werkstoffe gefunden werden. Folgende Etappenziele sollten während der Projektlaufzeit erreicht werden:

- 
- Beschaffung und Charakterisierung unterschiedlicher WDVS-Abbruchmaterialien
  - Erstellung und Anpassung einer Recyclingstrategie für individuell anfallende WDVS
  - Zerkleinerung, Separation und Klassierung von WDVS-Abbruchmaterialien
  - Modellierung eines Zerkleinerungsgesetzes für elastische Materialien
  - Chemische Extraktion des Flammschutzmittels HBCD aus Dämmstoffmaterialien
  - Konzept für einen getesteten und verifizierten Recyclingweg für WDVS

Im Rahmen dieses Abschlussberichts wurden die WDVS-Abbruchmaterialien durch die Variation von Prozessparametern gezielt aufbereitet. Des Weiteren konnten etwaige Schadstoffe in den Sekundärrohstoffen detektiert und ein Ansatz zur Extraktion des Flammschutzmittels HBCD erstellt werden. Ebenfalls konnten Möglichkeiten zur Verwertung HBCD-haltiger Abfälle identifiziert werden. Somit soll es nach der Projektlaufzeit möglich sein, den erarbeiteten und untersuchten Verwertungsweg, in die beteiligten Industriebetriebe und darüber hinaus zu übertragen. Unter anderem wurden folgende spezifische Fragestellungen bearbeitet:

- Durch welchen Mühlentyp können die WDVS so aufgeschlossen werden, dass die jeweiligen in Nachfolgeprozessen und für die Weiterverarbeitung effizient genutzt werden können?
- Welchen Einfluss haben unterschiedliche Prozessparameter und die materialspezifischen Parameter der unterschiedlichen Werkstoffe der WDVS auf die partikulären Eigenschaften und die spezifische Zerkleinerungsenergie?
- Wie müssen die Prozessparameter im Anschluss an den Zerkleinerungsprozess für die Sieb- und Strömungsklassierung gewählt werden, um Sekundärrohstoffe von hoher Reinheit generieren?
- Mit welchen Methoden können die während der unterschiedlichen Prozessschritte anfallenden Partikelkollektive effizient und hinreichend genau charakterisiert werden?
- Können durch die Herstellung von funktionellen Zusammenhängen zwischen der spezifischen Zerkleinerungsenergie und den partikulären Eigenschaften der Zerkleinerungsprodukte, neue Zerkleinerungsmodelle erstellt oder bestehende Modelle so modifiziert werden, dass zukünftig WDVS bzw. Dämmstoffe für frei definierbare Parameter effizient aufbereitet werden können?
- Erfüllen die erhaltenen Rezyklate die notwendigen rechtlichen Rahmenbedingungen um erneut als Sekundärrohstoffe für Recycling-Produkte dienen zu können?

## 1.4 Lösungsansatz und Arbeitsplan

Mittels verfahrenstechnischer Prozessschritte wie der Zerkleinerung, Sortierung, Klassierung im Gas oder Flüssigkeitsstrom und der Analyse von Partikelgrößen, spezifischen Oberflächen und Schütt- und Stampfdichte, sollen die individuell anfallenden WDVS sortenrein aufbereitet werden. Durch die Methode der chemischen Extraktion sollen hierbei etwaige Schadstoffe wie das Flammschutzmittel HBCD entfernt werden. Durch spezifische Versuche der individuellen Prozessschritte können durch



---

## 2 Planung und Ablauf der Arbeiten

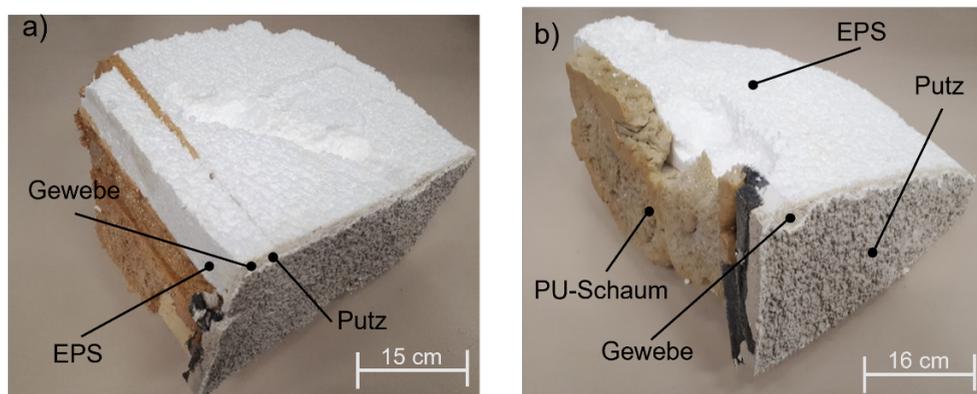
### 2.1 Beschaffung und Charakterisierung (AP1 & AP2)

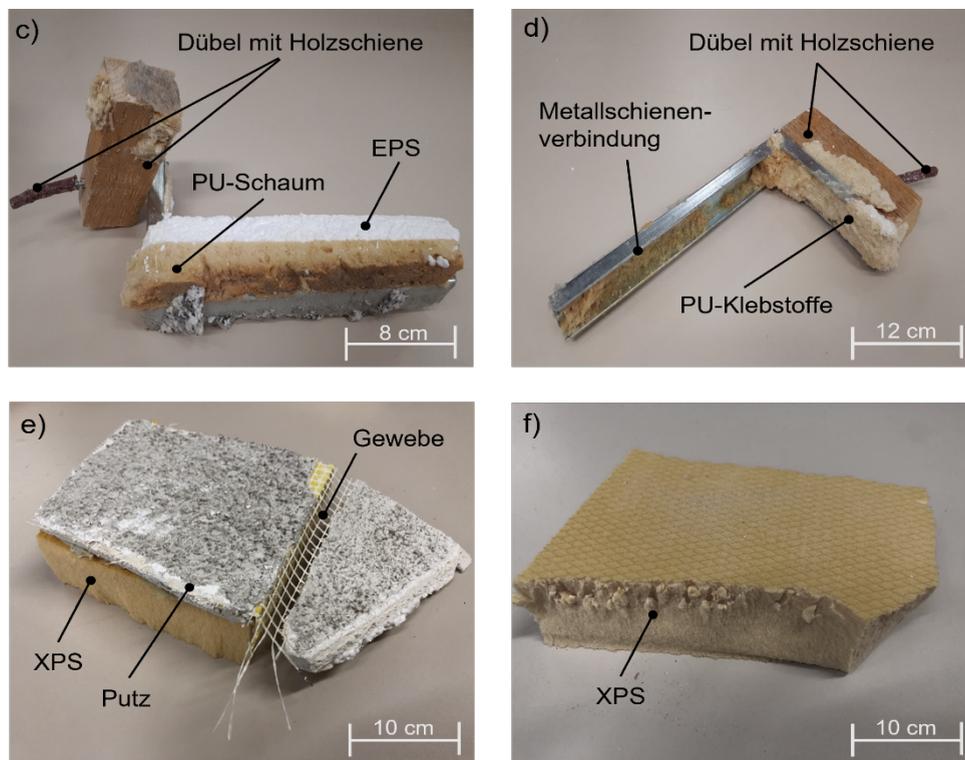
Im Rahmen von AP1 und AP2 des Forschungsvorhabens wurden WDVS-Abbruchmaterialien beschafft, welche im Zuge von Rückbaumaßnahmen an verschiedenen Wohnhäusern abgebrochen wurden. Die Abbruchmaterialien konnten aus dem Großraum Stuttgart (Baden-Württemberg), sowie aus Nürnberg und Hof (Bayern) beschafft werden. Diese WDVS wurden in den Jahren 1986 (Stuttgart/ Baden-Württemberg), 1997 (Nürnberg/ Bayern) und 2000 (Hof/ Bayern) verbaut. Hierbei konnten jeweils große Mengen an WDVS mit EPS, sowie mit XPS erhalten werden. Abbildung 2.1 zeigt den Abbruch eines Wohnhauses in Nürnberg und die manuell entfernten WDVS an der Gebäudefassade.



**Abbildung 2.1:** Abbruch eines Wohnhauses im Großraum Nürnberg (a) und händischer Abriss der WDVS von der Gebäudefassade (b)

Bei allen Baustellen wurden die WDVS ausschließlich händisch von den zuständigen Abbruchunternehmen abgebrochen. Abbildung 2.2 zeigt ausgewählte Segmente der beschafften WDVS-Abbruchmaterialien.





**Abbildung 2.2:** Ausgewählte WDVS-Abfälle welche im Zuge der Abbrucharbeiten abgebrochen wurden

Die an den Fassaden abgebrochenen WDVS enthielten grundsätzlich EPS als Dämmstoffmaterial, während an Stellen mit Wärmebrücken wie beispielsweise Deckenrändern, Stürzen, Stützen, Auskragungen und Sockelbereichen gewebearmierte XPS-Platten (WDVS-XPS) zum Einsatz kamen. Zusammenfassend konnten genügend Materialien für alle im Rahmen dieser Arbeit veranschlagten Versuche beschafft werden. Tabelle 2.1 gibt Aufschluss über die einzelnen Schichten der WDVS-Reststoffe mit EPS, sowie deren jeweilige Schichtstärke  $s$ , die über die verschiedenen WDVS-Generationen variieren. Dazu wurden die Schichtstärken  $s$  des Armierungs- und Oberputzes gemeinsam betrachtet.

**Tabelle 2.1:** Schichtstärken  $s$  der untersuchten WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS

WDVS-Schicht	WDVS (Jahr 2000)	WDVS (Jahr 1997)	WDVS (Jahr 1986)
	Schichtstärke $s$ [cm]	Schichtstärke $s$ [cm]	Schichtstärke $s$ [cm]
Dämmstoff (EPS)	24,2	22,4	19,6
Armierungsputz	3,0	4,1	2,2
Oberputz			
Gewebe 1	< 1	< 1	< 1
Gewebe 2	-	< 1	-
Klebstoffschicht	-	1,2	-

Im gleichen Zug wurden die Schichtstärken  $s$  der WDVS mit XPS als Dämmstoffmaterial bestimmt (Tabelle 2.2), die von den gleichen Baustellen beschafft werden konnten. Hierbei konnte jedoch nicht vollständig geklärt werden, ob die XPS-Systeme teilweise nachträglich installiert wurden.

**Tabelle 2.2:** Schichtstärken  $s$  der untersuchten WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS

WDVS-Schicht	WDVS (Jahr 2000)	WDVS (Jahr 1997)	WDVS (Jahr 1986)
	Schichtstärke $s$ [cm]	Schichtstärke $s$ [cm]	Schichtstärke $s$ [cm]
Dämmstoff (XPS)	9,5	8,2	8,6
Armierungsputz Oberputz	2,1	2,8	2,2
Gewebe 1	< 1	< 1	< 1

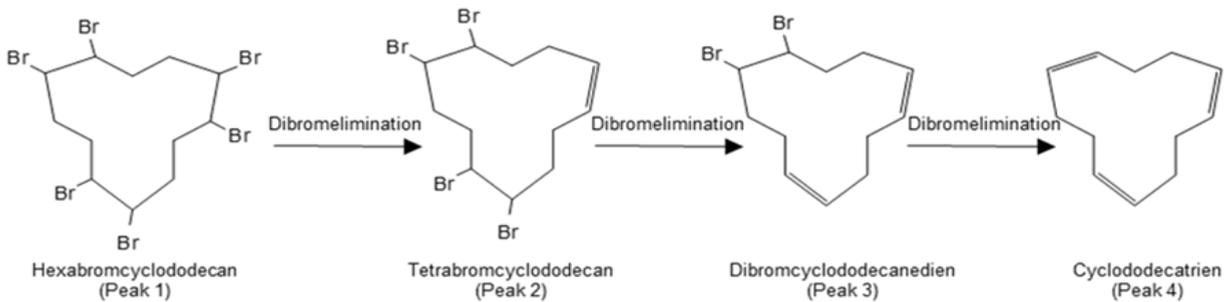
Nach dem Abbruch befanden sich überwiegend an den WDVS mit EPS grobe Störstoffe wie Befestigungsmaterialien, Dübel und Metallschienen-Verbindungen. Auch konnten Witterungsschäden, Feinstaub-Partikel und Spuren von Grünspan am Dämmstoffmaterial festgestellt werden.

## 2.2 Analyse des Flammschutzmittels HBCD (AP2 & AP6)

Zu Beginn des Forschungsvorhabens war es in AP2 das Ziel, den Flammschutzmittel-Gehalt von Hexabromcyclododecan (HBCD) in den Dämmstoffen nachzuweisen, was für die spätere Durchführung von AP6 entscheidend ist. Da das verwendete Dämmstoffmaterial (EPS und XPS) bei einer geringen Dichte ein hohes Volumen besitzt, ist es in seiner geschäumten Form für die Extraktion des Flammschutzmittels ungeeignet. Somit ist eine Volumenreduzierung des Styropors sinnvoll, da hierbei mehr Material der Extraktionshülse zugeführt werden kann und somit mehr Styropor vom Flammschutzmittel HBCD im späteren Verlauf des Projektes aufgereinigt werden kann. Allgemein ist bekannt, dass Lösemittel wie Aceton das Triebmittel aus Polystyrol, unter Entweichung von  $\text{CO}_2$ , entfernen. Hierdurch wird eine enorme Volumenreduzierung herbeigeführt. Somit wurde damit begonnen die Dämmstoffmaterialien in Aceton aufzulösen. Es wurden ca. 600 g Dämmstoffabfall (EPS) in 300 ml Aceton aufgelöst. Hierdurch bildete sich eine zähe Masse aus Polystyrol und Aceton. Anschließend wurde die erhaltene Masse bei  $60^\circ\text{C}$  über einen Zeitraum von 24 Stunden im Trocknen getrocknet, um das enthaltene Lösemittel abzdampfen. Somit wurde ein sprödes Material aus reinem Polystyrol ohne Triebmittel gewonnen. Um das Polystyrol mit größtmöglicher Oberfläche  $S_v$  in die Extraktionshülse überführen zu können, wurde das Material mittels einer Feinprallmühle mit einer Einlegrostmaschenweite  $w_{Ein} = 1$  mm zerkleinert. Durch den Mahlvorgang konnte eine mittlere Partikelgröße von  $x_{50,3} = 184,5$   $\mu\text{m}$  erzeugt werden.

Um das Flammschutzmittel mittels eines Gaschromatographen (GC) analysieren zu können, muss die zu analysierende Substanz (HBCD) aus dem Feststoff herausgelöst werden. Somit ist es für den Extraktionsprozess nötig, ein geeignetes Lösemittel zu eruiieren. Durch die durchgeführte Literaturrecherche konnte herausgefunden werden, dass sich hierfür ein Gemisch aus Aceton und n-Hexan für den Start von Versuchsreihen am besten eignet. Dies kann im Laufe der Forschungen gewechselt oder mit anderen Lösemitteln vermischt werden, um die Ausbeute zu erhöhen. Es wurde damit begonnen 300 ml Aceton in dem „Soxhlet“ Kolben vorzulegen. Die Extraktionshülsen wurden mit  $m = 20,0$  g Polystyrol befüllt. Hierfür wurde aus dem zerkleinerten HBCD haltigen Polystyrol mittels des Probenteilers eine repräsentative Menge für die Extraktionshülse entnommen. Bei Zugabe des Lösemittelgemisches kann festgestellt werden, welchen Einfluss das Lösemittel über die Zeit auf das Polystyrol hat. Das Temperierbad wurde auf eine Temperatur von  $T = 62^\circ\text{C}$  erhitzt und somit

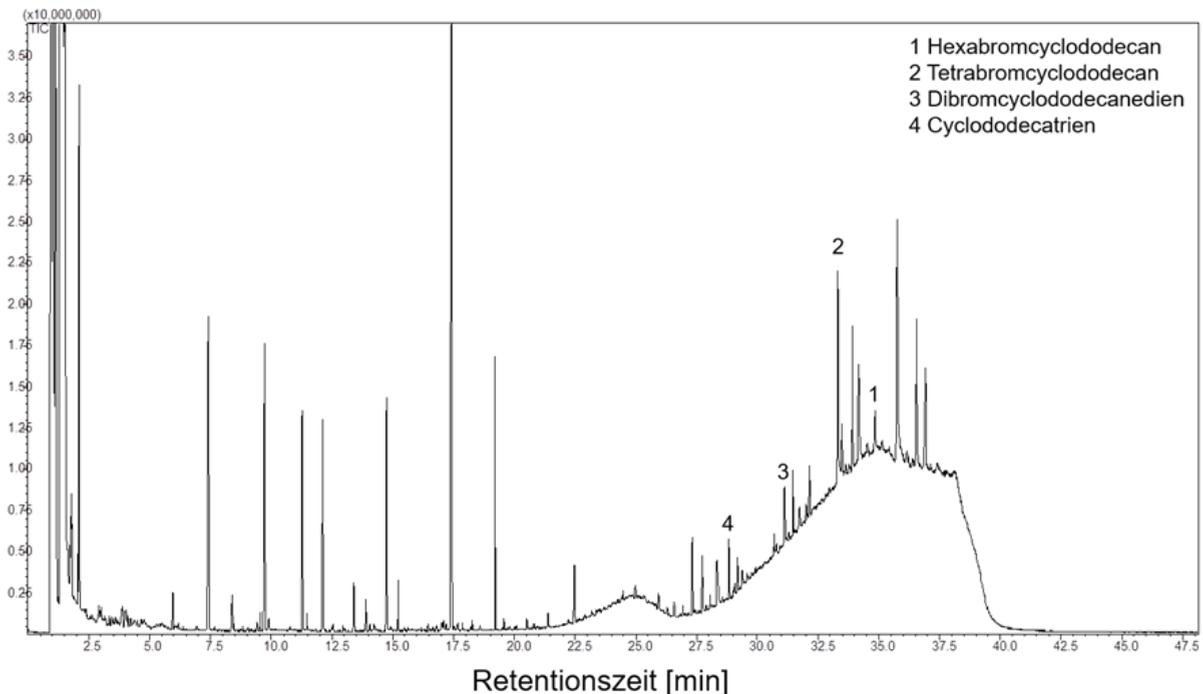
das Lösemittel zum Sieden gebracht. Zu Beginn der Versuche wurden lediglich 12 Zyklen in der „Soxhlet-Apparatur“ realisiert, da dies nur der Machbarkeit bzw. dem Nachweis des Flammschutzmittels diene. Nach Beendigung des Prozesses wurde das Extrakt entnommen und mittels eines Rotationsverdampfers vom größten Teil der Lösemittelmatrix (Aceton) abgetrennt. Im Anschluss konnte das reduzierte Extrakt mittels der vorhanden GC analysiert werden. Hierdurch kann neben HBCD auch der Gehalt weiterer bromierter bzw. nicht bromierter cyclischer Verbindungen analysiert werden. Während der Messungen wurde jedoch festgestellt, dass aufgrund steigender Temperaturen während des Aufheizt-Programmes der GC, das HBCD einer mehrstufigen Eliminierungsreaktion unterliegt. Abbildung 2.3 zeigt die schematische Dibromeliminierung.



**Abbildung 2.3** Schematische Darstellung der temperaturabhängigen Eliminierungsreaktion des Flammschutzmittels HBCD [24]

Die Trennung der bromierten cyclischen Dodecane erfolgte durch das eingestellte Temperatur-Programm der GC, wobei die Temperatur zunächst über einen Zeitraum von 1 min bei 80 °C gehalten wird. Im Anschluss wird die Temperatur in 10 °C Schritten bis auf 300 °C erhitzt und diese über einen Zeitraum von 10 min konstant gehalten. Abbildung 2.4 zeigt exemplarisch ein erhaltenes Chromatogramm mit den jeweilig markierten Zwischenprodukten der Eliminationsreaktion.

Intensität



**Abbildung 2.4:** GC/MS-Chromatogramm nach der Pyrolyse von EPS aus dem Jahr 1970 (1=Hexabromcyclododecan, 2=Tetrabromcyclododecan, 3=Dibromcyclododecanedien, 4=Cyclododecatrien)

Während dieser Temperaturbehandlung wandelt sich das HBCD anteilig in die drei cyclischen Verbindungen Tetrabromcyclododecan (Peak II), Dibromcyclododecanedien (Peak III) und Cyclododecatrien (Peak IV) um. Aufgrund der Eliminierungsreaktion ist das HBCD (Peak I) nicht als isolierter Peak im Chromatogramm nachweisbar. Die während der Temperaturbehandlung entstandenen Zwischenprodukte wurden über das Auswerteprogramm erfasst und durch Literaturangaben bestätigt [24–26]. Somit konnten das Flammschutzmittel HBCD und seine Zerfallsprodukte in allen Dämmstoffproben eindeutig identifiziert werden. Andere Bromverbindungen konnten nicht nachgewiesen werden. Durch die stattfindende Eliminierungsreaktion konnte der HBCD-Gehalt mittels der verwendeten GC nur qualitativ bestimmt werden. Um den HBCD-Gehalt auch quantitativ bestimmen zu können, kam im weiteren Verlauf der Untersuchungen ein RFA-Handspektrometer zum Einsatz. So konnte der Brom-Gehalt der Dämmstoffmaterialien und der jeweiligen anderen Schichten untersucht werden. Mittels stöchiometrischer Berechnungen konnte vom detektierten Bromgehalt auf die enthaltene Konzentration des Flammschutzmittels HBCD in den jeweiligen Schichtfolgen der WDVS-Reststoffe geschlossen werden. Auf diese Weise konnte zusätzlich festgestellt werden, ob und in welchem Ausmaß HBCD in die jeweiligen WDVS-Schichten diffundiert.

Tabelle 2.3 und Tabelle 2.4 zeigen den HBCD-Gehalt der jeweiligen Schichten der WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS und XPS als Dämmstoffmaterial.

**Tabelle 2.3:** HBCD-Gehalte in verschiedenen Schichten unterschiedlicher WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS als Dämmstoffmaterial

WDVS-Schicht	WDVS (Jahr 2000) HBCD [mg kg <sup>-1</sup> ]	WDVS (Jahr 1997) HBCD [mg kg <sup>-1</sup> ]	WDVS (Jahr 1986) HBCD [mg kg <sup>-1</sup> ]
Dämmstoff (EPS)	7232 ± 68	6110 ± 60	7616 ± 97
Armierungsputz	53 ± 6	18 ± 4	28 ± 6
Oberputz	25 ± 6	17 ± 4	36 ± 7
Gewebe 1	8 ± 2	8 ± 2	9 ± 2
Gewebe 2	-	12 ± 3	-
Klebstoffschicht	-	16 ± 4	-

**Tabelle 2.4:** HBCD-Gehalte in verschiedenen Schichten unterschiedlicher WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS als Dämmstoffmaterial

WDVS-Schicht	WDVS (Jahr 2000) HBCD [mg kg <sup>-1</sup> ]	WDVS (Jahr 1997) HBCD [mg kg <sup>-1</sup> ]	WDVS (Jahr 1986) HBCD [mg kg <sup>-1</sup> ]
Dämmstoff (XPS)	6841 ± 58	7009 ± 64	7293 ± 78
Armierungsputz	44 ± 5	37 ± 3	51 ± 8
Oberputz	33 ± 5	26 ± 6	31 ± 6
Gewebe 1	12 ± 1	10 ± 2	13 ± 1

Aus den durchgeführten Untersuchungen ging hervor, dass der HBCD-Gehalt der Dämmstoffmaterialien der unterschiedlichen Generationen zwischen 6110 und 7616 mg kg<sup>-1</sup> liegt. Somit wird der Grenzwert von 3 Ma.-% HBCD unterschritten. Der in der Literatur angegebene durchschnittliche HBCD-Gehalt im EPS-Dämmstoff liegt bei ca. 7000 mg kg<sup>-1</sup> [21; 27]. Weiterhin konnten in allen untersuchten Schichten der WDVS geringe Mengen an HBCD nachgewiesen werden. Es muss also davon ausgegangen werden, dass HBCD während der Standzeit der WDVS in die individuellen Werkstoffschichten diffundiert [28]. Es zeigt sich, dass in den unterschiedlichen Dämmstoffen der jeweiligen Jahrzehnte ein ähnlicher HBCD-Gehalt detektiert werden konnte. Obwohl HBCD in den WDVS eindeutig nachgewiesen werden konnte, wird der Grenzwert nicht überschritten, wodurch die aus den komplexen Kompositen rückgewonnenen Sekundärrohstoffe in Bezug auf den Flammschutzmittelgehalt grundsätzlich für eine Wiederverwertung geeignet wären.

## 2.3 Entwicklung einer Recyclingstrategie (AP3 & AP4)

In Hinblick auf die zunehmende Verknappung von Rohstoff-Ressourcen und wertvollem Deponieraum müssen künftig neue Wege im Umgang mit WDVS gefunden werden. Durch die Energiewende in der Bundesrepublik Deutschland und den daraus entstandenen Ressourceneffizienzprogrammen (ProgRess I – III) kam es zu einer Priorisierung des Themas im Bereich der Kreislaufwirtschaft, insbesondere in baugewerblichen Bereichen. Am Ende ihrer Lebensdauer müssen die anfallenden Bau-Abfälle, im Sinne der „Circular-Economy“, einem geeigneten Aufbereitungs- und Verwertungsprozess zugeführt werden, um langfristig Stoffkreisläufe effizient schließen zu können. Aufgrund der Problematik eines fehlenden „Up-Cyclings“ für herkömmlich anfallende Bau-Reststoffe und einem Mangel an Aufbereitungstechnologien zur mechanischen bzw. stofflichen Trennung von komplexen Verbundwerkstoffen geht ein erhebliches Ressourceneffizienzpotential verloren. Zusätzlich stellen

etwaige Unsicherheiten zu rechtlichen Beschränkungen in Bezug auf Stör- und Schadstoffe der Sekundärrohstoffe eine zusätzliche Problematik dar. Ziel muss es daher sein, unter Einsparung von Primärressourcen und Brennstoffen komplexe Bau-Reststoffe so aufzubereiten, dass sie für neuartige und hochwertige kreislauffähige Bauprodukte mit gleichbleibenden oder verbesserten Eigenschaften genutzt werden können („Cradle to Cradle“). Um den heutigen globalen Klimaansprüchen gerecht zu werden, muss sowohl der Aufbereitungs- als auch der Produktionsprozess weitestgehend CO<sub>2</sub>-neutral gestaltet sein. Bisher existieren einige Bestrebungen, für die komplexen WDVS Recyclingwege zu modellieren und eine geeignete Wiederverwertung für die individuellen Werkstoffe zu finden [29].

Abbildung 2.5 zeigt einen möglichen geschlossenen Verwertungskreislauf von WDVS, welcher die Bedingungen eines hochwertigen Recyclings nach dem aktuellen Kreislaufwirtschaftsgesetz vollständig erfüllt.



**Abbildung 2.5:** Möglicher Geschlossener Stoffkreislauf von WDVS

## 2.4 Zerkleinerungsprozess (AP5)

Um die WDVS-Abbruchmaterialien vollständig aufschließen zu können, kam eine Hammermühle der Firma Siebtechnik vom Typ HM1 zum Einsatz. Hierbei wird das Aufgabegut durch rechteckige (65 mm x 15 mm x 30 mm) Hämmer zerkleinert. Der Zerkleinerungseffekt auf das Aufgabegut wird durch den Abstand zwischen Schlagkreis und Mahlbahn von 10 mm, sowie dem klassierenden Einlegrost  $w$  bestimmt. Die eingesetzte Hammermühle besitzt bei einer Umfangsgeschwindigkeit von  $u = 26,6 \text{ m s}^{-1}$  und Drehzahl von  $n = 2445 \text{ min}^{-1}$  eine Motorleistung von  $P = 3,5 \text{ kW}$ . Das Aufgabegut wird über eine Vibrationsrinne aufgegeben. Bei den durchgeführten Laborversuchen kamen Einlegrostmaschenweiten von  $w = 20, 15, 10, 8, \text{ und } 6 \text{ mm}$  bei denen die jeweilige Siebfläche ( $A_{w=20} = 39,20 \text{ cm}^2$ ,  $A_{w=15} = 34,40 \text{ cm}^2$ ,  $A_{w=10} = 29,90 \text{ cm}^2$ ,  $A_{w=8} = 25,92 \text{ cm}^2$  und  $A_{w=6} = 24,62 \text{ cm}^2$ )

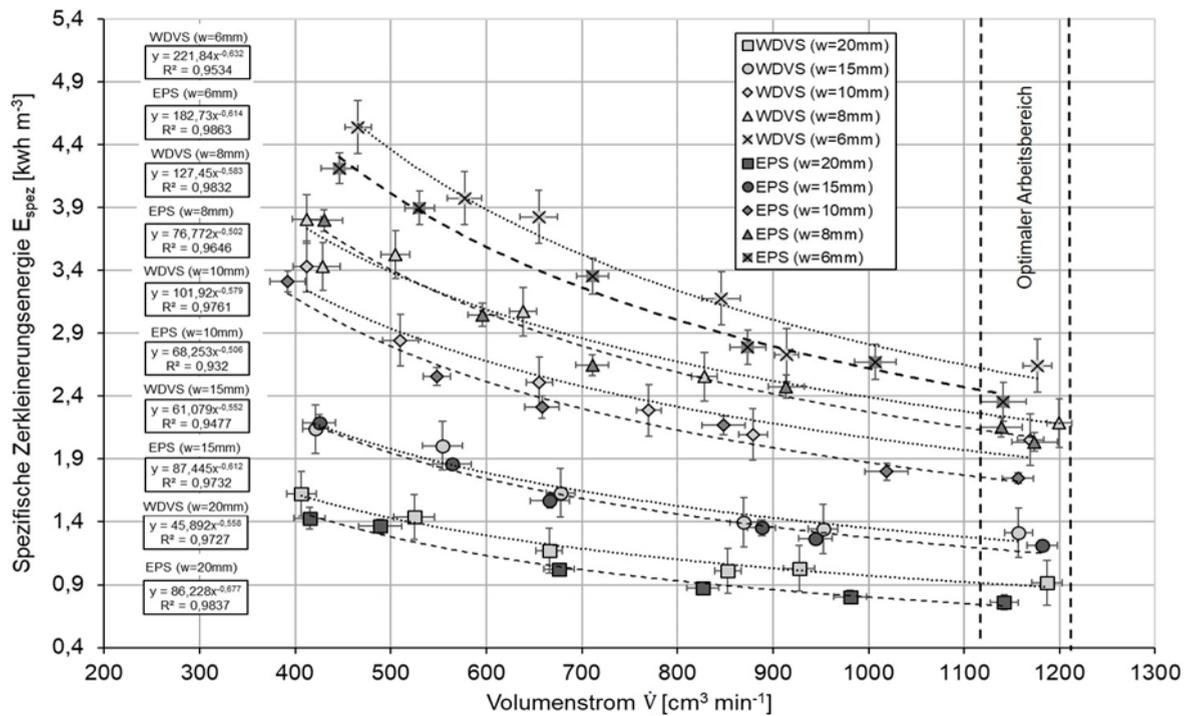
mit kleineren Einlegrostmaschen abnimmt. Um die für den Zerkleinerungsprozess benötigte elektrische Leistung  $P_{Elek}$  für die verwendete Hammermühle aufnehmen zu können, kam ein Fluke Power Quality and Energy Analyser (Typ 435 Series II) zum Einsatz. Durch die ermittelte Leistung kann die spezifische Zerkleinerungsenergie  $E_{spez}$  in Abhängigkeit des zu zerkleinerten Volumens bestimmt werden (Gl.1).

$$E_{spez} = \frac{1}{V} \int_{t_0}^{t_E} (P_{Elek.} - P_{0,Elek.}) dt \quad (1)$$

Da es zu höheren Schwankungen in der gemessenen Energie während des Zerkleinerungsprozesses kommt, wurde  $E_{spez}$  mit Hilfe des numerischen Lösungsverfahrens nach Simpson berechnet (Gl.2) [32]:

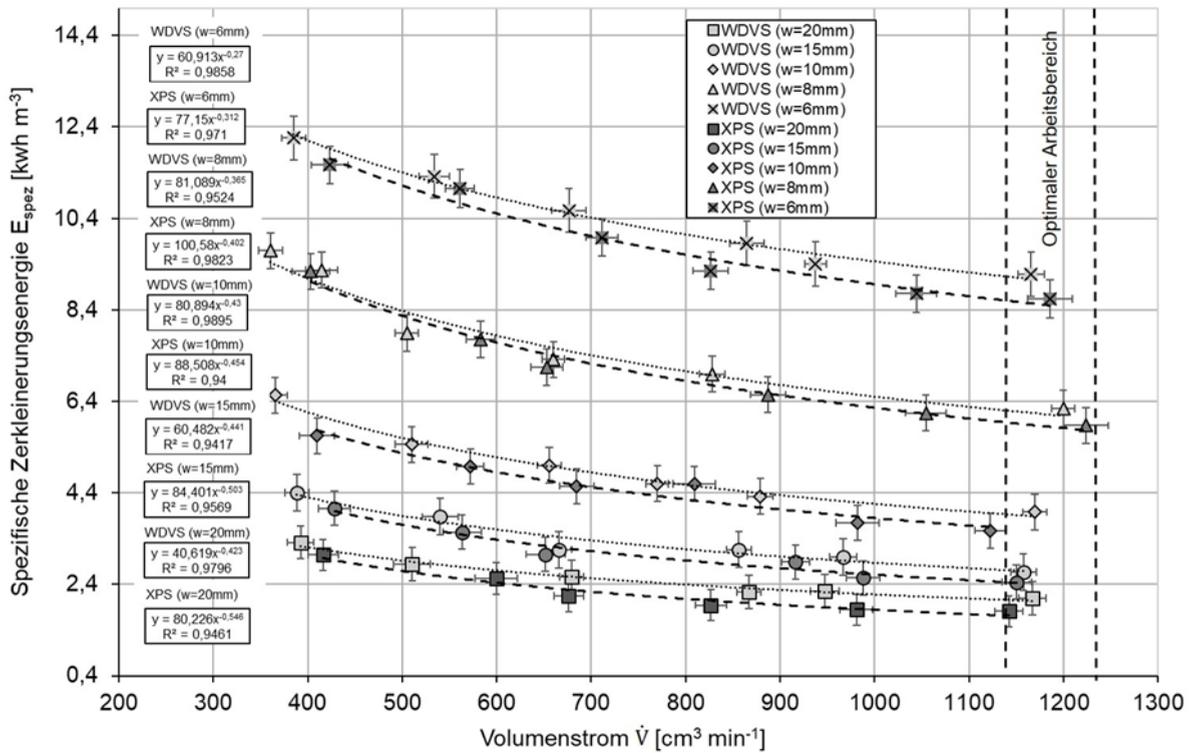
$$E_{spez} = \frac{1}{V} \left\{ \frac{\Delta t}{3} \left[ P_{Elek.}(t_0) + P_{Elek.}(t_E) + \sum_{k=1}^{n-1} [3 + (-1)^{k-1}] P_{Elek.}(t_k) \right] - P_{0,Elek.}(t_E - t_0) \right\} \quad (2)$$

Für die Zerkleinerungsprozesse kam als Aufgabegut sowohl WDVS-Segmente als auch überwiegend sortenreines Dämmstoffmaterialien zum Einsatz. Hierdurch kann die bestimmte Zerkleinerungsenergie der WDVS direkt mit reinen Dämmstoffmaterialien verglichen und etwaige Unterschiede aufgezeigt werden. Für die Versuche wurde die Einlegrostmaschenweite  $w$  und der Volumenstrom  $V$  gezielt variiert, um den Einfluss auf die Zerkleinerungsenergie  $E_{spez}$  bestimmen zu können. In dieser Arbeit wurde bewusst der Volumenstrom und nicht der Massenstrom betrachtet, da es zwischen den WDVS und den sortenreinen Dämmstoffmaterialien zu hohen Massenunterschieden bei gleichem Zerkleinerungsvolumen kommt. Für diese Versuche kam die Hammermühle der Firma Siebtechnik zum Einsatz. Andere Mühlentypen wie Schneid- oder Kugelmühlen erwiesen sich in Vorversuchen für die vorliegenden Werkstoffe als ungeeignet. Mittels der verwendeten Apparaturen konnten Volumenströme  $V$  im Bereich von  $400 \leq V \leq 1200 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$  realisiert werden. Die jeweiligen Prozesseinstellungen wurden sechsfach vermessen. Abbildung 2.6 zeigt den Zusammenhang der variierenden Prozessparameter der Einlegrostmaschenweite  $w$  und dem Volumenstrom  $V$  auf die spezifische Zerkleinerungsenergie  $E_{spez}$  für WDVS mit EPS im direkten Vergleich zu sortenreinem EPS.



