

# Abschlussbericht

## Recycling von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS)

von

Thomas Fehn, Ulrich Teipel

Technische Hochschule Nürnberg  
Institut für Interdisziplinäre Innovationen (iii)

Rainer Schweppe, Ditmar Schulz

Fraunhofer Institut für Chemische Technologie (ICT)

Förderkennzeichen: L7516026-16028

Laufzeit: 01.12.2016 – 31.12.2018

Die Arbeiten dieses Projekts wurden mit Mitteln  
des Landes Baden-Württemberg durchgeführt.

Mai 2019



**Baden-Württemberg**

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

**Abstract:** In diesem Abschlussbericht konnte ein Verwertungsweg entwickelt werden, welcher sich mit dem mechanischen Recycling kompletter WDVS-Modellsysteme beschäftigt. Nachdem in den erarbeiteten Arbeitspaketen sowohl die Makroskopischen wie auch die Eigenschaften und Strukturen der WDVS auf Mikroskopischer Ebene bekannt waren, konnten Potenziale zum Recycling zusammengefasst werden. Somit konnten anhand des entwickelten Verwertungsweges, orientierende Versuche einzelner Prozessschritte durchgeführt werden. Hierdurch wurde durch verschiedene verfahrenstechnische Prozessschritte wie der Sortierung, Zerkleinerung, Charakterisierung und Klassierung die morphologischen und partikulären Eigenschaften der Systeme so verändert werden, dass homogene und sortenreine Stoffströme aus dem komplexen Abfallstrom gewonnen werden konnten. Anschließend können diese einer neuen Wertschöpfungskette zugeführt werden. Aus den durchgeführten Laborversuchen konnte abschließen eine Auswahl an geeigneten Technologien zum Recycling der WDVS getroffen werden.

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung .....	1
2.	Stand der Technik .....	2
3.	Zielsetzung und Arbeitsplan .....	5
4.	Entwicklung einer Prozesskette zur werkstofflichen Verwertung von WDVS ...	6
5.	Materialien und Methoden .....	8
5.1	Verwendete Materialien .....	8
5.2	Methoden .....	10
5.2.1	Hammermühle .....	10
5.2.2	Strömungsklassierung mittels Zickzacksichter .....	10
5.2.3	Schneidmühle .....	11
5.2.4	Kugelmühle .....	11
5.2.5	Analysemethoden .....	11
6.	Versuchsdurchführung .....	12
7.	Auswertung und Ergebnisse .....	14
7.1	Durchführung der mechanischen Vorversuche .....	14
7.1.1	Zerkleinerung mittels Schneidmühle .....	15
7.1.2	Zerkleinerung mittels Kugelmühle .....	16
7.1.3	Zerkleinerung mittels Hammermühle .....	17
7.2	Anwendung des Verwertungsweges auf die konzipierten WDVS- Modellsysteme .....	20
7.2.1	Zerkleinerung der EPS-Modellsysteme mittels Hammermühle .....	20
7.2.2	Siebklassierung der zerkleinerten EPS-Modellsysteme .....	21
7.2.3	Strömungsklassierung der Grob- und Feinfraktion der EPS-Modellsysteme .	25
7.2.4	Zerkleinerung der XPS-Modellsysteme mittels Hammermühle .....	32
7.2.5	Siebklassierung der zerkleinerten XPS-Modellsysteme .....	33
7.2.6	Strömungsklassierung der Grob- und Feinfraktion der XPS-Modellsysteme .	37
8.	Diskussion der Ergebnisse des angewandten Verwertungsweges auf die konstruierten WDVS-Modellsystem .....	44
9.	Analytische Bestimmung der erhaltenen homogenen Materialfraktionen .....	47
9.1	TGA Prinzip und Auswertung .....	48
9.2	ICP-OES Prinzip und Auswertung .....	50
9.3	Berechnung der eingesetzten Massen .....	53
9.4	Diskussion .....	55

10.	Analyse von WDVS-Abbruchmaterialien.....	56
10.1	Probenvorbereitung .....	57
10.1.1	Dokumentation der Probenvorbereitung: .....	57
10.2	Auswertung der ICP-Messungen zur Elementaranalyse.....	59
10.2.1	Durchführung .....	59
10.2.2	Ergebnisse .....	60
11.	Auswertung der XRF-Messungen zur Brombestimmung .....	63
11.1	Durchführung .....	63
11.2	Ergebnisse .....	63
12.	Auswertung des thermischen Verhaltens über TGA .....	64
12.1	Durchführung .....	64
12.2	Ergebnisse .....	65
13.	Zusammenfassung.....	80
	Literaturverzeichnis .....	83
	Abbildungsverzeichnis.....	85
	Tabellenverzeichnis.....	88

In der vorliegenden Arbeiten wurden die Kapitel 1-8 von der **Technischen-Hochschule Nürnberg** Verfasst. Kapitel 9-12 wurden von dem **Fraunhofer-Institut für chemische Technologie ICT** durchgeführt.

## 1. Einleitung

In den vorangegangenen Arbeitspaketen (AP) wurde bereits zum Thema „Recycling von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS)“ eine umfassende Literatur und Patentrecherche durchgeführt. So wurden die materialspezifischen Eigenschaften der Komponenten untersucht, welche in den komplexen WDVS vorhanden sein können. Hierzu wurde eine Datenbank angelegt, so dass genaue Kenntnisse vorliegen, welche WDVS derzeit am Markt vorhanden sind und aus welchen Materialien diese Systeme bestehen, welche Festigkeiten und Besonderheiten sie besitzen. Um ein besseres Verständnis für die Systeme zu erhalten, wurden WDVS-Modellsysteme mit definierten Eigenschaften und Zusammensetzungen konzipiert. Durch die genaue Zusammensetzung der jeweiligen Komponenten konnte im Anschluss festgestellt werden, welche Anteile im Recyclingprozess rückgewonnen werden konnten. Zusätzlich konnten WDVS-Abbruchmaterialien von einem Abbruchunternehmen beschafft werden. So konnten diese genau analysiert und deren Zusammensetzung bestimmt werden. Da die Makroskopischen wie auch die Eigenschaften und Strukturen der WDVS auf mikroskopischer Ebene bekannt waren, konnten nun Recyclingpotenziale ermittelt und zusammengefasst werden. Somit konnte nun ein Verwertungsweg zum mechanischen Recycling entwickelt werden. Eine gezielte werkstoffliche Verwertung von WDVS-Abfällen existiert aktuell noch nicht. Somit sind auch die Anforderungen an die Verwertungswege noch nicht klar definiert. Nachdem eine Recyclingstrategie klar definiert wurde, konnte mit den erworbenen Kenntnissen, Technologien für das Recycling ausgewählt werden. Anschließend wurden orientierende Laborversuche durchgeführt und deren Eignung für das Recycling überprüft. In einem ersten Prozessschritt wurde die mechanische Aufbereitung einzelner Komponenten durch einen oder mehrere Zerkleinerungsschritte, eine mögliche Separation und Klassierung der Komponenten in einem Gas- oder Flüssigkeitsstrom und eine ggf. notwendige Sortierung untersucht. Zusätzlich wurden die erhaltenen Partikelfractionen charakterisiert. Hierzu wurden die Methoden der Siebklassierung sowie die der optoelektronischen Messung zur dynamischen Bildanalyse angewandt. Durch die Kenntnisse über die Partikelgrößenverteilungen der einzelnen Fractionen konnte der Trennprozess analysiert und optimiert werden. Mit Hilfe des Fraunhofer ICT konnten die organischen und mineralischen Bestandteile der jeweiligen Fractionen bestimmt werden, um das Ergebnis qualitativ bewerten zu können. Nachdem die orientierenden Versuche erfolgreich abgeschlossen waren,

konnte auf Basis der Ergebnisse eine Auswahl an möglichen Technologien getroffen werden, die ein Potential zum Recycling von WDVS aufweisen. Somit konnte der zu Beginn erarbeitete Verwertungsweg auf Grundlage der erhaltenen Ergebnisse dahingehen optimiert werden, um einen orientierenden Vorschlag für eine Recyclingstrategie zu erarbeiten. Dies erfolgte unter Berücksichtigung der ökonomischen und ökologischen Randbedingungen und den Möglichkeiten der Recyclingindustrie.

## 2. Stand der Technik

Im Rahmen der Energiewende wurde 2012 das Ressourceneffizienz-Programm (Prog. zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen-ProgRess), der Bundesrepublik Deutschland verabschiedet. Die Energieeinsparung sowie Energie- und Ressourceneffizienz nimmt in diesem Programm eine zentrale Rolle in baugewerblichen Bereichen ein [1]. Einen wesentlichen Beitrag zur Energieeinsparung bei Gebäuden leistet die Verringerung des Transmissionswärmeverlustes. Dies wird u.a. erreicht durch Wärmedämmverbund-Systeme (WDVS) an den Gebäudehüllen. WDVS finden seit den 1970er Jahren eine breite Anwendung in Deutschland. Diese komplexen Komposite zeichnen sich durch einen mehrschichtigen Aufbau aus. Dieser besteht aus einer Dämmschicht, einer gewebearmierten Unterputzschicht und einer Oberputzschicht. *Abbildung 1* zeigt den entsprechenden Aufbau eines solchen Systems.

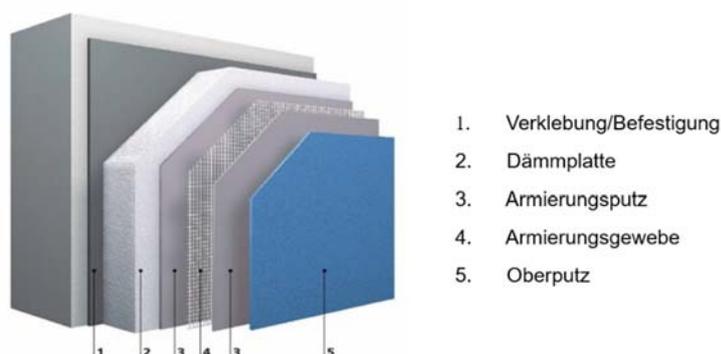


Abbildung 1: Üblicher Aufbau eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS) mit Benennung der individuellen Komponenten [2]

In der Bundesrepublik Deutschland werden jährlich ca. 230.000 Tonnen Dämmstoffe in der Bauindustrie verarbeitet. Davon sind ca. 50.000 - 70.000 Tonnen EPS (EPS = expanded polystyrene bzw. Styropor) und nahezu 42.000 Tonnen der anfallenden Dämmstoffabfälle enthalten einen hohen Anteil Hexabromcyclododecan (HBCD) als Flammschutzmittel [3].

Mit einem Marktanteil von 66 % wird als Dämmmaterial EPS/XPS verwendet, da dieser eine geringere Wärmeleitfähigkeit als andere Dämmstoffe vorweist und in der Herstellung vergleichsweise kostengünstig ist [4]. In *Abbildung 2* befindet sich eine Marktübersicht (Stand 2014) über die am häufigsten verwendeten Dämmstoffe welche in WDVS in der Bundesrepublik Deutschland, zum Einsatz kommen.

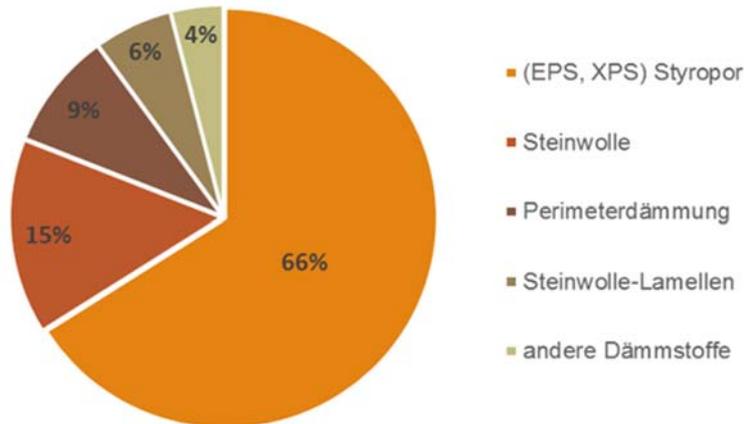


Abbildung 2: Marktanteil der am häufigsten verwendeten Dämmstoffe in WDVS der Bundesrepublik Deutschland (Stand 2014) [4]

Die WDVS der ersten Stunde haben inzwischen ihre Nutzungsdauer überschritten und stellen bereits heute und künftig in steigendem Ausmaß einen erheblichen Abfallstrom dar. Aufgrund der komplexen Zusammensetzung der WDVS existiert bis heute keine geeignete Aufbereitungstechnologie zur stofflichen Trennung der erhaltenen Werkstoffe, wodurch ein erhebliches Recyclingpotential verloren geht. Der Umgang mit diesen Abfällen und eine Wiederverwendung bzw. möglichst effiziente Rückgewinnung stehen immer mehr im Fokus der deutschen Abfallwirtschaft. Aufgrund ihres vielseitigen Anwendungsspektrums, besitzen sie eine breite Rohstoffbasis und bestehen aus mineralischen und / oder metallischen Materialien sowie aus Kunst- oder Naturstoffen. Angesichts dessen müssen Strategien und technologische Möglichkeiten für eine wertstoffliche Wiederverwertung des anfallenden Abfallstroms entwickelt werden. Aktuell werden verbrauchte WDVS in Deutschland überwiegend thermisch verwertet. Durch den hohen Heizwert der Dämmstoffmaterialien, überwiegend EPS/XPS (38 MJ/kg), haben die meisten Müllverbrennungsanlagen (MVAs) nicht die Möglichkeit komplette WDVS zu verbrennen. Nur 1-2 Gew. % EPS können dem normal anfallenden Abfall zugesetzt werden, da der Heizwert in den Kesselanlagen zu hoch wäre. Der durchschnittliche Heizwert der Kesselanlage einer MVA beträgt 10 MJ/KG (stand MVA Erlangen/Nürnberg) [5].

Erschwerend enthält das EPS das seit 2016 verbotene und gesundheitsschädliche Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD) was eine Aufbereitung und Verwertung der WDVS zusätzlich erschwert und eine Rückführung des EPS als Sekundärrohstoff an den Markt verhindert. *Abbildung 3* zeigt die Anwendungsbereiche des Flammschutzmittels HBCD.

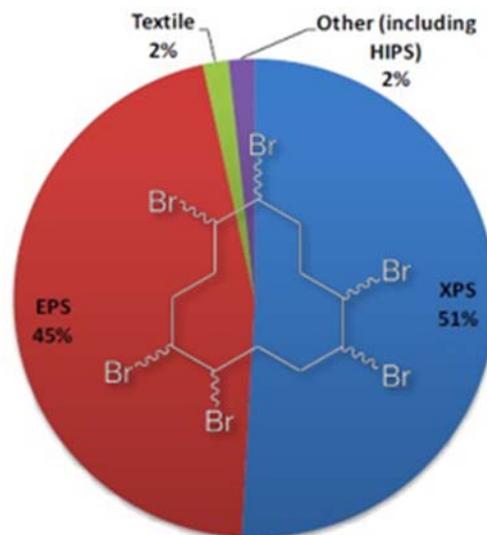


Abbildung 3: Anwendungsbereiche des Flammschutzmittels HBCD (Stand 2008) [6]

HBCD ist persistent, also in der Umwelt schwer abbaubar, und reichern sich im Grundwasser bzw. dem Erdreich an. Im Brandfall und bei unkontrollierter Entsorgung können sich hochgiftige Dioxine und Furane bilden. HBCD ist in der Umwelt inzwischen weit verbreitet und sogar in den Polarregionen nachweisbar [7]. Ein weiteres Entsorgungsproblem stellen die mineralischen Bestandteile in WDVS, wie z. B. der Armierungs- und Oberputz, dar [8]. Infolge steigender Abfallmengen durch den wachsenden Einsatz von WDVS und neuen rechtlichen Rahmenbedingungen für die Entsorgung sind neue Prozesse für das Recycling dringend notwendig. Aktuell werden WDVS in Deutschland überwiegend thermisch verwertet. Zum jetzigen Zeitpunkt existiert noch keine Möglichkeit, die eine Aufbereitung kompletter WDVS-Abfälle unter ökologischen und ökonomischen Randbedingungen zulässt. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine Recyclingstrategie entwickelt, welche sich auf die wertstoffliche Verwertung komplexer WDVS bezieht. Hierdurch sollen homogene Stoffströme erhalten werden welcher erneut am Markt platziert werden können.