**Abbildung 2.6:** Einfluss des Volumenstromes  $\dot{V}$  und der Einlegerostmaschenweite  $w$  auf die spezifische Zerkleinerungsenergie  $E_{spez}$  für WDVS mit EPS und sortenreines EPS

Der Zusammenhang zwischen der Zerkleinerungsenergie  $E_{spez}$  und dem Volumenstrom  $\dot{V}$  zeigt, bei unterschiedlichen Einlegerosten, für die Messdaten Potenzfunktionen in den betrachteten Bereichen. Für alle Funktionen konnte ein hohes Bestimmtheitsmaß von  $0,93 \leq R^2 \leq 0,98$  ermittelt werden. Sowohl für die WDVS als auch für die sortenreinen EPS-Abbruchmaterialien nimmt  $E_{spez}$  mit steigendem  $w$  ab. Ebenfalls steigt bei allen untersuchten Einlegerosten, die Zerkleinerungsenergie  $E_{spez}$  mit der Abnahme des Volumenstromes  $\dot{V}$ . Aufgrund der geringen Dichte des Dämmstoffmaterials kommt es bei geringeren Volumenströmen zu einer höheren Verweilzeit im Mahlraum, wodurch sich die Prozesszeit der Zerkleinerung erhöht, und die Energie ansteigt. Alle Funktionen deuten darauf hin, dass sich diese asymptotisch einem Grenzwert annähern. Während des Zerkleinerungsprozesses werden ausschließlich die jeweiligen Polystyrolkugeln aus dem Verbund gelöst, jedoch nicht die jeweiligen Kugeln weiter zerkleinert. So kann EPS mittels einer Hammermühle überwiegend nur auf die Größe der individuellen EPS-Kugeln zerkleinert werden. Hierdurch bleibt also die sphärische Form der Polystyrolkugeln erhalten. Die Messungen zeigen ebenfalls nur einen geringen Unterschied in der jeweiligen Zerkleinerungsenergie zwischen WDVS und dem sortenreinen EPS. Wie bereits vermutet ist überwiegend das Dämmstoffmaterial für die resultierende Zerkleinerungsenergie entscheidend. Somit spielt der im WDVS enthaltene Putz bzw. das Glasfasergewebe und die Klebstoffe nur eine untergeordnete Rolle in der energetischen Betrachtung. Abbildung 2.7 zeigt den entsprechenden Zusammenhang der Prozessparameter für WDVS mit XPS und überwiegend sortenreinem XPS.



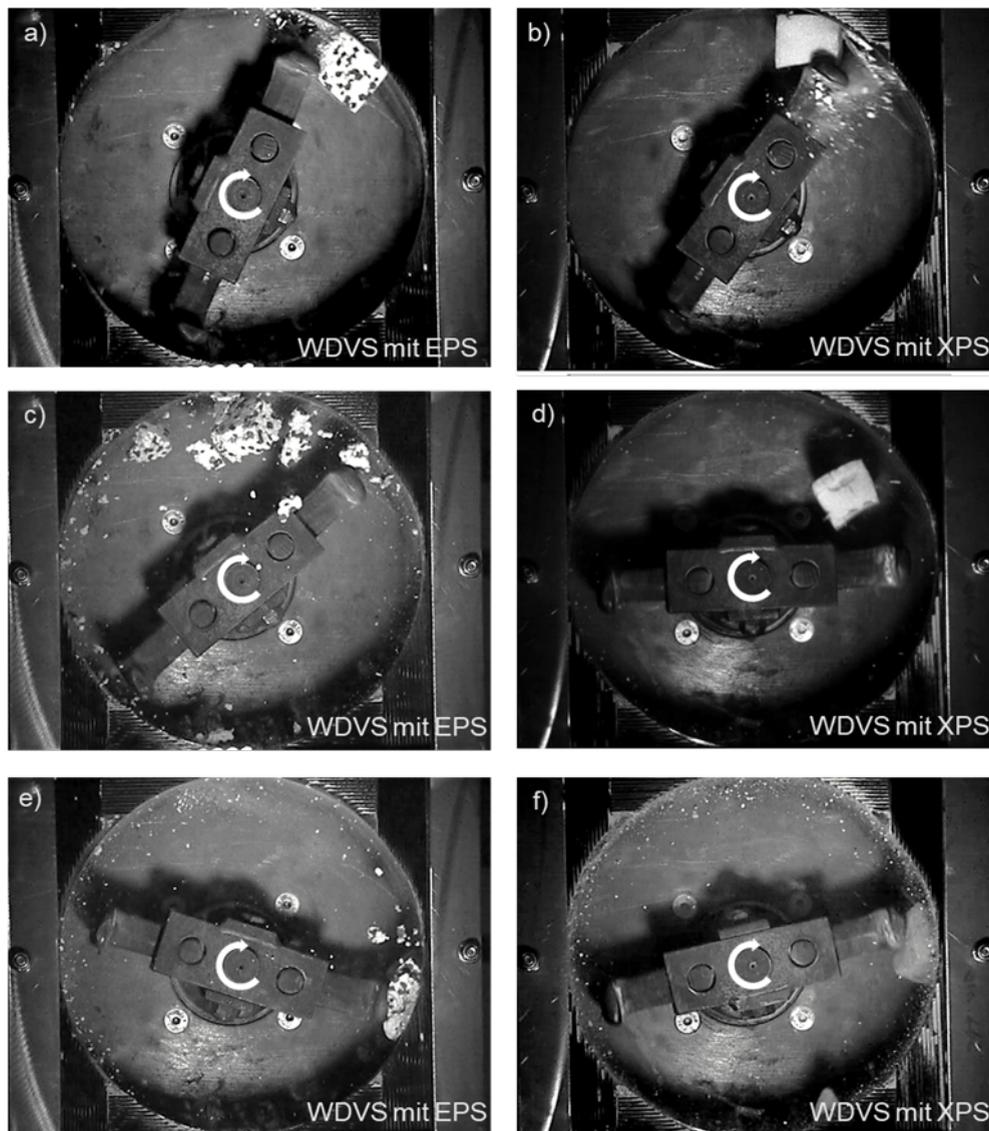
**Abbildung 2.7:** Einfluss des Volumenstromes  $\dot{V}$  und der Einlegrostmaschenweite  $w$  auf die spezifische Zerkleinerungsenergie  $E_{\text{spez}}$  für WDVS mit XPS und sortenreines XPS

Ebenfalls zeigt der Zusammenhang zwischen der Zerkleinerungsenergie  $E_{\text{spez}}$  und dem Volumenstrom  $\dot{V}$  bei unterschiedlichen Einlegerosten in Abbildung 2.7 Potenzfunktionen. Die resultierenden Bestimmtheitsmaße liegen im Bereich von  $0,94 \leq R^2 \leq 0,98$ . Auffällig bei diesen Untersuchungen ist eine starke Zunahme der Zerkleinerungsenergie ab der Einlegrostmaschenweite von  $w = 8 \text{ mm}$ . So kann davon ausgegangen werden, dass für kleine Endpartikelgrößen  $x_w$ , signifikant mehr Energie benötigt wird. Erneut zeigt sich, dass die jeweiligen Zerkleinerungsenergien zwischen WDVS mit XPS und sortenreinem XPS näherungsweise korrelieren, wodurch bestätigt wird, dass der Einfluss der anderen Werkstoffe nur einen geringen Einfluss auf die benötigte Zerkleinerungsenergie besitzen. Die WDVS mit XPS sowie die sortenreinen XPS-Proben zeigen für gleiche Einlegroste  $w$  und Volumenströme  $\dot{V}$  deutlich höhere Zerkleinerungsenergien als für die WDVS mit EPS bzw. sortenreinem EPS. So liegt bei  $\dot{V} \approx 400 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$  für  $w = 20 \text{ mm}$  der Energieunterschied bei  $\Delta E_{\text{pez}} \approx 1,69 \pm 0,213 \text{ kWh m}^{-3}$ . Für  $w = 6 \text{ mm}$  beträgt der Unterschied bereits  $\Delta E_{\text{pez}} \approx 7,62 \pm 0,481 \text{ kWh m}^{-3}$ . So wird für WDVS mit XPS bzw. reinem XPS fast dreimal so viel Energie als für WDVS mit EPS bzw. reinem EPS benötigt. Für den höchsten Volumenstrom von  $\dot{V} \approx 1200 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$  fällt dieser Unterschied geringer aus und liegt für  $w = 20 \text{ mm}$  bei  $\Delta E_{\text{s-pez}} = 1,18 \pm 0,185 \text{ kWh m}^{-3}$  und für  $w = 6 \text{ mm}$  bei  $\Delta E_{\text{s-pez}} = 6,54 \pm 0,452 \text{ kWh m}^{-3}$ . Die Diskrepanz der Energieunterschiede ist auf die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften der Dämmstoffmaterialien zurückzuführen. Im Zerkleinerungsprozess konnten alle Werkstoffe aus dem komplexen WDVS aufgeschlossen werden. Ebenfalls konnte für die jeweiligen Messreihen Potenzfunktionen des Typs  $y = a * x^{-n}$  mit negativen Exponenten  $n$  und positiven Faktor  $a$  angenähert werden. Es konnte sowohl der Putz vom Dämmstoffmaterial als auch von dem Glasfasergewebe abgetrennt werden. Die Fasern lagen einzeln und nicht in ihrer Gitterstruktur vor. Dies konnte für alle untersuchten Volumenströme  $\dot{V}$  und Einlegroste  $w$  erreicht werden. Für alle untersuchten Abbruchmaterialien konnte

---

zwischen den unterschiedlichen Generationen kein Unterschied in der Zerkleinerungsenergie festgestellt werden. Alle Abweichungen sind im Rahmen der Messungenauigkeiten der Apparaturen und wurden als Standardabweichung in den jeweiligen Diagrammen angegeben.

Wie bereits erwähnt, haben die Untersuchungen gezeigt, dass deutlich mehr Zerkleinerungsenergie für XPS-haltige Abbruchmaterialien benötigt wird. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften zu EPS. Wichtig war nun die Beanspruchung durch das Mahlerwerk auf die jeweiligen Werkstoffe zu identifizieren, um den Grund des höheren Energieeintrages bestimmen zu können. Um die Beanspruchungsart auf die Dämmstoffmaterialien eindeutig bestimmen zu können, wurde eine Hammermühle mit zwei gelenkigen Hämmern der Firma Alpine vom Typ 25/MZ so umgebaut, so dass der Zerkleinerungsprozess beobachtet werden kann. Diese besitzt bei einer maximalen Drehzahl von  $n = 1800 \text{ min}^{-1}$  und einer Umfangsgeschwindigkeit von  $u = 17,3 \text{ m s}^{-1}$  eine Leistung von  $P = 2,2 \text{ kW}$ . Am Mahlraum der Hammermühle wurde ein beschusssicheres Glas der Firma Silatec vom Typ BR3-NS-20/40 montiert. Somit können mit einer Hochgeschwindigkeitskamera die Beanspruchungsarten der Mühle auf das Aufgabegut bestimmt werden. Hierbei wurde eine Kamera der Firma KEYENCE VW-600m eingesetzt. Es können Aufnahmen mit einer maximalen Bildrate von 230.000 fps aufgenommen werden. Mittels der Software VW-9000 MotionAnalyzer von KEYENCE kann der Bruchvorgang analysiert werden. Somit kann die Beanspruchungsart auf die Materialien identifiziert werden. Für die Bestimmung der Beanspruchungsart wurden präparierte WDVS-Modellsysteme mit EPS und XPS zerkleinert. Die Abmessungen der verwendeten Modellsysteme entsprechen der Größe des Aufgabegutschachtes der verwendeten Mühle (50 x 50 x 50 mm). Es wurden jeweils 60 Segmente zerkleinert, gefolgt von einer detaillierten Auswertung der dabei gemachten Aufnahmen. In Abbildung 2.8 sind die Aufnahmen des Zerkleinerungsprozesses von WDVS mit EPS und XPS dargestellt.



**Abbildung 2.8:** Zerkleinerungsprozess der WDVS-Segmente mittels der Hammermühle 25/MZ. Primärstoß der Hämmer (a und b), Prallbeanspruchung (c und d) sowie Scherbeanspruchung (e und f) der WDVS mit EPS und XPS. Drehrichtung der Hämmer im Uhrzeigersinn

Durch Auswertung der Zerkleinerungsversuche konnte gezeigt werden, dass während des Primärstoßes des Mahlwerkes (Abbildung 2.8a-b) der gesamte Putz und das Glasfasergewebe durch Prallbeanspruchung vom Dämmstoff abgetrennt werden. Der Putz liegt im Anschluss in feinen Partikeln vor und ist für die energetische Betrachtung nach dem Primärschlag überwiegend vernachlässigbar. Das Glasfasergewebe liegt zu diesem Zeitpunkt noch in seiner Gitterstruktur vor. In Abbildung 2.8 e-f ist deutlich zu erkennen, dass beide Dämmstofftypen (EPS und XPS) durch Scherbeanspruchung zerkleinert werden. In diesem Fall ist der Dämmstoff zwischen Schlagwerkzeug und Mahlraum gestaucht, bevor er anschließend relaxiert. Durch jede Scherbeanspruchung werden Partikel aus dem Dämmstoffverbund herausgebrochen (XPS) oder die Kugeln aus dem Verbund gelöst (EPS). Weiterhin wird das Glasfasergewebe durch die Scherung aus seiner Gitterstruktur gelöst, bis nur noch einzelne Fasern vorliegen. Für das EPS konnte ebenfalls Prallbeanspruchung (Abbildung 2.8c) beobachtet werden. Hierbei werden wie bei der Scherbeanspruchung zwar die jeweiligen Polystyrolkugeln aus dem Verbund gelöst, jedoch ohne dabei aufgebrochen zu werden. Eine erfolgreiche Zerkleinerung durch Prallbeanspruchung am XPS (Abbildung 2.8 d) konnte nicht beobachtet werden.

Die Beanspruchungen im Mahlraum sind dann beendet, wenn die erzeugten Partikel kleiner als das verwendete Einlegrost sind und somit aus dem Mahlraum der Mühle ausgetragen werden. Zusätzlich konnte beobachtet werden, dass das zu zerkleinernde XPS im Vergleich zum EPS eine um ca. 35 % höhere Verweilzeit im Mahlraum benötigt, um die gewünschte Partikelgröße (je nach Einlegrost) zu erreichen. Dies ist wiederum auf die Materialeigenschaften des XPS zurückzuführen, wodurch sich zeigen lässt, dass das Dammstoffmaterial für den Zerkleinerungsprozess ausschlaggebend ist. Die anderen Werkstoffe verhielten sich während der Zerkleinerung identisch.

## 2.5 Charakterisierung der Partikelgrößen der Zerkleinerungsprodukte

Um die individuellen Partikelkollektive hinreichend charakterisieren zu können, wird ein opto-elektronisches Messgerät zur dynamischen Bildanalyse der Firma Retsch vom Typ CAMSIZER eingesetzt. Hierdurch können Partikel in einem Größenbereich von  $30 \mu\text{m} \leq x \leq 90 \mu\text{m}$  präzise bestimmt werden. Der Vorteil der dynamischen Bildanalyse im Gegensatz zur Siebanalyse ist, dass während der Charakterisierung der Partikel mehrere Partikelkenngrößen ermittelt werden können. Grundsätzlich werden die Sehnenmaße der Partikel durch das Verbinden der aufgenommenen Randpixel bestimmt. So werden über die Partikelprojektion die längsten Sehnen aus allen Messrichtungen ermittelt. Hierdurch können unterschiedliche statistische Sehnenlängen wie  $x_c$ ,  $x_{Fe}$ ,  $x_{Ma}$  bestimmt werden. Wird einer der statistischen Längen verwendet, wird der mittlere Partikeldurchmesser  $x_{min}$ ,  $x$  und  $x_{max}$  für jede gewählte Messklasse ausgegeben. Ebenfalls können die Längen von Fasern bzw. zylindrische Objekte bestimmt werden. Für die Längenverteilung von Fasern eignet sich die Kenngröße  $x_{Länge}$  (Gl. 3).

$$x_{Länge} = \sqrt{x_{Fe,max}^2 - x_{Ma,min}^2} \quad (3)$$

Der  $x_{Fe}$  beschreibt den Abstand zweier an die Projektionsfläche des Partikels angelegten Tangenten in Messrichtung. Der  $x_{Ma}$  gibt die Länge des Durchmessers durch den Flächenschwerpunkt in Messrichtung an. Als  $x_c$  wird die maximale Sehne der Projektionsfläche senkrecht zur Messrichtung bezeichnet [39; 40]. Häufig korrelieren in der Praxis die Ergebnisse der Siebanalyse mit der  $x_c$ -Sehnenlänge. Vom CAMSIZER wird die anzahlbezogene Verteilungssummenfunktion  $Q_0(x)$  ermittelt. Für diese Arbeit ist jedoch die volumenbezogene Verteilung  $Q_3(x)$  relevant. Generell können diese ineinander umgerechnet werden (Gl.4).

$$Q_0(x) = \frac{\int_{x_{min}}^x x^{-3} q_3(x) dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} x^{-3} q_3(x) dx} \quad (4)$$

Die  $Q_3$ -Verteilung wird vom CAMSIZER über ein Volumenmodell bestimmt. Hierfür kommt ein gestrecktes Rotationsellipsoid zum Einsatz (Gl. 5). Es wird ein Gesamtvolumen  $V_p$  ermittelt, auf das die Mengen in der  $Q_3$ -Verteilung bezogen werden.

$$V_{ellipsoid} = \frac{\pi}{6} x_{Fe,max} x_{c,min}^2 \quad (5)$$

Die Sphärizität  $\psi$  nach Wandell beschreibt das Verhältnis der Oberfläche  $A_p$  einer Kugel gleichen Volumens zur Oberfläche des Körpers und kann gemäß Gl. (6) bestimmt werden [41].

$$\psi = \frac{\pi^{\frac{1}{3}}(6V_p)^{\frac{2}{3}}}{A_p} \quad (6)$$

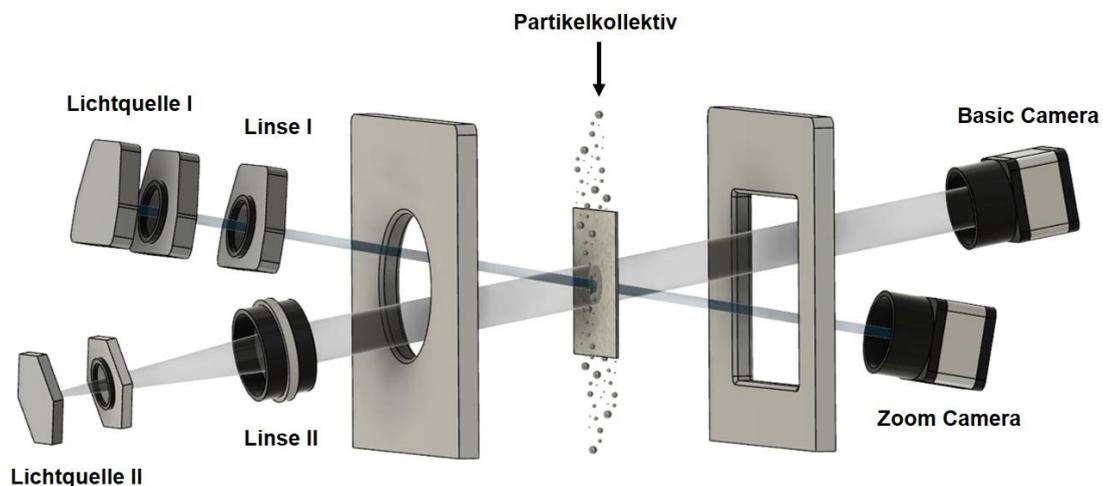
Durch Kenntnis der Messdaten des CAMSIZER kann die Dispersität nach VDI 3491 berechnet werden (Gl. 7) [41].

$$\kappa = \frac{x_{84,3} - x_{16,3}}{2 x_{50,3}} \quad (7)$$

Hierdurch kann die Breite einer Verteilungssummenfunktion  $Q_r(x)$  bestimmt werden. Je nach Breite eines Partikelkollektives kann dieses als monodispers  $\kappa < 0,14$ , Quasimonodispers  $0,14 \leq \kappa \leq 0,41$  oder Polydispers  $\kappa > 0,41$  beschrieben werden. Zusätzlich kann über die gemessene Ausgangspartikelgröße  $x_\alpha$  und die Endkorngröße  $x_\omega$  im Zerkleinerungsprodukt auf den Zerkleinerungsgrad  $Z$  geschlossen werden (Gl.8) [42].

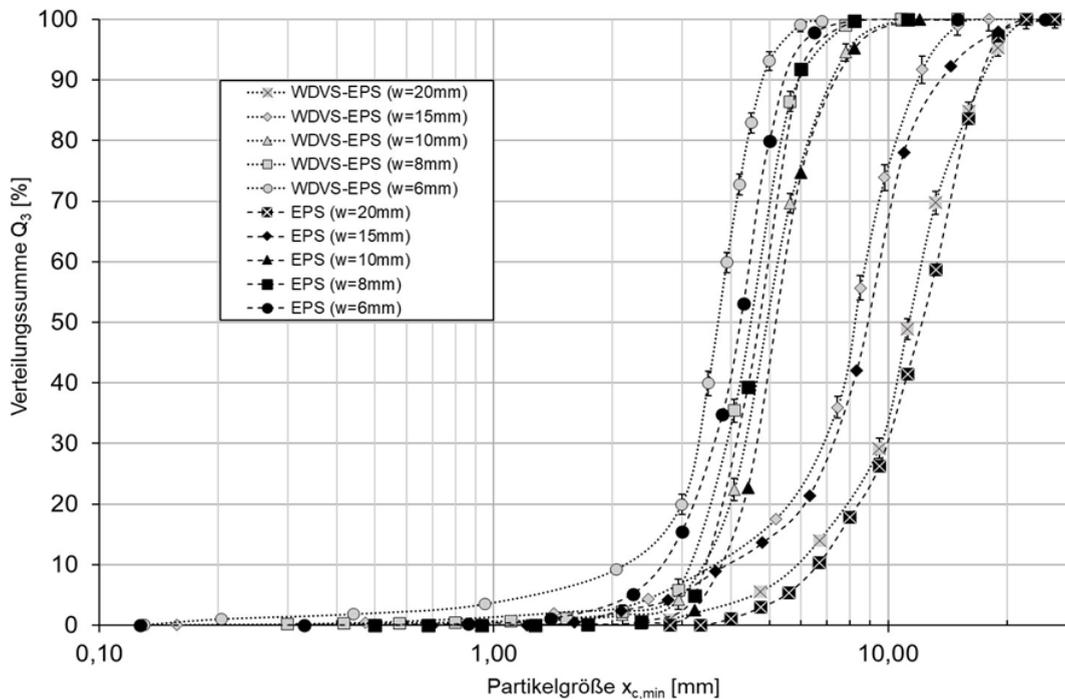
$$Z_{50} = \frac{x_{50,\alpha}}{x_{50,\omega}} \quad (8)$$

Abbildung 2.10 zeigt schematisch den Aufbau des CAMSIZER, um das Messprinzip zu verdeutlichen.



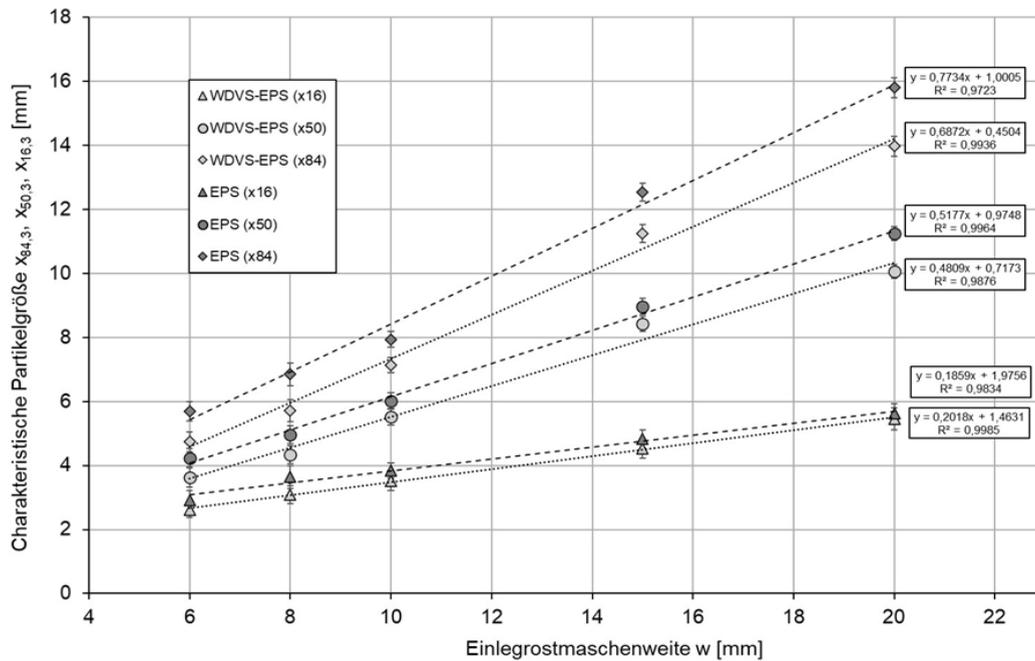
**Abbildung 2.9:** Schematischer Aufbau des CAMSIZER der Firma Retsch

Durch die dargestellte Messtechnik konnte im Anschluss an den Zerkleinerungsprozess der Einfluss von Prozessparametern wie der unterschiedlichen Volumenströme ( $400 \leq V \leq 1200 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ ) und Einlegroste ( $w = 20, 15, 10, 8$  und  $6 \text{ mm}$ ) auf die partikulären Eigenschaften der unterschiedlichen Zerkleinerungsprodukte der WDVS-Abbruchmaterialien untersucht werden. Wie bereits vermutet, besitzt im Vergleich zum Volumenstrom, die Einlegrostmaschenweite einen starken Einfluss auf die partikulären Eigenschaften. Durch unterschiedliche Volumenströme konnte kein direkter Einfluss festgestellt werden. Ebenfalls konnte zwischen den jeweiligen Abbruchmaterialien der unterschiedlichen Generationen kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Abbildung 2.11 zeigt den Einfluss der Einlegrostmaschenweite  $w$  auf die gemittelten volumenbezogenen Verteilungssummenfunktionen  $Q_3(x_{c,min})$  der WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS sowie der reinen EPS-Abbruchmaterialien.



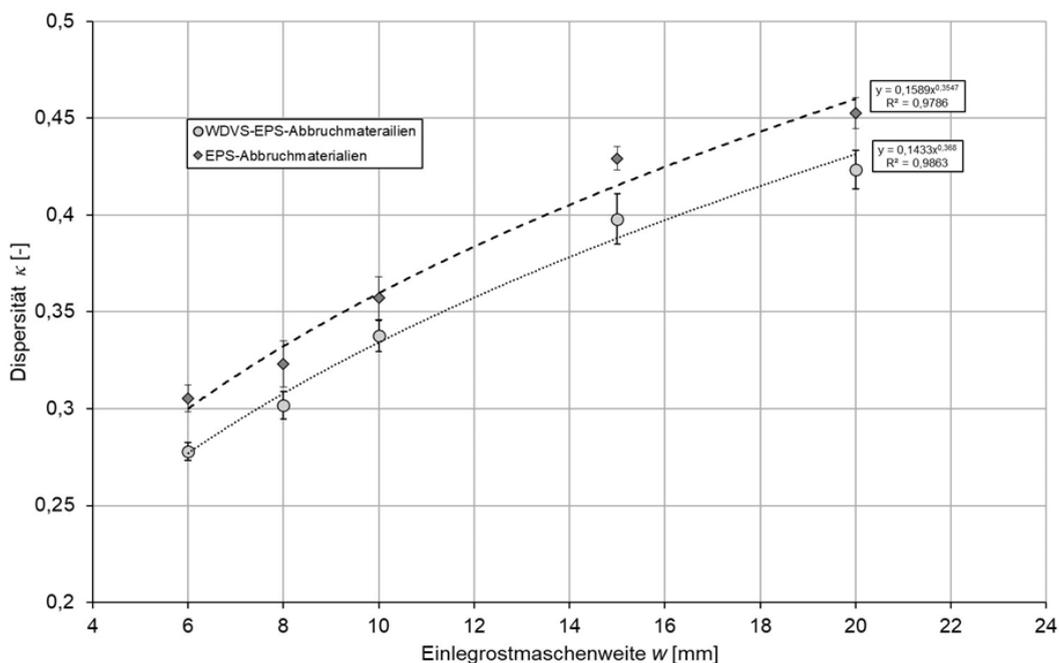
**Abbildung 2.10:** Einfluss der Einlegrostmaschenweite  $w$  auf die Verteilungssummenfunktionen  $Q_3(x_{c,min})$  der WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS sowie der sortenreinen EPS-Abbruchmaterialien unterschiedlicher Generationen

Wie zu erwarten kann aus Abbildung 2.10 geschlossen werden, dass die Einlegrostmaschenweite  $w$  einen direkten Einfluss auf die Verteilungssummenfunktionen  $Q_3(x_{c,min})$  besitzt. So nimmt diese mit kleineren Maschenweiten kontinuierlich ab. Dies zeigt sich sowohl für die WDVS-Abbruchmaterialien als auch für die EPS-Abbruchmaterialien. Weiterhin wird deutlich, dass die Verteilungssummenfunktionen der WDVS-Abbruchmaterialien für die jeweiligen Einlegroste in einem geringeren Partikelgrößenbereich verlaufen, als dies für die EPS-Abbruchmaterialien der Fall ist. Dies hängt mit den feinen Putzpartikeln zusammen, die sich in den Zerkleinerungsprodukten der WDVS anreichern und dabei die Summenfunktionen nach links verschieben. Für die Einlegroste  $w > 10$  mm zeigen die Verteilungssummenfunktionen überwiegend breite Verteilungen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich bei größeren Maschen deutlich mehr Polystyrolkugeln in einem Verbund befinden als bei kleineren Einlegrosten. Um die Funktionen näher beschreiben zu können, wurden die charakteristischen Kenngrößen  $x_{16,3}$ ,  $x_{50,3}$  und  $x_{84,3}$  mittels des CAMSIZER bestimmt. Entgegen den Erwartungen konnte ein direkter Zusammenhang zwischen den charakteristischen Kenngrößen und der Einlegrostmaschenweite  $w$  hergestellt werden, da aufgrund der zusätzlich hergestellten Einlegroste mehr Messpunkte in unterschiedlichen Bereichen generiert werden konnten. Abbildung 2.11 zeigt den direkten Zusammenhang zwischen der Einlegrostmaschenweite  $w$  und den mittels der dynamischen Bildanalyse bestimmten charakteristischen Kenngrößen ( $x_{16,3}$ ,  $x_{50,3}$  und  $x_{84,3}$ ). Wie Abbildung 2.11 zeigt, konnten sowohl für die WDVS-Abbruchmaterialien als auch für die EPS-Abbruchmaterialien lineare Funktionen nach  $y = m \cdot x + t$  mit positiver Steigung  $m$  und positivem Ordinatenabschnitt  $t$  bestimmt werden. So wird näherungsweise eine lineare Abnahme der Partikelgröße mit dem Abfall der Einlegrostmaschenweite  $w$  ersichtlich. Dies ist insofern ungewöhnlich, da es zu keiner linearen Abnahme der Siebfläche kommt. Ebenfalls ist auffallend, dass für alle charakteristischen Kenngrößen eine lineare Funktion angenähert werden konnte. Weiterhin konnten für alle Funktionen hohe Bestimmtheitsmaße im Bereich von  $0,97 \leq R^2 \leq 0,99$  ermittelt werden.



**Abbildung 2.11:** Zusammenhang zwischen der Einlegrostmaschenweite  $w$  und den charakteristischen Kenngrößen für die WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS sowie den sortenreinen EPS-Abbruchmaterialien

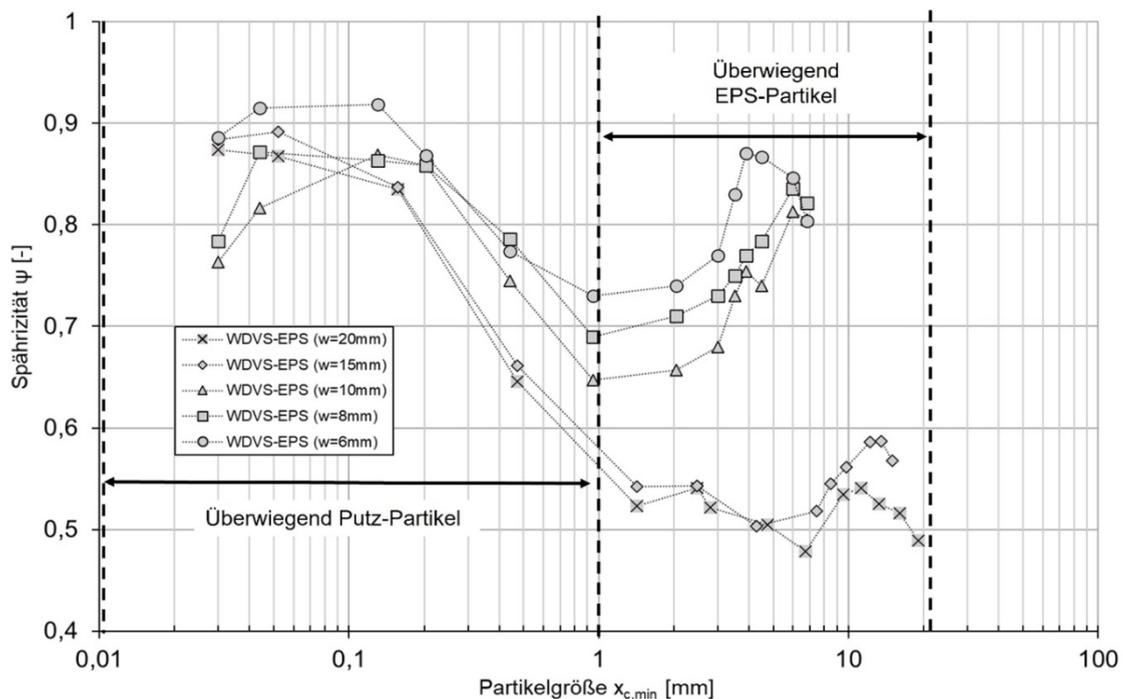
Die dargestellten Verteilungssummenfunktionen  $Q_3(X_{c,min})$  in Abbildung 2.10 zeigen, dass die Breite der Verteilung mit abnehmender Einlegrostmaschenweite kontinuierlich abnimmt. So nimmt die Dispersität der WDVS-Abbruchmaterialien vom größten zum kleinsten Einlegrost  $w$  von  $\kappa_{(w=20)} = 0,42$  auf  $\kappa_{(w=6)} = 0,28$ , und für die die EPS-Abbruchmaterialien von  $\kappa_{(w=20)} = 0,45$  auf  $\kappa_{(w=6)} = 0,31$  ab. Es konnte jedoch, wie in Abbildung 2.12 verdeutlicht, ein direkter Zusammenhang zwischen der Dispersität  $\kappa$  und der Einlegrostmaschenweite  $w$  festgestellt werden.



**Abbildung 2.12:** Zusammenhang zwischen der Einlegrostmaschenweite  $w$  und der volumenbezogenen Dispersität  $\kappa$  für WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS sowie die sortenreinen XPS-Abbruchmaterialien

Der Zusammenhang zwischen der Dispersität und der Einlegrostmaschenweite wird durch die Zunahme der Dispersität mit größer werdenden Einlegrostmaschen bzw. Siebflächen deutlich. Sowohl für die WDVS- als auch für die EPS-Abbruchmaterialien konnten Potenzfunktionen nach  $y = a * x^n$  mit positivem Exponenten  $n$  und positivem Faktor  $a$  für den betrachteten Bereich angenähert werden. Hierbei konnten hohe Bestimmtheitsmaße im Bereich von  $R^2 = 0,98$  ermittelt werden. Dieser Zusammenhang konnte für alle zerkleinerten Chargen der WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS bzw. der sortenreinen EPS-Abbruchmaterialien festgestellt werden.

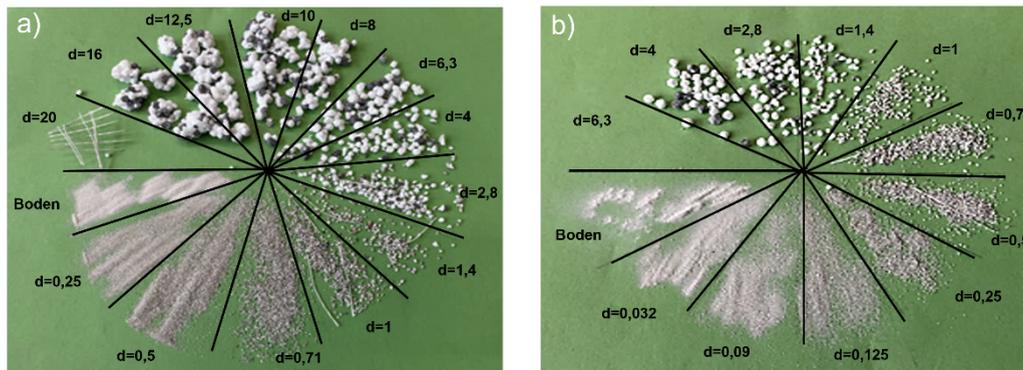
Abbildung 2.13 zeigt die ermittelten Sphäritäten  $\psi$  über der jeweiligen Partikelgrößen  $x_{c,min}$  der unterschiedlich verwendeten Einlegroste  $w$ . Wie auch bei den WDVS-Modellsystemen mit EPS nimmt die Sphärität  $\psi$  mit Abnahme der Einlegrostmaschenweite  $w$  stark zu. Es zeigt sich, dass die Sphärität für die jeweilige Partikelgröße einen ähnlichen Verlauf aufweist, welcher sich mit zunehmender Maschenweite nach unten verschiebt. Im Feingutbereich von  $0,03 \leq x \leq 1,0$  mm nimmt die Sphärität mit zunehmender Partikelgröße kontinuierlich ab. Wie bereits für die WDVS-Modellsysteme mit EPS erläutert wurde, resultiert dies aus irregulär geformten EPS-Resten sowie Faserückständen, welche eine geringe Sehnenlänge aufweisen und sich so in der Feinfraktion anreichern können. In diesem Bereich ist die mittlere Sphärität  $\psi_{Mittel}$  für die Zerkleinerungsprodukte mit einer Einlegrostmaschenweite von  $w = 6$  mm am größten.



**Abbildung 2.13:** Sphärität  $\psi$  in Abhängigkeit der Partikelgröße  $x_{c,min}$  für die unterschiedlichen Zerkleinerungsprodukte der WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS als Dämmstoffmaterial

Es wird aktuell davon ausgegangen, dass die Sphärität des Putzes bei kleiner werdenden Einlegrostmaschen stark zunimmt, wodurch sich auch der Anstieg der mittleren Sphärität in der Feinfraktion erklären ließe. Erwartungsgemäß steigt die Sphärität aller Zerkleinerungsprodukte in einem Partikelgrößenbereich von  $1,0 \leq x \leq 11$  mm wieder stark an. Dies ist auf den hohen Anteil an Polystyrol-Kugeln in dieser Fraktion zurückzuführen. Wie bereits vermutet werden die jeweiligen EPS-

Kugeln bei abnehmenden Maschenweiten weiter separiert, wodurch die Sphärizität ansteigt. Abbildung 2.14 zeigt die Anreicherung der jeweiligen Partikelgrößen mittels Siebanalyse für die Einlegroste von  $w = 20$  mm und 6 mm. Durch die Analyse der Rückstandsfraktionen wird der Unterschied im Verlauf der Sphärizitäten in Abbildung 2.13 verdeutlicht bzw. bestätigt. Es wird ersichtlich, dass sich bei den Zerkleinerungsprodukten mit einer Einlegrostmaschenweite von  $w = 20$  mm deutlich stärkere Verbünde von EPS-Partikeln in den Fraktionen der Siebmaschen  $d = 16 - 10$  mm anreichern. Hier zeigen sich überwiegend separierte EPS-Kugeln in den Siebfraktionen von  $d = 4 - 2,8$  mm. Somit konnten für diese Messungen hohe Sphärizitäten ermittelt werden. In den Chargen der reinen EPS-Proben konnten im Bereich von  $0,6 \leq x \leq 10,0$  mm keine Unterschiede in der Sphärizität zu den WDVS-Abbruchmaterialien festgestellt werden.

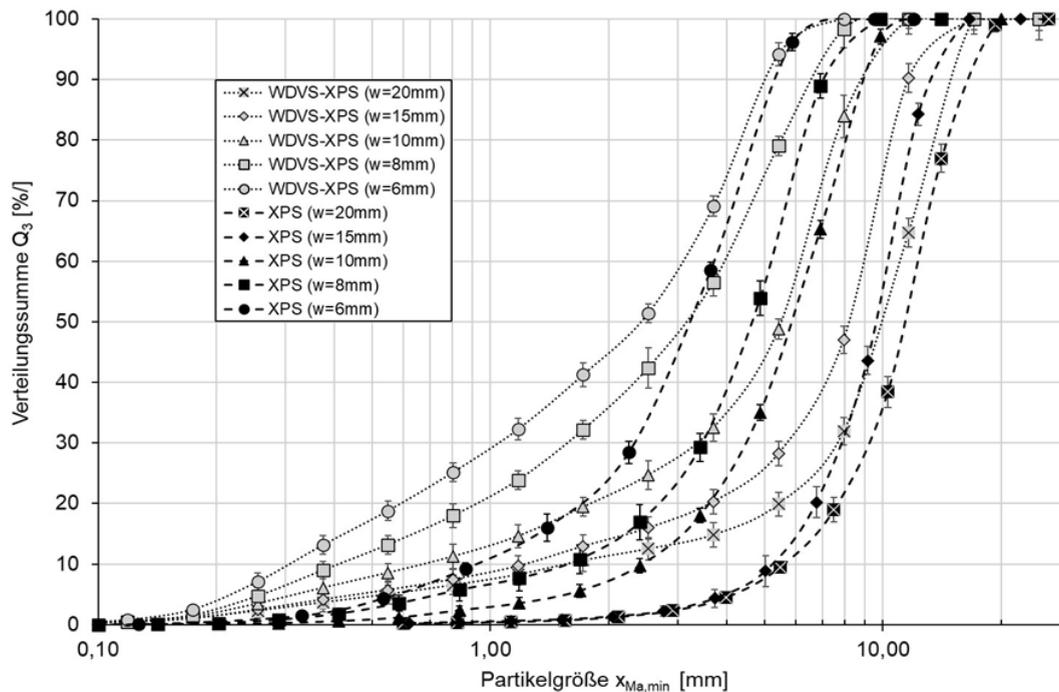


**Abbildung 2.14:** Rückstandsfraktionen der durchgeführten Siebturmanalyse für die Zerkleinerungsprodukte der WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS für die Einlegrostmaschenweite von  $w = 20$  mm (a) und 6 mm (b)

Da bei diesen Proben keine mineralischen Anteile vorhanden sind, lagern sich die Partikel überwiegend im Grobputzbereich an. Da keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten, soll in diesem Abschnitt nicht weiter darauf eingegangen werden. Die Untersuchung der Zerkleinerungsprodukte der WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS und der sortenreinen EPS-Abbruchmaterialien haben gezeigt, dass die jeweiligen partikulären Eigenschaften mittels der dynamischen Bildanalyse vollständig charakterisiert werden können. Erwartungsgemäß zeigten die jeweiligen Chargen an WDVS und EPS unterschiedlicher Generation nur geringfügige Unterschiede in der Charakterisierung.

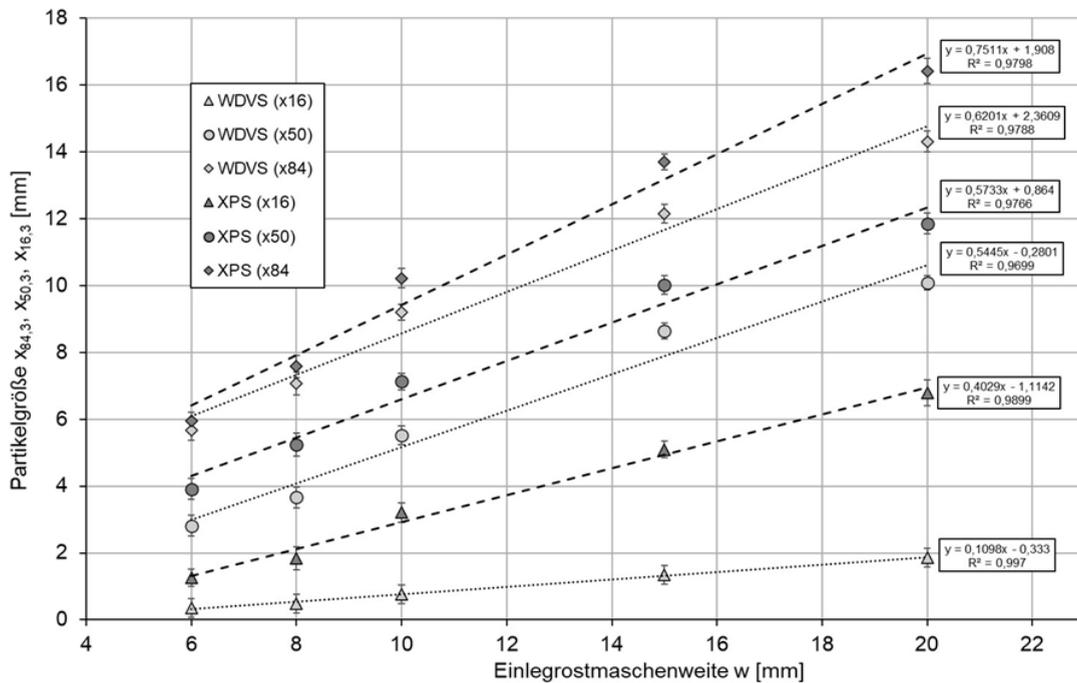
Im nächsten Schritt sollen nun die WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS sowie die sortenreinen XPS-Abbruchmaterialien betrachtet werden. Auch hier zeigten die Laborversuche einen signifikanten Einfluss der Prozessparameter auf die partikulären Eigenschaften der individuellen Zerkleinerungsprodukte. Wie schon bei den WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS konnten für die jeweiligen Chargen unterschiedlicher Generation keine signifikanten Unterschiede in den partikulären Eigenschaften festgestellt werden, wodurch die partikulären Kenngrößen gemittelt werden konnten. Die entsprechenden Standardabweichungen sind in den Diagrammen angegeben. Zum Zwecke der vollständigen Charakterisierung wurden die jeweiligen Zerkleinerungsprodukte mittels der dynamischen Bildanalyse im CAMSIZER vermessen. Abbildung 2.15 zeigt den Einfluss der Einlegrostmaschenweite  $w$  auf die gemittelten volumenbezogenen Verteilungssummenfunktionen  $Q_3(X_{Ma,min})$  der WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS, sowie auf die reinen XPS-Abbruchmaterialien. Erwartungsgemäß nimmt diese mit kleiner werden Maschen der Einlegroste kontinuierlich ab. Dies zeigt sich sowohl für die

WDVS- als auch die XPS-Abbruchmaterialien. Weiterhin konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den Verteilungssummenfunktionen der jeweiligen Einlegrostmaschenweite für WDVS und Dämmstoffe aufgezeigt werden. Dieser Unterschied fällt deutlicher aus als bei den WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS. Dies ist damit zu begründen, dass die Putzschicht der WDVS mit XPS deutlich dicker als die der WDVS mit EPS ist. So zeigt sich im Feingutbereich eine deutliche Verschiebung der volumenbezogenen Verteilungssummenfunktionen nach links. Grundsätzlich kommen WDVS mit XPS zur Perimeterdämmung zum Einsatz. Dabei werden im Vergleich zu herkömmlichen WDVS mit EPS häufig dickere Putzschichten an der Fassade verwendet. Die erweiterte Putzdicke und die daraus resultierenden Verläufe der Verteilungssumme konnten bei allen WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS unterschiedlicher Generation beobachtet werden.



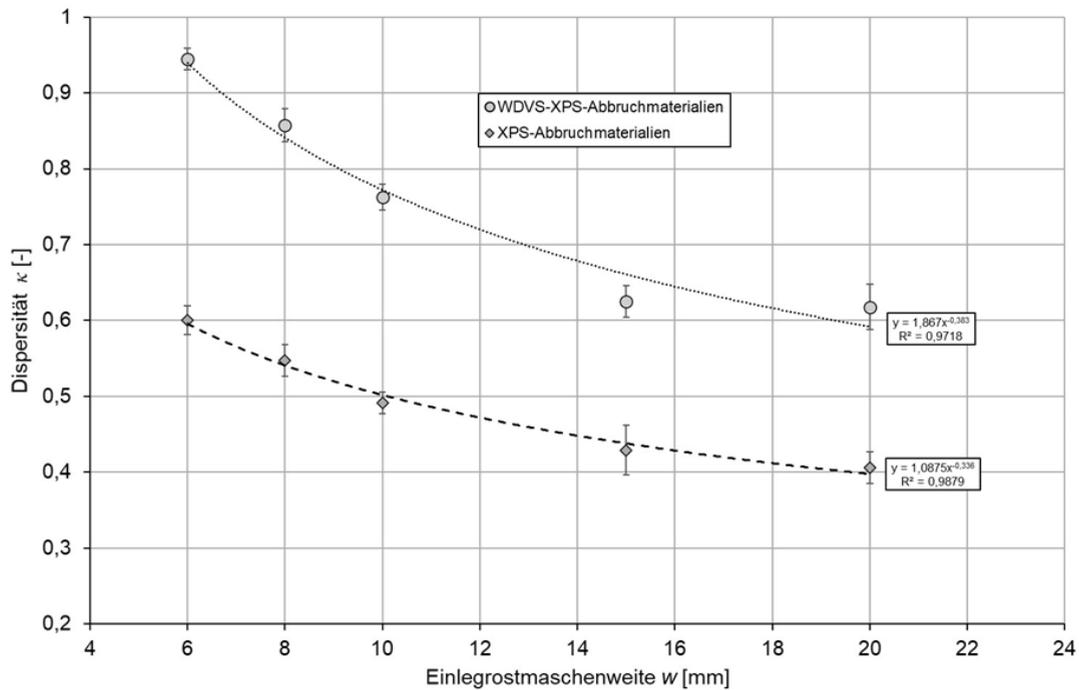
**Abbildung 2.15:** Einfluss der Einlegrostmaschenweite  $w$  auf die Verteilungssummenfunktionen  $Q_3(x_{Ma,min})$  der WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS, sowie auf die sortenreinen XPS-Abbruchmaterialien unterschiedlicher Generation

Um die jeweiligen Partikelgrößen-Summenfunktionen näher beschreiben zu können, wurden erneut die charakteristischen Kenngrößen  $x_{16,3}$ ,  $x_{50,3}$  und  $x_{84,3}$  mittels der dynamischen Bildanalyse bestimmt. Weiterhin konnte ein direkter linearer Zusammenhang zwischen den charakteristischen Kenngrößen und der Einlegrostmaschenweite  $w$  hergestellt werden. Dies ist insofern erstaunlich, als XPS ein anderes Bruchverhalten als EPS aufweist. Abbildung 2.16 zeigt den direkten Zusammenhang zwischen der Einlegrostmaschenweite  $w$  und den mittels der dynamischen Bildanalyse bestimmten charakteristischen Kenngrößen ( $x_{16,3}$ ,  $x_{50,3}$  und  $x_{84,3}$ ). Die in Abbildung 2.16 angenäherten linearen Funktionen nach  $y = m \cdot x + t$  weisen eine positive Steigung  $m$  und einen positiven Ordinateabschnitt  $t$  auf. Es zeigt sich also näherungsweise eine lineare Abnahme der Partikelgröße bei kleiner werdenden Einlegrosten. Weiterhin konnten für alle charakteristischen Kenngrößen lineare Funktionen bestimmt und auch angenähert werden. Für alle Funktionen konnten hohe Bestimmtheitsmaße im Bereich von  $0,97 \leq R^2 \leq 0,98$  ermittelt werden.



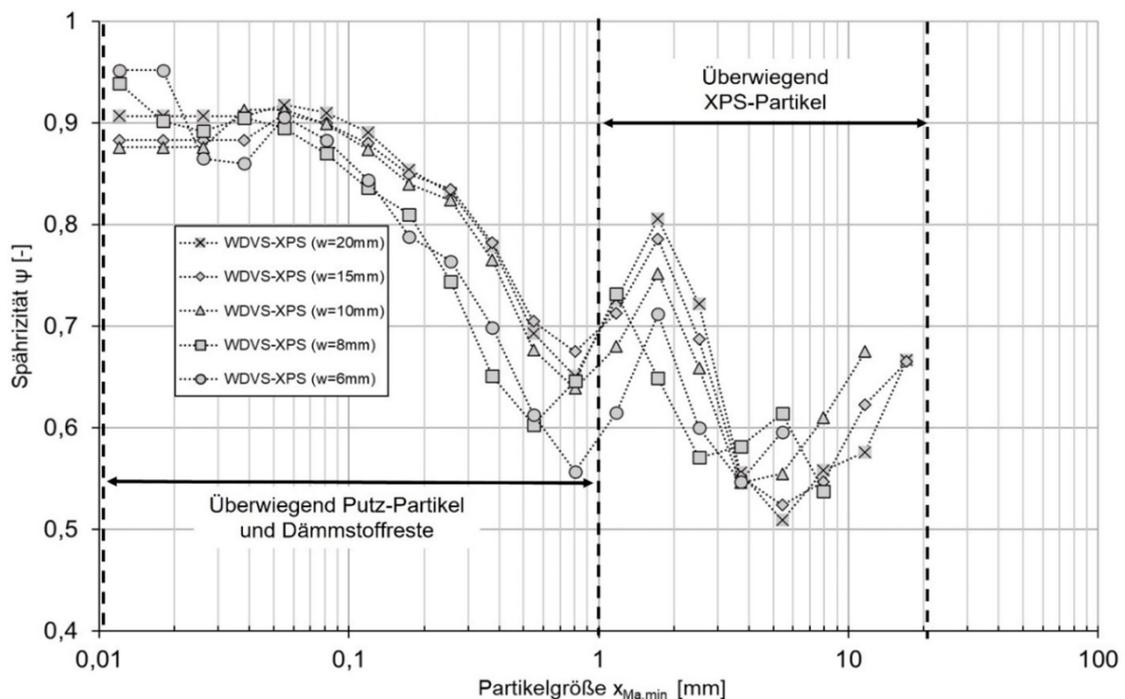
**Abbildung 2.16:** Zusammenhang zwischen der Einlegrostmaschenweite  $w$  und den charakteristischen Kenngrößen ( $X_{16,3}$ ,  $X_{50,3}$  und  $X_{84,3}$ ) für die WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS sowie die sortenreinen XPS-Abbruchmaterialien

Im Gegensatz zu den WDVS mit EPS bzw. dem reinem EPS zeigen die Verteilungssummenfunktionen in Abbildung 2.15 eine Zunahme der Breite mit abnehmender Einlegrostmaschenweite. Dies ist, wie bereits erläutert, auf die Materialeigenschaften und das Bruchverhalten des XPS zurückzuführen. Dieser Sachverhalt konnte erneut durch die aus den charakteristischen Kenngrößen errechneten Dispersitäten  $\kappa$  bestätigt werden. So nehmen diese für die WDVS-Abbruchmaterialien vom größten zum kleinsten Einlegrost  $w$  von  $\kappa_{(w=20)} = 0,61$  auf  $\kappa_{(w=6)} = 0,94$ , und für die XPS-Abbruchmaterialien von  $\kappa_{(w=20)} = 0,41$  auf  $\kappa_{(w=6)} = 0,6$ , stark zu. Aufgrund des deutlich höheren Putzanteiles sind die Unterschiede zwischen den WDVS und dem Dämmstoffmaterial in diesem Fall deutlich höher. Weiterhin konnte wie in Abbildung 2.17 dargestellt, ein direkter Zusammenhang zwischen der Dispersität  $\kappa$  und der Einlegrostmaschenweite  $w$  festgestellt werden. Obenstehend wird die Abnahme der Dispersität bei größerer Einlegrostmaschenweite verdeutlicht. Sowohl für die WDVS-Abbruchmaterialien als auch für die XPS-Abbruchmaterialien konnten Potenzfunktionen nach  $y = a * x^n$  mit positivem Exponenten  $n$  und negativem Faktor  $a$  für den betrachteten Bereich angenähert werden. Die ermittelten Bestimmtheitsmaße lagen im Bereich von  $R^2 = 0,98$ . Der dargestellte Zusammenhang konnte für alle Chargen der WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS bzw. der sortenreinen XPS-Abbruchmaterialien bestimmt werden. Die entsprechende Standardabweichung zwischen den unterschiedlichen WDVS bzw. Dämmstoffen unterschiedlicher Generation ist direkt im Diagramm angegeben.



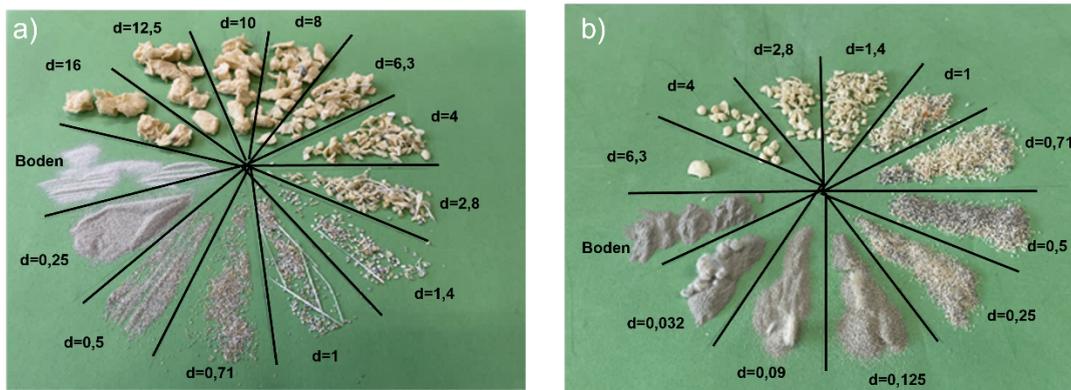
**Abbildung 2.17:** Zusammenhang zwischen der Einlegrostmaschenweite  $w$  und der volumenbezogenen Dispersität  $\kappa$  für WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS sowie die sortenreinen XPS-Abbruchmaterialien

Im Anschluss wurde für die WDVS der Verlauf der Sphärizität für die jeweiligen Partikelgrößen mittels der dynamischen Bildanalyse bestimmt. Abbildung 2.18 zeigt die ermittelten Sphärizitäten  $\psi$  für die jeweiligen Partikelgrößen  $x_{Ma,min}$  der verwendeten Einlegroste  $w$ .



**Abbildung 2.18:** Sphärizität  $\psi$  in Abhängigkeit der Partikelgröße  $x_{Ma,min}$  für die unterschiedlichen Zerkleinerungsprodukte der WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS als Dämmstoffmaterial

Die Einlegrostmaschenweite  $w$  bei WDVS mit XPS hat keinen direkten Einfluss auf die Sphärizität  $\psi$ . Alle Zerkleinerungsprodukte weisen einen ähnlichen Verlauf für die jeweiligen Sphärizitäten auf. Wie bereits bei WDVS mit EPS beobachtet werden konnte, nimmt die Sphärizität im Feingutbereich von  $0,01 \leq x \leq 1,0$  mm mit steigender Partikelgröße ab. Dies resultiert unter anderem aus den irregulär geformten Dämmstoffresten, den unterschiedlichen Putzpartikeln, sowie den enthaltenen Fasersrückständen. In diesem Bereich schwankt die mittlere Sphärizität  $\psi_{Mittel}$  für die jeweiligen Zerkleinerungsprodukte. Auch hier wird davon ausgegangen, dass die Sphärizität des Putzes bei kleiner werdenden Einlegrostmaschen  $w$  zunimmt. Allerdings schwanken die Sphärizitäten der XPS-Partikel in diesem Bereich sehr stark. Die Sphärizität steigt im Grobgutbereich  $1,0 \leq x \leq 16$  mm wieder leicht an, schwankt jedoch auch dort sehr stark. So konnte durch die irregulär geformten Dämmstoffpartikel des XPS kein direkter Einfluss der Einlegrostmaschenweite festgestellt werden. Der starke Anstieg der Sphärizität im Bereich von  $1,0 \leq x \leq 3$  mm ist auf die Putzpartikel zurückzuführen, die sich in diesem Maschenbereich anreichern. Abbildung 2.19 zeigt die Anreicherung der jeweiligen Partikelgrößen mittels einer Siebanalyse für die Einlegeroste von  $w = 20$  mm und 6 mm.