### 3. Zielsetzung und Arbeitsplan

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, Lösungswege für die Aufbereitung, das stoffliche Recycling und die Verwertung der komplexen WDVS und deren Inhaltsstoffe zu entwickeln. Die Abfallströme die durch den Rückbau der WDVS entstehen, stellen aufgrund ihrer komplexen Zusammensetzung sehr hohe Anforderungen an das Recycling. Eine neu entwickelte Prozesskette zur Aufbereitung der WDVS muss diesen komplexen Stoffstrom ökonomisch und ökologisch sicher verarbeiten. Um einen entsprechenden Verwertungsweg entwickeln zu können, sollte vorerst der Ist-Zustand zum Thema Markteigenschaften, Abbruch und Logistik festgestellt werden, um einen Überblick über die verwendeten Systeme und deren Kompositmaterialien mit ihren jeweiligen Materialeigenschaften zu erhalten. Um die komplexen Komposite verwerten zu können sollten die für das Projekt wichtigen Materialkombinationen der WDVS deklariert, charakterisiert und insbesondere die Grenzflächen bzw. die Verbindungsstellen der Struktur untersucht werden. Nach Ermittlung und Auswertung dieser materialspezifischen Kenngrößen, werden in dem Projekt innovative Technologien zur Aufbereitung und zum sortenreinen Recycling von WDVS-Abfällen erarbeitet. Nachdem die Strukturen und die Eigenschaften der WDV-Materialien auf mikroskopischer Ebene bekannt sind, können Recyclingpotenziale ermittelt und zusammengefasst werden. Anschließend wird ein Verwertungsweg zum Mechanischen Recycling entwickelt, der die verschiedenen verfahrenstechnischen Prozessschritte, wie die Sortierung, Zerkleinerung, Charakterisierung und Klassierung enthält. Es sollen die Eigenschaften der Systeme so modifiziert werden, dass homogene und sortenreine Stoffströme aus dem Abfallstrom gewonnen werden können. Des Weiteren muss die erhaltenen Partikelfractionen charakterisiert werden. Hierzu dienen anfänglich die Methoden der Siebanalyse sowie opto-elektronische Messungen der dynamischen Bildanalyse. Mit den Kenntnissen der Partikelgrößenverteilungen der einzelnen Fraktionen kann der Trennprozess analysiert und optimiert werden. Projektbegleitend wird kontinuierlich eine physikalische und chemische Charakterisierung des Fraunhofer ICT durchgeführt werden. Der in diesem Projekt zugrundeliegende Arbeitsplan befindet sich in *Abbildung 4*. Durch die hier festgelegten Arbeitspakete konnte das Forschungsvorhaben erfolgreich durchgeführt und zum Abschluss gebracht werden.

Arbeitsprogramm / Zeitplan		Projektdauer in Monaten											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
AP1	Erfassung des Ist- Zustandes / Beschaffung der Systeme	Red	Red	Red									
AP2	Charakterisierung der verschiedenen Komponenten		Blue	Blue									
AP3	Analyse der Komponenten der WDVS und der Verbundstrukturen			Green	Blue	Blue	Blue	Blue					
AP4	Materialspezifische Bewertung der Wärmedämmverbundsysteme und Verbundstrukturen						Red	Red					
AP5	Orientierende Versuche einzelner Prozessschritte							Blue	Blue	Blue	Blue	Blue	
AP6	Auswahl geeigneter Technologien zum Recycling von WDVS											Blue	Blue
AP7	Projektkoordination	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red

	Institut für interdisziplinäre Innovationen (iii)
	Fraunhofer ICT
	TH Nürnberg

Abbildung 4: Arbeitsprogramm des Forschungsvorhabens "Recycling von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS)

### 4. Entwicklung einer Prozesskette zur werkstofflichen Verwertung von WDVS

In den letzten 10 Jahren hat sich die Abfallwirtschaft in Deutschland erheblich gewandelt, wodurch sie einen maßgeblichen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung in Deutschland leistet. Die immer knapper werden Ressourcen können durch hohe Verwertungsquoten geschont werden. Hierdurch werden Sekundärrohstoffe gewonnen oder Energie erzeugt. Werkstoffliches EPS-Recycling ist heute bereits etabliert. Aus reinem Verpackungsmaterial sowie Dämmstoffverschnitt von der Baustelle werden EPS-Kugeln und Polystyrol-Regranulat gewonnen. Diese Abfälle weisen eine hohe Sortenreinheit ohne Fremdbestandteile wie Putz, Klebstoffe etc. auf und in den Abschnitten des derzeit produzierten Dämmmaterials ist kein HBCD enthalten. EPS-Abfälle aus dem klassischen Rückbau können aufgrund der Verunreinigungen und der rechtlichen Notwendigkeit, dass HBCD zu dezimieren, aktuell noch nicht werkstofflich verwertet werden. Sortenrein getrenntes, HBCD-freies EPS aus dem WDVS-Rückbau könnte hingegen für ein Recycling geeignet sein [8, 9]. Ziel des Vorhabens ist eine werkstoffliche Verwertung, um aus den Kompositmaterialien homogenen Stoffströme rückzugewinnen. Hierbei bleiben die Materialien bzw. die Makromoleküle erhalten, welche anschließend unter ökologischen

und ökonomischen Bedingungen wieder am Markt etabliert werden können. Ein Ansatz für einen Verwertungsweg welcher sich mit dem Recycling von kompletten WDVS beschäftigt ist in *Abbildung 5* dargestellt.

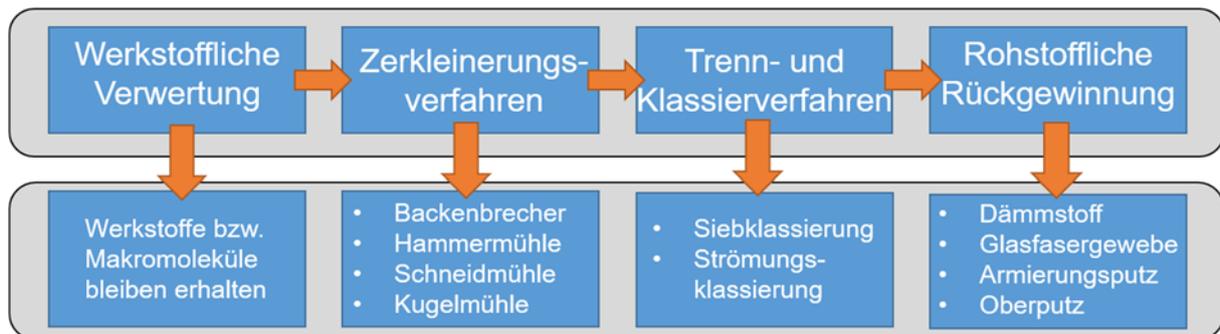


Abbildung 5: Verwertungsweg zur werkstofflichen Verwertung von WDVS

Um eine werkstoffliche Verwertung von WDVS zu realisieren, müssen zu den einzelnen Abschnitten des Verwertungsweges Laborversuche durchgeführt werden. In einem ersten Prozessschritt wird die mechanische Aufbereitung einzelner Komponenten durch einen oder mehrere Zerkleinerungsschritte durchgeführt. Anschließend kann durch eine Sieb- und Strömungsklassierung das Zerkleinerungsprodukt weiter aufgetrennt werden. Somit können homogene Stoffströme aus dem komplexen Abfallgemisch erzeugt werden. Es müssen Versuche mit dem Ziel durchgeführt werden, sortenreine Fraktionen aus WDVS- Abfällen zu erhalten und damit die Eignung verschiedener Zerkleinerungs- und Trennverfahren zu untersuchen. Auf Grundlage des Verwertungsweges in *Abbildung 5*, wurde ein Fließschema für die im Labormaßstab durchgeführten Versuche entwickelt. Dieser wurde in *Abbildung 29* dargestellt. Im Folgenden sollen mögliche Verfahrensschritte aufgeführt werden, welche für die Aufbereitung von WDVS-Abfällen getestet werden sollen:

**Zerkleinerungsverfahren:** In einem ersten Schritt wurde der anfallende WDVS-Abfall einem Zerkleinerungsprozess zugeführt. Hierbei wurden unterschiedliche Mühlentypen, wie die Hammermühle, Schneidmühle und Kugelmühle auf deren Eignung hin überprüft. Auch eine Vorzerkleinerung unter Zuhilfenahme eines Backenbrechers wurde betrachtet. Ziel hierbei ist es die individuellen Materialien des WDVS aus ihrem komplexen Verbund lösen zu können.

**Trenn- und Klassierverfahren:** Bei der Zerkleinerung eines komplexen Mehrkomponentensystems liegt zumeist eine breite Partikelgrößenverteilung vor. So ist eine Klassierung des Zerkleinerungsproduktes mittels Siebung notwendig.

Hierbei wird durch die Wahl geeigneter Maschenweiten der Siebe eine Fein- und Grobfractionen erhalten. Diese werden anschließend mittels Strömungsklassierung in homogene Stoffströme separiert.

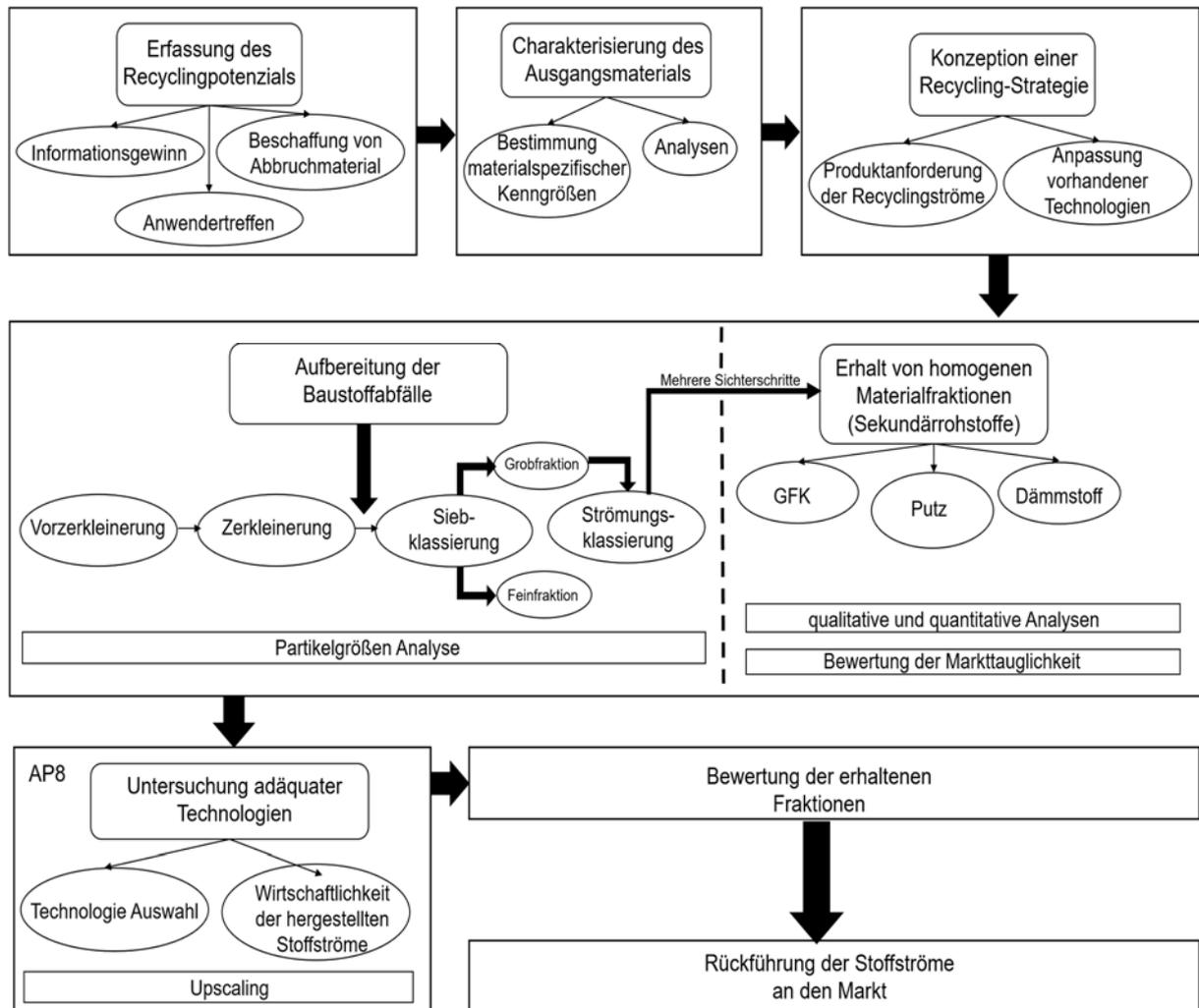


Abbildung 6: Schematischer Verwertungsweg für WDVS-Abfälle im Labormaßstab

## 5. Materialien und Methoden

### 5.1 Verwendete Materialien

Aufgrund der Vielfalt der Materialien und der komplexen Bauweise der anfallenden WDVS-Abfälle wurden in einem ersten Schritt WDVS-Modellsysteme konstruiert. Somit waren die eingesetzten Massen der individuell verwendeten Materialien bekannt. Hierdurch konnte im Verlauf des Verwertungsweges festgestellt werden, welcher Anteil der jeweiligen Materialien Rückgewonnen werden kann. Der Verwertungsweg konnte so quantifiziert und optimiert werden. Die Konstruktion der WDVS-Modellsysteme erfolgte anhand der Ausführungshinweise des Buches „Praxis Handbuch Innendämmung; Planung-Konstruktion-Details - Beispiele“ [10].

Dieses Praxishandbuch behandelt die Planung und Bemessung der WDVS, die Verwendungsmöglichkeiten über die für den Fall geeignete Materialauswahl und die Berücksichtigung von Anschlüssen und Wärmebrücken. Für die Konstruktion der Systeme wurde als Dämmstoffmaterial Expandierter und Extrudierter Polystyrol (EPS/XPS) verwendet. Da diese Dämmstofftypen am häufigsten in Deutschland verbaut werden bzw. wurden, sind diese überwiegend im Abfallstrom zu finden. Der verwendete Ober- und Unterputz stammte von der Firma SAKRET [11, 12]. Als Armierungsgewebe kam Gewebe der Firma BAUFAS zum Einsatz [13]. Die relevanten technischen Daten der eingesetzten Baustoffe befinden sich in *Tabelle 1*.

Tabelle 1: Technische Daten der eingesetzten Baustoffe zur Konstruktion der WDVS-Modellsysteme [11, 12, 13]

Baustoff	Firma	Technische Daten	
EPS	BACHL Dämmtechnik	Wärmeleitfähigkeit Dichte Fläche Dämmstoffplatte	$\lambda = 0,035 \text{ W / m}^{\circ}\text{K}$ $\rho = 20 \text{ kg / m}^3$ $A = 0,5 \text{ m}^2$
XPS	BACHL Dämmtechnik	Wärmeleitfähigkeit Dichte Fläche Dämmstoffplatte	$\lambda = 0,045 \text{ W / m}^{\circ}\text{K}$ $\rho = 40 \text{ kg / m}^3$ $A = 0,8 \text{ m}^2$
Unterputz	SAKRET	Korngröße Rohdichte Druckfestigkeit Materialverbrauch	$x_p = 1 \text{ mm}$ $\rho = 900 \text{ kg / m}^3$ $\sigma = 1,5 - 5 \text{ N / mm}^2$ $1 \text{ mm pro kg / m}^2$
Oberputz	SAKRET	Korngröße Rohdichte Druckfestigkeit Materialverbrauch	$x_p = 2 \text{ mm}$ $\rho = 1300 \text{ kg / m}^3$ $\sigma = 1,5 - 5 \text{ N / mm}^2$ $3 / 2 \text{ mm pro kg / m}^2$
Armierungsgewebe	BAUFAS	Gewicht Maschenweite	$145 \text{ g / m}^2$ $4 \times 4 \text{ mm}$

Zu Beginn wurde die Größe der einzelnen Modellsysteme festgelegt. Der limitierende Faktor war die Größe des Schachtes für die Probenzufuhr der verwendeten Zerkleinerungsapparaturen. So wurde durch Vermessung des jeweiligen Probenschachtes die Größe der Modellsysteme auf  $56 \text{ cm}^2$  festgelegt. Die Dicke der Systeme betrug jeweils 6 cm. Die Dämmstoffplatten (EPS/XPS) wurden in äquivalente Segmente unterteilt. Anschließend wurde der Unterputz auf die Segmente, laut technischer Vorgabe, aufgetragen. Der Unterputz wurde als sogenannte „Dünnschicht“ mit einer Schichtdicke von 2-3 mm aufgetragen. Dies ist die übliche Unterputz-dicke welche bei Wohnhäusern verwendet wird. Das Armierungsgewebe wurde auf die entsprechende Größe der Dämmstoffsegmente zugeschnitten und während des Auftrags des Unterputzes darin eingebettet. Nach dem Aushärten des Unterputzes konnte der Oberputz aufgetragen werden. Dieser wurde ebenfalls mit einer Schichtdicke von 2-3 mm aufgetragen

Die konzipierten WDVS-Modellsysteme wurden in *Abbildung 7* veranschaulicht dargestellt.



Abbildung 7: Konzipierte WDVS-Modellsysteme mit EPS (links) und XPS (rechts) als Dämmstoffmaterial

## 5.2 Methoden

### 5.2.1 Hammermühle

Zur Zerkleinerung der WDVS wurde eine Hammermühle der Firma Siebtechnik vom Typ HM1 eingesetzt. Durch 16 gelagerte, rechteckige (65 mm x 15 mm x 30 mm) Hämmer, wird das aufgegebene Material durch Prallbeanspruchung zerkleinert. Der Mahlraum der verwendeten Hammermühle ist mit Hartmetall ausgekleidet. Der Feinheitsgrad des Produktes wird durch den Abstand zwischen Schlagkreis und Mahlbahn von 1 mm sowie dem klassierenden Einlegesieb bestimmt. Bei den durchgeführten Laborversuchen kam ein Einlegesieb von 10 mm zum Einsatz. Die eingesetzte Hammermühle besitzt eine Motorleistung von 1,5 kW mit einer Drehzahl von 2445 min<sup>-1</sup> bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 26,6 m\*s<sup>-1</sup> [14].

### 5.2.2 Strömungsklassierung mittels Zickzacksichter

Um die Partikelfractionen des Zerkleinerungsgutes in homogene Bestandteile aufzutrennen, wurde die Methode der Strömungsklassierung angewandt. Hierzu wurde eine Zickzacksichter-anlage der Firma Alpine vom Typ 1-40 MZN verwendet. In einem Sichter werden Partikel an-hand ihrer unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten sortiert. Die Sinkgeschwindigkeit steht in Abhängigkeit der Korngrößen, der Dichten und der Umströmungseigenschaften der Partikel.

Aufgrund der großen Spannweite der Dichte der unterschiedlichen Materialien, findet die Trennung maßgeblich nach der Dichte des Partikels statt. Somit wird eine Schwer- und Leichtfraktion erhalten. Hierbei kann ein Volumenstrom von  $1 \text{ Nm}^3$  bis  $50 \text{ Nm}^3$  realisiert werden [15].

### 5.2.3 Schneidmühle

Ebenfalls wurden Zerkleinerungsversuche der WDVS mit einer Schneidmühle des Typs Retsch SM 2000 durchgeführt. Schneidmühlen eignen sich besonders für die Zerkleinerung von faserigen und elastischen Materialien, da die Schneidspannung die vorherrschende Kraft ist. Die Rotationsgeschwindigkeit der Mühle betrug  $750 \text{ min}^{-1}$ , was zu einer Umfangs-Höchstgeschwindigkeit von  $5 \text{ m/s}$  führte und der Elektromotor entwickelte eine Nennleistung von  $1500 \text{ W}$ . Die Mühle war mit 18 Wendeschneidplatten und 4 festen Statorstäben, bestehend aus harte Legierung, versehen. Die Siebe waren mit quadratischen Maschen mit den Durchmessern von  $10 \text{ mm}$  perforiert [16].

### 5.2.4 Kugelmühle

Unter anderem wurden Zerkleinerungsversuche von WDVS mit der Kugelmühle durchgeführt. Diese dient der Grob- bzw. Fein- und Feinstzerkleinerung oder Homogenisierung von Mahlgut. Die Mühle besteht aus einem in Rotation versetzten Mahlraum, in dem Mahlgut durch Mahlkörper zerkleinert wird. Die im Labor verwendete Kugelmühle basiert auf dem Ansatz von Bond. Die in diesem Projekt verwendete Kugelmühle besitzt eine Leistung von  $2500 \text{ W}$  mit einer maximalen Umfangsgeschwindigkeit von  $60 \text{ min}^{-1}$ . Die verwendeten Mahlkugeln bestehen aus Stahl (S355) [17].

### 5.2.5 Analysemethoden

Die Charakterisierung der Partikelgrößenverteilungen des Zerkleinerungsproduktes und der erhaltenen Siebfraktionen wurde mit einer Siebmaschine der Firma Retsch vom Typ AS 200 control durchgeführt. Die Siebe wurden nach DIN 323 der Siebreihe R20/3 für das Zerkleinerungsgut und R20 für die Siebfraktionen ausgewählt. Hierbei betragen die Maschenweiten der Siebe der R 20/3-Reihe  $x_w = 10; 8; 6,2; 4; 2,8; 2; 1,4; 1; 0,71; 0,5; 0,355; 0,25; 0,18; 0,125; 0,09; 0,071$  und  $0,033 \text{ mm}$ . Für die R20 Reihe gilt  $x_w = 10; 8; 6,2; 4; 2,8; 2; 1,4; 1 \text{ mm}$ . Die Amplitude ( $1,5 \text{ mm}$ ) und die Intervallzeit ( $10 \text{ s}$ ) waren bei allen Siebungen identisch.

Um eine Reproduzierbarkeit der Siebanalyse zu gewährleisten, wurde für jedes Zerkleinerungsprodukt die Siebzeit nach DIN 661665 bestimmt [18]. Des Weiteren wurden die Partikelgrößenverteilungen des Zerkleinerungsgutes und der erhaltenen Sichterfraktionen mit einem opto-elektronischen Messgerät zur dynamischen Bildanalyse der Firma Retsch (Camsizer) durchgeführt. Zur Messung der Partikel wird das Probenmaterial über eine vorgeschaltete Vibrationsrinne im Inneren des Gerätes an einer beleuchteten Wand vorbeigeführt, wobei dieses von zwei Kameras detektiert wird. Dabei detektiert die Ba-sic-Kamera große Partikel, die Zoom-Kamera registriert kleine Partikel. Die Kombination der beiden Kameras ermöglicht es, Partikel in einem Größenbereich von 20  $\mu\text{m}$  bis 90 mm präzise zu erfassen. Mittels der von den Kameras aufgenommenen Projektionsflächen der Partikel, lassen sich verschiedene statistische Größen, wie der Feret-Durchmesser oder der Martin-Durchmesser aber auch deren Maxima und Minima, bestimmen [19]. Zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilungen wurde  $x_c$ -min herangezogen. Als  $x_c$  wird die maximale Sehne der Projektionsfläche senkrecht zur Messrichtung bezeichnet. Als  $x_c$  wird die maximale Sehne der Projektionsfläche senkrecht zur Messrichtung bezeichnet. Die Kenngröße  $x_c$ -min bezeichnet die kürzeste aller maximalen gemessenen Sehnen  $x_c$  an der Projektionsfläche eines Partikels. Die Kenngröße  $x_c$ -min ist gut geeignet für den Vergleich von Siebanalysen mit dynamischer Bildverarbeitung.

## 6. Versuchsdurchführung

Bei WDVS handelt es sich um ein komplexes Komposit welches aus den unterschiedlichsten Materialien bestehen kann. Aus diesem Grund wurde damit begonnen, definierte WDVS-Modellsysteme selbst herzustellen. Damit besitzen diese bekannte Eigenschaften und Zusammensetzung an den verwendeten Materialien. Somit kann im Anschluss an die Laborversuche genau ermittelt werden, welche Mengen aus dem Ursprungsmaterial im WDVS in den sortenreinen Stoffströmen zurückgewonnen werden konnte. Als Dämmstoffmaterial wurde hierfür EPS und XPS verwendet, da diese Dämmstoffart am häufigsten am deutschen Markt vertreten ist. Nähere Informationen zur Konstruktion der WDVS befinden sich in *Kapitel 4*.

Anschließend wurde damit begonnen die konstruierten WDVS einem Zerkleinerungsprozess zuzuführen. Hierfür wurden Vorversuche mit den in *Kapitel 5* beschriebenen Zerkleinerungsapparaturen durchgeführt um das bestmögliche Zerkleinerungsprodukt zu erhalten und so eine geeignete Mühle eruiieren zu können.

Es soll damit begonnen werden, die erhaltenen WDVS mittels Backenbrecher vorzuzerkleinern. Anschließend soll das erhaltene Zerkleinerungsprodukt einer der ausgewählten Mühlentypen zugeführt werden. So wird jeweils die identische Menge an WDVS der Hammermühle, Schneidmühle und der Kugelmühle zugeführt. Um eine repräsentative Menge an vorzerkleinerten WDVS für die Zerkleinerung zu erhalten, soll ein Rotationsprobenteiler verwendet werden. Bei der Verwendung der Hammermühle wird ein 10 mm Sieb unter dem Mahlwerk eingesetzt. Ziel hierbei ist es die sphärische Form des Styropors nicht zu zerstören da dies für eine Wiederverwertung besser geeignet wäre als wenn die Struktur aufgebrochen ist. So soll auch bei der verwendeten Schneidmühle ein 10 mm Sieb verwendet werden. Bei der Kugelmühle werden für den Vorversuch 14 Kugeln mit einem Kugeldurchmesser von 5- und 10 cm zu gleichen Anteilen verwendet. Hiermit soll in einem ersten Versuch die Eignung des Mühlentyps überprüft werden.

Die erhaltenen Zerkleinerungsprodukte werden anschließend mittels Siebanalyse bzw. CAMSIZER und Methode der Laserbeugung vermessen, um eine Partikelgrößenverteilung zu erhalten. Hierbei kann das Zerkleinerungsprodukt bewertet werden und somit die Eignung der Mühlentypen überprüft werden. Je nach breite der Partikelgrößenverteilung des Zerkleinerungsproduktes ist eine anschließende Separation mittels Siebung nötig.

Oft handelt es sich bei breit verteilten Partikelfractionen um eine bimodale bzw. mehrmodale Verteilung welche sich mittels Strömungsklassierung nur schwer in homogene Massenströme auftrennen lassen. Somit kann unter Kenntnis der Partikelgrößenverteilung durch Verwendung von einem oder mehreren Sieben eine Monomodale Verteilungskurve erhalten werden, welche anschließend leichter zu separieren ist.

Die hergestellten Proben können nun mittels der in Kapitel 4 beschriebenen Sichteranlage in ihre homogenen Bestandteile aufgetrennt werden. Hierbei sollen die Volumenströme zwischen  $5 \text{ Nm}^3$  und  $25 \text{ Nm}^3$  variiert werden. Ziel hierbei ist es einen Volumenstrom zu eruieren mit welchem sich die bestmögliche Klassierung realisieren lässt. Nach dem ersten Sichterdurchgang wird eine Schwer- bzw. Leichtfraktion erhalten. Hierbei kann es in den jeweiligen Fraktionen noch zu Verunreinigungen von anderen Materialien kommen was weitere Sichterschritte nicht ausschließt.

Die erhaltenen Fraktionen sollen jeweils vermessen werden, umso Kenntnis über das erhaltene Partikelkollektiv zu erhalten. Hierdurch sollen nun möglichst reine homogene Massenströme erhalten werden welche für die Rückführung am Markt geeignet wären. Anschließend sollen die erhaltenen Kenntnisse auf die entwickelte Verwertungsstrategie angewandt werden, um die Auswahl der verwendeten Apparaturen durch die Ergebnisse der Vorversuche einzugrenzen. Wenn eine Recyclingstrategie mittels der konstruierten WDVS-Modellsysteme ermittelt wurde, kann der Verwertungsweg auf realen WDVS-Abfall angewandt werden.

Im Abschluss sollen die erhaltenen homogenen Materialfraktionen Analytisch mittels einer TGA-Analyse bestimmt werden. Hierdurch kann genau festgestellt werden, in welcher Sortenreinheit die jeweilige Fraktion vorliegt. Des Weiteren sollen WDVS-Abbruchmaterialien von Baustellen untersucht werden, um die jeweiligen Schichten bzw. Materialien bestimmen zu können. Hierdurch kann auch der im Dämmstoffmaterial enthaltene HBCD-Gehalt bestimmt werden.

## 7. Auswertung und Ergebnisse

### 7.1 Durchführung der mechanischen Vorversuche

Im Folgenden sollen die mechanischen Vorversuche ausgewertet werden. Hierfür wurden drei unterschiedliche Mühlentypen (Hammermühle, Schneidmühle und Kugelmühle) verwendet. Zusätzlich wurde die Methode der Vorzerkleinerung mittels eines Backenbrechers angewandt. Es konnte jedoch gleich zu Beginn festgestellt werden, dass diese Art der Zerkleinerung für WDVS ungeeignet ist. Da die WDVS, allen voran der enthaltenen Dämmstoffe, sehr elastisch ist, konnten diese mittels eines Backenbrechers nicht vorzerkleinert werden. Diese Art von Zerkleinerungsapparatur ist überwiegend für spröde bzw. feste Materialien geeignet. Somit konnten die enthaltenen Materialien, in Ihrem Verbund, nicht gelöst werden. Aus diesem Grund kann der Backenbrecher für den Verwertungsweg von WDVS ausgeschlossen werden. Somit müssen die hergestellten WDVS-Modellsysteme den ausgewählten Mühlentypen direkt zugegeben werden. Jeder Mühle wurden jeweils fünf hergestellte Modellsysteme mit EPS und XPS zugeführt.

### 7.1.1 Zerkleinerung mittels Schneidmühle

Um festzustellen ob die Schneidmühle für den veranschlagten Recyclingweg geeignet ist wurden hierfür Vorversuche zur Zerkleinerung unter Verwendung der definierten WDVS-Modellsysteme durchgeführt. Anfangs wurde für die Schneidmühle kein Siebeinsatz gewählt. Das erhaltene Zerkleinerungsprodukt ist in *Abbildung 8* dargestellt.