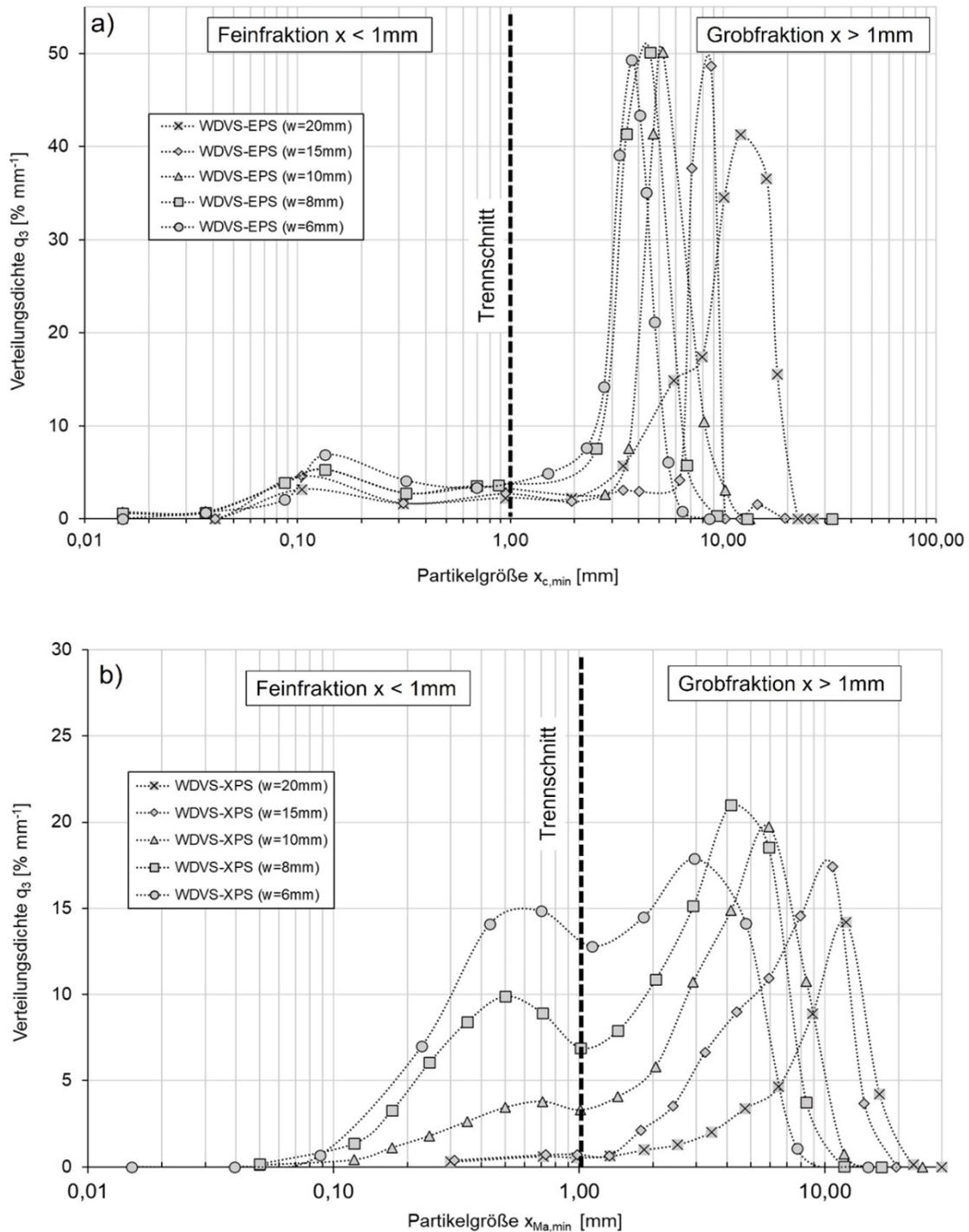
**Abbildung 2.19:** Rückstandsfraktionen der durchgeführten Siebturmanalyse für die Zerkleinerungsprodukte der WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS für die Einlegrostmaschenweite von  $w = 20$  mm (a) und 6 mm (b)

Mithilfe der Methode der dynamischen Bildanalyse konnten die individuellen Zerkleinerungsprodukte der WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS und die sortenreinen XPS-Abbruchmaterialien vollständig charakterisiert werden. Auch hier zeigen die verschiedenen WDVS und XPS Chargen unterschiedlicher Generation keine signifikanten Unterschiede in der Charakterisierung. So konnten auch hier die jeweiligen Kenngrößen und Funktionen gemittelt werden.

## 2.6 Aufbereitung der individuellen Zerkleinerungsprodukte

Im Folgenden wird die Anwendung der entwickelten Recyclingstrategie auf die zerkleinerten WDVS-Abbruchmaterialien beschrieben. Da die Feinfraktion für den Prozessschritt der Windsichtung nicht geeignet ist und einer Sortenreinheit der abschließend erhaltenen Stoffströme im Weg stünde, wurde diese mittels Siebung von den Zerkleinerungsprodukten abgetrennt. Wie zuvor beschrieben hat der Massen- bzw. Volumenstrom keinen direkten Einfluss auf die partikulären Eigenschaften, wodurch auch hier die meisten Ergebnisse gemittelt werden konnten. Weiterhin wurden die partikulären Eigenschaften mittels der dynamischen Bildanalyse charakterisiert. Für die Abtrennung der Feinfrak-

tion kam ein Sieb mit der Maschenweite von  $d = 1 \text{ mm}$  zum Einsatz. Abbildung 2.20 zeigt die Verteilungsdichtefunktionen  $q_3(x)$  mit eingezeichnetem Trennschnitt für die Zerkleinerungsprodukte der WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS (a) und XPS (b) als Dämmstoffmaterial.



**Abbildung 2.20:** Einfluss der Einlegrosstmaschenweite  $w$  auf die Verteilungsdichtefunktionen  $q_3(x_{c,min} / x_{Ma,min})$  für die Zerkleinerungsprodukte der WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS (a) und XPS (b) mit eingezeichnetem Trennschnitt für die Abtrennung der Feinfraktion

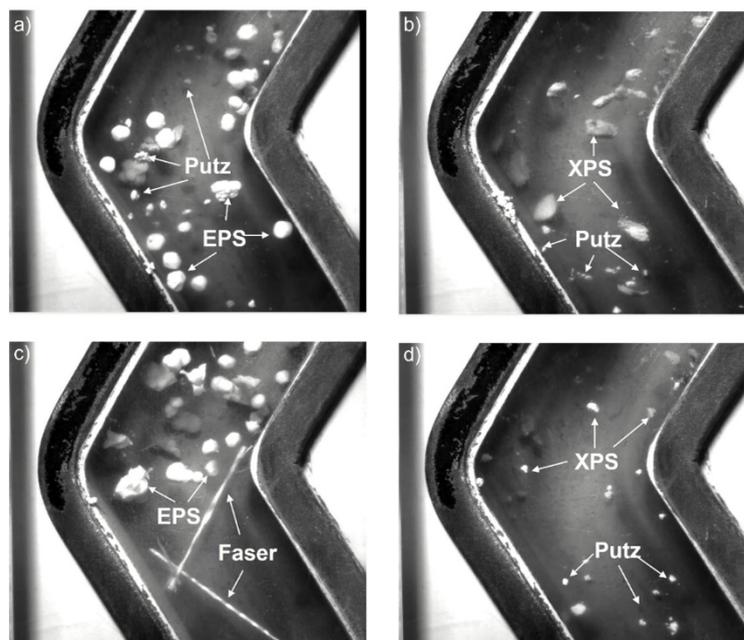
Die angewandte Siebmaschenweite kam zum Einsatz, da die Verteilungsdichtefunktionen  $q_3(x)$  für die Zerkleinerungsprodukte mit EPS und XPS eine bimodale Verteilung mit einem Minimum bei

---

$x \approx 1$  mm zeigten. Dieser bimodale Verlauf ist, wie bereits erwähnt, durch die Putzfraktion zu erklären. Weiterhin zeigt sich, dass der Feinanteil für die WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS deutlich größer ist als für jene mit EPS. Dies resultiert aus dem hohen Anteil an zusätzlichen XPS-Partikeln, die sich in diesem Bereich anlagern. Im Anschluss konnten die jeweiligen Feinfraktionen mit einer durchschnittlichen Siebzeit von ca.  $t = 6$  min für alle Zerkleinerungsprodukte abgetrennt werden.

Im nächsten Prozessschritt konnten die erzeugten Grob- und Feinfraktionen durch Windsichtung und Verwendung eines Zickzacksichters in sortenreine Stoffströme separiert werden. Hierbei waren unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten  $v_{Luft}$  für die jeweiligen Fraktionen bzw. Werkstoffe notwendig, um die Partikelkollektive auftrennen zu können. Da die Strömungsgeschwindigkeiten je nach Größe der jeweiligen Partikel und der enthaltenen Werkstoffe variieren, waren für die Grobfraktion der WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS im ersten Sichterschnitt Strömungsgeschwindigkeiten von  $v_{Luft} = 3,2 - 3,9$  m s<sup>-1</sup> notwendig, um den mineralischen Putzanteil vom Dämmstoffmaterial abzutrennen. Für die WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS mussten aufgrund der größeren Dichte des XPS höhere Geschwindigkeiten von  $v_{Luft} = 3,8 - 4,7$  m s<sup>-1</sup> realisiert werden. Nach diesem Schritt konnte zwar der Putz aus der Grobfraktion vollständig vom Dämmstoff abgetrennt werden, allerdings befand sich in der Leichtfraktion, also im Dämmstoffmaterial, noch ein großer Anteil an Glasfasergewebe. So musste in einem zweiten Sichterschnitt das Glasfasergewebe vom Dämmstoffmaterial abgetrennt werden. Hierfür waren Strömungsgeschwindigkeiten von  $v_{Luft} = 1,3 - 1,9$  m s<sup>-1</sup> für die WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS, und Strömungsgeschwindigkeiten von  $v_{Luft} = 1,7 - 2,6$  m s<sup>-1</sup> für die WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS notwendig. Durch diese beiden Sichterschnitte konnten alle Werkstoffe aus der Grobfraktionen rückgewonnen werden. Dies konnte für alle Zerkleinerungsprodukte der jeweilig verwendeten Einlegrostmaschenweiten  $w$  erfolgreich durchgeführt werden. So waren also für beide Systemarten zwei Sichterschnitte notwendig, um die Werkstofffraktionen auftrennen zu können. Im dritten Sichterschnitt wurde die durch die Siebklassierung erhaltene Feinfraktion separiert. Hierbei wurde zunächst der feinkörnige Putz abgetrennt. Dies war aufgrund der geringen Partikelgröße der Putzpartikel und der daraus resultierenden Haftkräfte bzw. des Agglomerationsverhaltens nur bedingt möglich. Die Strömungsgeschwindigkeiten, die nötig waren, um den Putz von den Fasern und Dämmstoffresten der Feinfraktion abtrennen zu können, lagen für die WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS bei  $v_{Luft} = 0,8 - 1,4$  m s<sup>-1</sup>, und für die WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS bei  $v_{Luft} = 0,9 - 1,5$  m s<sup>-1</sup>. Nach Abtrennung des Putzes aus der Feinfraktion konnte beobachtet werden, dass sich in der Mischfraktion ein Großteil der Fasern in Glasfaseragglomeraten bzw. Faserknäulen anlagert. Diese konnten im Folgenden durch einen zusätzlichen Klassierschritt aus der Mischfraktion abgetrennt werden. Hierfür waren für beide WDVS-Abbruchmaterial-Typen Strömungsgeschwindigkeiten von  $v_{Luft} = 1,1 - 1,2$  m s<sup>-1</sup> notwendig. Diese reicherten sich aufgrund ihres Gewichtes in der Schwerfraktion an. Die Mischfraktion, die sich in der Leichtfraktion angereichert hatte, konnte aufgrund der starken elektrostatischen Wechselwirkungen des EPS nicht weiter aufgetrennt werden. So enthält diese Mischfraktion Putz-, Dämmstoff-, Glasfaser- und Klebstoffreste, ihr Anteil fällt jedoch sehr gering aus. Aufgrund der geringeren Haftkräfte des XPS konnte durch einen fünften Sichterschnitt, dass Dämmstoffmaterial XPS aus dieser Mischfraktion überwiegend rückgewonnen werden. Hierbei waren Strömungsgeschwindigkeiten von  $v_{Luft} = 0,5 - 0,7$  m s<sup>-1</sup> nötig. Allerdings konnten auch hier das Dämmstoffmaterial nicht vollständig abgetrennt werden, wodurch eine nicht weiter trennbare Mischfraktion entsteht.

Um den Prozess der Windsichtung besser beschreiben zu können, wurde die Durchführung mittels der in Kapitel 2.4 beschriebenen Hochgeschwindigkeitskamera untersucht. Die Untersuchungen konnten zeigen, dass die maßgebliche Trennung der jeweiligen Werkstoffe bereits in der ersten Sichterstufe des Strömungsklassierers (Zickzacksichter) stattfindet. Zwar werden aufgrund des Dichteunterschiedes einzelne Dämmstoffpartikel durch die Putzpartikel bis in die zweite und dritte Stufe getragen, allerdings erfolgt anschließend durch die Strömungsgeschwindigkeit ein Auftrieb der Dämmstoffpartikel bis in die Leichtfraktion. So kam es zu Beginn der Laborversuche zu einem Fehlaustrag in den jeweiligen Fraktionen, der jedoch verschwand, nachdem die jeweils nötigen Strömungsgeschwindigkeiten eruiert werden konnten. Mittels der verwendeten Hochgeschwindigkeitskamera konnte die erste Sichterstufe durch umfangreiche Auslichtung im Detail betrachtet werden. Abbildung 2.21 zeigt exemplarisch aufgenommene Bilder der ersten Sichterstufe während des Windsichtungsprozesses. Hierbei wurde in Abbildung 2.21a und b die Abtrennung der Dämmstofffraktion aus der Grobfraktion betrachtet. Abbildung 2.21c zeigt die Separation der Fasern vom EPS-Dämmstoffmaterial, und Abbildung 2.21d die Abtrennung des XPS-Dämmstoffmaterials aus der Feinfraktion.



**Abbildung 2.21:** Aufnahmen der ersten Sichterstufe mit der Hochgeschwindigkeitskamera für die Abtrennung der Putz- von den Dämmstoffpartikeln in der Grobfraktion (a und b), die Abtrennung der Fasern vom Dämmstoffmaterial (c) und die Abtrennung des Dämmstoffmaterials vom Putz in der Feinfraktion

Aufgrund des großen Datenvolumens werden hier nur exemplarisch Bilder dargestellt, die während des Trennprozesses in der ersten Sichterstufe aufgenommen wurden. Wie bereits beschrieben, waren für die jeweiligen Zerkleinerungsprodukte unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten notwendig. So wurde im **1. Sichterschnitt** die Putzfraktion vom Dämmstoffmaterial und den Glasfasern abgetrennt (Grobfraktion), im **2. Sichterschnitt** die Glasfasern vom Dämmstoffmaterial abgetrennt (Grobfraktion), im **3. Sichterschnitt** der Putz vom Dämmstoffmaterial abgetrennt (Feinfraktion), im **4. Sichterschnitt** die Glasfaseragglomerate aus der Mischfraktion abgetrennt (Feinfraktion), und im **5. Sichterschnitt** das XPS Dämmstoffmaterial aus der Mischfraktion abgetrennt (Feinfraktion). Die maximale Standardabweichung für die jeweiligen Fraktionen aus den WDVS-Abbruchmaterialien der unterschiedlichen Generationen lag bei 7,6 %.

Durch die hier umfangreich durchgeführten mechanischen Laborversuche war es möglich, aus den komplexen WDVS-Abbruchmaterialien durch verfahrenstechnische Prozessschritte wie Zerkleinerung sowie Sieb- und Strömungsklassierung sortenreine Sekundärrohstoffe rückzugewinnen. In den folgenden Kapiteln werden die Reinheitsgrade sowie Stör- und Schadstoffe der jeweiligen Fraktionen ausführlich diskutiert. Abbildung 2.22 zeigt exemplarisch die rückgewonnenen Materialfraktionen aus den aufbereiteten WDVS-Abbruchmaterialien aus den Grob- (GF) und Feinfraktionen (FF).

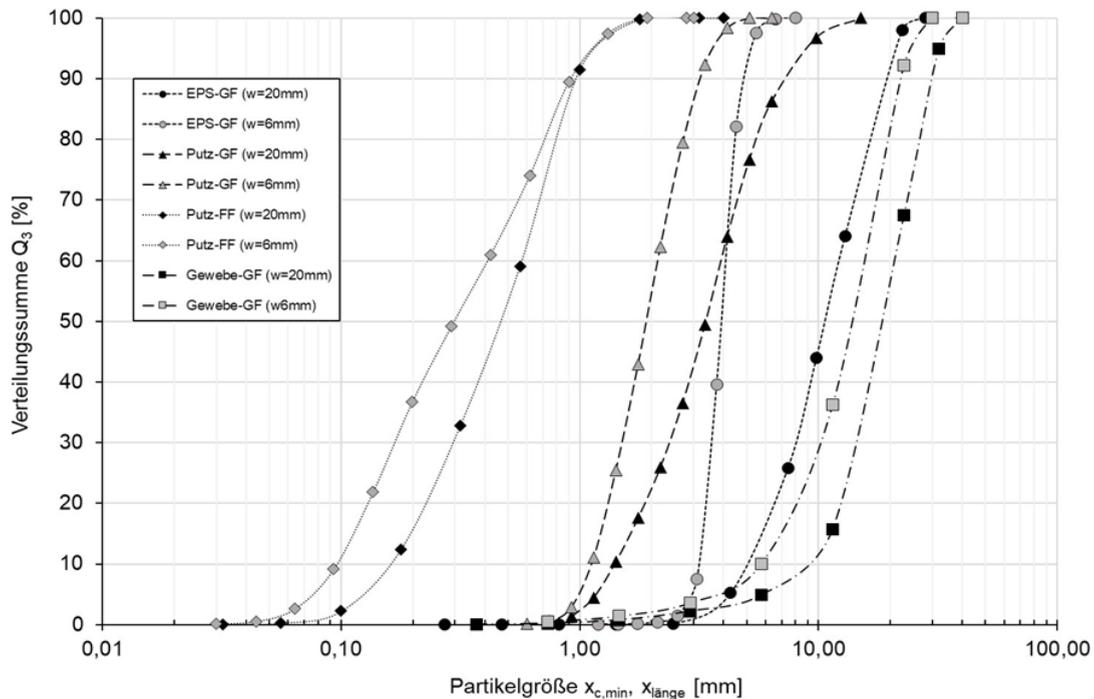


**Abbildung 2.22:** Exemplarische Darstellung der rückgewonnenen Sekundärrohstoffe aus den WDVS-Abbruchmaterialien; EPS aus der GF (a), XPS aus der GF (b), Putz aus der GF(c), Putz aus der FF (d), Glasfasern aus der GF (e) sowie Glasfaseragglomerate aus der FF (f)

## 2.7 Charakterisierung der partikulären Eigenschaften der rückgewonnenen Sekundärrohstoffe

Nachdem die WDVS-Abbruchmaterialien durch die im Recyclingplan festgelegten verfahrenstechnischen Prozessschritte erfolgreich aufbereitet werden konnten, wird in diesem Kapitel beschrieben, wie die jeweilig rückgewonnenen Werkstoffe in Bezug auf ihre partikulären Eigenschaften hin untersucht wurden. So stellen neben den charakteristischen Kenngrößen ( $x_{16,3}$ ,  $x_{50,3}$  und  $x_{84,3}$ ), der Sphärizität  $\psi$  und der Dispersität  $\kappa$ , die Kompressibilität  $\xi$  und die Fließfähigkeit  $H$  entscheidende Größen

für Transport und Weiterverarbeitung dar. Zunächst wurden die unterschiedlichen Fraktionen mittels der dynamischen Bildanalyse und der Siebanalyse untersucht. Wie bei allen bisherigen Ergebnissen wurden die jeweiligen Werte aufgrund der geringfügigen Unterschiede gemittelt. Abbildung 2.23 zeigt zusammengefasst die erhaltenen Verteilungssummenfunktionen  $Q_3(x_{c,min}, x_{länge})$  für die rückgewonnenen Sekundärrohstoffe der WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS für die größte und kleinste Einlegrostmaschenweite  $w$ .

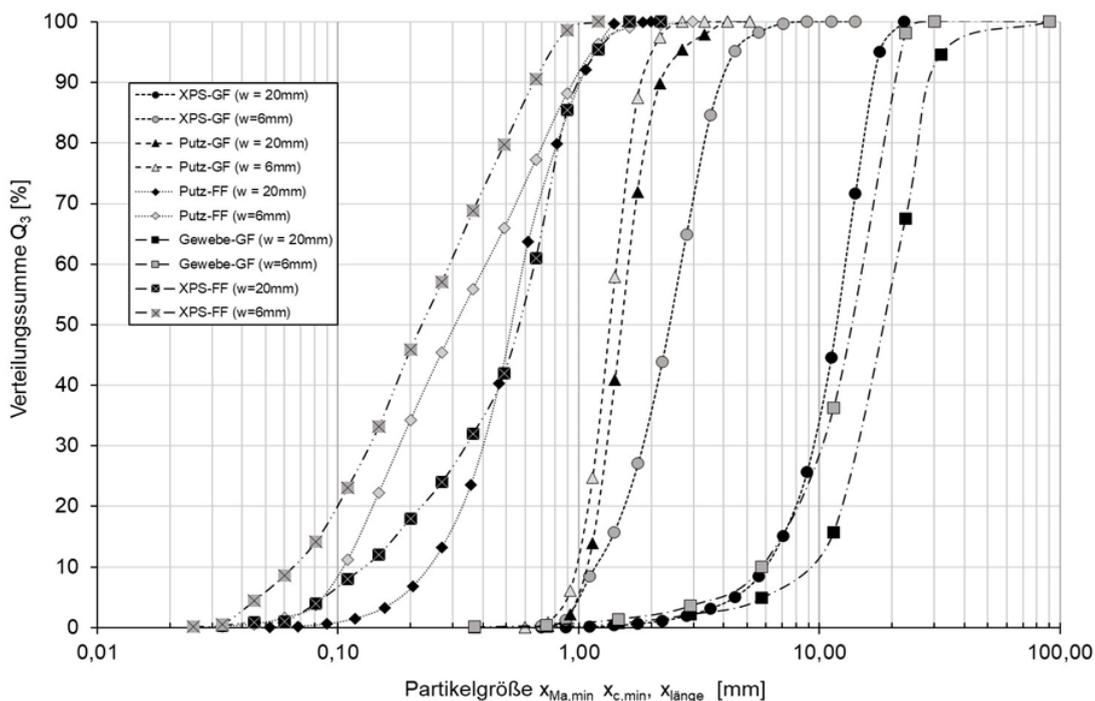


**Abbildung 2.23:** Verteilungssummenfunktion  $Q_3(x_{c,min}, x_{länge})$  in Abhängigkeit der Einlegrostmaschenweite  $w$  für die rückgewonnenen Sekundärrohstoffe der WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS

Wiederum zeigt die Einlegrostmaschenweite  $w$  einen signifikanten Einfluss auf die Verteilungssummenfunktionen der jeweils untersuchten Fraktionen. So nimmt das EPS aus der GF von der größten zur kleinsten Einlegrostmasche im Medianwert von  $x_{50,(w=20)} = 10,15$  mm auf  $x_{50,(w=6)} = 3,91$  mm ab. Wie zu erwarten, sinkt mit kleiner werdender Maschenweite die Dispersität  $\kappa$ . So nimmt diese von  $\kappa_{(w=20)} = 0,37$  auf  $\kappa_{(w=6)} = 0,14$  kontinuierlich ab. Beim rückgewonnenen EPS handelt es sich also um quasimonodisperse Verteilungen. Im gleichen Zug steigt die mittlere Sphärizität  $\psi_{Mittel}$  mit kleiner werdenden Einlegrostmaschen von  $\psi_{Mittel,(w=20)} = 0,70$  auf  $\psi_{Mittel,(w=6)} = 0,89$ . Weiterhin zeigt sich eine deutliche Partikelgrößenreduktion des Putzes aus der Grobfraction, wobei  $x_{50,(w=20)} = 3,34$  mm auf  $x_{50,(w=6)} = 1,90$  mm abnimmt. Die Dispersität sinkt für den Putz von  $\kappa_{(w=20)} = 0,79$  auf  $\kappa_{(w=6)} = 0,31$ . So wird eine anfänglich polydisperse Verteilung in eine quasimonodisperse Verteilung umgewandelt. Wie bereits vermutet, steigt auch für den Putz die Sphärizität  $\psi_{Mittel}$ . So nimmt diese von  $\psi_{Mittel,(w=20)} = 0,66$  auf  $\psi_{Mittel,(w=6)} = 0,79$  zu. Auch hier zeigt sich, dass der Einlegrost einen direkten Einfluss auf die partikulären Eigenschaften bzw. Sehnenlängen der Fasern aus der Grobfraction hat. So nimmt die mittlere Partikelgröße von  $x_{50,(w=20)} = 16,46$  mm auf  $x_{50,(w=6)} = 12,88$  mm ab. Weiterhin sinkt die Verteilungsbreite der Funktionen von  $\kappa_{(w=20)} = 0,75$  auf  $\kappa_{(w=6)} = 0,28$ . Die Sphärizität der Fasern wurde aufgrund deren Partikelform nicht bestimmt. Die weiteren Verteilungssummenfunktionen in Abbildung 2.23 beschreiben die Partikelgrößenreduktion des rückgewonnenen Putzes aus der Feinfraction. Hierbei konnten die geringsten Unterschiede

zwischen dem größten und kleinsten Einlegrost festgestellt werden. So nimmt der Medianwert der Funktionen von  $x_{50,(w=20)} = 0,52$  mm auf  $x_{50,(w=6)} = 0,27$  mm ab. Im direkten Vergleich zu den anderen Fraktionen kommt es zu einer Zunahme der Dispersität mit kleiner werdender Maschenweite. So steigt die Dispersität von  $K_{(w=20)} = 0,69$  auf  $K_{(w=6)} = 1,27$ , wobei sich diese Putzpartikel in einem größeren Partikelbereich anlagern. Da es bei geringeren Einlegrostmaschenweiten zu höheren Verweilzeiten des Aufgabegutes im Mahlraum kommt, wird davon ausgegangen, dass manche Putzpartikel stärker durch das Mahlwerk beansprucht werden und somit vermehrt Partikel im Feingutbereich entstehen. Dennoch steigt die Sphärizität für diese Fraktion von  $\psi_{50,(w=20)} = 0,46$  auf  $\psi_{50,(w=6)} = 0,69$ .

In Abbildung 2.24 befinden sich die zusammengefassten Verteilungssummenfunktionen  $Q_3(x_{c,min}, x_{länge})$  für die rückgewonnenen Sekundärrohstoffe der WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS in Abhängigkeit der Einlegrostmaschenweite  $w$ .



**Abbildung 2.24:** Verteilungssummenfunktion  $Q_3(x_{Ma,min}, x_{c,min}, x_{länge})$  in Abhängigkeit der Einlegrostmaschenweite  $w$  für die rückgewonnenen Sekundärrohstoffe der WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS

Für die aufbereiteten Sekundärrohstoffen der WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS zeigt sich wiederum der direkte Einfluss der Einlegrostmaschenweite  $w$  auf alle rückgewonnenen Werkstofffraktionen. Der Medianwert  $x_{50}$  der rückgewonnenen XPS-Fraktion sinkt von der kleinsten zur größten Einlegrostmasche von  $x_{50,(w=20)} = 13,04$  mm auf  $x_{50,(w=6)} = 4,01$  mm. Im direkten Vergleich zum rückgewonnenen EPS steigt mit kleiner werdenden Maschen die Dispersität  $\kappa$ , wobei die Breite der Funktion kontinuierlich von  $(w=20) = 0,33$  auf  $K_{(w=6)} = 0,39$  zunimmt. Die Funktionen können dennoch als quasimonodispers bezeichnet werden. Ebenfalls kann im Vergleich zu den Zerkleinerungsprodukten der WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS eine leichte Zunahme der Sphärizität beobachtet werden. Diese steigt von  $\psi_{Mittel,(w=20)} = 0,54$  auf  $\psi_{Mittel,(w=6)} = 0,67$  an. Erneut konnte eine Verkleinerung der Partikelgröße für den Putz aus der Grobfraktion festgestellt werden. Diese sinkt von

---

$x_{50(w=20)} = 1,82$  mm auf  $x_{50(w=6)} = 1,45$  mm. Es zeigt sich, dass dieser Putz im Vergleich zum rückgewonnenen Putz aus der Grobfraction der WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS eine deutlich geringere Körnung besitzt. Dies ist auf die unterschiedlichen Putzsorten zurückzuführen, die jeweils verwendet wurden. Weiterhin kommt es zu einer Abnahme der Dispersität des Putzes von  $\kappa_{(w=20)} = 0,29$  auf  $\kappa_{(w=6)} = 0,15$ . Die Sphärizität steigt von  $\psi_{Mittel,(w=20)} = 0,61$  auf  $\psi_{Mittel,(w=6)} = 0,87$ . Ebenfalls konnte ein signifikanter Einfluss der Einlegrostmaschenweite auf die Sehnenlänge der Fasern in der Grobfraction beobachtet werden. So nimmt die mittlere Partikelgröße  $x_{Länge}$  von  $x_{50,(w=20)} = 16,78$  mm auf  $x_{50,(w=6)} = 12,69$  mm ab und zeigt damit nur geringe Abweichungen zu den Fasern aus den WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS. Die Breite der Verteilungssummenfunktionen nimmt erneut für die Fasern ab und sinkt von  $\kappa_{(w=20)} = 0,89$  auf  $\kappa_{(w=6)} = 0,38$ . Die Sphärizität der Fasern wurde nicht bestimmt. Die mittlere Partikelgröße für den Putz aus der Feinfraction nimmt ebenfalls ab. So kommt es zu einer Partikelgrößenreduktion von  $x_{50,(w=20)} = 0,67$  mm auf  $x_{50,(w=6)} = 0,38$  mm. Auch hier steigt bei kleineren Einlegrostmaschen die Dispersität an. So nimmt diese von  $\kappa_{(w=20)} = 0,52$  auf  $\kappa_{(w=6)} = 0,89$  zu. Die Sphärizität steigt von  $\psi_{50,(w=20)} = 0,37$  auf  $\psi_{50,(w=6)} = 0,58$ . Zusätzlich konnte aus der Feinfraction ein erheblicher Anteil an Dämmstoffmaterial (XPS) rückgewonnen werden. Hier sinkt die mittlere Partikelgröße von  $x_{50,(w=20)} = 0,56$  mm auf  $x_{50,(w=6)} = 0,23$  mm. Wie bereit für das Dämmstoffmaterial aus der Grobfraction aufgezeigt, steigt die Dispersität von  $\kappa_{(w=20)} = 0,91$  auf  $\kappa_{(w=6)} = 1,14$ . Die Sphärizität steigt leicht von  $\psi_{50,(w=20)} = 0,49$  auf  $\psi_{50,(w=6)} = 0,58$ .

Neben den aufgeführten partikulären Eigenschaften stellen für den Transport und die Weiterverarbeitung der Sekundärrohstoffe die sogenannten Schütt- und Stampfdichten ( $\rho_{Schütt}$ ,  $\rho_{Stampf}$ ) eine entscheidende Kenngrößen dar. Insbesondere für die erhaltenen Dämmstofffraktionen spielen diese Größen eine entscheidende Rolle. Da es sich bei den aufbereiteten Dämmstofffraktionen um Materialfraktionen mit hohem Volumen, hoher Porosität und geringen Dichten handelt, stellt die physikalische Beanspruchung in den Bereichen Transport und Weiterverarbeitung einen essenziellen Faktor dar. Durch Kenntnis von Schütt- und Stampfdichten kann auf die Kompressibilität  $\zeta$  und die Fließfähigkeit, welche über den Hausner-Faktor  $H$  beschrieben werden kann, geschlossen werden. Tabelle 2.5 zeigt die ermittelten Kenngrößen für die rückgewonnenen Dämmstofffraktionen EPS und XPS.