Probenaufgabe



Zerkleinerungsprodukt  
aus der Schneidmühle

Abbildung 8: Zerkleinerungsprodukt (Systeme mit EPS als Dämmstoff) durch Verwendung der Schneidmühle ohne Siebeinsatz

Es konnten nicht alle WDVS mittels der Schneidmühle zerkleinert werden. Sowohl bei den Dämmstoffsystemen mit EPS als auch mit XPS verklemmte sich während des Zerkleinerungsprozesses das Mahlwerk. Die verwendete Mühle wurde anschließend geöffnet um den Mahlraum zu begutachten. Die Blockierung des Mahlraumes ist in *Abbildung 9* dargestellt.



Blockierung des  
Mahlraumes bei  
Verwendung von Systemen  
mit EPS als Dämmstoff



Blockierung des  
Mahlraumes bei  
Verwendung von Systemen  
mit XPS als Dämmstoff

Abbildung 9: Blockierung des Mahlraumes der Schneidmühle während der Zerkleinerung von definierten WDVS mit EPS und XPS als Dämmstoffmaterial

Nach der Säuberung des Mahlwerkzeuges wurde der Zerkleinerungsprozess fortgeführt. Jedoch verstopfte das Mahlwerk nach weiterer Zugabe von WDVS erneut. Das erhaltene Produkt der zerkleinerten WDVS zeigten sich am Dämmstoff noch Spuren von Putzresten. Das Armierungsgewebe lag in Fasern vor. Es konnten jeweils nur 20 % der Systeme zerkleinert werden. Das erhaltene Produkt eignet sich nicht für die Klassierung der individuellen Materialien in einem Sieb, da weder die einzelnen Materialien im Verbund getrennt noch die Anzahl der Systeme vollständig zerkleinert werden konnten. Anschließend wurde unter Verwendung eines 10 mm Siebes der Zerkleinerungsvorgang wiederholt. Damit sollte eine definierte Partikelgröße der erhaltenen Fraktion erreicht werden. Jedoch konnte hierbei kein Zerkleinerungsprodukt erzielt werden. Bei beiden verwendeten Systemarten blockierte bereits bei Zugabe des ersten Systems der Mahlraum. Damit ist die Schneidmühle als Zerkleinerungsapparatur für den entwickelten Verwertungsweg ungeeignet und kann somit ausgeschlossen werden.

#### 7.1.2 Zerkleinerung mittels Kugelmühle

Nachdem die Schneidmühle als Zerkleinerungsapparatur ausgeschlossen werden konnte, sollte nun die Eignung der Kugelmühle überprüft werden. Wie bereits in *Kapitel 5* beschrieben, wurden unterschiedliche Mahlkugeln, welche verschiedene Durchmesser besitzen, für die Zerkleinerung verwendet. Für den Versuch wurden jeweils fünf der Systeme in der Mahltrommel platziert. Anschließend wurden die Mahlkugeln hinzugegeben. Die Mühle wurde bei maximaler Drehzahl betrieben, bei einer Laufzeit von 15 min. Die Einstellungen der Mühle wurden aufgrund von Prozessparametern von ähnlichen Zerkleinerungsversuchen aus vergangenen Projekten ausgewählt. Sollte sich die Materialien weitgehend voneinander trennen lassen, müssen diese Parameter neu berechnet und optimiert werden. Das erhaltene Zerkleinerungsprodukt der Kugelmühle ist in *Abbildung 10* abgebildet. Überwiegend konnten die Materialien nicht voneinander getrennt werden. Häufig befand sich das Armierungsgewebe noch am Dämmstoff. Auch Putzreste konnten sowohl am Gewebe als auch am Dämmstoff festgestellt werden. Der Dämmstoff konnte hierbei nicht zerkleinert werden. Sowohl der EPS als auch der XPS blieben in ihrer ursprünglichen Form bestehen. Da die Dämmstoffmaterialien elastisch sind, konnten die Kugeln kaum Zerkleinerungsarbeit am EPS bzw. XPS leisten. Somit kann auch diese Form der Zerkleinerung für den entwickelten Verwertungsweg für WDVS ausgeschlossen werden.



Zerkleinerungsprodukt der Kugelmühle bei Verwendung von Systemen mit EPS als Dämmstoff



Zerkleinerungsprodukt der Kugelmühle bei Verwendung von Systemen mit XPS als Dämmstoff

Abbildung 10: Zerkleinerungsprodukt (Systeme mit EPS und XPS als Dämmstoff) durch Verwendung der Kugelmühle bei maximaler Leistung mit 14 Mahlkugeln

### 7.1.3 Zerkleinerung mittels Hammermühle

Für die Versuche wurde die Hammermühle aus Kapitel 4.1.2 verwendet, welche dort bereits beschrieben wurde. Es wurde damit begonnen Systeme ohne Siebeinsatz zu zerkleinern. Das hieraus resultierende Zerkleinerungsprodukt ist in *Abbildung 11* dargestellt.



Zerkleinerungsprodukt der Hammermühle bei Verwendung von Systemen mit EPS als Dämmstoff



Zerkleinerungsprodukt der Hammermühle von ausgewählten Stücken der zerkleinerten Systeme

Abbildung 11: Zerkleinerungsprodukt (Systeme mit EPS als Dämmstoff) durch Verwendung der Hammermühle ohne Siebeinsatz

Die Größe des Zerkleinerungsprodukts variiert hierbei stark. Es konnten sowohl feine Partikel an Dämmstoff und Putz, als auch sehr grobe Dämmstoffstücke im Produkt festgestellt werden. Das Armierungsgewebe wurde überwiegend aus dem System herausgelöst. Jedoch befanden sich am Gewebe und an den größeren Dämmstoffstücken noch Putzreste.

Für die Systeme, welche als Dämmstoff XPS enthalten, wurde das gleiche Ergebnis erzielt. Hierbei war jedoch die Anzahl an feineren Partikeln deutlich höher, da das Dämmstoffmaterial XPS spröder als EPS ist. Die erhaltenen Partikelfractionen konnten jedoch nicht vermessen werden, da das Zerkleinerungsprodukt zu grob war. Es befanden sich am Dämmstoff und Armierungsgewebe Putzreste, welche sich im Anschluss nur schwer voneinander separieren ließen. Somit ist die Verwendung der Hammermühle, ohne die Regulierung eines Siebeinsatzes, nicht geeignet. In einem nächsten Schritt wurde ein Siebeinsatz mit 10 mm Maschen eingesetzt. Es wurden wie bereits zuvor, Systeme mit beiden Dämmstoffvarianten (EPS/XPS) zerkleinert. Das erhaltene Zerkleinerungsprodukt ist in *Abbildung 12* dargestellt.

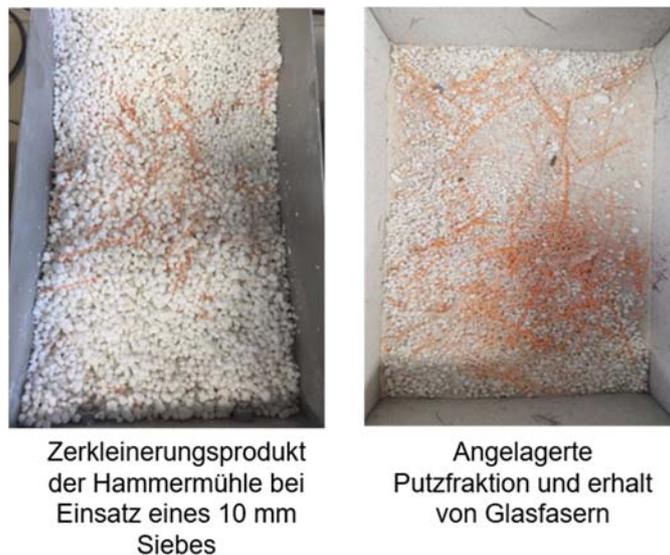


Abbildung 12: Zerkleinerungsprodukt (Systeme mit EPS als Dämmstoff) durch Verwendung der Hammermühle mit einem 10 mm Siebeinsatz

Hierbei waren nun keine Partikelgrößen über 10 mm im Zerkleinerungsprodukt vorhanden. Das Styropor wurde aus dem Verbund herausgelöst und behielt dabei seine sphärische Form. Das Armierungsgewebe lag in einzelnen Fasern vor. Weder am Dämmstoff noch am Armierungsgewebe konnten Putzreste festgestellt werden. Der Putz bestand überwiegend aus feinen Partikeln, welcher sich am Grund des Probenbehälters (*Abbildung 12* Bild rechts) sammelte. Da durch diesen Zerkleinerungsprozess die Komponenten des WDVS voneinander gelöst werden konnten, ist die Wahl einer Hammermühle mit definiertem Siebeinsatz für den Verwertungsweg am geeignetsten. Mit den Zerkleinerungsversuchen der Systeme, welche XPS als Dämmstoff enthalten, konnten die gleichen Ergebnisse erzielt werden. Auch hier war, wie bereits bei den Versuchen ohne Siebeinsatz, der Feinanteil durch das Dämmstoffmaterial XPS deutlich höher.

Anschließend wurde eine Siebanalyse mit einer R20/3 Siebreihe durchgeführt, um festzustellen wo sich welche Fraktion der zerkleinerten WDVS anreichert. Nach DIN 661665 wurde eine Siebzeitbestimmung für beide WDVS-Typen durchgeführten. Die ermittelte Siebzeit betrug für beide WDVS-Typen 6 Minuten. In den Sieben  $x > 1$  mm lagerte sich überwiegend der Dämmstoff und Fasern des Armierungsgewebes an. Hierbei lag der EPS/XPS in seiner sphärischen Form vor. Es konnte keine Dämmstoffpartikel festgestellt werden bei welchen die Struktur zerstört war. Putzpartikel lagen nur vereinzelt vor. Überwiegend handelt es sich um den Oberputz, welcher in seiner Struktur grobkörniger als der Unterputz ist. In den Sieben  $x < 1$  mm konnten überwiegend feine Putzpartikel festgestellt werden. Des Weiteren lagen Dämmstoffpartikel vor, bei denen die sphärische Struktur aufgebrochen war. Diese lagen in feinen Fasern vor. Bei den WDVS, welche XPS als Dämmstoffmaterial enthielt, war der Feinanteil in den Sieben  $x < 1$  mm deutlich höher. Da XPS ein deutlich spröderes Material als EPS ist, war der abrieb während des Mahlvorganges in der Hammermühle deutlich höher und die sphärische Form des XPS konnte nur teilweise erhalten werden. *Abbildung 13* zeigt das Ergebnis der Siebanalyse am Beispiel der WDVS mit XPS als Dämmstoffmaterial.



Abbildung 13: Siebanalyse mittels R20/3 Siebreihe an zerkleinerte WDVS-Modellsysteme

## 7.2 Anwendung des Verwertungsweges auf die konzipierten WDVS-Modellsysteme

In den Vorversuchen wurden bereits festgestellt, dass eine Vorzerkleinerung der WDVS mittels Backenbrecher aufgrund der Materialeigenschaften des Dämmstoffes nicht geeignet ist. Des Weiteren konnten Zerkleinerungsapparaturen wie die Schneidmühle und die Kugelmühle ebenfalls ausgeschlossen werden. Lediglich mit der Hammermühle konnten die Komponenten im WDVS durch Druck- und Prallbeanspruchung voneinander gelöst werden. Nun soll der in Kapitel 4 dargestellte Verwertungsweg auf die konzipierten WDVS angewandt werden.

### 7.2.1 Zerkleinerung der EPS-Modellsysteme mittels Hammermühle

Da die Vorversuche unter Verwendung der Hammermühle vielversprechend waren, konnten nun in einem nächsten Schritt erneut größere Mengen an den WDVS-Modellsystemen zerkleinert werden um das Materialgemisch separieren zu können. Die eingesetzten Massen sowie die erzielten Massenströme während der Zerkleinerung der EPS-Systeme sind in *Tabelle 2* aufgelistet.

Tabelle 2: Eingesetzte Massen der EPS-Modellsysteme und erzielte Massenströme in der Hammermühle

WDVS-System (Dämmstoffart)	EPS
Eingesetzte Masse	712,1 g (15 x System)
Massenstrom	5,7 kg/h
Probenverlust	12 g

Anschließend wurde die Zerkleinerungsfraction aus der Hammermühle mittels des CAMSIZERS analysiert. Es sollte festgestellt werden, welche Art an Verteilung des Partikelkollektives vorliegt. *Abbildung 48* zeigt die Verteilungssummenfunktion und die Verteilungsdichtefunktion des Zerkleinerungsproduktes von den WDVS-Modellsystemen, welches EPS als Dämmstoffmaterial enthielten. Es konnte eine mittlere Partikelgröße von  $x_{50} = 4,9$  mm vermessen werden.

Die Verteilungsdichtefunktion zeigt eine deutliche bimodale Verteilung. Da das EPS durch die Zerkleinerung überwiegend seine sphärische Form beibehält und somit die Styroporpartikel größer 1 mm sind, reicherte sich im Feinanteil unter 1 mm überwiegend feine Putz- und Dämmstoffpartikel/fasern an. Eine bimodale Verteilung erschwert eine Trennung der Komponenten, wodurch es nötig ist im späteren Verlauf dieser Versuchsreihe das Partikelkollektiv in eine Fein- und Grobfraction zu separieren.

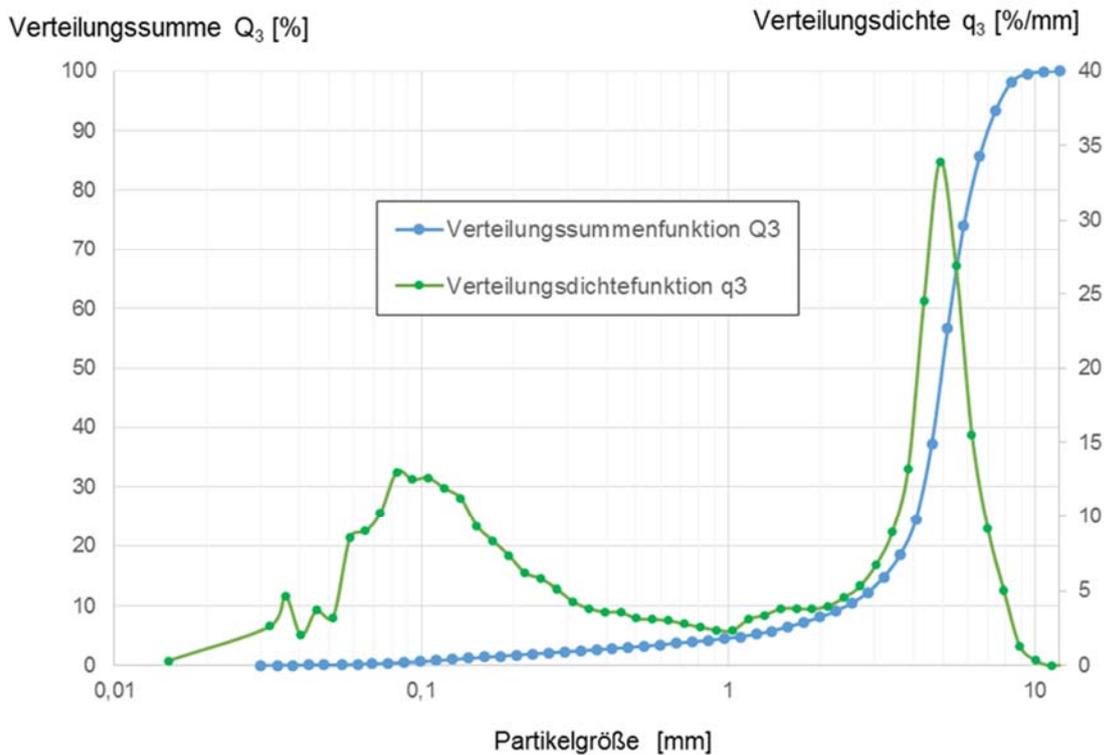


Abbildung 14: Verteilungssummen- und Verteilungsdichtefunktion der zerkleinerten EPS-Modellsysteme

### 7.2.2 Siebklassierung der zerkleinerten EPS-Modellsysteme

Das erhaltene Zerkleinerungsprodukt der WDVS wurde bereits mittels eines CAMSIZERS vermessen. Die Verteilungsdichtefunktionen der konstruierten WDVS (*Abbildung 14*) zeigten eine breite sowie eine bimodale Verteilung. Da für die Trennung der Komponenten mittels Strömungsklassierung eine solche Verteilung ungeeignet ist, musste die Probe mittels Siebklassierung in Partikelfractionen vorgetrennt werden. Bei dem durch den Zerkleinerungsprozess erhaltenen Partikelkollektiv wurde aufgrund der bimodalen Verteilungsdichtefunktion eine Fraktionierung in eine Fein- und Grobfraction durchgeführt. Da die Verteilungsdichtefunktion ihr Minimum bei einer Partikelgröße von 1 mm besaß, wurde hier die Siebklassierung durchgeführt. *Abbildung 15* zeigt für die Verteilungsdichtefunktionen den angesetzten Trennschnitt für die Siebklassierung. Der Siebturm bestand aus einem 1 mm Sieb sowie einem Boden. Begonnen wurde hierbei für das Zerkleinerungsprodukt eine Siebzeitbestimmung nach DIN 661665 durchzuführen. Es konnte eine Zeit von 4 min, bei einer Amplitude von 1,5 in einem 10 Sekunden Intervall, ermittelt werden.

Da die Siebe nur eine begrenzte Menge an Probe fassen konnten, wurde aus dem Zerkleinerungsprodukt mittels des Probenteilers eine repräsentative Menge entnommen. Dies wurde solange wiederholt, bis das gesamte Zerkleinerungsprodukt der EPS-Modellsysteme getrennt wurde.

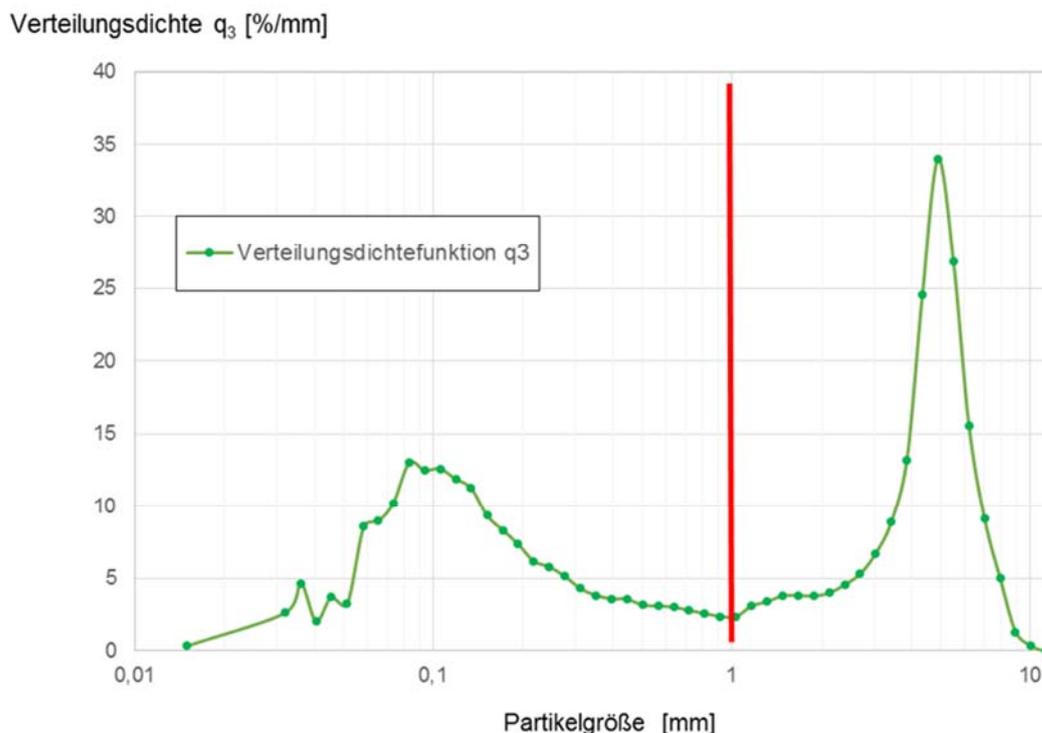


Abbildung 15: Verteilungsdichtefunktion der zerkleinerten EPS-Modellsysteme mit angesetztem Trennschnitt bei 1mm

Von der erhaltenen Fein- und Grobfractionen wurde anschließend das Gewicht bestimmt. Hierbei konnte genau festgestellt werden, welches Massenverhältnis für die beiden erhaltenen Fractionen vorliegt. *Tabelle 3* zeigt das Massenverhältnis der erhaltenen Fein- und Grobfraction.

Tabelle 3: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Fein- und Grobfraction der zerkleinerten EPS-Modellsysteme

Sieb	Grobfraction ( $x > 1 \text{ mm}$ )	Feinfraktion ( $x < 1 \text{ mm}$ )
Masse der Fraktion	524,6 g (75 wt.-%)	174,9 g (25 wt.-%)
Probenverlust	0,6 g	

Obwohl vermutet wurde, dass von den EPS-Modellsysteme sich der Putz überwiegend in der Feinfraktion anlagerte, konnte anschließend festgestellt werden, dass sich auch ein erheblicher Anteil an Putz (Überwiegend grobkörniger Putz) in den Sieben  $x > 1 \text{ mm}$  ansammelte. Hierbei lagen das EPS in seiner sphärischen Form und das Armierungsgewebe in Fasern vor. In der Feinfraktion war die Form des Styropors zerstört.

Fasern konnten keine beobachtet werden. Ebenfalls lagen feine Putzpartikel vor. *Abbildung 16* zeigt exemplarisch die Siebklassierung einer WDVS-Probe welche EPS als Dämmstoffmaterial enthielten.

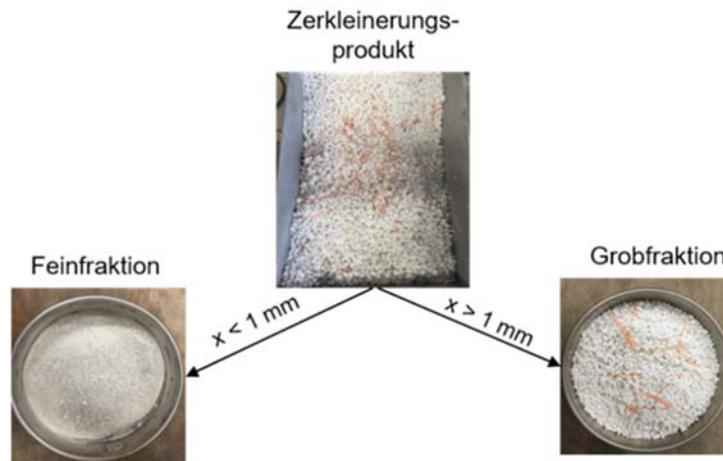


Abbildung 16: Siebklassierung der zerkleinerten EPS-Systeme. Trennung bei 1 mm.

Um das Ergebnis der Siebklassierung bewerten zu können, wurden die erhaltenen Fraktionen mittels des CAMSIZER vermessen. *Abbildung 17* zeigt die Partikelgrößenverteilung der Grobfraktion welche EPS als Dämmstoffmaterial enthalten.

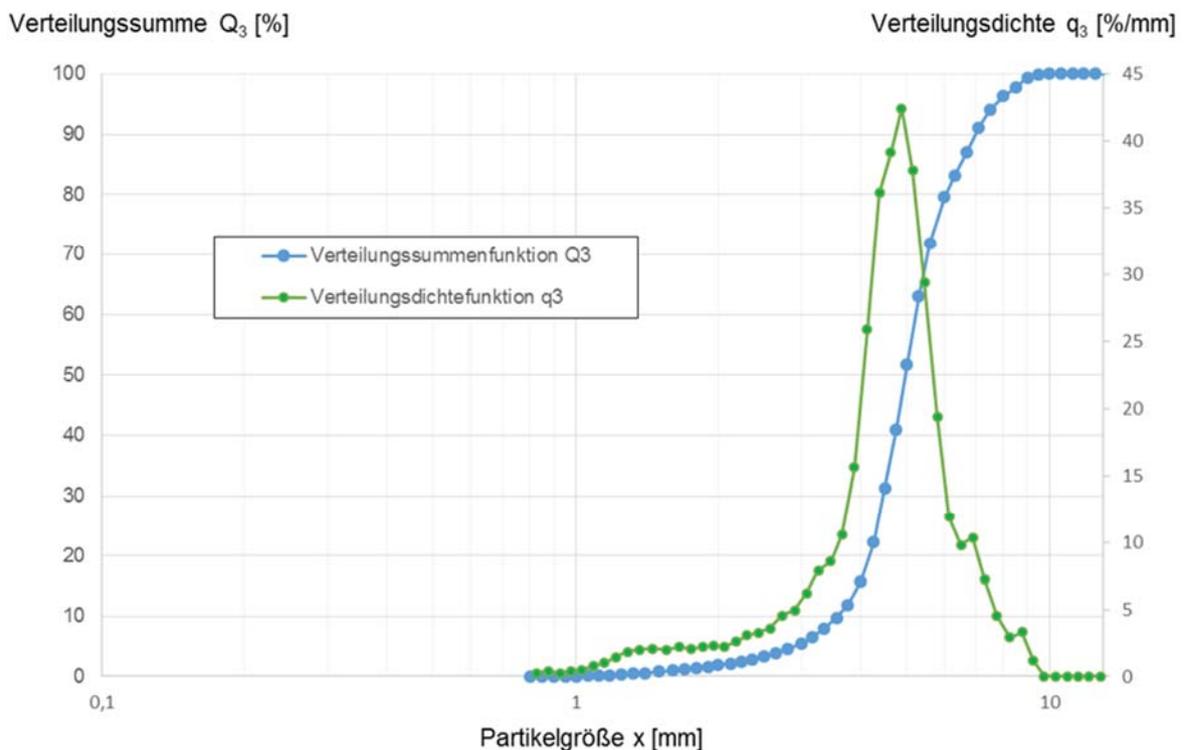


Abbildung 17: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Grobfraktion ( $x > 1$  mm) der EPS-Modellsysteme

Wie durch beide Verteilungsdichtefunktionen ersichtlich ist, liegt hierbei nun eine monomodale Verteilung vor. Die Partikelgrößenverteilung der Grobfraction zeigt nun keine Partikel von  $x < 1$  mm mehr. Die Verteilungssummenfunktion zeigte eine enge Verteilung bei einer mittleren Partikelgröße von  $x_{50} = 4,9$  mm. Aufgrund der dichten Verteilung ist diese Fraktion im späteren Verlauf des Recyclingweges optimal für eine Separation mittels Windsichtung geeignet. *Abbildung 18* zeigt die durch die Messung erhaltene Partikelgrößenverteilung der Feinfraktion.

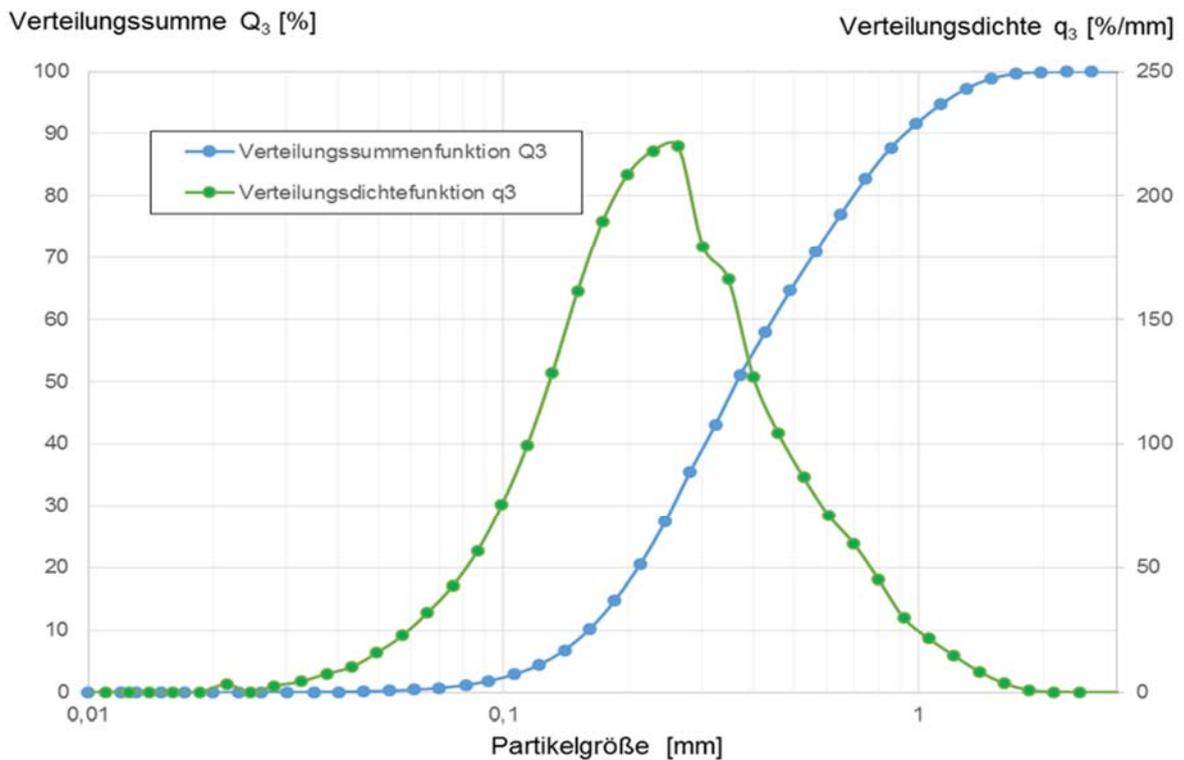


Abbildung 18: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Feinfraktion ( $x < 1$  mm) der EPS-Modellsysteme

Die erhaltene Partikelgrößenverteilung der Feinfraktion enthielten noch einige wenige Partikel, welche in einem Bereich von  $x > 1$  mm lagen. Somit zeigt sich, dass bei der Siebklassierung einige Partikel von  $x > 1$  mm in die Feinfraktion verschleppt wurden. Es handelt sich um eine deutlich breitere Verteilungsfunktion als bei der Grobfraction bei einer mittleren Partikelgröße von  $x_{50} = 0,36$  mm. Da die Putz- und Styroporpartikel in den Partikelgrößen von  $28 \mu\text{m} - 1,1$  mm vorlagen, ist im späteren Verlauf des Verwertungsweges diese Fraktion aufgrund ihrer breiten und feinen Verteilung deutlich komplexer zu separieren.

### 7.2.3 Strömungsklassierung der Grob- und Feinfraktion der EPS-Modellsysteme

Die erhaltene Grob- und Feinfraktionen des separierten Zerkleinerungsproduktes wurden anschließend in die homogenen Stoffströme aufgetrennt. Hierfür wurde die Methode der Strömungsklassierung unter Zuhilfenahme eines Zickzacksichters angewandt. Es wurden verschiedenen Volumenströme im Sichter realisiert, um für jede individuelle Probe das bestmögliche Trennergebnis erzielen zu können. Da die Grobfraktion leichter zu separieren ist wurde damit begonnen diese in ihre homogenen Materialien aufzutrennen. Das bestmögliche Trennergebnis für diese Fraktion konnte bei einem Volumenstrom von  $15 \text{ Nm}^3/\text{h}$  erzielt werden. In der Leichtfraktion befand sich EPS und Glasfasergewebe sowie Reste von feinen Putzpartikeln. Der Putz ließ sich aufgrund des hohen Dichteunterschiedes zwischen den Komponenten ( $\rho_{\text{Putz}} \sim 1100 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{EPS}} \sim 20 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{Gewebe}} \sim 120 \text{ kg/m}^3$ ) bei einem hohen Volumenstrom gut aus dem Materialgemisch abtrennen. Sowohl das EPS als auch das Gewebe lagerten sich beide in derselben Fraktion an, da der Dichteunterschied zwischen beiden Materialien gering ist. *Abbildung 19* zeigt die erhaltene Schwer- und Leichtfraktion nach der Sichtung.