**Tabelle 2.5:** Charakteristische Kenngrößen ( $\rho_{Schütt}$ ,  $\rho_{Stampf}$ ,  $\xi$  und  $H$ ) der Dämmstofffraktionen EPS und XPS aus den WDVS-Abbruchmaterialien in Abhängigkeit der Einlegrostmaschenweite  $w$

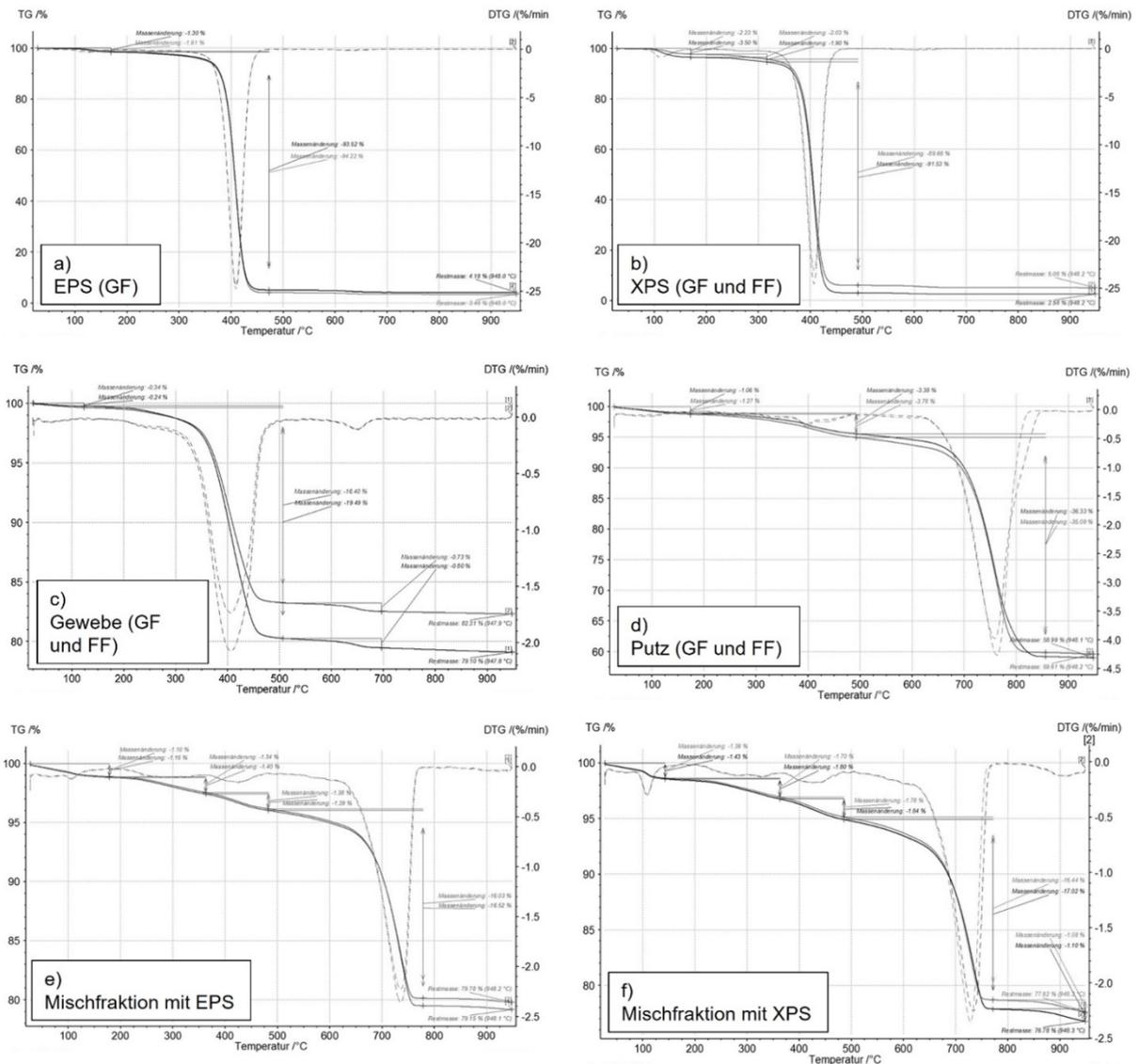
Einlegrostmaschenweite	Fraktion	Schüttdichte $\rho_{Schütt}$ [kg m <sup>-3</sup> ]	Stampfdichte $\rho_{Stampf}$ [kg m <sup>-3</sup> ]	Kompressibilität $\zeta$ [-]	Fließfähigkeit $H$ [-]
Sekundärrohstoff (w=20mm)	EPS	32,81	35,33	0,071	1,077
	XPS	15,71	17,19	0,087	1,095
Sekundärrohstoff (w=15mm)	EPS	20,48	21,94	0,067	1,071
	XPS	27,57	29,89	0,078	1,084
Sekundärrohstoff (w=10mm)	EPS	29,18	31,21	0,065	1,070
	XPS	30,88	33,19	0,070	1,075
Sekundärrohstoff (w=8mm)	EPS	29,89	31,98	0,065	1,070
	XPS	37,81	40,00	0,055	1,058
Sekundärrohstoff (w=6mm)	EPS	32,98	35,13	0,061	1,065
	XPS	39,84	42,18	0,055	1,058

Im Verlauf der Untersuchungen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Dämmstoffen unterschiedlicher Generation festgestellt werden. Hierbei lag die maximale Standardabweichung bei 5,4 %. Ebenfalls konnten keine Unterschiede zwischen den sortenrein abgebrochenen Dämmstoffen und den rückgewonnenen Dämmstoffen festgestellt werden. Hier lag die maximale Abweichung bei 4,1 %. Die Messungen zeigen sowohl für EPS als auch für XPS eine Abnahme der Kompressibilität  $\zeta$  mit kleiner werdenden Einlegrostmaschen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich kleinere Partikel, in diesem Fall die Dämmstoffpartikel, besser verdichten als größere Partikel. So nimmt die Kompressibilität von  $\zeta_{(w=20)} = 0,071$  auf  $\zeta_{(w=6)} = 0,061$  für EPS, und von  $\zeta_{(w=20)} = 0,087$  auf  $\zeta_{(w=6)} = 0,055$  für XPS ab. Es zeigt sich, dass die Kompressibilität für alle Einlegroste unter dem Grenzwert von  $\zeta \leq 0,2$  liegt. Umso niedriger die Kompressibilität ist, desto mehr verdichtet sich das Material unter physikalischen Einflüssen und gilt als gut fließfähig. In diesem Zusammenhang kann auch der sogenannte Hausner-Faktor  $H$  ermittelt werden. Dieser beschreibt die Volumenminderung durch physikalische Einflüsse wie Stampfen oder Vibration und spielt deshalb insbesondere bei Dämmstoffen eine entscheidende Rolle. Wie bereits vermutet, liegt der Hausner Faktor  $H$  sowohl für EPS als auch für XPS bei  $H > 1$ . Damit nähert er sich zwar bei abnehmender Einlegrostmaschenweite an  $H = 1$  an, kann diesen Wert jedoch nicht erreichen. Der Hausner Faktor nimmt für EPS von  $H_{(w=20)} = 1,077$  auf  $H_{(w=6)} = 1,065$ , und für XPS von  $H_{(w=20)} = 1,095$  auf  $H_{(w=6)} = 1,058$  ab. Somit konnte bestätigt werden, dass es durch Einwirkung von Vibration oder Erschütterungen zu einer Volumenabnahme der Partikelkollektive kommt. Dies hat erheblichen Einfluss auf den Transport und die Weiterverarbeitung, welcher dementsprechend berücksichtigt werden muss. Ebenfalls sei an dieser Stelle erwähnt, dass es bei den betrachteten Dämmstoffen häufig zu elektrostatischen Wechselwirkungen kommt. Dies muss bei einer entsprechenden Verarbeitung zusätzlich berücksichtigt werden.

---

## 2.8 Bestimmung der Sortenreinheit der individuell rückgewonnenen Sekundärrohstoffe (AP5 & AP6)

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens war es von essenzieller Bedeutung, die Reinheit der rückgewonnenen Werkstofffraktionen zu bestimmen, um den Recyclingprozess in Bezug auf die verwendeten Prozessschritte hinreichend bewerten zu können. In diesem Kapitel wird beschrieben, wie die in dieser Arbeit rückgewonnenen Sekundärrohstoffe im Anschluss an den Aufbereitungsprozess, einer thermografischen Analyse (TG-Analyse) unterzogen wurden. Dieser Vorgang wurde sowohl für die rückgewonnenen Sekundärrohstoffe der WDVS mit XPS und EPS unterschiedlicher Generation als auch für alle jeweils verwendeten Einlegrostmaschenweiten  $w$  durchgeführt. Die quantitative Untersuchung von organischen und anorganischen Inhaltsstoffen in den rückgewonnenen Fraktionen gestaltete sich sehr komplex. Aufgrund einer Überlagerung der Ergebnisse, die für die temperaturabhängigen Zersetzungsstufen des Ober- und Armierungsputzes erlangt werden konnten, können die beiden Putzsorten nur als ganze Einheit bewertet werden. Weiterhin gestaltete sich die Unterscheidung des Glasfasergewebes aufgrund der Überlagerung von Ergebnissen temperaturabhängiger Zersetzungsstufen ebenfalls als schwierig. Aus diesem Grund wurden als Referenzmessung Reinstoffproben der jeweiligen Schichten der WDVS analysiert. Hierbei konnten nur geringfügige Unterschiede bei den Putzschichten sowie im Glasfasergewebe festgestellt werden. Der erste auftretende Zersetzungsbereich zwischen  $T = 350 - 450 \text{ °C}$  ist durch die Zersetzung des Polystyrols charakterisiert, da sich in diesem Temperaturfenster organische Bestandteile zersetzen. Der zweite Zersetzungsbereich findet zwischen  $T = 500 - 750 \text{ °C}$  statt. Für diesen Temperaturbereich ist allgemein bekannt, dass sich mineralische Verbindungen wie Calciumhydroxid ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), Magnesiumhydroxid ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) und Magnesiumcarbonat ( $\text{MgCO}_3$ ) zersetzen. Die dabei entstehenden Zersetzungsprodukte sind Wasser, Kohlenstoffdioxid und elementarer Sauerstoff. Die Restmassen der nach einer Temperaturbehandlung von  $T = 750 \text{ °C}$  noch vorhandenen Proben verhielten sich auch bei einer Temperatur von  $T = 950 \text{ °C}$  als nichtflüchtig. Der Restmassen-Anteil setzt sich hauptsächlich aus Metall-Oxiden zusammen, welche zuvor als Kationen in den mineralischen WDVS-Bestandteilen enthalten waren. Abbildung 2.25 zeigt exemplarisch die erhaltenen Thermogramme der jeweilig rückgewonnenen Werkstofffraktionen. Hierbei ist auffällig, dass die Thermogramme der jeweilig gleichen Fraktionen nur geringfügige Unterschiede aufzeigen. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sich die über vergangene Generationen hinweg verbauten Materialien in ihrer Zusammensetzung weitestgehend ähnelten.



**Abbildung 2.25:** Exemplarische Darstellung der erhaltenen Thermogramme für die rückgewonnenen Werkstoffe aus den WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS und XPS aus der Grob- (GF) und Feinfraktion (FF). (a) EPS aus der GF, (b) XPS aus der GF und FF, (c) Armierungsgewebe aus der GF und FF, (d) Putz aus der GF und FF, (e) Mischfraktion mit EPS und (f) Mischfraktion mit XPS

Der hohe Massen-Anteil der Zersetzungsstufe 1 des rückgewonnenen EPS und XPS aus der Grobfraktion (Abbildung 2.25 a und b) ist ein klarer Hinweis darauf, dass diese hauptsächlich aus Polystyrol besteht. Bei der Restmasse, die auch noch bei höchsten TGA-Temperaturen über 950 °C übrig bleibt, könnte es sich um Metalloxide, sowie um schwerflüchtige, verkockte Kohlenstoff-Modifikationen handeln. Die Putz-Bestandteile aus der Grob- und Feinfraktion (Abbildung 2.25 d) nehmen nur einen geringen Massenanteil in der Zersetzungsstufe 1 ein, was auf einen geringen Anteil an EPS oder Gewebe zurückzuführen ist. Die Gewebefraktion (Abbildung 2.25 c) besteht optisch betrachtet nur aus Glasfasern. Ein Vergleich der Massenanteile der Zersetzungsprodukte der rückgewonnenen Glasfaserfraktion mit den Massenanteilen im Reinstoff zeigte jedoch jeweils nur geringe Abweichungen. Es kann deshalb angenommen werden, dass die rückgewonnenen Stoffströme einheitlich und nur geringfügig mit Bestandteilen anderer Fraktionen verunreinigt sind. Die beiden erhaltenen Mischfraktionen (Abbildung 2.25 e und f) zeigen einen erhöhten Massenanteil in der Zer-

setzungsstufe 1. Dieser ist darauf zurückzuführen, dass sich noch Polystyrol-, Klebstoff, und Glasfaserreste in dieser Fraktion befinden. In Tabelle 2.6 finden sich die gemittelten Ergebnisse der TGA für die jeweiligen Zersetzungsbereiche.

**Tabelle 2.6:** TGA bis 950 °C der durch den Aufbereitungsprozess rückgewonnenen Rezyklate aus den WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS und XPS als Dämmstoffmaterial

<b>Werkstoff</b>	<b>Zersetzungsbereich 1 300 – 450 °C Masse [wt.-%]</b>	<b>Zersetzungsbereich 2 500 – 750 °C Masse [wt.-%]</b>	<b>Restmasse nach 950 °C Masse [wt.-%]</b>
<b>Reinstoffe</b>			
EPS	93,2 ± 0,15	5,2 ± 0,11	1,6 ± 0,16
XPS	91,8 ± 0,12	4,8 ± 0,15	3,4 ± 0,12
Armierungsputz	/	35,4 ± 0,12	65,1 ± 0,14
Oberputz	/	32,2 ± 0,15	64,0 ± 0,14
Gewebe	19,1 ± 0,10	/	78,9 ± 0,11
<b>Rezyklate</b>			
<b>WDVS mit EPS</b>			
EPS (GF)	91,6 ± 1,31	4,7 ± 0,58	3,7 ± 0,64
Putz (GF)	1,2 ± 0,03	34,2 ± 3,21	64,6 ± 3,49
Putz (FF)	2,7 ± 0,08	33,8 ± 2,56	63,5 ± 2,87
Gewebe (GF)	21,7 ± 1,16	2,2 ± 0,05	76,1 ± 1,21
Gewebe (FF)	20,2 ± 1,11	2,3 ± 0,05	77,5 ± 1,26
Mischfraktion (FF)	7,8 ± 2,11	32,4 ± 2,47	58,8 ± 2,81
<b>Rezyklate</b>			
<b>WDVS mit XPS</b>			
XPS (GF)	90,8 ± 1,21	5,2 ± 0,49	4,0 ± 0,52
XPS (FF)	88,4 ± 1,21	7,1 ± 0,58	4,5 ± 0,57
Putz (GF)	1,9 ± 0,07	33,9 ± 3,18	64,2 ± 3,22
Putz (FF)	2,1 ± 0,13	31,8 ± 3,17	66,1 ± 3,28
Gewebe (GF)	22,8 ± 1,27	3,1 ± 0,17	74,1 ± 1,35
Gewebe (FF)	20,7 ± 1,14	2,4 ± 0,04	76,9 ± 1,89
Mischfraktion (FF)	11,5 ± 3,24	29,6 ± 3,16	58,9 ± 3,58

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass nur geringfügige Unterschiede zwischen den jeweiligen Rezyklaten und der verwendeten Einlegrostmaschenweite  $w$  vorliegen. Die zugehörigen Standardabweichungen wurden in Tabelle 2.6 angegeben. Vergleicht man die Ergebnisse der Reinstoffproben mit den Rezyklaten, so zeigt sich, dass durch die entwickelte Verwertungsstrategie überwiegend sortenreine Stoffströme rückgewonnen werden konnten.

## 2.9 Bestimmung von Inhaltsstoffen und der mineralogischen Zusammensetzung der rückgewonnenen Sekundärrohstoffe

Aufgrund umwelttechnischer Aspekte und der jeweiligen rechtlichen Rahmenbedingungen war es von entscheidender Bedeutung, die elementare- und die mineralogische Zusammensetzung der erhaltenen Rezyklate zu ermitteln. So müssen diese vorgegebenen Grenzwerte erfüllen, damit sie erneut als Sekundärrohstoffe verwendet werden können. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde die Einstufung nach dem RC-Leitfaden Bayern herangezogen, der die Anforderungen an die

Verwertung von Bauschutt in technischen Bauwerken regelt. Aufgrund der umfangreich durchgeführten Analysen werden im Rahmen dieses Berichtes nur die wichtigsten Elemente bzw. Schwermetalle aufgezeigt. In einem ersten Schritt wurden die individuellen Fraktionen mittels der ICP-OES auf ihre elementare Zusammensetzung hin untersucht (Tabelle 2.7 und 2.8). So konnten die jeweiligen Gehalte an Calcium (Ca), Aluminium (Al), Kupfer (Cu), Chrom (Cr), Zink (Zn) und Schwefel (S) untersucht werden.

**Tabelle 2.7:** ICP-OES-Analyse von Haupt- Neben und Spurenelementen in rückgewonnenen Stoffströmen aus WDVS-Abbruchmaterial mit EPS als Dämmstoffmaterial

Element	Ca [g kg <sup>-1</sup> ]	Al [mg kg <sup>-1</sup> ]	Cr [mg kg <sup>-1</sup> ]	Ni [mg kg <sup>-1</sup> ]	Zn [mg kg <sup>-1</sup> ]	S [mg kg <sup>-1</sup> ]
<b>Rezyklate WDVS (Jahr 1986)</b>						
EPS (GF)	27,7	1435	10,4	4,6	79,7	247,8
Putz (GF)	254,5	2133	28,9	9,9	26,9	780,1
Putz (FF)	243,0	1976	31,5	6,1	24,7	634,5
Gewebe (GF)	86,1	49495	26,1	3,7	5,5	1217
Gewebe (FF)	87,55	49343	26,2	3,9	5,2	1233
Mischfraktion (FF)	233,0	2069	29,9	7,5	22,4	857,6
<b>Rezyklate WDVS (Jahr 1997)</b>						
EPS (GF)	24,9	1296	7,4	4,4	81,7	284,1
Putz (GF)	241,3	2371	24,6	12,8	21,2	693,8
Putz (FF)	226,8	2295	17,4	10,8	25,3	677,2
Gewebe (GF)	77,1	50281	15,3	4,8	7,2	981
Gewebe (FF)	82,5	50149	13,4	5,4	7,2	979
Mischfraktion (FF)	218,7	1489	20,1	3,8	18,7	584,2
<b>Rezyklate WDVS (Jahr 2000)</b>						
EPS (GF)	26,3	1619	9,1	4,1	77,9	272,9
Putz (GF)	241,7	2386	27,2	5,8	24,3	723,1
Putz (FF)	244,1	1849	24,6	7,2	22,8	716,4
Gewebe (GF)	85,2	49297	19,4	5,3	6,9	1183
Gewebe (FF)	84,9	49312	19,1	4,8	6,9	1197
Mischfraktion (FF)	223,9	1722	22,7	6,2	18,2	746,3

**Tabelle 2.8:** ICP-OES-Analyse von Haupt- Neben und Spurenelementen in rückgewonnenen Stoffströmen aus WDVS-Abbruchmaterial mit XPS als Dämmstoffmaterial

Element	Ca [g kg <sup>-1</sup> ]	Al [mg kg <sup>-1</sup> ]	Cr [mg kg <sup>-1</sup> ]	Ni [mg kg <sup>-1</sup> ]	Zn [mg kg <sup>-1</sup> ]	S [mg kg <sup>-1</sup> ]
<b>Rezyklate WDVS (Jahr 1986)</b>						
XPS (GF)	23,2	1374	8,2	5,3	56,8	223,4
XPS (FF)	23,1	1341	7,9	5,1	58,1	221,8
Putz (GF)	244,7	1739	23,87	10,4	23,7	741,5
Putz (FF)	232,7	1722	24,41	10,5	23,4	781,1
Gewebe (GF)	91,2	51629	22,1	2,9	4,2	1187
Gewebe (FF)	90,6	51481	22,7	3,2	4,5	1188
Mischfraktion (FF)	229,7	1674	19,6	7,8	21,1	644,8
<b>Rezyklate WDVS (Jahr 1997)</b>						
XPS (GF)	24,8	1522	6,7	4,8	71,5	262,7
XPS (FF)	24,8	1499	6,6	4,3	72,4	258,1
Putz (GF)	286,2	2145	19,7	10,1	24,4	622,3
Putz (FF)	277,2	2174	19,4	10,1	22,8	687,9
Gewebe (GF)	86,7	50971	15,4	5,4	4,6	1387
Gewebe (FF)	86,1	50759	15,3	5,4	4,6	1379
Mischfraktion (FF)	271,6	1892	18,2	9,8	22,7	654,4
<b>Rezyklate WDVS (Jahr 2000)</b>						
XPS (GF)	23,9	1481	6,2	5,8	62,1	235,2
XPS (FF)	24,1	1479	6,2	5,6	62,2	231,9
Putz (GF)	266,1	2261	22,4	10,5	44,2	746,1
Putz (FF)	265,4	2197	21,7	10,2	44,9	786,6
Gewebe (GF)	90,7	49895	18,2	2,3	5,9	1288
Gewebe (FF)	89,5	50007	17,6	2,5	5,8	1271
Mischfraktion (FF)	257,8	1866	20,2	7,6	34,5	722,2

Aus der Literatur ist allgemein bekannt, dass in mineralischen Putzen von WDVS die Verbindungen Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ), Quarzit ( $\text{SiO}_2$ ), Dolomit ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) und Portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) enthalten sind [43–45]. Hierdurch kann der hohe Calcium-Gehalt der rückgewonnenen Putzfraktionen aus der Leicht- und Grobfraction, sowie der Mischfraktion erklärt werden. Glasfasergewebe enthält üblicherweise Siliziumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) und Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ) wodurch sich die erhöhten Anteile an Aluminium und Silicium in der Gewebefraktion erklären lassen. Für die Wiederverwertung der erhaltenen Sekundärrohstoffe in neuen Bau-Produkten, spielen die Schwermetall-Gehalte, u.a. Chrom, Nickel, Quecksilber, Blei und Zink, eine entscheidende Rolle. Weiterhin sind schwankende Schwefel- bzw. Sulfat-Gehalte als Störstoffe bei der Herstellung sowie Nutzung von RC-Baustoffen zu betrachten. Diese befinden sich jedoch unter den in Bayern für Recycling-Baustoffe vorgeschriebenen Richtwerten (RW 1-2). Eine besondere Herausforderung in mineralischen Baurestoffen stellen Störstoffe wie Sulfate ( $\text{SO}_4$ ) dar. Bei der Deponierung oder während des Recyclingprozesses können sich Sulfat-Ionen lösen, wodurch die gesetzlich zulässige Sulfatmenge im Abwasser überschritten wird. Somit wurde an den jeweils rückgewonnenen Putzen nach DIN 19528 ein Perkolationsverfahren durchgeführt. So können die Sulfat-Ionen nach vorgegebenen Perkolationszeiten ausgefällt und gravimetrisch ermittelt werden. Zusätzlich wurde das am Ende gewonnene Eluat mittels der ICP-OES vermessen, um festzustellen, welcher Anteil an

Schwermetallen sich durch das Auswaschen löst. Tabelle 2.9 und Tabelle 2.10 zeigen die Ergebnisse der Elementaranalyse sowie den errechneten Sulfatgehalt des rückgewonnenen Putzes aus den WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS.

**Tabelle 2.9:** Analyse von Spurenelementen mittels der ICP-OES des durch des Perkolationsverfahrens erhaltenen Eluate der rückgewonnenen Putzfraktionen aus den WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS als Dämmstoffmaterial

Element	Ca [mg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Cd [µg/l]	Ni [µg/l]	Hq [µg/l]	Pb [µg/l]	Zn [µg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]
<b>Grenzwert RW1</b>	-	50,0	50,0	8,0	50,0	0,5	40,0	100,0	250,0
<b>Putz aus WDVS mit EPS (Jahr 1986)</b>									
<b>Putz (GF)</b>	964,2	9,0	1,0	6,0	3,0	-	-	11,7	416,2
<b>Putz (FF)</b>	944,8	9,0	1,0	6,0	3,0	-	-	10,1	466,4
<b>Putz aus WDVS mit EPS (Jahr 1997)</b>									
<b>Putz (GF)</b>	1022,8	7,0	8,0	5,0	2,0	-	-	11,0	322,8
<b>Putz (FF)</b>	1007,2	7,0	6,0	5,0	2,0	-	-	12,8	387,5
<b>Putz aus WDVS mit EPS (Jahr 2000)</b>									
<b>Putz (GF)</b>	975,5	18,5	22,5	7,0	<1,0	-	-	4,0	423,6
<b>Putz (FF)</b>	955,8	17,4	19,3	7,0	<1,0	-	-	5,0	443,8

**Tabelle 2.10:** Analyse von Spurenelementen mittels der ICP-OES des durch des Perkolationsverfahrens erhaltenen Eluate der rückgewonnenen Putzfraktionen aus den WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS als Dämmstoffmaterial

Element	Ca [mg/l]	Cr [µg/l]	Cu [µg/l]	Cd [µg/l]	Ni [µg/l]	Hq [µg/l]	Pb [µg/l]	Zn [µg/l]	SO <sub>4</sub> [mg/l]
<b>Grenzwert RW1</b>	-	50,0	50,0	8,0	50,0	0,5	40,0	100,0	250,0
<b>Putz aus WDVS mit XPS (Jahr 1986)</b>									
<b>Putz (GF)</b>	1142,6	7,0	3,0	5,0	12,0	-	-	12,7	432,8
<b>Putz (FF)</b>	1158,2	7,0	2,0	6,0	12,5	-	-	12,5	499,2
<b>Putz aus WDVS mit XPS (Jahr 1997)</b>									
<b>Putz (GF)</b>	997,2	4,0	<1,0	3,0	10,1	-	-	10,2	416,5
<b>Putz (FF)</b>	980,4	4,0	<1,0	3,0	9,0	-	-	10,1	472,6
<b>Putz aus WDVS mit XPS (Jahr 2000)</b>									
<b>Putz (GF)</b>	1097	4,0	2,0	5,0	8,0	-	-	9,0	432,7
<b>Putz (FF)</b>	1065	4,0	2,0	5,0	7,0	-	-	10,4	481,5

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass, bis auf Quecksilber und Blei, alle relevanten Elemente bzw. Sulfat nachgewiesen werden konnten. Es zeigt sich, dass die jeweiligen Gehalte an Spurenelementen in den Putzen aus der Fein- und Grobfraktion ähnliche Konzentrationen aufweisen. Dabei unterscheiden sich die Konzentrationen in den Putzen verschiedener Generationen nur geringfügig. Weiterhin konnte festgestellt werden, dass keiner der relevanten Schwermetall-Gehalte nach den bayerischen Richtlinien (RW1) überschritten wurde. Wie zu erwarten, wurden jedoch für alle Messungen die Sulfat-Werte ( $\text{SO}_4$ ) deutlich überschritten. Dies resultiert aus dem stark Sulfat-haltigen Gips, welcher üblicherweise in Putzen enthalten ist. Allerdings können die Putze trotz allem bedenkenlos als Sekundärrohstoffe verwendet werden, da eine Überschreitung des Sulfatwertes unter der Bedingung zulässig ist, dass die Calcium-Konzentration im Eluat mindestens der 0,43-fachen Sulfatkonzentration entspricht. Um auf die genaue mineralogische Zusammensetzung der Putze schließen zu können, wurden zusätzlich eine RFA- und eine XRD-Analyse durchgeführt. Mittels der RFA können die oxidischen Gehalte der Putze wie Siliciumdioxid ( $\text{SiO}_2$ ), Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Eisenoxid ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ), Magnesiumoxid ( $\text{MgO}$ ), Schwefeltrioxid ( $\text{SO}_3$ ), Kaliumoxid ( $\text{K}_2\text{O}$ ), Titanoxid ( $\text{TiO}_2$ ), Natriumoxid ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), Chromoxid ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), Zinkoxid ( $\text{ZnO}$ ), Bleioxid ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), Manganoxid ( $\text{Mn}_3\text{O}_4$ ) und Bariumoxid ( $\text{BaO}$ ) ermittelt werden. Während der RFA lag der Glühverlust bei einer Temperatur von  $T = 950\text{ °C}$  zwischen 36,1 und 37,5 wt.-%. Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich dabei hauptsächlich um freigesetztes  $\text{CO}_2$  und möglicherweise um geringe Mengen Wasser, z.B. aus dem Portlandit, handelt. Tabelle 2.11 und Tabelle 2.12 zeigen die mittels RFA ermittelten Oxide der rückgewonnenen Putze aus WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS und XPS als Dämmstoffmaterial.

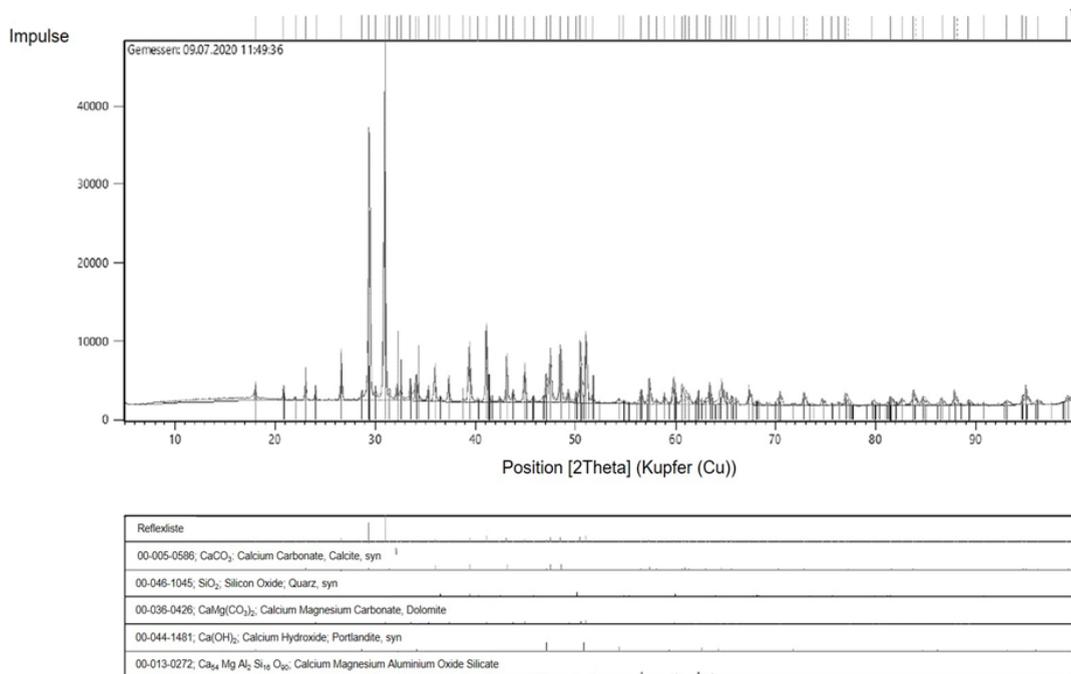
**Tabelle 2.11:** RFA-Analyse der rückgewonnenen Putze aus WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS als Dämmstoffmaterial

Putz aus WDVS mit EPS (Jahr 1986)							
<b>Gehalt</b>	<b><math>\text{SiO}_2</math></b>	<b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	<b><math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></b>	<b><math>\text{CaO}</math></b>	<b><math>\text{MgO}</math></b>	<b><math>\text{SO}_3</math></b>	<b><math>\text{K}_2\text{O}</math></b>
Anteil [wt.-%]	9,16	1,37	0,61	43,15	8,22	0,73	0,19
<b>Gehalt</b>	<b><math>\text{TiO}_2</math></b>	<b><math>\text{Na}_2\text{O}</math></b>	<b><math>\text{Cr}_2\text{O}_3</math></b>	<b><math>\text{ZnO}</math></b>	<b><math>\text{P}_2\text{O}_5</math></b>	<b><math>\text{Mn}_3\text{O}_4</math></b>	<b><math>\text{BaO}</math></b>
Anteil [wt.-%]	0,07	0,06	0,01	0,01	-	0,05	0,04
Putz aus WDVS mit EPS (Jahr 1997)							
<b>Gehalt</b>	<b><math>\text{SiO}_2</math></b>	<b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	<b><math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></b>	<b><math>\text{CaO}</math></b>	<b><math>\text{MgO}</math></b>	<b><math>\text{SO}_3</math></b>	<b><math>\text{K}_2\text{O}</math></b>
Anteil [wt.-%]	8,82	1,34	0,69	42,66	7,42	0,64	0,17
<b>Gehalt</b>	<b><math>\text{TiO}_2</math></b>	<b><math>\text{Na}_2\text{O}</math></b>	<b><math>\text{Cr}_2\text{O}_3</math></b>	<b><math>\text{ZnO}</math></b>	<b><math>\text{P}_2\text{O}_5</math></b>	<b><math>\text{Mn}_3\text{O}_4</math></b>	<b><math>\text{BaO}</math></b>
Anteil [wt.-%]	0,04	0,06	0,01	0,01	-	0,07	0,03
Putz aus WDVS mit EPS (Jahr 2000)							
<b>Gehalt</b>	<b><math>\text{SiO}_2</math></b>	<b><math>\text{Al}_2\text{O}_3</math></b>	<b><math>\text{Fe}_2\text{O}_3</math></b>	<b><math>\text{CaO}</math></b>	<b><math>\text{MgO}</math></b>	<b><math>\text{SO}_3</math></b>	<b><math>\text{K}_2\text{O}</math></b>
Anteil [wt.-%]	9,08	1,7	0,62	42,59	8,12	0,68	0,17
<b>Gehalt</b>	<b><math>\text{TiO}_2</math></b>	<b><math>\text{Na}_2\text{O}</math></b>	<b><math>\text{Cr}_2\text{O}_3</math></b>	<b><math>\text{ZnO}</math></b>	<b><math>\text{P}_2\text{O}_5</math></b>	<b><math>\text{Mn}_3\text{O}_4</math></b>	<b><math>\text{BaO}</math></b>
Anteil [wt.-%]	0,05	0,06	0,02	0,03	-	0,07	0,01

**Tabelle 2.12:** RFA-Analyse der rückgewonnenen Putze aus WDVS-Abbruchmaterialien mit XPS als Dämmstoffmaterial

Putz aus WDVS mit XPS (Jahr 1986)							
<b>Gehalt</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>
Anteil [wt.-%]	8,94	2,14	0,65	43,37	7,63	0,62	0,08
<b>Gehalt</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>ZnO</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	<b>BaO</b>
Anteil [wt.-%]	0,02	0,03	0,03	0,02	-	0,04	0,03
Putz aus WDVS mit XPS (Jahr 1997)							
<b>Gehalt</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>
Anteil [wt.-%]	9,04	1,93	0,58	43,42	7,71	0,66	0,07
<b>Gehalt</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>ZnO</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	<b>BaO</b>
Anteil [wt.-%]	0,03	0,04	0,03	0,02	-	0,04	0,05
Putz aus WDVS mit XPS (Jahr 2000)							
<b>Gehalt</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SO<sub>3</sub></b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>
Anteil [wt.-%]	9,21	1,84	0,67	43,32	7,64	0,72	0,06
<b>Gehalt</b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>ZnO</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub></b>	<b>BaO</b>
Anteil [wt.-%]	0,05	0,03	0,02	0,01	-	0,01	0,02

Es wird deutlich, dass sich die Putzsorten in den oxidischen Gehalten der jeweiligen Spurenelemente nur geringfügig unterscheiden. Als Hauptbestandteil wurden in den Putzproben ein CaO-Gehalt zwischen 42,59 – 43,42 wt.-% nachgewiesen. Unter der Annahme, dass es sich bei den ermittelten Glühverlusten um abgespaltenes CO<sub>2</sub> und H<sub>2</sub>O handelt, kann gefolgert werden, dass der Putz als Hauptbestandteil Calciumcarbonat (CaCO<sub>3</sub>) und Dolomit (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) enthält. Außerdem wurden Siliciumoxid-Gehalte (SiO<sub>2</sub>) zwischen 8,82 – 9,21 wt.-% festgestellt. Es ist sehr wahrscheinlich, dass es sich dabei um Quarzit, möglicherweise aber auch anteilig um silikatische Bestandteile handelt. Weiterhin konnten Magnesiumoxid-Gehalte (MgO) zwischen 7,42 – 8,22 wt.-% detektiert werden. Magnesiumoxid ist ein Bestandteil von Dolomit. Die bestehende Diskrepanz zwischen den Gewichtsanteilen des CaO-Gehalts und dem Glühverlust kann durch enthaltenes Portlandit (Ca(OH)<sub>2</sub>) erklärt werden. Um die Untersuchungen der RFA zu verifizieren, wurden an den Putzproben zusätzlich XRD-Analysen durchgeführt. Abbildung 2.26 zeigt exemplarisch ein erhaltenes Diffraktogramm aus der XRD-Analyse. In der aus mehreren Inhaltsstoffen bestehenden, mehrphasigen Putzprobe konnten mittels der eingesetzten Auswertesoftware spezifische Reflexe eindeutig mineralogischen Bestandteilen zugeordnet werden. Andere Reflexe entzogen sich infolge von Überlagerungen einer eindeutigen Bestimmung. Für alle Proben konnten jedoch mit hoher Übereinstimmung Calzit, Quarzit, Dolomit und Portlandit nachgewiesen werden. Durch die erhaltenen Diffraktogramme wurden die Ergebnisse der durchgeführten RFA bestätigt.