Abbildung 19: Schwer- und Leichtfraktion der Grobfraktion der EPS-Modellsysteme, nach dem ersten Sichterdurchgang mit einem Volumenstrom von  $15 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Da in der erhaltenen Schwerfraktion keine Fremdpartikel vorlagen, steht der erhaltene Putz für eine Wiederverwertung zur Verfügung. Die Leichtfraktion bestand aus einer Mischfraktion, welche sich aus EPS, Glasfasergewebe und Putzresten zusammensetzte, weshalb diese in einem weiteren Sichterschnitt weiter aufbereitet werden musste, um die Materialien voneinander trennen zu können. Als nächster Schritt wurden beide Fraktionen mittels des CAMSIZER vermessen.

Hierbei soll die Partikelgrößenverteilung der beiden erhaltenen Fraktionen überprüft werden. *Abbildung 20 und Abbildung 21* zeigt die Vermessung beider Fraktionen.

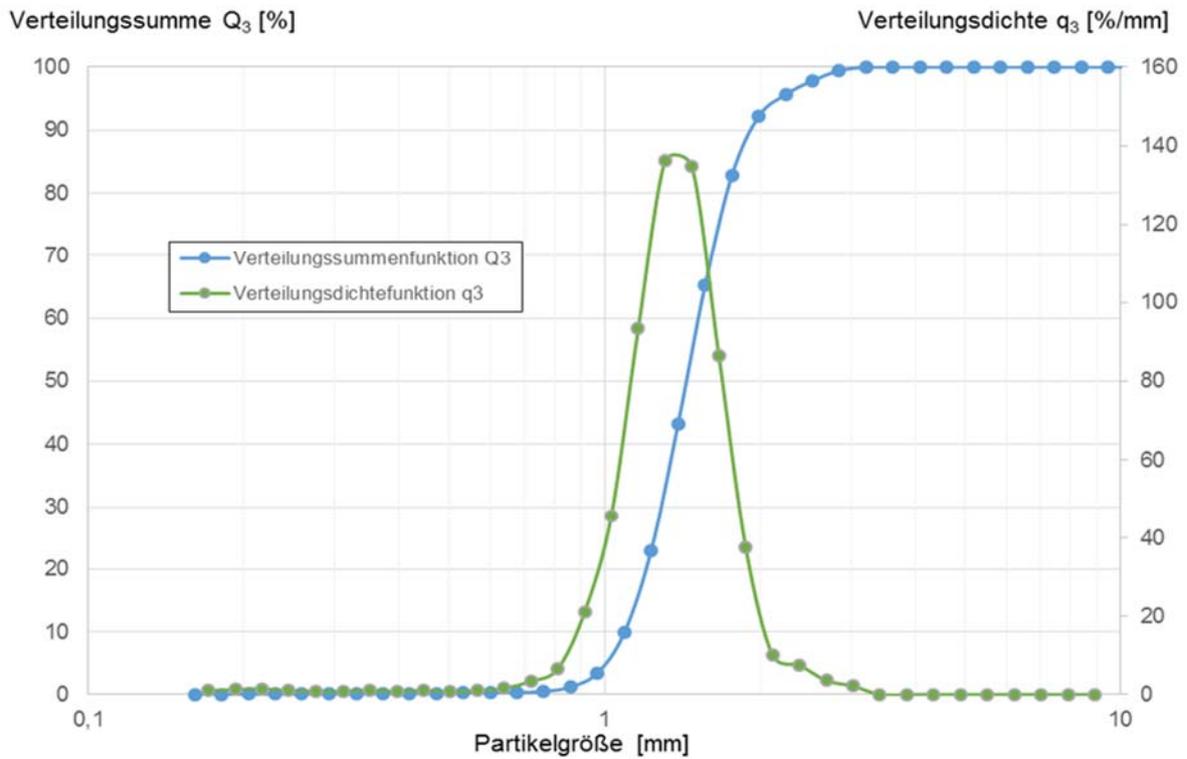


Abbildung 20: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Schwerfraktion ( $x > 1$  mm), der EPS-Modellsysteme, nach dem ersten Sichterdurchgang

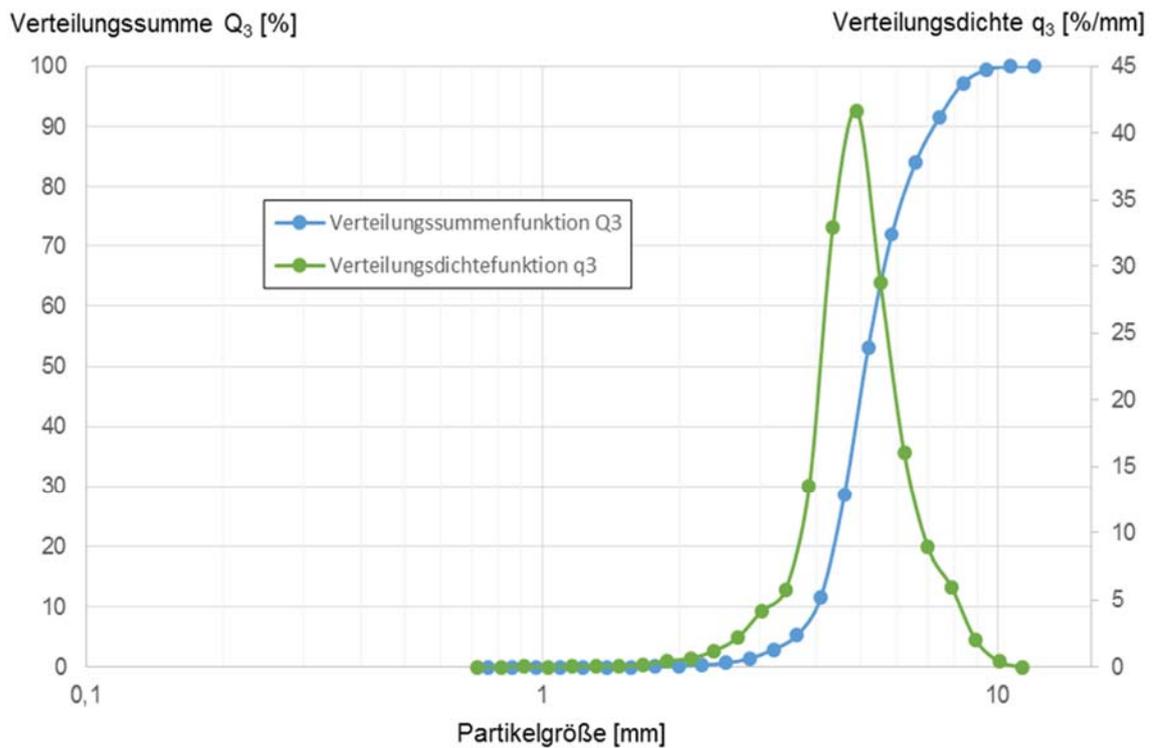


Abbildung 21: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Leichtfraktion ( $x > 1$  mm) der EPS-Modellsysteme, nach dem ersten Sichterdurchgang

In der Schwerfraktion betrug die mittlere Partikelgröße  $x_{50} = 1,4$  mm. Die Verteilungsdichtefunktion zeigt hierbei eine enge monomodale Verteilung. Es kann davon ausgegangen werden dass die Schwerfraktion überwiegend aus Oberputz bzw. Unterputz bestand. Die Leichtfraktion besaß eine mittlere Partikelgröße von  $x_{50} = 5,1$  mm und besaß damit eine deutlich größere Partikelgröße als die Schwerfraktion. Auch hier konnte eine monomodale Verteilungsdichtefunktion festgestellt werden. Von beiden Fraktionen wurde die Masse bestimmt um das Massenverhältnis von Schwer- zu Leichtfraktion bestimmen zu können. In *Tabelle 4* befinden sich die Gewichtsverhältnisse der beiden erhaltenen Fraktionen.

Tabelle 4: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Schwer- und Leichtfraktion ( $x > 1$  mm), der EPS-Modellsysteme, nach dem ersten Sichterdurchgang

Fraktion	Schwerfraktion ( $x > 1$ mm)	Leichtfraktion ( $x > 1$ mm)
Masse der Fraktion	466,2 g (89 wt.-%)	57,6 g (11 wt.-%)
Probenverlust	0,8 g	

Wie bereits vermuten, befindet sich der größte Gewichtsanteil (89 wt.-%) aufgrund des Putzes in der Schwerfraktion. Der Gewichtsanteil der Leichtfraktion betrug aufgrund der geringen Dichte des Armierungsgewebes und des EPS lediglich 11 wt.-%. Anschließend wurde durch einen zweiten Sichterschnitt die Leichtfraktion weiter aufgetrennt. Hierfür wurde ein geringer Volumenstrom gewählt, da die Dichten des Armierungsgewebes und des EPS im selben Größenbereich liegen. Es konnte ein Volumenstrom von  $7 \text{ Nm}^3/\text{h}$  ermittelt werden. *Abbildung 22* zeigt die erhaltene Schwer- und Leichtfraktion.

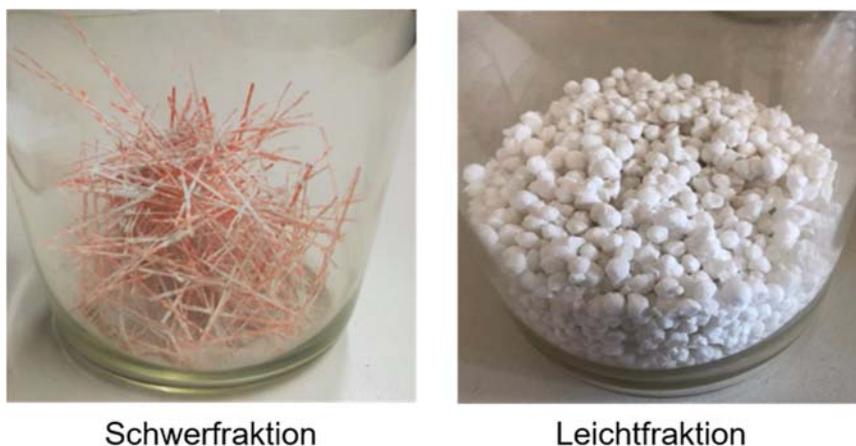


Abbildung 22: Schwer- und Leichtfraktion der Grobfraktion der EPS-Modellsysteme, nach dem zweiten Sichterdurchgang mit einem Volumenstrom von  $7 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Es konnte keine Rückstände von Gewebe bzw. Putz festgestellt werden und lag damit sortenrein vor. Von den erhaltenen Fraktionen wurden im Anschluss die jeweiligen Massen aufgenommen. Diese befinden sich in *Tabelle 5*.

Tabelle 5: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Schwer- und Leichtfraktion ( $x > 1$  mm) der EPS-Modellsysteme nach dem zweiten Sichterdurchgang

<b>Fraktion</b>	<b>Schwerfraktion (<math>x &gt; 1</math> mm)</b>	<b>Leichtfraktion (<math>x &gt; 1</math> mm)</b>
Masse der Fraktion	12 g (21 wt.-%)	45,2 g (79 wt.-%)
Probenverlust	0,4 g	

Da in der Schwerfraktion noch Putzpartikel vorlagen, wurden durch einen weiteren Sichterschnitt, das Armierungsgewebe von den feinen Putzpartikeln abgetrennt. Jedoch konnte hierbei keine reine Fraktion aus Glasfasergewebe erzeugt werden. Da die Putzpartikel überwiegend sehr fein waren, besaßen diese nur eine geringe Masse und lagerten sich teilweise in der Leichtfraktion an, in welcher sich auch das Armierungsgewebe befand. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich der Putz (welcher eine Partikelgröße von  $x > 1$  mm besitzen sollte) durch den Klassiervorgang durch Partikelstöße weiter zerkleinerte. Da durch einen weiteren Sichterschnitt keine reproduzierbaren Ergebnisse erzielt werden konnten, wurde mittels eines 1 mm Siebes der Putz abgeseibt. Somit konnten alle Putzreste vom Glasfasergewebe entfernt werden und damit sortenreine Stoffströme erzeugt werden. Das Glasfasergewebe reicherte sich in der Grobfraktion an wohingegen der gesamte Putz in der Feinfraktion zu finden war. Die erhaltenen Massen befinden sich in *Tabelle 6*.

Tabelle 6: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Grob- und Feinfraktion ( $x > 1$  mm), der Leichtfraktion der EPS-Modellsysteme nach dem zweiten Sichterdurchgang

<b>Fraktion</b>	<b>Grobfraktion (<math>x &gt; 1</math> mm)</b>	<b>Feinfraktion (<math>x &lt; 1</math> mm)</b>
Masse der Fraktion	8,6 g (76 wt.-%)	2,7 g (24 wt.-%)
Probenverlust	0,7 g	

Somit konnten nun aus dem anfänglichen Mehrkomponentengemisch der Grobfraktion, sortenreine Stoffströme erzeugt werden. *Tabelle 7* zeigt welcher Gewichtsanteil aus den eingesetzten Materialien des konstruierten WDVS rückgewonnen werden konnte.

Tabelle 7: Eingesetzte und rückgewonnene Massen der Grobfraktion der EPS-Modellsysteme sowie der rückgewonnene Gewichtsanteil

Fraktion	Eingesetzte Masse	Rückgewonnene Masse	Gewichtsanteil
Styropor (EPS)	54 g	45,2 g	84 wt.-%
Putz	646,5 g	468,9 g	73 wt.-%
Armierungsgewebe	11,6 g	8,6 g	85 wt.-%

Anschließend wurde damit begonnen die Feinfraktion ( $x < 1 \text{ mm}$ ) mittels der Strömungsklassierung in ihre homogenen Bestandteile aufzutrennen. Da in dieser Fraktion überwiegend sehr feine Partikelgrößen vertreten waren, musste hierbei ein geringerer Volumenstrom von  $8 \text{ Nm}^3/\text{h}$  gewählt werden. Bei diesen Einstellungen konnte das beste Trennergebnis erzeugt werden. Das Resultat der Sichtung befindet sich in *Abbildung 23*.

Abbildung 23: Schwer- und Leichtfraktion der Feinfraktion der EPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang mit einem Volumenstrom von  $8 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 

In der Schwerfraktion konnten ausschließlich Putzpartikel festgestellt werden. Somit lag diese Fraktion sortenrein vor. Diese wurde anschließend mittels des CAMSIZER vermessen. Die hieraus resultierende Partikelgrößenverteilung befindet sich in *Abbildung 24*. Die monomodale Verteilungsdichtefunktion zeigt eine scharfe Trennung. Die enge Verteilungssummenfunktion besitzt eine mittlere Partikelgröße von  $x_{50} = 711 \text{ }\mu\text{m}$ . Der erhaltene sortenreine Putz steht nun für eine Wiederverwertung zur Verfügung.

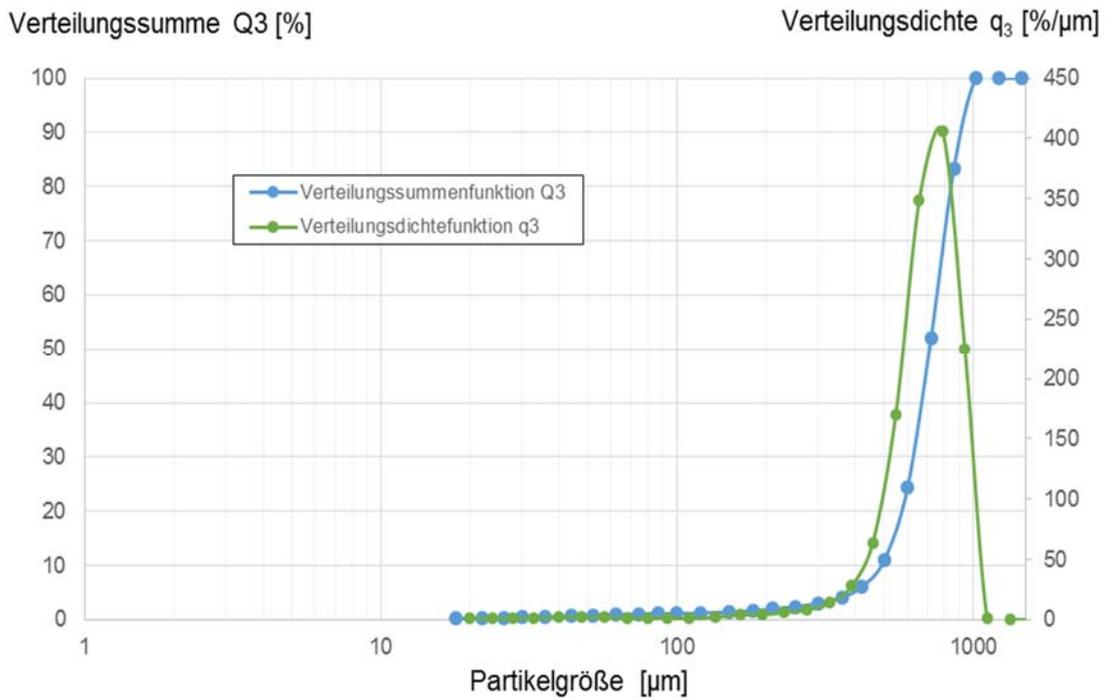


Abbildung 24: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Schwerfraktion ( $x < 1$  mm) der EPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang

Die erhaltene Leichtfraktion bestand aus einer Mischfraktion welche feine Dämmstoffpartikel, Putzpartikel sowie Geweberesten enthielt. Da es bei dieser Fraktion um ein feines Kollektiv an Partikeln handelte, wurde diese Probe mittels Methode der Laserbeugung vermessen. Das Ergebnis der Messung befindet sich in Abbildung 25.

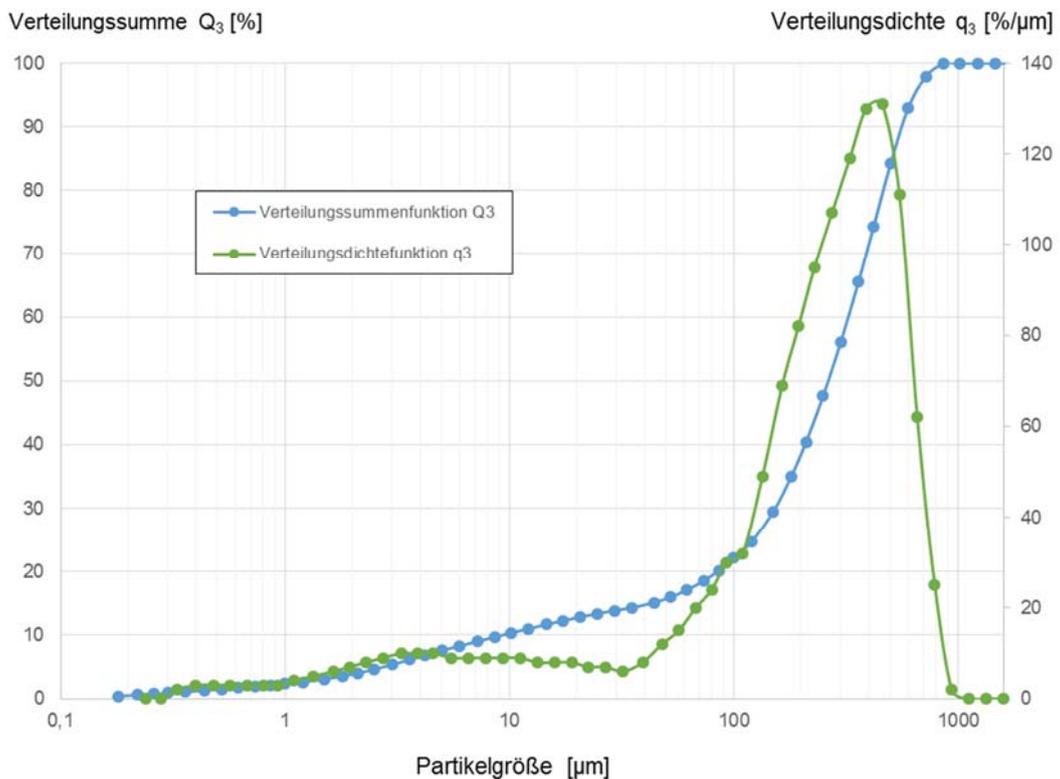


Abbildung 25: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Leichtfraktion ( $x < 1$  mm) der EPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang

Wie am Verlauf der Verteilungsdichtefunktion deutlich wird, handelt es sich um eine breite Verteilung im Feinanteil Bereich von  $50 \mu\text{m} > x > 0,5 \mu\text{m}$ . Die mittlere Partikelgröße betrug  $x_{50} = 268 \mu\text{m}$ . Die Massenanteile der erhaltenen Schwer- und Leichtfraktion befinden sich in *Tabelle 8*.

Tabelle 8: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Schwer- und Leichtfraktion ( $x < 1 \text{ mm}$ ) der EPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang

Fraktion	Schwerfraktion ( $x < 1 \text{ mm}$ )	Leichtfraktion ( $x < 1 \text{ mm}$ )
Masse der Fraktion	68,4 g (42 wt.-%)	94,3 g (58 wt.-%)
Probenverlust	12 g	

Es wurde anschließend damit begonnen die Leichtfraktion mittels eines weiteren Sichterschlittes aufzutrennen. Hierbei konnte jedoch bei keinen der gewählten Volumenströme ein reproduzierbares Ergebnis erzeugt werden.

Die beiden erhaltenen Fraktionen beinhalteten eine Mischfraktion aus den Komponenten EPS, Gewebe und Putz. Da in dem Partikelkollektiv der feinanteil sehr hoch ist, konnte mittels der Methode der Strömungsklassierung keine Trennung realisiert werden. Ebenfalls konnte aufgrund der feinen Verteilung der Materialien keine Trennung mittels Siebklassierung durchgeführt werden. Hierbei war der limitierende Faktor die Maschenweite der vorhandenen Siebe. Somit konnten aus der erhaltenen Leichtfraktion keine homogenen Massenströme der enthaltenen Materialien erzeugt werden. In *Tabelle 9* ist der Gewichtsanteil zu finden, welcher zeigt wie viel aus den eingesetzten Materialien in der Leichtfraktion rückgewonnen werden konnte.

Tabelle 9: Eingesetzte und rückgewonnene Massen der Feinfraktion, der EPS-Modellsysteme, sowie der individuell rückgewonnene Gewichtsanteil

Fraktion	Eingesetzte Masse	Rückgewonnene Masse	Gewichtsanteil
Styropor (EPS)	54 g	/	/
Putz	646,5 g	68,4 g	11 wt.-%
Armierungsgewebe	11,6 g	/	/

Da aus der Leichtfraktion keines der drei enthaltenen Materialien rückgewonnen werden konnte, kann hierbei auch kein Anteil bestimmt werden welcher in der Fraktion enthalten ist. Lediglich ein Anteil von 11 wt.-% Putz vom Gesamtanteil konnte aus der Leichtfraktion rückgewonnen werden.

Da das erhaltene Zerkleinerungsprodukt aus der Hammermühle der EPS-Modellsysteme nicht weiter aufbereitet werden konnte, konnte nun der Gesamtanteil der Rückgewonnenen Massen bestimmt werden. In *Tabelle 10* sind die Rückgewonnenen Massen der eingesetzten Materialien zu finden.

Tabelle 10: Eingesetzte und rückgewonnene Massen des gesamten Zerkleinerungsproduktes der EPS-Modellsysteme sowie der individuell rückgewonnene Gewichtsanteil

Fraktion	Eingesetzte Masse	Rückgewonnene Masse	Gewichtsanteil
Styropor (EPS)	54 g	45,2 g	84 wt.-%
Putz	646,5 g	537,3 g	83 wt.-%
Armierungsgewebe	11,6 g	8,6 g	85 wt.-%

#### 7.2.4 Zerkleinerung der XPS-Modellsysteme mittels Hammermühle

Wie bereits bei den Systemen welche EPS als Dämmstoffmaterial enthielten, sollten nun die WDVS mit XPS als Dämmstoff mittels der Hammermühle zerkleinert werden. Ebenfalls wurde hierbei ein 10 mm Sieb während der Zerkleinerung verwendet, um ein definiertes Zerkleinerungsprodukt zu erhalten. Die erzielten Massenströme sowie die Masse der eingesetzten Materialien befinden sich in *Tabelle 11*.

Tabelle 11: Eingesetzte Massen der XPS-Modellsysteme und erzielte Massenströme in der Hammermühle

WDVS-System (Dämmstoffart)	XPS
Eingesetzte Masse	781,1 g (15 x System)
Massenstrom	6,2 kg/h
Probenverlust	14,3 g

Das erhaltene Zerkleinerungsprodukt wurde anschließend mittels des CAMSIZER vermessen. Hierbei konnte nun erneut festgestellt werden, welche Art an Verteilung des Partikelkollektives vorlag. *Abbildung 26* zeigt die Verteilungsdichte- und Verteilungssummenfunktion der zerkleinerten Systeme.

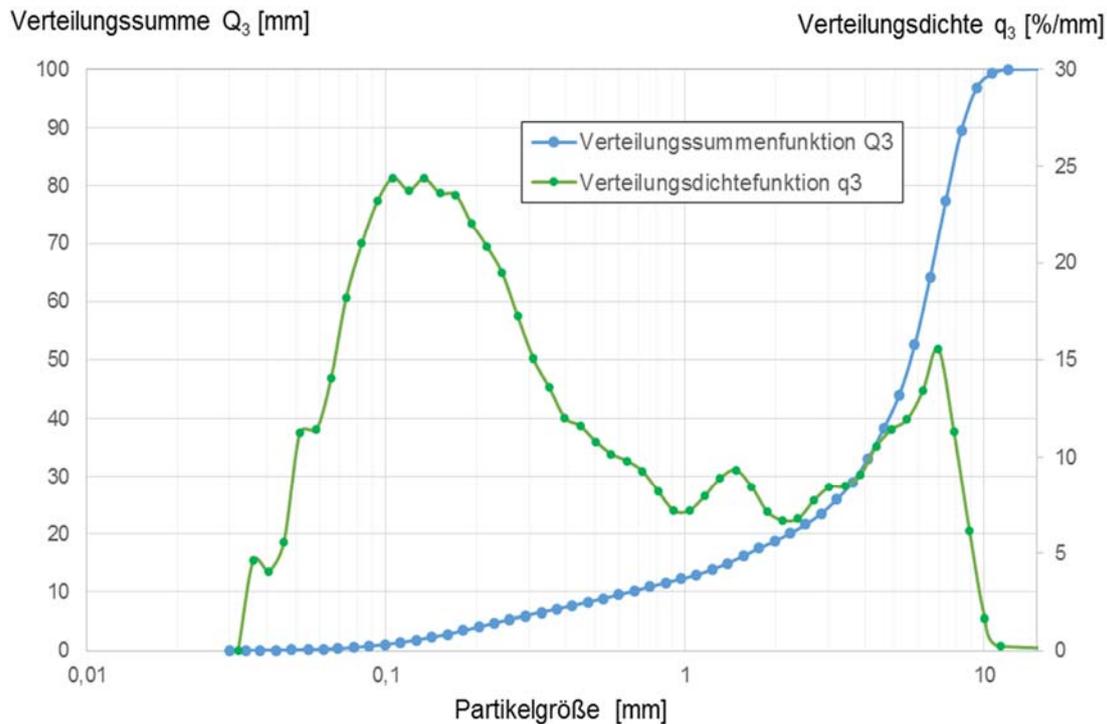


Abbildung 26: Verteilungssummen- und Verteilungsdichtefunktion der zerkleinerten XPS-Modellsysteme

Die mittlere Partikelgröße betrug hierbei  $x_{50} = 5,2$  mm. Auch hier zeigt die Verteilungsdichtefunktion einen bimodalen Verlauf. Wie bereits die Siebanalyse zeigte, ist in diesem Partikelkollektiv der Feinanteil deutlich höher. Dies zeigt sich auch in der Verteilungsdichtefunktion. Da auch hierbei eine breite Partikelverteilung vorliegt, ist es hierbei komplex die individuellen Materialien aus dem Komposit zu trennen. Es ist nötig im späteren Verlauf dieser Versuche das Kollektiv in eine Fein- und Grobfraction aufzutrennen.

### 7.2.5 Siebklassierung der zerkleinerten XPS-Modellsysteme

Das erhaltene Zerkleinerungsprodukt der Systeme welche XPS als Dämmstoffmaterial enthalten zeigte in *Abbildung 61* eine breite bimodale Verteilung mit einem hohen Feinanteil (Volumenbezogen) im Bereich  $1 \text{ mm} > x > 0,03 \text{ mm}$ . Da auch hierbei eine Trennung mittels Strömungsklassierung aufgrund der unterschiedlichen Partikelgrößen komplex ist, wurde bei 1 mm ein Trennschnitt angesetzt. *Abbildung 61* zeigt den angesetzten Trennschnitt in der erhaltenen Verteilungsdichtefunktion

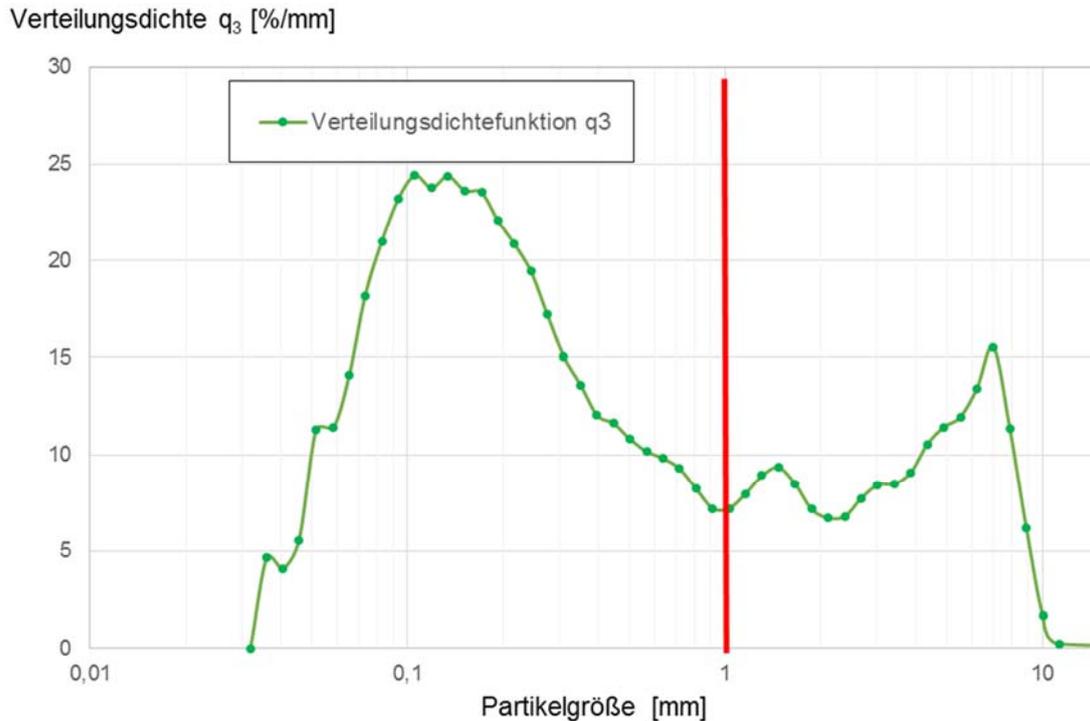


Abbildung 27: Verteilungsdichtefunktion der zerkleinerten XPS-Modellsysteme mit angesetztem Trennschnitt bei 1 mm

Der Siebturm bestand ebenfalls aus einem 1 mm Sieb um eine Feinfraktion ( $x < 1$  mm) und eine Grobfraktion ( $x > 1$  mm) zu erhalten. Die Siebzeitbestimmung wurde nach DIN 661665 durchgeführt. Es konnte eine Siebzeit von 5 min, bei einer Amplitude von 1,5 in einem 10 Sekunden Intervall, ermittelt werden.