**Abbildung 2.26:** Exemplarische Darstellung eines XRD-Diffraktogramms der rückgewonnenen Putz-Fraktionen aus den WDVS-Abbruchmaterialien

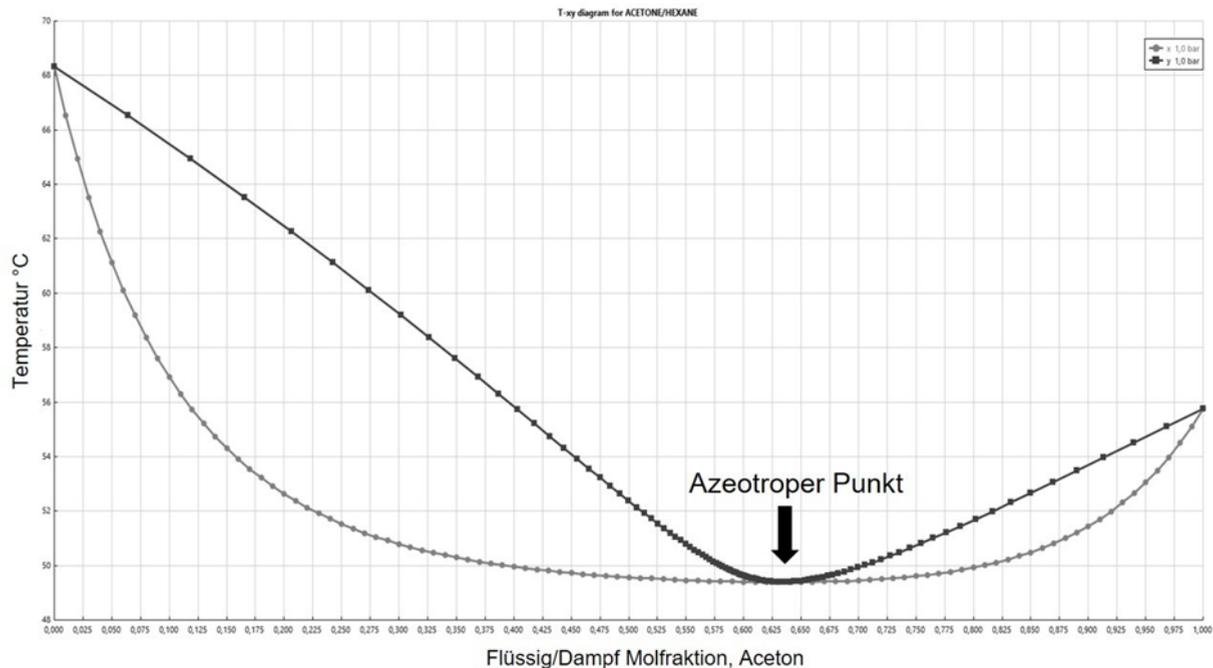
## 2.10 Extraktion des Flammschutzmittels HBCD (AP 6)

Um das partikulär gebundene Flammschutzmittel HBCD in AP6 aus dem Dämmstoffmaterialien EPS und XPS extrahieren zu können, kam eine Soxhlet-Apparatur zum Einsatz. Diese dient der Fest-Flüssig-Extraktion, bei der in einer Extraktionshülse aus Filterpapier befindliche Extraktionssubstanzen vom Lösungsmittel diskontinuierlich extrahiert werden. Für den Extraktionsprozess ist es nötig ein geeignetes Lösemittel zu eruieren. Hierfür wurde ein Lösemittelscreening durchgeführt. Durch eine Literaturrecherche konnte folgende Extraktionsmittel bzw. Lösemittelgemische bestimmt werden (Tabelle 2.13) [46].

**Tabelle 2.13:** Verwendete Extraktionsmittel zur Extraktion von HBCD

Lösemittelgemisch	Verhältnis
Aceton : n-Hexan	(Verhältnis 1:1)
Diethylether : n Hexan	(Verhältnis 1:1)
Toluol	(Reines Lösemittel)
Aceton	(Reines Lösemittel)
Dichlormethan : n-Hexan	(Verhältnis 1:1)

In Vorversuchen konnte aufgezeigt werden, dass ein Gemisch aus Aceton und n-Hexan im Verhältnis 1:1 die höchsten Ausbeuten an HBCD erzielt. Um für das Gemisch das Volumenverhältnis beim Siedepunkt bestimmen zu können, kam das Simulationsprogramm Aspen+ zum Einsatz. Hierbei wurde eine Siedelinse (T- xy-Diagramm) erstellt (Abbildung 2.27)



**Abbildung 2.27:** Siedelinse des Lösemittelgemisches Aceton/n-Hexan bei Umgebungsdruck (1,013 bar)

Die Siedelinse besitzt laut dem Simulationsprogramm Aspen+ einen azeotropen Punkt bei einem Molanteil von  $x_{\text{Aceton}} = 0,64$  und einer Siedetemperatur von  $T_{\text{siede}} = 49,5 \text{ °C}$ . So ergibt ein 1:1 Gemisch (Volumenbezogen) aus n-Hexan und Aceton ein Lösemittelgemisch mit azeotropen Eigenschaften. Das Volumenverhältnis der beiden Stoffe am azeotropen Punkt ergibt sich aus Gleichung 9.

$$\frac{V_{\text{Ac}}}{V_{\text{Hex}}} = \frac{\rho_{\text{Hex}} m_{\text{Ac}}}{\rho_{\text{Ac}} m_{\text{Hex}}} = \frac{\rho_{\text{Hex}} n_{\text{Ac}} M_{\text{Ac}}}{\rho_{\text{Ac}} n_{\text{Hex}} M_{\text{Hex}}} = \frac{\rho_{\text{Hex}} x_{\text{Ac,Azeotrop}} M_{\text{Ac}}}{\rho_{\text{Ac}} x_{\text{Hex,Azeotrop}} M_{\text{Hex}}} \quad (9)$$

$V_{\text{Ac}}$  = Volumen Aceton

$V_{\text{Hex}}$  = Volumen Hexan

$\rho_{\text{Ac}}$  = Dichte Aceton

$\rho_{\text{Hex}}$  = Dichte Hexan

$m_{\text{Ac}}$  = Masse Aceton

$m_{\text{Hex}}$  = Masse Hexan

$M_{\text{Ac}}$  = Molare masse Aceton

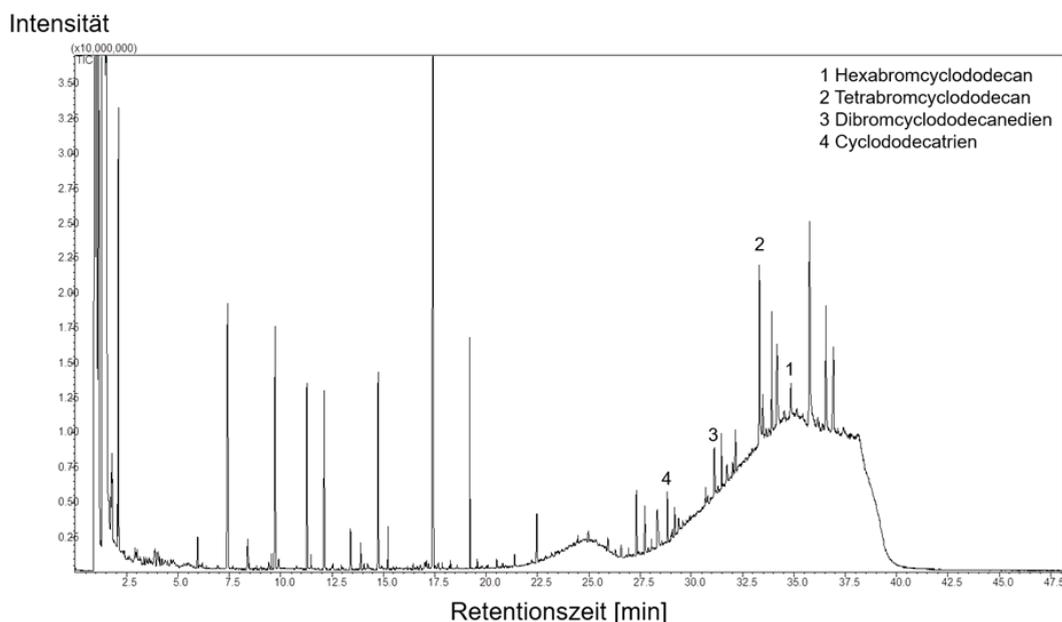
$M_{\text{Hex}}$  = Molare masse Hexan

Somit folgt in Gleichung 12 folgendes Volumenverhältnis:

$$\frac{V_{\text{Ac}}}{V_{\text{Hex}}} = \frac{\rho_{\text{Hex}} * x_{\text{Ac,Azeotrop}} * M_{\text{Ac}}}{\rho_{\text{Ac}} * x_{\text{Hex,Azeotrop}} * M_{\text{Hex}}} = \frac{0,66 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 0,64 \frac{\text{mol}}{\text{mol}_{\text{Fu}}} * 58,08 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{0,79 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} * 0,36 \frac{\text{mol}}{\text{mol}_{\text{Fu}}} * 86,18 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 1,00095 \quad (10)$$

Durch die azeotrope Zusammensetzung des Lösemittelgemisches hat der bei der Extraktion entstehende Dampf die gleiche Zusammensetzung wie das flüssige Lösemittel. Zudem ändert sich dadurch die Zusammensetzung des Dampfes während der Extraktion nicht. Würde das Gemisch

aus drei Teilen Aceton und einem Teil n-Hexan bestehen wäre ein Aceton-Anteil von  $0,75 \text{ mol mol}_{\text{Fu}}^{-1}$  im Lösemittelgemisch. Wird dieses zum Sieden gebracht, hat der entstehende Dampf einen geringeren Aceton-Anteil, da das azeotrope Gemisch (mit  $x_{\text{Ac}} = 0,64$ ) der Leichtsieder ist. Dadurch verschiebt sich die Gemischzusammensetzung im flüssigen (siedendem) Lösemittel zu steigenden Aceton-Anteilen. Dadurch ändert sich wiederum auch die Zusammensetzung des entstehenden Dampfes. Somit ist weder im flüssigen Lösemittel noch im Dampf, der im Kondensator niedergeschlagen wird, eine konstante Zusammensetzung gegeben, was zu Schlechteren (bzw. nicht vorhersagbaren) Extraktionseigenschaften führen kann. Somit sollte das Lösemittelgemisch im azeotropen Punkt vorgelegt werden, so bleibt die Dampfzusammensetzung von Aceton und n-Hexan während der Extraktion gleich. Für die „Soxhlet“ Apparatur wurden Extraktionshülsen der Firma Marcherey-Nagel verwendet. Diese besitzen einen Durchmesser von  $d = 23 \text{ mm}$  und eine Höhe von  $H = 80 \text{ mm}$ . Für die Reinigung der erhaltenen Probe nach dem Extraktions- bzw. Destillationsprozesses wurden diese mittels eines Rotationsverdampfers von der Lösemittelmatrix abgetrennt und zusätzlich über einen  $0,45 \mu\text{m}$  Polytetrafluorethylen (PTFE) Filter aufgereinigt. Im Anschluss können die Extrakte im Gaschromatographen analysiert werden. Abbildung 2.28 zeigt exemplarisch das Chromatogramm des extrahierten HBCD aus dem rückgewonnenen EPS bei einer Extraktionszeit von  $t = 8 \text{ h}$ .

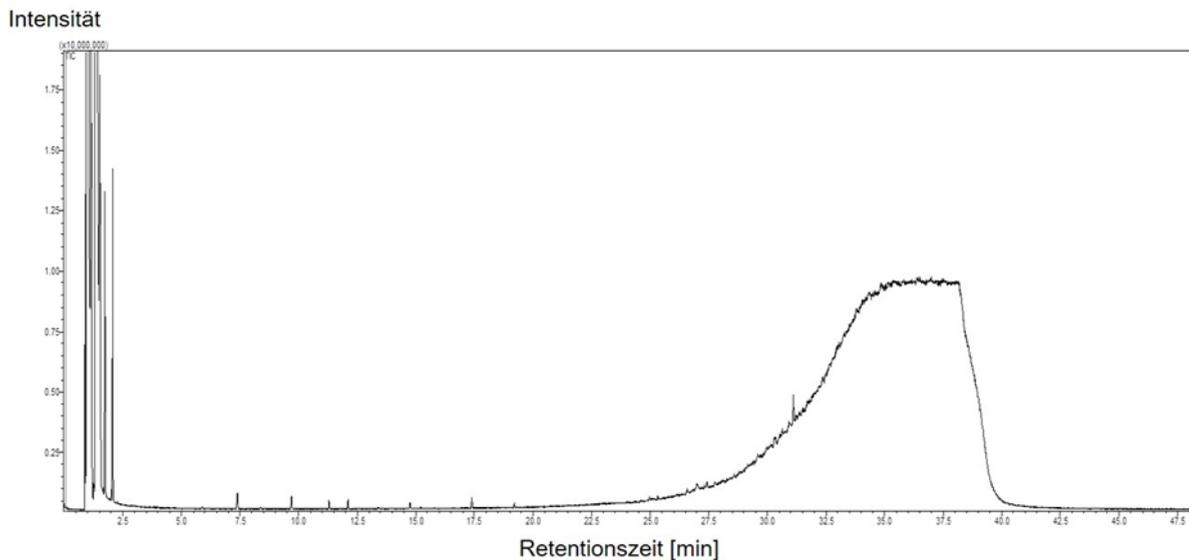


**Abbildung 2.28:** GC/MS-Chromatogramm nach der Extraktion von HBCD (1=Hexabromcyclododecan, 2=Tetrabromcyclododecan, 3=Dibromcyclododecanedien, 4=Cyclododecatrien)

Für das rückgewonnene XPS konnten die gleichen Resultate erzielt werden. Die Retentionszeiten der Peaks im dargestellten GC-Chromatogramm konnte bei der HBCD-Analyse aller Dämmstofffraktionen der untersuchten Dämmstoffe nachgewiesen werden. Das Chromatogramm zeigt Verunreinigen welche auf Restbestandteile von Polystyrol zurückzuführen ist. Ebenfalls zeigt sich, die De-bromierungselimination des HBCD. Diese konnte ebenfalls bereits in Vorversuchen bestätigt werden. Bei den anderen verwendeten Lösemitteln konnte HBCD nicht reproduzierbar nachgewiesen werden. Nur mit der oben beschriebenen Lösemittelzusammensetzung konnte HBCD nach der Extraktion eindeutig und reproduzierbar nachgewiesen werden, was die Eignung weiter bestätigt.

---

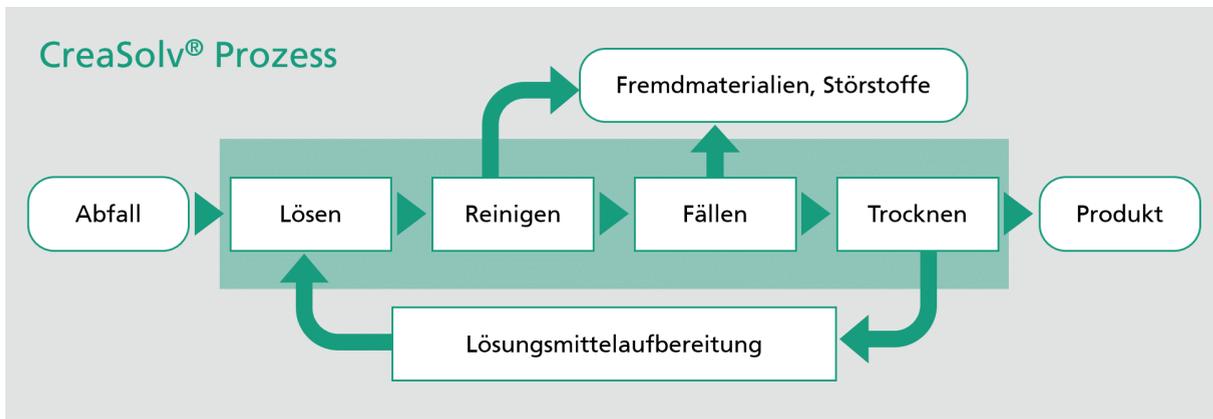
Durch Lösemittelrückstände im Extrakt kann aktuell der HBCD-Gehalt nach der Extraktion nur qualitativ bestimmt werden. Zusätzlich wurde das Extraktionsmittel, welches über den Rotationsverdampfer rückgewonnen werden konnte, untersucht. Abbildung 2.29 zeigt das Chromatogramm des rückgewonnenen Lösemittels im welchem keine Spuren von HBCD mehr nachgewiesen werden konnten.



**Abbildung 2.29:** GC/MS-Chromatogramm des Rückgewonnenen Lösemittelgemisches (Aceton:n-Hexan)

## 2.11 Chemische Separation (AP 6)

Für den Gesamtprozess ist die Abtrennung von Fremd- sowie Störstoffen (z.B. Mörtel, Armierungsgewebe, bromierte Flammschutzmittel, etc.) aus der vorbehandelten EPS-Zielfraktion von großer Bedeutung. Nach dem Prozessschritt der Extraktion wurde die Reinigung und Rückgewinnung von Polystyrol aus den Zielfraktionen durch den CreaSolv® Prozess (Abbildung 2.30) des Fraunhofer IVV untersucht. Das EPS wird dabei in einem für Polystyrol selektiven Lösemittel gelöst. Fremdstoffe, wie andere Polymere oder mineralische Stoffe bleiben ungelöst und können mittels Filtration von der reinen Polystyrol-Lösung abgetrennt werden. Die in dieser Lösung mitgelösten bromierten Additive können über die Zugabe eines Fällmittels zur Polymerlösung entfernt werden. Durch die Vermischung des Fällmittels mit dem Lösemittel wird die Polarität so weit verändert, dass das Polystyrol nicht mehr in Lösung geht und als Bodensatz ausfällt. Die nicht kovalent gebundenen Additive (bromierte Flammschutzmittel) hingegen verteilen sich in Polymer und Extrakt und können bei Wiederholung dieses Prozessschrittes stufenweise verringert werden, bis der gesetzliche Grenzwert erreicht wird.



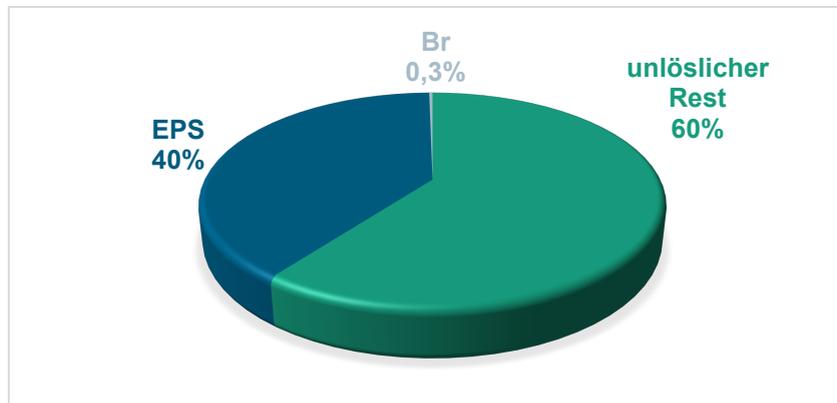
**Abbildung 2.30:** CreaSolv® Prozesses

Anschließend wird das ausgefällte und von bromierten Flammschutzmitteln befreite Polystyrol vom restlichen Lösemittel durch Schmelzetrocknung und Extrusion befreit und als Granulat ausgetragen. Als Input für den CreaSolv® Prozess dienten mehrere EPS-Fractionen, die in vorangegangenen Arbeitspaketen von der TH Nürnberg zerkleinert und von groben Verunreinigungen separiert worden sind. Diese wurden nach obigem Schema mit dem CreaSolv® behandelt.



**Abbildung 2.31:** von links nach rechts: EPS Inputfraktion, nach Auflösung in einem CreaSolv® Lösemittel, Filtrerrückstand, getrockneter Filtrerrückstand

Die einzelnen Ströme des CreaSolv® Prozesses (Abbildung 2.31) wurden massenbilanziert und somit konnte die Zusammensetzung des Inputmaterials bestimmt werden (Abbildung 2.32). Demzufolge besteht der mechanisch aufbereitete Input zu 40% aus Polystyrol und 60% aus Fremdmaterial. Letzteres konnte nach einer Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) wegen seines hohen Ca-Gehalts (23%) zu mineralischem Baustoff zugeordnet werden. Der hohe Si-Gehalt (3%) im Armierungsgerüst kann auf einen Einsatz von Glasfasern hinweisen. Durch die Analyse der reinen Polystyrol-Lösung mittels RFA-Technik konnte ein Gesamtbromgehalt von 0,3% im Input (0,69% auf EPS bezogen) ermittelt werden. Üblicherweise wird mit der Röntgenfluoreszenzanalyse eine Elementaufschlüsselung der untersuchten Probenmatrix erreicht. Somit können damit keine Aussagen getroffen werden, welche Molekülverbindungen sich in den untersuchten Proben befinden. Im Falle des Bromgehalts in der Zielfraktion kann nicht unterschieden werden, ob das Brom dem verbotenen HBCD oder dem alternativen Flammschutzmittel Poly-FR entstammt.



**Abbildung 2.32:** Zusammensetzung der EPS-Zielfractionen

Ob es sich um HBCD oder Poly-FR in einer unverpressten EPS Probe handelt kann mittels eines Schnelltest [47] ermittelt werden. Dazu wird EPS mit Aceton versetzt, damit nicht kovalent gebundene Additive (HBCD) in das Lösemittel diffundieren, bis sich ein Gleichgewicht zwischen EPS-Gel und Aceton eingestellt hat. Da in diesem Fall weniger Brom im Extrakt als im EPS-Gel via RFA gemessen wurde, kann angenommen werden, dass das Brom überwiegend dem Poly-FR zugerechnet werden kann. Eine Verifizierung mittels GC-ECD konnte dies bestätigen (0,28% HBCD in EPS). Der EPS-Input hat demnach eine über dem gesetzlichen Grenzwert liegenden Konzentration (0,01%) von HBCD und darf dementsprechend nicht durch mechanische Verfahren, wie z.B. Wiedereinschmelzen, recycelt werden.

Die Qualität des Rezyklats (Abbildung 2.33) konnte durch verschiedene Analysemethoden untersucht werden. Dazu zählen Fast-Fourier-Infrarot-Spektroskopie (FTIR), Melt-flow-rate (MFR), Molekulargewichtsbestimmung (Mw) via Gelpermeationschromatographie, Schmelzpunktbestimmung (Tg) via Differential Scanning Calometry (DSC), Bestimmung des Zug-Moduls und der Charpy-Schlagfestigkeit.



**Abbildung 2.33:** PS Rezyklat nach CreaSolv® Prozess

Das Rezyklat weist gegenüber Neuware eine graue bis schwarze Verfärbung auf und kann mit den im Input enthaltenen Graphitkügelchen erklärt werden. Da das Graphit im Nanobereich bei der Neuwareproduktion eingesetzt wird, können diese nicht mit einfachen Filtern abgetrennt werden und verbleiben im Material. Die Ergebnisse in Tabelle 2.14 zeigen Abweichungen bei dem Zug-Modul und der Charpy-Schlagfestigkeit gegenüber der Anforderung von Neuware. Diese Abweichung kann mit zu hohen Restlösemittelgehalten begründet werden. Dieser lag je nach Extruderfraktion zwischen 0,1%-0,2%. Das Lösemittel wirkt wie ein Weichmacher und kann z.B. die Schlagfestigkeit herabsetzen. Eine Optimierung der Extrudereinstellung kann das verhindern. Hierzu sind in Zukunft

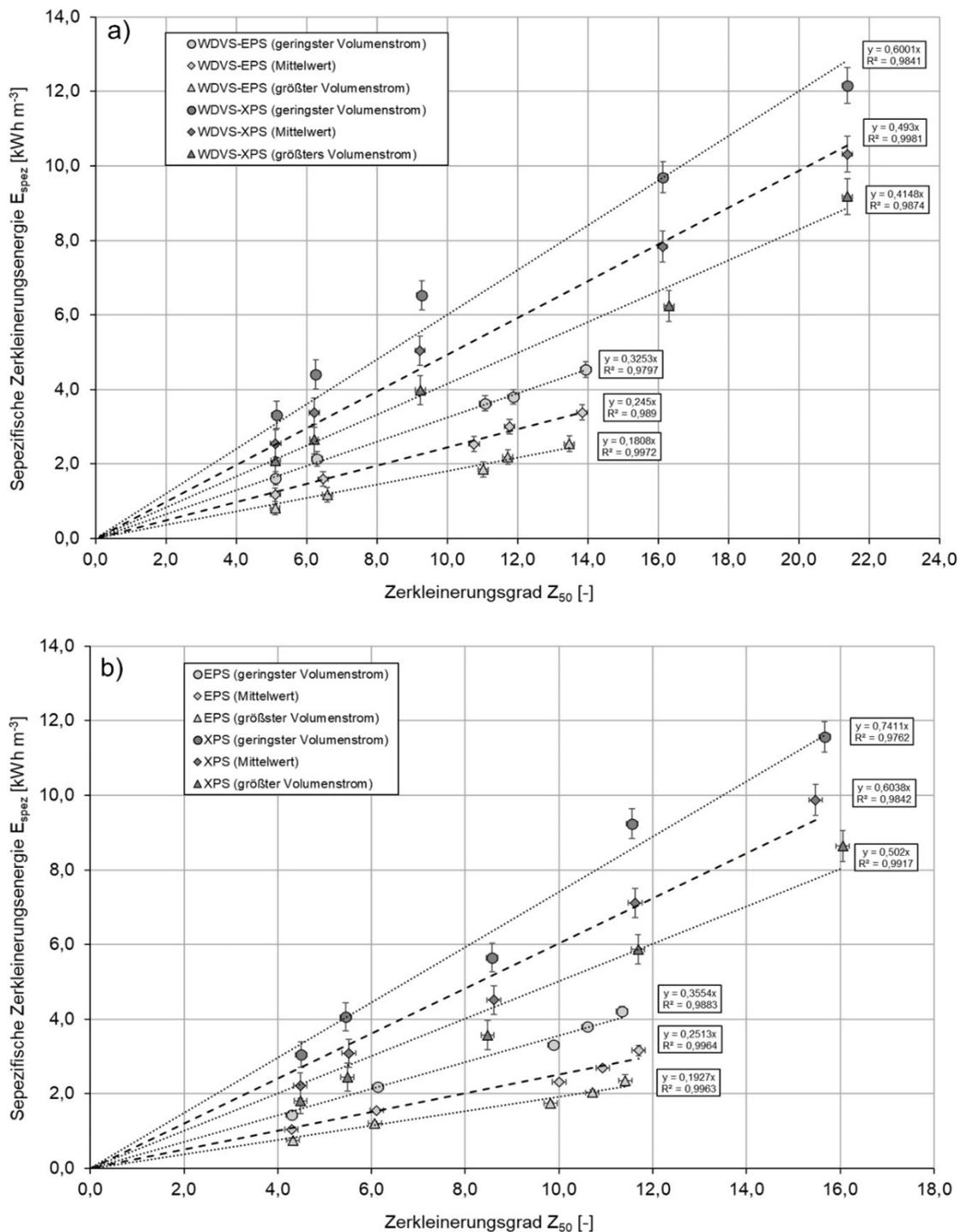
genauere Experimente durchzuführen. Alle anderen Werte für die Qualitätsbewertung liegen im Bereich von Neuware General Purpose Polystyrene (GPPS). Versuche in vorangegangenen Projekten, wie z.B. dem PolyStyreneLoop Projekt [48], haben gezeigt, dass diese 1:1 mit Neuware ersetzt, wieder aufgeschäumt und als Wärmedämmung wiedereingesetzt werden kann. In diesem Projekt ist aufgrund von zu geringen Probenmengen keine Wiederaufschäumung durchgeführt worden.

**Tabelle 2.14:** Vergleich der Qualitätsparameter PS Rezyklat vs. Neuware GPPS

Analyse	PS-Rezyklat	Neuware GPPS
FTIR	97% Korrelation	100% Korrelation
MFR [g/10 min]	7	2-20
Mw [g/mol]	169.000	>170.000
Tg [°C]	103	100
Zug-Modul [MPa]	3021	3200
Charpy-Schlagfestigkeit [kJ/m <sup>2</sup> ]	2	10
HBCD [mg/kg]	<12	<100

## 2.12 Zerkleinerungsmodell für elastische Dämmstoffmaterialien (AP6 & AP7)

Wie bereits oben erwähnt, stellen Zerkleinerungsprozesse einen der energieaufwändigsten Prozessschritte bei Aufbereitungsprozessen dar. Aus diesem Grund muss dieser in Bezug auf die Einsparung von Energie und CO<sub>2</sub> so effizient wie möglich ausgelegt werden. Der wichtigste Faktor bei Zerkleinerungsprozessen ist der Zusammenhang zwischen der geforderten Partikelgrößenreduktion und der hierfür nötigen Zerkleinerungsenergie. Die Untersuchungen zur Zerkleinerung der WDVS und der Dämmstoffe haben gezeigt, dass die spezifische Zerkleinerungsenergie stark von der verwendeten Einlegrostmaschenweite  $w$  und dem eigestellten Volumenstrom  $V$  abhängt. Im Zuge der durchgeführten Untersuchungen wurden direkte funktionelle Zusammenhänge zwischen der Zerkleinerungsenergie und der durch den Zerkleinerungsprozess erreichten Partikelgrößenreduktion aufgezeigt. So konnten die Zerkleinerungsprozesse auf die gängigen Zerkleinerungsmodelle nach Rittinger, Kick und Bond übertragen, und auf Grundlage dieser Modelle ein neues empirisches Zerkleinerungsmodell für die hier untersuchten Werkstoffe entwickelt werden. Einer der wichtigsten Zusammenhänge in Bezug auf die für die Partikelgrößenreduktion notwendige Zerkleinerungsenergie ist der Zusammenhang zwischen dem Zerkleinerungsgrad  $Z_{50,3}$  und der spezifischen Zerkleinerungsenergie  $E_{spez}$ . Ziel der Untersuchungen war es, den optimalen funktionellen Zusammenhang zur Abschätzung der Zerkleinerungsenergie für die untersuchten WDVS-Abbruchmaterialien und Dämmstoffe zu ermitteln. Abbildung 2.30 zeigt den Zusammenhang zwischen der volumenbezogenen spezifischen Zerkleinerungsenergie  $E_{spez}$  und dem Zerkleinerungsgrad  $Z_{50,3}$  in Abhängigkeit des Volumenstromes  $V$  für WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS und XPS (Abbildung 2.30 a) und die sortenreinen Dämmstoffmaterialien (Abbildung 2.30 b). Die jeweiligen Standardabweichungen und Bestimmtheitsmaße  $R^2$  sind in den jeweiligen Diagrammen direkt angegeben.



**Abbildung 2.30:** Zusammenhang zwischen der volumenbezogenen spezifischen Zerkleinerungsenergie  $E_{spez}$  und dem Zerkleinerungsgrad  $Z_{50,3}$  für WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS und XPS (a) und den sortenreinen Dämmstoffmaterialien EPS und XPS (b)

Abbildung 2.30 zeigt deutlich, dass bei der Zerkleinerung der Abbruchmaterialien der Zusammenhang zwischen der volumenbezogenen spezifischen Zerkleinerungsenergie  $E_{spez}$  und dem Zerkleinerungsgrad  $Z_{50,3}$  in Abhängigkeit der untersuchten Volumenströme durch lineare Funktionen durch den Ursprung beschrieben werden kann. Dies konnte sowohl für die WDVS-Abbruchmaterialien als auch für die untersuchten Dämmstoffe festgestellt werden. Erneut zeigt sich, dass neben der Einlegrostmaschenweite  $w$  auch der Volumenstrom  $V$  einen signifikanten Einfluss auf die spezifische Zerkleinerungsenergie besitzt. Wie bereits in vorangegangenen Untersuchungen

konnte festgestellt werden, dass für die Zerkleinerung von XPS bzw. WDVS mit XPS deutlich mehr Zerkleinerungsenergie als für WDVS mit EPS bzw. reines EPS benötigt wird. Auch zeigen sich nur geringe Abweichungen im Vergleich zwischen den WDVS-Abbruchmaterialien und den zugehörigen sortenreinen Dämmstoffen. Die erhaltenen linearen Ursprungsgeraden sind durch hohe Bestimmtheitsmaße von  $R^2 = 0,98 - 0,99$  gekennzeichnet. Ein Ziel der Untersuchungen war es, die benötigte Zerkleinerungsenergie  $E_{spez}$  für eine gewünschte Endpartikelgröße  $x_\omega$  abschätzen zu können. In der Literatur existieren bereits Zusammenhänge für die Abschätzung der Zerkleinerungsenergie. So kann nach den Zerkleinerungsgesetzen von Rittinger, Kick und Bond die Zerkleinerungsenergie für geforderte Endpartikelgrößen  $x_\omega$  grob abgeschätzt werden. Hierbei wird eine Proportionalität zwischen dem Energiebedarf einer Zerkleinerungsapparatur und dem Energiebedarf zur Zerkleinerung einzelner Partikel vorausgesetzt [49–51]. Die benötigte Zerkleinerungsenergie für eine Partikelgrößenreduktion ist nach Rittinger wie folgt definiert:

$$dE_{R,spez} \sim \frac{dx}{x^2} \quad (11)$$

Kick ging davon aus, dass die Zerkleinerungsenergie der elastischen Deformationsarbeit des Zerkleinerungsguts (Hooksches Gesetz) entspricht:

$$dE_{K,spez} \sim \frac{dx}{x} \quad (12)$$

Für den Übergangsbereich zwischen Rittinger und Kick, fand Bond folgende Beziehung:

$$dE_{B,spez} \sim \frac{dx}{x^{1,5}} \quad (13)$$

Die hierfür notwendige Zerkleinerungsenergie  $E_{i,spez}$  wird durch eine Integration der Gln.4 – 6 erreicht. Durch das Einführen von Proportionalitätsfaktoren  $c_i$  erhält man für Rittinger, Kick und Bond folgende Zerkleinerungsgesetze.

$$E_{R,spez} = c_R \cdot \left[ \left( \frac{1}{x_\omega} \right) - \left( \frac{1}{x_\alpha} \right) \right] \quad (14)$$

$$E_{K,spez} = c_K \cdot \log \left( \frac{x_\alpha}{x_\omega} \right) \quad (15)$$

$$E_{B,spez} = c_B \cdot \left( \sqrt{\frac{1}{x_\omega}} - \sqrt{\frac{1}{x_\alpha}} \right) \quad (16)$$

In der Praxis hat sich gezeigt, dass für kleine Endpartikelgrößen  $x_\omega$  das Modell nach Rittinger, für große  $x_\omega$  hingegen das Modell nach Kick zutrifft. Der Partikelgrößenbereich dazwischen kann durch das Gesetz von Bond beschrieben werden. Bei den jeweiligen Proportionalitätsfaktoren  $c_i$  handelt es sich um empirisch bestimmte, materialspezifische Konstanten. Hierbei können die Koeffizienten nur sehr grob auf etwa  $\pm 50\%$  abgeschätzt werden, da für die Zerkleinerung maßgebende Materialwerte erheblich streuen können und die zwischen verschiedenen Zerkleinerungsmaschinen vorhandenen Unterschiede nicht berücksichtigt werden [51; 52]. Für Dämmstoffmaterialien bzw. Kompositmaterialien mit elastischem Materialverhalten sind diese Koeffizienten  $c_i$  bislang unbekannt. Die Problematik hierbei ist, dass diese materialabhängigen Konstanten eine Funktion der unterschiedlichen Rohstoffe sowie deren werkstofftechnisches Verhalten und den Prozessparameter der jeweiligen Mühlen darstellen. Da diese Modelle überwiegend für spröde mineralische Reinstoffe entwickelt wurden, lassen sich diese häufig nicht oder unzureichend auf die Zerkleinerung von elastischen

Dämmstoffen bzw. komplexen Kompositen anwenden. So wurde auf Basis der Gln. (14 – 16) eine Modellgleichung für die hier untersuchten elastischen Materialien aufgestellt. Die Auswertung der aufgenommenen Leistung während der Zerkleinerung der betrachteten Materialien zeigte, dass die Zerkleinerungsenergie  $E_{spez}$  signifikant von dem Volumenstrom  $V$  abhängt. So kann folgender Zusammenhang formuliert werden:

$$E_{F,spez} = k_F \cdot (x_\omega^n - x_\alpha^n) \quad (17)$$

für den Proportionalitätsfaktoren  $k_F$  gilt:

$$k_F = f(\text{Materialeigenschaften}, \text{Volumenstrom}) \quad (18)$$

Mittels Regressionsanalyse lässt sich für die jeweiligen Volumenströme  $V$  und der resultierenden Energie bzw. Endpartikelgröße  $x_\omega$  die Proportionalitätsfaktoren  $k_F$  sowie der Exponent  $n$  ermitteln. Die derart ermittelten Proportionalitätsfaktoren  $k_F$  weisen eine hyperbolische Abhängigkeit vom Volumenstrom auf. So kann für  $k_F$  ein Zusammenhang der materialspezifischen Konstante  $c_F$  und dem Volumenstrom  $V$  hergestellt werden, wodurch sich für die hier untersuchten Materialien folgende Modellgleichung ergibt:

$$E_{F,spez} = \frac{c_F}{\dot{V}^\beta} \cdot (x_\omega^n - x_\alpha^n) \quad (19)$$

Hierdurch konnten für die untersuchten Materialien empirische Gleichungen bestimmt werden. In Tabelle 2.15 sind die für die jeweiligen untersuchten Stoffe gemittelten materialspezifischen Konstanten  $c_F$  sowie die gemittelten Exponenten  $n$  und  $\beta$  zusammengefasst.

**Tabelle 2.15:** Die aus der Modellgleichung bestimmten Konstanten  $c_F$ ,  $n$  und  $\beta$  für WDVS mit EPS, WDVS mit XPS, sortenreinem EPS und XPX

Material	WDVS-EPS	EPS	WDVS-XPS	XPS
$c_F$ [J m <sup>3(β-1)·n</sup> s <sup>-β</sup> ]	0,0152	0,0158	0,506	0,511
$\beta$ [-]	0,582	0,579	0,332	0,328
$n$ [-]	-0,84	-0,81	-0,78	-0,76

Die Gln. (20 - 23) zeigen die empirischen Zusammenhänge für die untersuchten Stoffe.

$$E_{F,WDVS-EPS,spez} = \frac{c_{F,WDVS-EPS}}{\dot{V}^{0,582}} \cdot (x_\omega^{-0,84} - x_\alpha^{-0,84}) \quad (20)$$

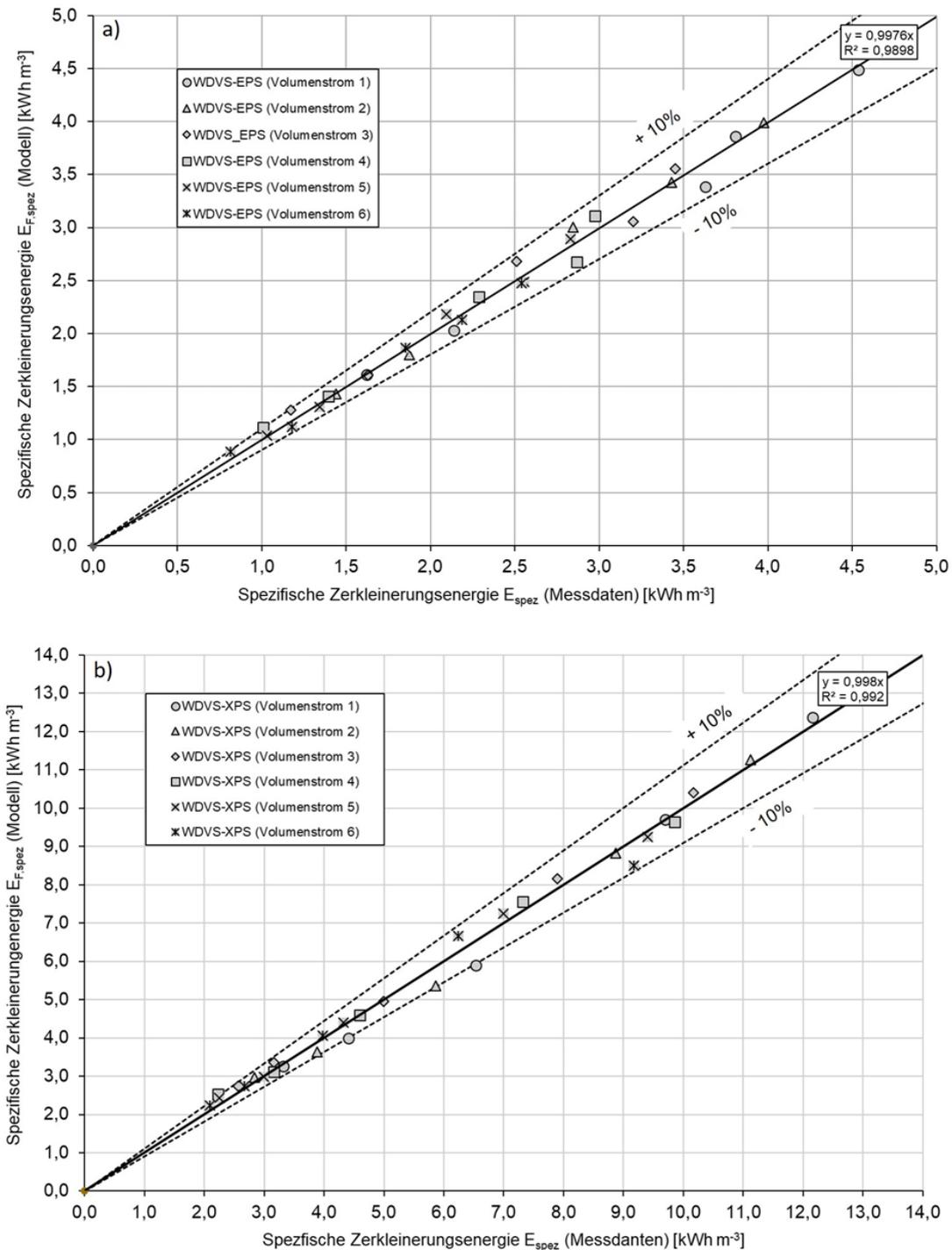
$$E_{F,EPS,spez} = \frac{c_{F,EPS}}{\dot{V}^{0,579}} \cdot (x_\omega^{-0,81} - x_\alpha^{-0,81}) \quad (21)$$

$$E_{F,WDVS-XPS,spez} = \frac{c_{F,WDVS-XPS}}{\dot{V}^{0,332}} \cdot (x_\omega^{-0,78} - x_\alpha^{-0,78}) \quad (22)$$

$$E_{F,XPS,spez} = \frac{c_{F,XPS}}{\dot{V}^{0,328}} \cdot (x_\omega^{-0,76} - x_\alpha^{-0,76}) \quad (23)$$

Bei genauerer Betrachtung zeigt sich, dass die jeweiligen Koeffizienten ( $c_F$ ,  $n$  und  $\beta$ ) für WDVS mit EPS und sortenreinem EPS sowie für WDVS mit XPS und sortenreinem XPS sich im selben Bereich befinden. Dies resultiert aus dem geringen Energieunterschied zwischen den WDVS und den dazugehörigen Dämmstoffmaterialien. So konnte für alle aufgenommenen Messwerte, die zugehörige spezifische Zerkleinerungsenergie nach den Modellgleichungen (20 - 23) berechnet werden. Um die

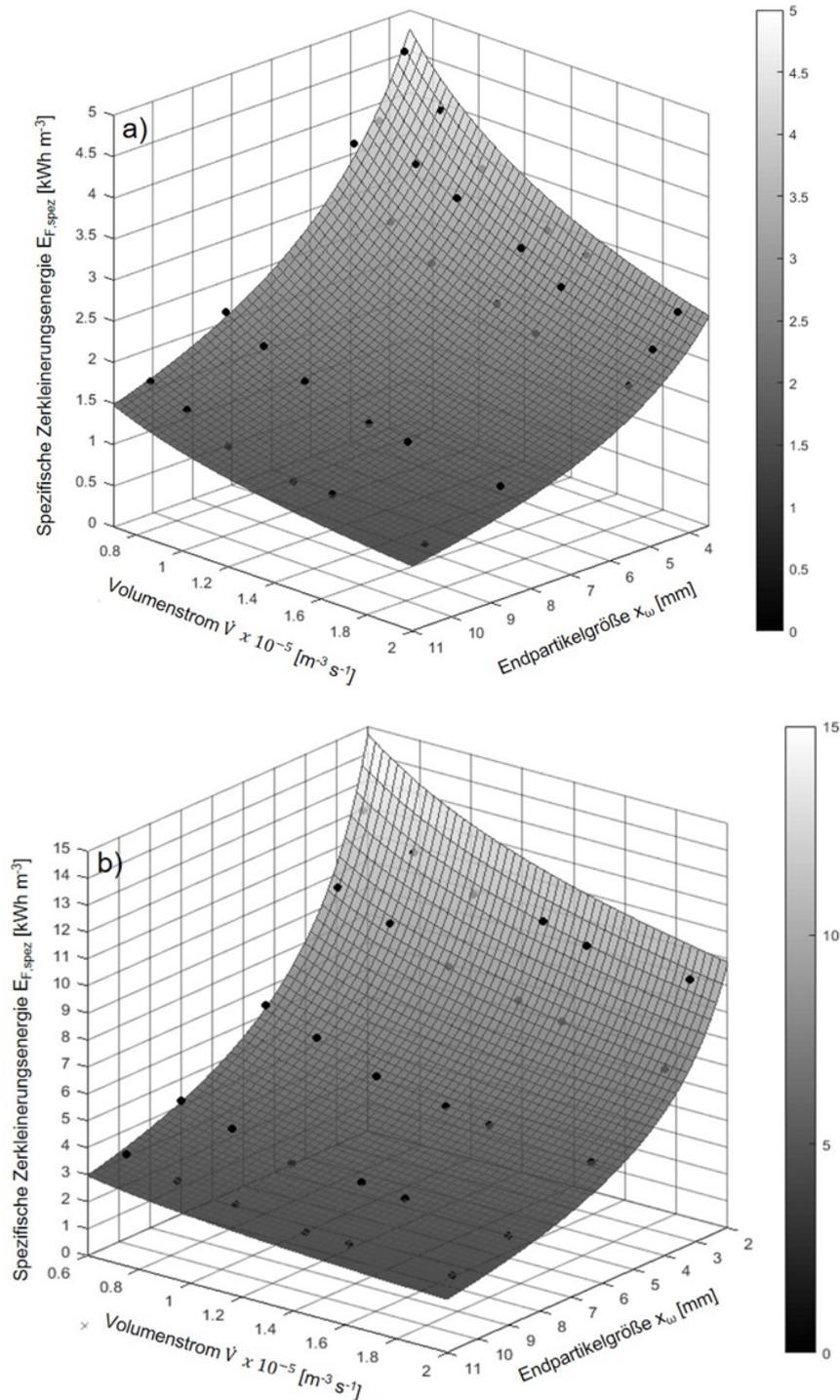
Modelladäquatheit bestimmen zu können, wurden zur visuellen Abschätzung Paritätsdiagramme erstellt. Da sich die zugehörigen Gleichungen stark ähneln, werden nur die Paritätsdiagramme für WDVS mit EPS (Abbildung 2.31a) und WDVS mit XPS (Abbildung 2.31b) vorgestellt.



**Abbildung 2.31:** Paritätsdiagramme zur Überprüfung der Modelle für WDVS mit EPS (a) und WDVS mit XPS (b). Messpunkte vom kleinsten bis zum größten Volumenstrom ( $V_1 - V_6$ )

Die Abbildungen verdeutlichen, dass die Werte um die Winkelhalbierende sowohl für WDVS-EPS als auch für WDVS-XPS mit einem Fehler um ca. 10% streuen. So konnte für die Abweichung der Modelle ein maximaler relativer Fehler  $y$  für WDVS-EPS von  $y_{\max} = 10,46\%$ , für WDVS-XPS von  $y_{\max} = 12,59\%$ , für EPS  $y_{\max} = 13,50\%$  und für XPS  $y_{\max} = 13,98\%$  bestimmt werden. Abbildung

2.32 zeigt den direkten Zusammenhang zwischen der Zerkleinerungsenergie  $E_{F,spez}$ , der Endpartikelgröße  $x_\omega$  und dem benötigten Volumenstrom  $\dot{V}$  für WDVS mit EPS (a) und WDVS mit XPS (b).



**Abbildung 2.32:** Abhängigkeit der spezifischen Zerkleinerungsenergie  $E_{F,spez}$  von der Endpartikelgröße  $x_\omega$  und dem Volumenstrom  $\dot{V}$  mit eingetragenen Messwerten für WDVS mit EPS (a) und WDVS mit XPS (b)

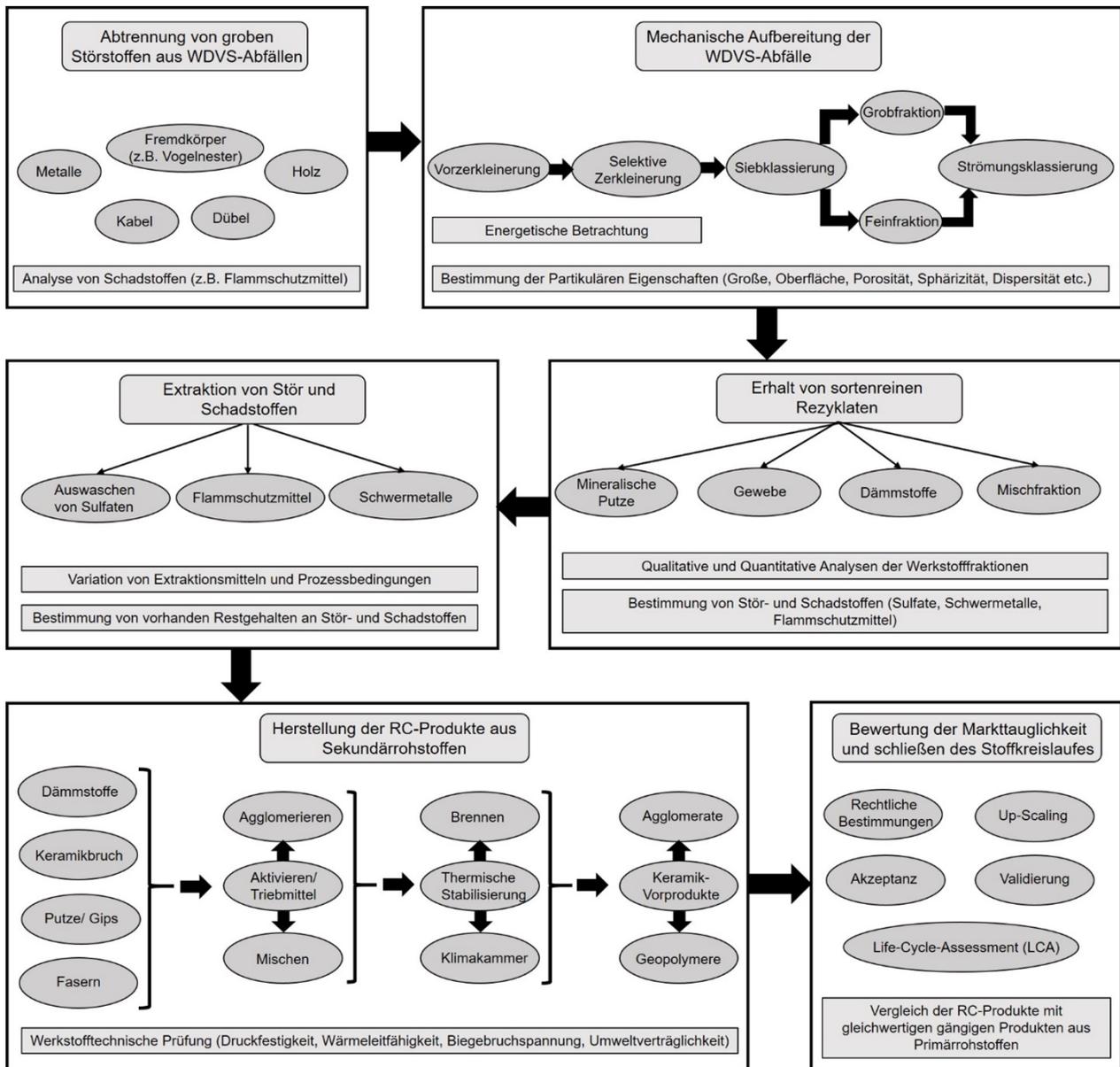
Wie bereits auf Basis der Paritätsdiagramme vermutet, streuen die Messpunkte um die modellierte Fläche. Dies zeigt sich sowohl für WDVS-Abbruchmaterialien mit EPS, als auch für jene mit XPS. Mittels der hier durchgeführten Modellierung konnte nun ein erstes Abschätzungsmodell zur Bestimmung der spezifischen Zerkleinerungsenergie  $E_{F,spez}$  in Abhängigkeit des Volumenstromes  $\dot{V}$  und der Endpartikelgröße  $x_{50,3,\omega}$  für die untersuchten elastischen Komposite bzw. Dämmstoffmaterialien

---

aufgestellt werden. An dieser Stelle sei erwähnt, dass der Zerkleinerungsprozess durch eine Vielzahl an weiteren Parametern wie Dichte, Bruchverhalten, Sprödigkeit, Mühlentyp etc. beeinflusst wird, welche hier nur grob in der materialspezifischen Konstante  $c_F$  zusammengefasst sind. Aufgrund der Unkenntnis der einzelnen Parameter kann es bei empirischen Modellen häufig zu teils starken Abweichungen kommen. Leider konnte bis zu diesem Zeitpunkt kein direkter Zusammenhang zwischen allen Parametern und der Zerkleinerungsenergie hergestellt werden. Somit bleibt das hier entwickelte empirische Modell auf die untersuchten Größenbereiche und verwendeten Apparaturen beschränkt. Allerdings kann nun die Zerkleinerungsenergie in Bezug auf gewisse Parameter mit moderaten Abweichungen vorhergesagt werden. Dies stellt einen wichtigen Schritt dar, um den vorgestellten Recycling- bzw. Aufbereitungsprozess auf einen größeren Maßstab zu übertragen. Nur so kann es langfristig gelingen die vermehrt anfallenden WDVS-Abbruchmaterialien unter ökonomischen Rahmenbedingungen aufzubereiten.

## **2.13 Konzeption der Technologie zum Recycling von WDVS (AP4 &7)**

Auf Basis der in der vorliegenden Arbeit enthaltenen Daten bzw. Prozessparametern und Informationen konnte aus verfahrenstechnischer Sicht eine detaillierte Recyclingstrategie entwickelt werden. Hierbei wurde die Abfolge der einzelnen Prozessschritte genauestens beachtet, und die individuellen Apparaturen und Analysegeräte präzise ausgewählt. Ebenfalls wurden die Projektteilnehmer ausführlich konsultiert, um gängige Anlagentechnik zu diskutieren und auszuwählen, und um die hier vorgeschlagene Recyclingstrategie durch ein Up-Scaling in der Wirtschaft zu etablieren. So soll der entwickelte Verwertungsweg auf frei definierbare WDVS-Abbruchmaterialien angewandt werden. Die Verwertungsstrategie beinhaltet verfahrenstechnische Prozessschritte, wie die Zerkleinerung, Sieb- und Strömungsklassierung incl. Partikelgrößencharakterisierung und Schadstoffanalysen. Ebenfalls wurde für in die Recyclingstrategie eine Wiederverwertung der rückgewonnenen Sekundärrohstoffe implementiert. Allerdings ist die Recyclingstrategie keine monotone, statische Abbildung, sondern eine dynamische sich mit zunehmendem Kenntniserfolg entwickelnde Konformität, die über den gesamten Forschungszeitraum angepasst werden musste. Somit kann der Prozess an die ökologischen und ökonomischen Rahmenbedingungen des Freistaates Bayern bzw. der Bundesrepublik Deutschland angepasst werden. Abbildung 2.37 zeigt das entwickelte Fließschema zur sortenreinen und schadstoffarmen Aufbereitung von individuellen WDVS. Ebenfalls enthält die Verwertungsstrategie einen Vorschlag für die Wiederverwertung der erhaltenen Rezyklate.



**Abbildung 2.37:** Verfahrenstechnische Aufbereitungs- und Verwertungsstrategie zur sortenreinen Aufbereitung von Wärmedämmverbundsystemen um den Stoffkreislauf von WDVS-Abfällen langfristig schließen zu können [30–32]

Die hier grob skizzierte Verwertungsstrategie basiert auf dem volumenbezogenen Abfallaufkommen und der komplexen Beschaffenheit von anfallenden WDVS-Abbruchmaterialien. Nach dem Abbruch der WDVS befinden sich an den Systemen bzw. Dämmstoffmaterialien Befestigungsmaterialien wie Metallschienen, Holze, Dübel und Klebstoffe, sowie Witterungsschäden oder biologische Störstoffe. Diese müssen vor der mechanischen Aufbereitung überwiegend entfernt werden, da sie für den Zerkleinerungsprozess hinderlich sind. Hier müssen zunächst Proben der erhaltenen Abbruchabfälle analysiert und auf etwaige Schadstoffe hin untersucht werden. So kann die Recyclingfähigkeit der anfallenden Abfälle nach geltenden rechtlichen Bestimmungen beurteilt werden. Anschließend können Zerkleinerungsprozesse mit variierenden Massenströmen  $\dot{m}$  und Einlegrostmaschenweiten  $w$  durchgeführt werden. Dies richtet sich nach den gewünschten Partikelgrößen bzw. den Zerkleinerungsgraden  $Z$  der jeweiligen Werkstoffe. Da der Zerkleinerungsprozess einen der energieaufwändigsten Prozessschritte in der Aufbereitungstechnik darstellt, sollte er so ökonomisch wie möglich

---

durchgeführt werden, um die angestrebten Produkte bzw. Aufschlüsse erreichen zu können. Grundsätzlich entsteht bei der Zerkleinerung von Mehrkomponentensystemen mit einer breiten Rohstoffbasis ein Partikelkollektiv mit einem hohem Feingutanteil. Aufgrund der Haftkräfte zwischen den Partikeln und der elektrostatischen Aufladung des Dämmstoffmaterials ist die Fraktion „Feingutanteil“ vergleichsweise komplex aufzutrennen. Aus diesem Grund wurde im Anschluss an den Zerkleinerungsprozess eine Siebklassierung implementiert. Hierdurch kann der Feingutanteil von der Grobfraction effizient abgetrennt werden. Aufgrund des hohen Dichteunterschiedes der jeweiligen Werkstoffe ist die Strömungsklassierung die einfachste und effizienteste Methode, um die Materialien der Fein- und Grobfraction voneinander trennen zu können. So können aus den Mischfraktionen sortenreine Stoffströme rückgewonnen werden, welche für eine Wiederverwertung größtenteils geeignet sind [30–32]. Je nach Einsatzgebiet der rückgewonnenen Rohstoffe werden an die erhaltenen aufbereiteten Fraktionen unterschiedliche Anforderungen in Bezug auf ihre partikulären Eigenschaften gestellt. Die mineralischen Partikelkollektive, welche eine breite Verteilungssummenfunktion  $Q_3(x)$  aufweisen, werden beispielsweise zur Erhöhung der Packungsdichte bei Füllstoffen bevorzugt. Eine enge Verteilungssummenfunktion  $Q_3(x)$  mit geringer Partikelgröße  $x$  wird bei der Herstellung von Recycling-Ziegeln und Geopolymersteinen gewünscht, wo hohe Festigkeitskennwerte und Oberflächen  $S_v$  angestrebt werden [33–35]. Separierte Glasfasern können zur Steigerung von Druckfestigkeiten in Bauprodukten genutzt werden, was großtechnisch zum Teil bereits durchgeführt wird [36; 37]. Zu den partikulären Eigenschaften zählen, neben der Partikelgröße  $x$ , der Zerkleinerungsgrad  $Z$ , die Dispersität  $\kappa$ , die spezifische Oberfläche  $S_v$ , und die Sphärizität  $\psi$ , mit welcher sich die Kollektive beschreiben lassen. Da es sich bei den aufbereiteten Dämmstofffraktionen um eine Materialfraktion mit hohem Volumen und hoher Porosität handelt, stellt die physikalische Beanspruchung in den Bereichen Transport und Weiterverarbeitung einen zusätzlichen Faktor dar. So muss zusätzlich über die Schütt-  $\rho_{\text{Schütt}}$  und Stampfdichte  $\rho_{\text{Stampf}}$  die Kompressibilität  $\xi$  und die Volumenminderung  $H$  bestimmt werden. Mittels der Methode der „Soxhlet-Extraktion“ bzw. der Eluation, können etwaige Stör- und Schadstoffe (insbesondere das Flammschutzmittel HBCD in den Dämmstoffmaterialien) ausgeschläußt werden. Hier muss ein geschlossener Lösemittelkreislauf gebildet werden, um den Prozess so effizient wie möglich zu gestalten. Ziel ist es, aus den rückgewonnenen Sekundärrohstoffen neuartige und hochwertige Recycling-Produkte (RC-Produkte) für den Hochbausektor zu gestalten. Vorangegangenen Forschungsvorhaben haben bestätigt, dass aus anfallenden Bau-Reststoffen wie z.B. Mauerziegelbruch, Keramik-Reststoffen, und Porenbeton neue RC-Bauprodukte entwickelt werden können. So konnten aus den Rezyklaten unter Zugabe von Treibmitteln hochwertige Agglomerate für Hochbauanwendungen mit poröser Struktur, Zuschlagstoffe für Leichtbeton, Materialien für Wärmedämmung und Schallschutz, sowie Trägermaterialien für Pflanzennährstoffe entwickelt werden. Der hier rückgewonnene mineralische Putz kann ebenfalls für diese RC-Produkte genutzt werden. Darüber hinaus wurden aus diesen Sekundärrohstoffen Geopolymer-basierte RC-Produkte als Betonersatzstoffe entwickelt und hergestellt. Diese Produkte weisen günstige werkstofftechnische Eigenschaften in Bezug auf Druckfestigkeit, Wärmeleitfähigkeit sowie Schadstoffgehalt auf und stellen damit ein preiswertes und besonders konkurrenzfähiges Vor- bzw. Endprodukt für Baustoffe und Keramiken dar. Für die Verwertung von Dämmstoffmaterialien ergeben sich nach jetzigem Stand zweierlei Verwertungsmöglichkeiten. Zum einen kann rückgewonnenes EPS und XPS beim POROTON-Verfahren zur Herstellung hochwärmedämmender Mauerziegel als Porosierungsmittel eingesetzt werden. Da alle Ziegelwerke über eine thermische Nachverbrennung verfügen, spielt u.a. das im Dämmstoff enthaltene HBCD keine Rolle; es wird thermisch zu  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  und unkritischen Bromverbindungen zersetzt [38]. Diese Methode ist bei einer hohen Belastung

---

von HBCD zu favorisieren. Hingegen wäre über eine Extraktion des Flammschutzmittels eine nicht-thermische Verwertung als Polystyrol Re-Granulat möglich. Aufgrund der grob skizzierten Verwertungsstrategie wurde eine spezifische Auswahl an Technologien, Methoden und Apparaturen zusammengestellt, um die sortenreine Aufbereitung zu verwirklichen.

### **3 Darstellung, Bewertung und Anwendbarkeit der erzielten Ergebnisse**

Aufgrund der zunehmenden Herstellung und Verwertung von Baustoffen werden in den kommenden Jahrzehnten die Abfallströme aus der Baubranche in Bayern deutlich ansteigen. Deshalb müssen im Sinne des KrWG die anfallenden Massenströme an Rest-Baustoffen einem sinnvollen Verwertungsweg zugeführt werden. Nach dem Prinzip „Cradle to Cradle“ werden mit der Aufbereitung und der Rückführung von homogenen Materialfraktionen an bereits bestehende Herstellungsprozesse wichtige Rohstoffressourcen und wertvoller Deponieraum geschont. Das hier vorgestellte Vorhaben leistet einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Ressourceneffizienz durch werkstoffliches Recycling sowie der Rückführung verbrauchter Komponenten in Form aufbereiteter, homogener und schadstofffreier Sekundärrohstoffe im Freistaat Bayern. Somit wird am Produktionsstandort Bayern die Wettbewerbssituation von Firmen deutlich verbessert, welche diese Technologie annehmen. Mit der Durchführung dieses Forschungsvorhabens und der späteren Umsetzung in den entsprechenden Industriezweigen entsteht für die Bevölkerung und die Umwelt in Bayern ein enormer Nutzen durch Ressourcen- und Deponieschonung und vorallem durch Rückführung und Integration der Sekundärrohstoffe in die Bauindustrie.

Der in diesem Forschungsvorhaben entwickelte und erprobte Recyclingweg wurde erfolgreich im Labormaßstab angewendet. Durch die energieeffiziente Aufbereitung und die erhaltenen Rezyklate mit hoher Qualität steigt der wirtschaftliche und gesellschaftliche Nutzen der Rezyklate enorm. Nach erfolgreichem Projektabschluss kann bei einem Ziel-TRL von 5 – 6 der Recyclingweg bereits in der bayerischen Recyclingindustrie bzw. Abfallwirtschaft angewendet werden. Eine Etablierung des Aufbereitungsverfahrens am Markt ist somit realistisch und dringend erforderlich. Mögliche Risiken stellen hierbei das Upscaling des Herstellungsverfahrens dar, da die betrachteten Abfälle in ihrer Homogenität stark variieren. Rechtliche Randbedingungen in Bezug auf Schadstoffgehalte müssen überprüft und ggf. angepasst werden. Ein weiteres mögliches Risiko kann eine Ablehnung des Endverbrauchers gegenüber recycelten Produkten sein. Nach erfolgreichem Projektabschluss können aus den entstandenen Forschungsergebnissen und dem hieraus resultierenden wissenschaftlichen Informationsgewinn, sowie den daraus entstandenen Verwertungswegen und optimierten Prozesseinstellungen, Lizenzen, Schutzrechte bzw. Patente entwickelt werden. Eine erfolgreiche wirtschaftliche Übertragung der entwickelten Technologien soll nach Projektabschluss über langjährige Wirtschaftspartner der THN aus der Recyclingbranche in Bayern erfolgen. In den darauffolgenden Jahren soll zwischen den Industriefirmen und der THN ein reger Wissenstransfer stattfinden, damit das erhaltene Know-How in die Recyclingwirtschaft etabliert werden kann. Somit würde in den ersten drei Jahren nach Projektabschluss eine systematische Etablierung des Recyclingweges am Markt und ein erhöhtes Bewusstsein für Recyclingprodukte in der Gesellschaft entstehen.

---

## 4 Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts

### Journal Artikel:

---

T. Fehn; U. Teipel, *Recycling von Wärmedämmverbundsystemen*, ReSource, **2019**, 32(4), 18–22, ISSN: 1868-9531.

T. Fehn; U. Teipel, *Werkstoffliche Aufbereitung von Wärmedämmverbundsystemen*, Chemie Ingenieur Technik, **2020**, 92(4), 431–440, DOI: 10.1002/cite.201900124

T. Fehn; F. Kugler; B. Tübke; R. Schweppe; P. Mebert; W. Krcmar; U. Teipel, *Charakterisierung und Störstoffanalyse von rückgewonnenen Stoffströmen aus Wärmedämmverbundsystemen*, Chemie Ingenieur Technik, **2021**, 93(5), 771–780, DOI: 10.1002/cite.202000215

T. Fehn; S. Wolf; A. Schreiber; U. Teipel, *Bestimmung der partikulären Eigenschaften von aufbereiteten Sekundärrohstoffen aus Wärmedämmverbundsystemen*, Chemie Ingenieur Technik, **2021**, 93(11), 1792–1804, DOI: 10.1002/cite.202100054

T. Fehn; M. P. Elsner; R. Schweppe; U. Teipel, *Bestimmung der Prozessparameter von Zerkleinerungsprozessen für dämmstoffhaltige Kompositmaterialien*, Chemie Ingenieur Technik, **2021**, 94(3), DOI: 10.1002/zit.202100137

### Konferenz Beiträge und Teilnahmen:

---

- **Buchbeiträge**

T. Fehn; U. Teipel, 9. Wissenschaftskongress Abfall und Ressourcenwirtschaft; „*Aufbereitung von komplexen Kompositmaterialien*“ Amberg, Deutschland, 8. – 9. **Oktober 2020**, innsbruck university press, ISBN: 978-3-903187-48-1

T. Fehn; U. Teipel, *Symposium Rohstoffinnovationen und Rohstoffeffizienz* Bd: 5, „*Werkstoffliches Recycling von Wärmedämmverbundsystemen*“ Pfinztal, Deutschland, 9. – 10. **Mai 2020**, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN: 978-3-8396-1466-2

T. Fehn; U. Teipel, 12. Nordhäuser Sekundärrohstoff- Workshop; „*Werkstoffliche Aufbereitung von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS)*“ Nordhausen, Deutschland, 24. – 25. **Oktober 2020**; erhältlich online über [https://wertstoffwende.eu/nordhaeuser\\_seroworkshop/](https://wertstoffwende.eu/nordhaeuser_seroworkshop/)

- **Vorträge**

9. Wissenschaftskongress Abfall und Ressourcenwirtschaft; „*Aufbereitung von komplexen Kompositmaterialien*“ Amberg, Deutschland, 8. – 9. **Oktober 2019**

12. Nordhäuser Sekundärrohstoff- Workshop; „*Werkstoffliche Aufbereitung von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS)*“ Nordhausen, Deutschland, 24. – 25. **Oktober 2019**

---

Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Rohstoffe, *Mechanische Zerkleinerung und Aufbereitung von dämmstoffhaltigen Kompositmaterialien*, Bamberg, Deutschland 30. März – 1. April 2022

- **Poster**

*Symposium Rohstoffinnovationen und Rohstoffeffizienz Bd: 5, „Werkstoffliches Recycling von Wärmedämmverbundsystemen“* Pfinztal, Deutschland, 9. – 10. Mai 2020

## **5 Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern und im Projektverbund**

Es konnte über den Projektverbund des vorliegenden Forschungsvorhabens von den beteiligten Firmen unterschiedlich anfallende WDVS-Abbruchmaterialien beschafft und in einem ersten Schritt vor Ort charakterisiert werden. So konnten WDVS-Abbruchmaterialien aus den unterschiedlichen Jahrzehnten mit unterschiedlichen Werk- und Inhaltsstoffen beschafft werden. Der aktuelle Stand der Recycling-Strategie und der durchgeführten Versuche im Labormaßstab wurde regelmäßig mit den beteiligten Partnern kommuniziert und diskutiert. So wurde beispielsweise die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Wiederverwertung von Sekundärrohstoffen erörtert. So wurde nachträglich eine umfassende Schad- und Störstoffanalyse in den Aufbereitungsweg von WDVS implementiert. Ebenfalls wurde über eine mineralogische Analyse der Putzbestandteile diskutiert, welche ebenfalls in die Strategie eingebettet wurde. Bereits im ersten Teil des Forschungsvorhabens wurde vorhandene Anlagentechnik in Recyclingbetrieben diskutiert, was maßgeblich zur Konzeption der Verwertungsstrategie beitrug. Ebenfalls wurde eng mit dem Fraunhofer IVV zusammengearbeitet, wobei hierbei die Extraktion bzw. die Analyse des Flammschutzmittels HBCD im Vordergrund stand. Die durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass die im Labormaßstab getestete Recyclingstrategie, voraussichtlich im industriellen Maßstab durchgeführt werden kann. Über die Projektlaufzeit hinaus sollen neueste Erkenntnisse im Bereich des Recyclings von WDVS ausgetauscht werden. Darauf basierend können zukünftige Versuche modifiziert bzw. optimiert werden.

## **6 Zusammenfassung**

Ein essenzieller Bau- bzw. Kompositwerkstoff zur energetischen Sanierung von Gebäuden sind aktuell und zukünftig Wärmedämmverbundsysteme (WDVS). Hierdurch wird der Transmissionswärmeverlust von Gebäudefassaden deutlich reduziert, wodurch ein hoher Anteil an Heizenergie eingespart werden kann. Jedoch haben die ersten Systeme zum jetzigen Zeitpunkt ihre maximale Standzeit erreicht und stellen aktuell einen immer weiter ansteigenden Abfallstrom in der Bundesrepublik Deutschland dar. Aktuell existiert in der Aufbereitungsbranche keine etablierte Recyclingtechnologie zur sortenreinen Aufbereitung von WDVS. Die resultiert aus den individuell verbauten Werkstoffen der vergangenen Generationen und dem komplexen Verbund. Ebenfalls bestehen in Bezug

---

auf Schad- und Störstoffe in den jeweiligen Materialien viele Unsicherheiten für die Wiederverwertung. Somit werden WDVS überwiegend thermisch verwertet, wodurch ein erhebliches Ressourceneffizienzpotential verloren geht. Primäres Ziel dieses Forschungsvorhabens war es daher, anfallende WDVS-Abbruchmaterialien mit denen am häufigsten verwendeten Dämmstoffen EPS und XPS mechanisch so aufzubereiten, dass sortenreine Sekundärrohstoffe für eine hochwertige Wiederverwertung zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund wurde durch das Verbundvorhaben ForCYCLE II -WDVS- eine Recyclingstrategie bestehend aus verfahrenstechnischen Prozessschritten wie der Zerkleinerung, Sortierung, Sieb- und Strömungsklassierung entwickelt, um diese Verbundwerkstoffe überwiegend sortenrein und nach den geltenden ökonomischen sowie ökologischen Rahmenbedingungen aufzubereiten. Dies geschah unter der hohen Beteiligung von bayerischen Firmen, Handwerkern und Clustervereinigungen.

Bis zur Durchführung dieses Forschungsvorhabens war es überwiegend unbekannt, welchen Einfluss unterschiedliche Prozessparameter des Zerkleinerungsprozesses auf die spezifische Zerkleinerungsenergie und die partikulären Eigenschaften der Zerkleinerungsprodukte bzw. die erhaltenen Rezyklate der individuellen Werkstoffe besitzen. Hierzu wurden WDVS- und Dämmstoff-Abbruchmaterialien unterschiedlicher Generationen in unterschiedlichen Hammermühlen mit variierenden Prozesseinstellungen zerkleinert, um den komplexen Verbund der Kompositmaterialien aufschließen zu können. Anschließend konnten die jeweilig erhaltenen Zwischen- und Endprodukte umfangreich mittels der dynamischen Bildanalyse und der Siebanalyse auf deren partikulären Eigenschaften charakterisiert werden. Zusätzlich war es Ziel der Zerkleinerungsversuche, einen funktionellen Zusammenhang zwischen der Zerkleinerungsenergie und den partikulären Eigenschaften herzustellen. Hierdurch sollten die Ergebnisse auf bestehende Zerkleinerungsmodelle übertragen und anschließend so modifiziert werden, dass ein neues Zerkleinerungsmodell formuliert werden konnte. Aufgrund der unterschiedlichen komplexen Materialverhalten wurde zusätzlich in einer eigens umgebauten Hammermühle der Bruchvorgang der WDVS mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgenommen, analysiert und ausgewertet. So soll es zukünftig gelingen WDVS-Abbruchmaterialien für frei definierbare Parameter effizient und so ökonomisch wie möglich aufzubereiten. In einem weiteren Schritt wurden die Zerkleinerungsprodukte mittels Sieb- und Strömungsklassierung so aufbereitet, dass möglichst sortenreine Stoffströme erzeugt werden konnten.

Mittels hochsensitiver Analysemethoden konnte die Reinheit und die mineralogische Zusammensetzung der jeweiligen Rezyklate bestimmt und somit der Recyclingprozess ggf. angepasst werden. Zusätzlich müssen in Bezug auf rechtliche Beschränkungen von Sekundärrohstoffe etwaige Grenzwerte für Schwermetalle und Flammschutzmittel untersucht werden. Mittels unterschiedlichen Analysemethoden konnte die hohe Reinheit der Werkstoffe überprüft und deren Eignung bestätigt werden. Durch umfangreiche HBCD-Analysen konnte ebenfalls nachgewiesen werden, dass die jeweiligen Fraktionen bedenkenlos als Sekundärrohstoff verwendet werden können, da alle Werte deutlich unter den geforderten 3 wt.-% HBCD lagen. So zeigt sich, dass die jeweilig rückgewonnenen Sekundärrohstoffe als höchst geeignet erscheinen, um diese als Sekundärrohstoffe für hochwertige Recyclingprodukte (RC-Produkte) nutzen zu können. Ebenfalls konnte durch umfangreiche Untersuchungen am Flammschutzmittel HBCD festgestellt werden, dass die Möglichkeit besteht, dieses extrahieren zu können. Hierzu werden in einer Pilotanlage des Fraunhofer IVV umfangreiche Versuche in Anwendungsumgebung durchgeführt. Mittels der durchgeführten Untersuchungen konnte ein erster Ansatz zur sortenreinen Aufbereitung von WDVS formuliert, getestet und validiert werden.

---

Hierdurch kann der Stoffkreislauf von WDVS unter hohen ökonomischen und ökologischen Rahmenbedingungen, vollständig geschlossen werden.

## **7 Ausblick**

Zum jetzigen Zeitpunkt konnten alle veranschlagten Laborversuchen in den jeweilig formulierten Arbeitspaketen nicht nur erreicht, sondern auch erweitert bzw. optimiert werden. Die mechanische Aufbereitung der WDVS-Abbruchmaterialien hat gezeigt, dass durch die Veränderung von Prozessparametern direkt Einfluss auf die partikulären Eigenschaften genommen werden kann. Diese Eigenschaften konnten genauestens analysiert bzw. charakterisiert werden. Ebenfalls konnten aufgezeigt werden, dass ein geschlossener Lösemittelkreislauf zur Extraktion des Flammschutzmittels HBCD durchgeführt werden kann und das Lösemittel nach der Extraktion erneut verwendet werden kann. Zukünftig müssen die mechanischen Versuche in Bezug auf weitere Abbruchmaterialien unterschiedlicher Generationen getestet, optimiert und die Verwertbarkeit der individuellen Fraktionen überprüft werden. Wie bereits beschrieben, wurde die Recyclingstrategie auf gängige Anlagentechnik der Recyclingindustrie angepasst. Somit sollte es in den kommenden Jahren möglich sein, die Strategie problemlos in die Industrie übertragen zu können. Zum jetzigen Zeitpunkt wird an der TH-Nürnberg ein Projekt im Rahmen des Landesministeriums für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie im Freistaat Bayern ein Forschungsvorhaben bearbeitet, welches sich mit der Weiterverarbeitung von Sekundärrohstoffen beschäftigt. Es könnten z. B. Rezyklate aus aufbereiteten WDVS für die Herstellung von Agglomeraten für den Wärme- und Schallschutz sowie Recycling-Ziegel verwendet werden. Ziel soll es sein, hochinnovative Bauprodukte aus RC-Materialien zu schaffen, um wichtige Primärressourcen zu schonen und wertvollen Deponieraum einzusparen. Langfristig soll hierbei die Akzeptanz sowohl für Industrie und Wirtschaft als auch für den Endverbraucher deutlich erhöht werden. Nur somit kann es in den kommenden Jahren gelingen, den Stoffkreislauf von anfallenden WDVS-Abfällen vollständig zu schließen.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt (UBA), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Referat Öffentlichkeitsarbeit, *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm I –Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen* -, 2012, Deutschland, Berlin, [www.bmu.de](http://www.bmu.de).
- [2] Umweltbundesamt (UBA), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Referat Öffentlichkeitsarbeit, *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm II –Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen-*, 2016, Deutschland, Berlin, [www.bmu.de](http://www.bmu.de).
- [3] Umweltbundesamt (UBA), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB), Referat Öffentlichkeitsarbeit, *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III –Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen-*, 2020, Deutschland, Berlin, [www.bmu.de](http://www.bmu.de).
- [4] T. Steiner, *Fachverband und Innendämmung, Praxishandbuch Innendämmung, Planung-Konstruktion-Details-Beispiele*, Müller-Rudolf Verlag, Deutschland, 2016, ISBN: 978-3481029739.
- [5] H. Oberhaus; F. Frössel; W. Haegele, *Wärmedämm-Verbundsysteme, Von der Thermohaut bis zur transparenten Wärmedämmung*, Fraunhofer IRB Verlag, Deutschland, 2008, ISBN: 978-3816774280.
- [6] W. Albrecht, Bauphysik-Kalender, *Recycling von Wärmedämmstoffen*, 2019, 121–138, DOI: 10.1002/9783433609842.ch4.
- [7] W. Albrecht; C. 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*, Fraunhofer IRB Verlag, 2015, ISBN: 978-3-8167-9411-0.
- [8] N. Heller; S. Flamme. Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen, *Entwicklung und Modellierung von Entsorgungswegen für WDVS-Abfälle, 4 Konferenz für Mineralische Nebenprodukte und Abfälle*, Bd: 4, TK Verlag Karl Thomé Kozmiensky, Deutschland, Berlin, 2017, ISBN: 978-3-944310-35-0.
- [9] Bundesverband Baustoffe–Steine und Erden e.V, *Mineralische Bauabfälle Monitoring 2016*, Dezember 2018, Berlin, Deutschland, [www.baustoffrecycling-bayern.de](http://www.baustoffrecycling-bayern.de).
- [10] B. Schneider, *Recycling-Informationssysteme*, Deutscher Universitätsverlag, Deutschland, Wiesbaden, 1999, ISBN: 978-3-8244-7018-1.
- [11] Statistisches Bundesamt (Destatis), *Umwelt, Abfallentsorgung*, 19(1), 2017, Deutschland, [www.destatis.de](http://www.destatis.de).

- 
- [12] H. Dresch; B. Dima; J. Horn; W. Grüttner; Mark, E., Frank, PlasticsEurope Der Verband der Kunststoffherzeuger, *Verwertung von Polystyrol-Schaumstoffabfällen mit HBCD, Untersuchung zur energetischen Verwertung von expandiertem Polystyrol-Schaumstoff (EPS) und extrudiertem Polystyrol-Schaumstoff (XPS), die als Flammenschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD) enthalten, durch die Mitverbrennung in der Abfallverbrennungsanlage für kommunale Abfälle der Stadt Würzburg*, 2015, Würzburg, Deutschland, [www.zvaws.de](http://www.zvaws.de).
- [13] H. Fromme; B. Hilger; E. Kopp; M. Miserok; W. Völkel, Environment international, *Polybrominated diphenyl ethers (PBDEs), hexabromocyclododecane (HBCD) and "novel" brominated flame retardants in house dust in Germany*, 2014, 64, 61–68, DOI: 10.1016/j.envint.2013.11.017.
- [14] L. S. Birnbaum; D. F. Staskal, Environmental health perspectives, *Brominated flame retardants: cause for concern?*, 2004, 1, 9–17, DOI: 10.1289/ehp.6559.
- [15] I. Miller; T. Serchi; S. Cambier; C. Diepenbroek; J. Renaut; J. H. J. van der Berg; C. Kwadijk; A. C. Gutleb; E. Rijntjes; A. J. Murk, Toxicology letters, *Hexabromocyclododecane (HBCD) induced changes in the liver proteome of eu- and hypothyroid female rats*, 2016, 40–51, DOI: 10.1016/j.toxlet.2016.01.002.
- [16] H. Jo; M.-H. Son; S.-H. Seo; Y.-S. Chang, Environmental pollution (Barking, Essex : 1987), *Matrix-specific distribution and diastereomeric profiles of hexabromocyclododecane (HBCD) in a multimedia environment: Air, soil, sludge, sediment, and fish*, 2017, 515–522, DOI: 10.1016/j.envpol.2017.04.093.
- [17] E. Roze; L. Meijer; A. Bakker; K. N. J. A. van Braeckel; P. J. J. Sauer; A. F. Bos, Environmental health perspectives, *Prenatal exposure to organohalogens, including brominated flame retardants, influences motor, cognitive, and behavioral performance at school age*, 2009, 12, 1953–1958, DOI: 10.1289/ehp.0901015.
- [18] Amtsblatt der Europäischen Union, Verordnung (EU), 2016/293, *Änderung der Verordnung (EG) Nr. 850/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates über persistente organische Schadstoffe hinsichtlich des Anhangs I*, 1 März 2016.
- [19] Amtsblatt der Europäischen Union, Verordnung (EU), 2016/460, *Änderung der Anhänge IV und V der Verordnung (EG) Nr. 850/2004 des Europäischen Parlaments und des Rates über persistente organische Schadstoffe*, 30 März 2016.
- [20] Umweltbundesamt (UBA), *Weltweites „Aus“ für Flammenschutzmittel HBCD*, Presse-Mitteilung Nr. 23 vom 8. Mai 2013, Dessau-Roßlau, Deutschland, [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de).
- [21] Umweltbundesamt (UBA), *Answers to frequently asked questions to Hexabromocyclododecane (HBCD)*, 2017, Deutschland, [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de).
- [22] J. Y. Zhu; G. S. Wang; X. J. Pan; R. Gleisner, Chemical Engineering Science, *Specific surface to evaluate the efficiencies of milling and pretreatment of wood for enzymatic saccharification*, 2009, 64(03), 474–485, DOI: 10.1016/j.ces.2008.09.026.

- 
- [23] L. Kratky; T. Jirout, *Chemical Engineering & Technology, Biomass Size Reduction Machines for Enhancing Biogas Production*, 2011, 34(03), 391–399, DOI: 10.1002/ceat.201000357.
- [24] Y. Zhong; H. Wang; Z. Yu; X. Geng; C. Chen; D. Li; X. Zhu; H. Zhen; W. Huang; D. E. Fennell; L. Y. Young; P. Peng, *Frontiers in microbiology, Diastereoisomer-Specific Biotransformation of Hexabromocyclododecanes by a Mixed Culture Containing Dehalococcoides mccartyi Strain 195*, 2018, 9, 1713–1728, DOI: 10.3389/fmicb.2018.01713.
- [25] Y. Zhong; D. Li; X. Zhu; W. Huang; P. Peng, *Environmental geochemistry and health, Solvent effects on quantitative analysis of brominated flame retardants with Soxhlet extraction*, 2018, 1955–1964, DOI: 10.1007/s10653-017-9979-5.
- [26] Y. Zhong; P. Peng; Z. Yu; H. Deng, *Chemosphere, Effects of metals on the transformation of hexabromocyclododecane (HBCD) in solvents: implications for solvent-based recycling of brominated flame retardants*, 2010, 72–78, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.06.061.
- [27] Umweltbundesamt (UBA), *Substituting Environmentally Relevant Flame Retardants: Assessment Fundamentals, Volume I: Results and summary overview -*, 2000, Deutschland, www.umweltbundesamt.de.
- [28] F.-W. Wittbecker; Giersig Manfred, *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, Fire and Ecotoxicological Aspects of Polyurethane Rigid Foam*, Springer-Verlag, Deutschland, Berlin, ISBN: 0-387-95263-2.
- [29] N. Heller; M. Simons, *Recycling Technology Worldwide recovery, Entsorgung von Wärmedämmverbundsystemen mit EPS*, Bau-Verlag, Deutschland, 2018.
- [30] T. Fehn; U. Teipel, *ReSource, Recycling von Wärmedämmverbundsystemen*, 2019, 32(4), 18–22, ISSN: 1868-9531.
- [31] T. Fehn; U. Teipel, *Werkstoffliches Recycling von Wärmedämmverbundsystemen, Symposium Rohstoffinnovationen und Rohstoffeffizienz*, Bd: 5, Fraunhofer IRB Verlag, Deutschland, 2019, ISBN: 978-3-8396-1466-2.
- [32] T. Fehn; U. Teipel; R. Schweppe; D. Schulz, *Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden Württemberg, Abschlussbericht –Recycling von Wärmedämmverbundsystemen-*, 2019. Förderkennzeichnung: L7516026-16028.
- [33] M. Eisenlauer; H. Graf; U. Teipel, *Chemie Ingenieur Technik, Prozesstechnik zur Altholzaufbereitung*, 2018, 90(04), 521–532, DOI: 10.1002/cite.201700097.
- [34] W. Eden; B. Middendorf, *Mauerwerk, Entwicklung eines Recycling-Mauersteins - Verwendung von Abbruchmaterial und Baurestmassen und Anwendung der Kalksandstein-Technologie*, 2009, 13(01), 46–49, DOI: 10.1002/dama.200990004.
- [35] T. Reschke; E. Siebel; G. Thielen, *Beton : die Fachzeitschrift für Bau + Technik, Einfluß der Granulometrie und Reaktivität von Zement und Zusatzstoffen auf die Festigkeits- und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton*, 1999, 49(12), 719–724, ISSN: 0005-9846.
- [36] Frank, U, Vogdt; D. Fischer; F. Schaudienst; M. Schober, *Leitfaden Recyclingpotential von Mineralwolle, Optimierung der Stoffströme im Lebenszyklus von Bauprodukten, Forschungsinitiative Zukunft Bau*, Fraunhofer IRB Verlag, 2019, ISBN: 978-3-7388-0385-3.

- 
- [37] A. B. Kizilkanat; N. Kabay; V. Akyüncü; S. Chowdhury; A. H. Akça, *Construction and Building Materials, Mechanical properties and fracture behavior of basalt and glass fiber reinforced concrete: An experimental study*, 2015, 100, 218–224, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.006.
- [38] E. K. Jung; W. Krcmar, *Tile & Brick International, Porosifiers for the Production of Lightweight Bricks*, 1997, 13(1), 7–12, ISSN: 0938-9806.
- [39] Merkus, G, H, *Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality*, Springer-Verlag, Niederlande, 2009, ISBN: 978-1-4020-9016-5.
- [40] Y. Arai, *Chemistry of Powder Production*, Springer-Verlag, England, 1996, ISBN: 978-0-412-39540-6.
- [41] Fachbereich Umweltmesstechnik, VDI, 3491, *Messen von Partikeln - Herstellungsverfahren für Prüfaerosole - Grundlagen und Übersicht*, VDI/DIN-Kommission Reinhaltung der Luft (KRdL) - Normenausschuss, Deutschland, 2016.
- [42] M. Stuess, *Mechanische Verfahrenstechnik – Partikeltechnologie 1*, Springer-Verlag, Deutschland, 2009, ISBN: 978-3-540-32551-2.
- [43] F. Frössel, *Lexikon der Putz- und Stucktechnik*, Fraunhofer IRB Verlag, Deutschland, 1999, ISBN: 978-3816747000.
- [44] F. Frössel, *Handbuch Putz und Stuck –Herstellung, Beschichtung und Sanierung für Neu- und Altbau*, Fraunhofer IRB Verlag, Deutschland, 2003, ISBN: 978-3-7667-1567-8.
- [45] M. Müller, *Die Abbindebeschleunigung von Stuckgips durch Calciumsulfatdihydrat*, Kassel University Press, Kassel, Deutschland, 2007, ISBN: 978-3-89958-328-1.
- [46] Y. Zhong; D. Li; X. Zhu; W. Huang; P. Peng, *Environmental geochemistry and health, Solvent effects on quantitative analysis of brominated flame retardants with Soxhlet extraction*, 2018, 5, 1955–1964, DOI: 10.1007/s10653-017-9979-5.
- [47] Schlummer M, Vogelsang J, Fiedler D, Gruber L, Wolz G. Rapid identification of polystyrene foam wastes containing hexabromocyclododecane or its alternative polymeric brominated flame retardant by X-ray fluorescence spectroscopy. *Waste Management & Research*. 2015;33(7):662-670. doi:[10.1177/0734242X15589783](https://doi.org/10.1177/0734242X15589783)
- [48] <https://polystyreneloop.eu/>
- [49] P. Ritter von Rittinger, *Zweiter Nachtrag zum Lehrbuch der Aufbereitungskunde*, Ernst und Korn, Deutschland, 1867.
- [50] H. Rumpf, *Chemie Ingenieur Technik, Grundlegende physikalische Probleme bei der Zerkleinerung*, 1962, 11, 731–741, DOI: 10.1002/cite.330341104.
- [51] M. Zogg, *Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik, Mit 121 Bildern, 29 Tabellen und 32 Berechnungsbeispielen*, B.G. Teubner, Stuttgart, Deutschland, 1993, ISBN: 3-519-16319-5.
- [52] L. Gongbo; X. Xiaohu, *Minerals Engineering, Experimental investigation of the energy-size reduction relationship in comminution using fractal theory*, 1993, 2, 163–172, DOI: 10.1016/0892-6875(93)90130-F.

---

# Anhang

## Anlage 1: Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
$C_B$	$[m^{2.5} s^{-2}]$	Proportionalitätsfaktor nach Bond
$E_{\text{spez.}}$	$[kWh t^{-1}]$	spezifische Zerkleinerungsenergie
$H$	$[-]$	Hausner-Faktor
$m$	$[kg]$	Masse
$\dot{m}$	$[kg s^{-1}]$	Massenstrom
$n$	$[s^{-1}]$	Drehzahl
$P$	$[m^2 kg s^{-3}]$	Gesamtleistung
$P_{\text{Elek.}}$	$[m^2 kg s^{-3}]$	Elektrische Leistung
$P_{0,\text{Elek.}}$	$[m^2 kg s^{-3}]$	Leerlaufleistung
$Q_3(x)$	$[\%]$	Verteilungssumme
$R^2$	$[-]$	Korrelationskoeffizient
$t$	$[s]$	Zeit
$t_0$	$[s]$	Beginn Zerkleinerung
$t_E$	$[s]$	Ende Zerkleinerung
$u$	$[m s^{-1}]$	Umfangsgeschwindigkeit
$V$	$[m^3]$	Volumen
$w$	$[m]$	Einlegrostmaschenweite
$x$	$[m]$	Partikelgröße
$x_\alpha$	$[m]$	Aufgabegutpartikelgröße
$x_\beta$	$[m]$	Endpartikelgröße
$\kappa$	$[-]$	Dispersität
$\varphi$	$[\%]$	Volumenanteil
$\psi$	$[-]$	Sphärizität

---

## Anlage 3: Auflistung der Kooperationspartner aus der Wirtschaft

DIE GRÜNEN ENGEL

Antwerpener Straße 19., 90451 Nürnberg

Giering Stuck

Imkerstraße 10, 90542 Eckental