Nach dem das gesamte Zerkleinerungsprodukt abgesiebt wurde, konnten die Massen der erhaltenen Fein- und Grobfraktion bestimmt werden. In *Tabelle 12* befindet sich das Massenverhältnis der erhaltenen Fein- und Grobfraktion.

Tabelle 12: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Fein- und Grobfraktion der zerkleinerten XPS-Modellsysteme

Sieb	Grobfraktion ( $x > 1$ mm)	Feinfraktion ( $x < 1$ mm)
Masse der Fraktion	490,5 g (64 wt.-%)	275,9 (36 wt.-%)
Probenverlust	0,4 g	

Bei den Systemen welche XPS als Dämmstoffmaterial enthalten war der Feinanteil mit 36 wt.-% deutlich höher als bei den Systemen welche XPS als Dämmstoffmaterial enthielten. Hierbei konnte ein erheblicher Anteil an XPS sowie Putzpartikel und Glasfasern festgestellt werden. Die Feinfraktion bestand aus einer Mischfraktion aus feinen Putzresten und XPS welches nicht mehr in seiner elliptischen Form vorlag.

Anschließend wurde mittels CAMSIZER bei erhaltenen Fraktionen vermessen um das Ergebnis der Siebklassierung bewerten zu können. *Abbildung 28* zeigt die Vermessung der Grobfraction.

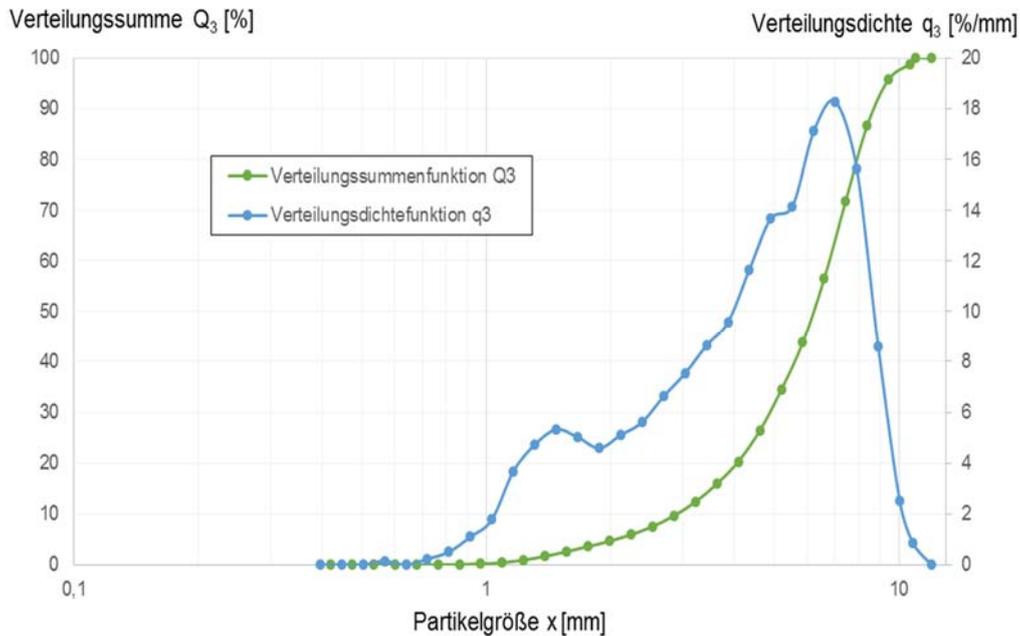


Abbildung 28: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Grobfraction ( $x > 1$  mm) der XPS-Modellsysteme

Die Verteilungsdichtefunktion der Grobfraction zeigt hierbei erneut eine, wenn auch geringe, bimodale Verteilung. Es kann davon ausgegangen werden das sich hierbei ein größerer Anteil an Putz in der Fraktion angesammelt hat. Die mittlere Partikelgröße lag bei  $x_{50} = 6,3$  mm und ist somit deutlich größer als auch breiter Verteilt wie bei der Grobfraction der Systeme welche EPS als Dämmstoffmaterial enthalten. Dies resultiert daraus, da die sphärische Form des XPS in ihrem Verbund größer ist als die des EPS. *Abbildung 63* zeigt das Ergebnis der CAMSIZER Messung der Feinfraktion.

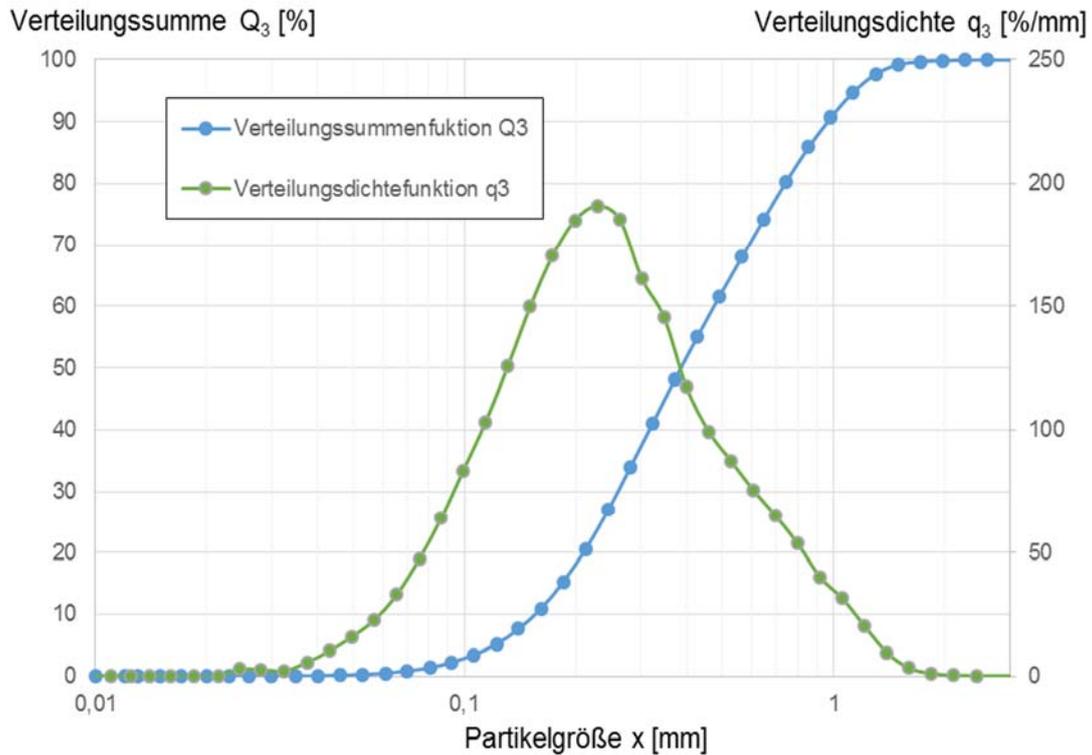


Abbildung 29: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Feinfraktion ( $x < 1$  mm) der XPS-Modellsysteme

Die Partikelgrößenverteilung der Feinfraktion zeigte einen ähnlichen Verlauf als die Ergebnisse der Messung der Feinfraktion welche XPS als Dämmstoff enthielten. Die mittlere Partikelgröße lag hierbei bei  $x_{50} = 0,38$  mm. Auch hierbei wurde Partikel über  $x > 1$  mm vermessen. Es ist davon auszugehen, dass ebenfalls Partikel aus der Grobfraktion in die Feinfraktion verschleppt wurden bzw. der Putz während der Siebklassierung nachzerkleinerte. Da hier eine breite Verteilung an feinen Putz- und Styroporpartikeln vorlag, wird auch hierbei die Trennung mittels Windsichtung komplexer.

### 7.2.6 Strömungsklassierung der Grob- und Feinfraktion der XPS-Modellsysteme

Nachdem die Zerkleinerungsfraction der Systeme welche XPS als Dämmstoffmaterial enthielten mittels Siebklassierung separiert wurden, konnten die erhaltene Fein- und Grobfraktion mittels Windsichtung in ihre homogenen Bestandteile aufgetrennt werden. Die Volumenströme wurden hierbei erneut so variiert, dass für jede individuelle Probe ein optimales Trennergebnis erzielt werden konnte. Es wurde damit begonnen die Schwerfraktion zu separieren. Um bei der Schwerfraktion das bestmögliche Trennergebnis zu realisieren, konnte ein Volumenstrom von  $16 \text{ Nm}^3/\text{h}$  ermittelt werden. Das Ergebnis der erhaltenen Leicht- und Schwerfraktion befindet sich in *Abbildung 30*.

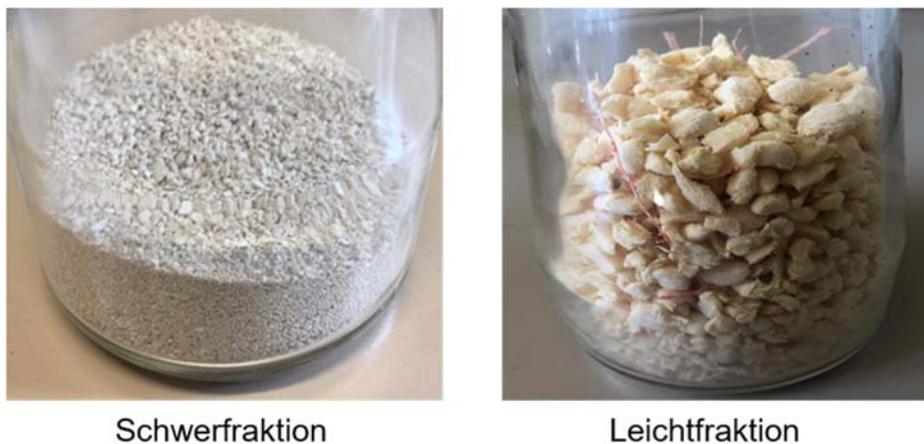


Abbildung 30: Schwer- und Leichtfraktion der Grobfraktion der XPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang mit einem Volumenstrom von  $16 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Hierbei befand sich in der Schwerfraktion ausschließlich Putz ohne Vermischung von Fremdanteilen. In der Leichtfraktion befanden sich eine Mischfraktion bestehend aus Dämmstoffmaterial und Geweberesten sowie ein Anteil an feineren Putzpartikeln. So konnte, wie bereits bei dem Sichterschnitt der Systeme welche EPS als Dämmstoffmaterial enthielte, der Putz aufgrund des hohen Dichteunterschiedes ( $\rho_{\text{Putz}} \sim 1100 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{XPS}} \sim 30 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{Gewebe}} \sim 120 \text{ kg/m}^3$ ) zu den anderen Materialien, überwiegend aus dem Materialgemisch abgetrennt werden. Beide Fraktionen wurden anschließend mittels des CAMSIER vermessen um hierdurch den Verlauf der Partikelgrößenverteilung einsehen zu können. *Abbildung 66* zeigt die Partikelgrößenverteilung der erhaltenen Schwerfraktion. Die Partikelgrößenverteilung zeigt eine enge Verteilung bei einer mittleren Partikelgröße von  $x_{50} = 1,42 \text{ mm}$ . Es konnte eine monomodale Verteilungsdichtefunktion durch den ersten Sichterengang für die Grobfraktion erzeugt werden.

Da diese Fraktion sortenrein vorlag, steht diese für eine Wiederverwertung zur Verfügung und könnte somit erneut am Markt etabliert werden.

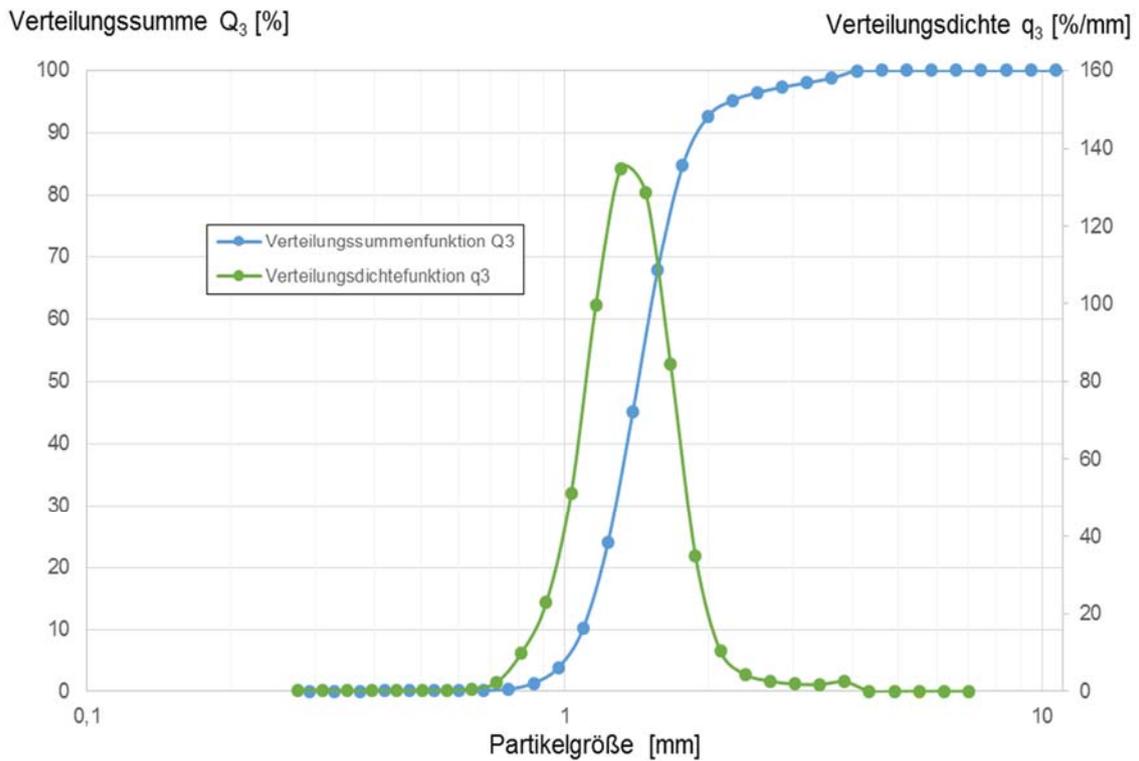


Abbildung 31: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Schwerfraktion ( $x > 1$  mm) der XPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang

In *Abbildung 32* befindet sich die Partikelgrößenverteilung der Leichtfraktion.

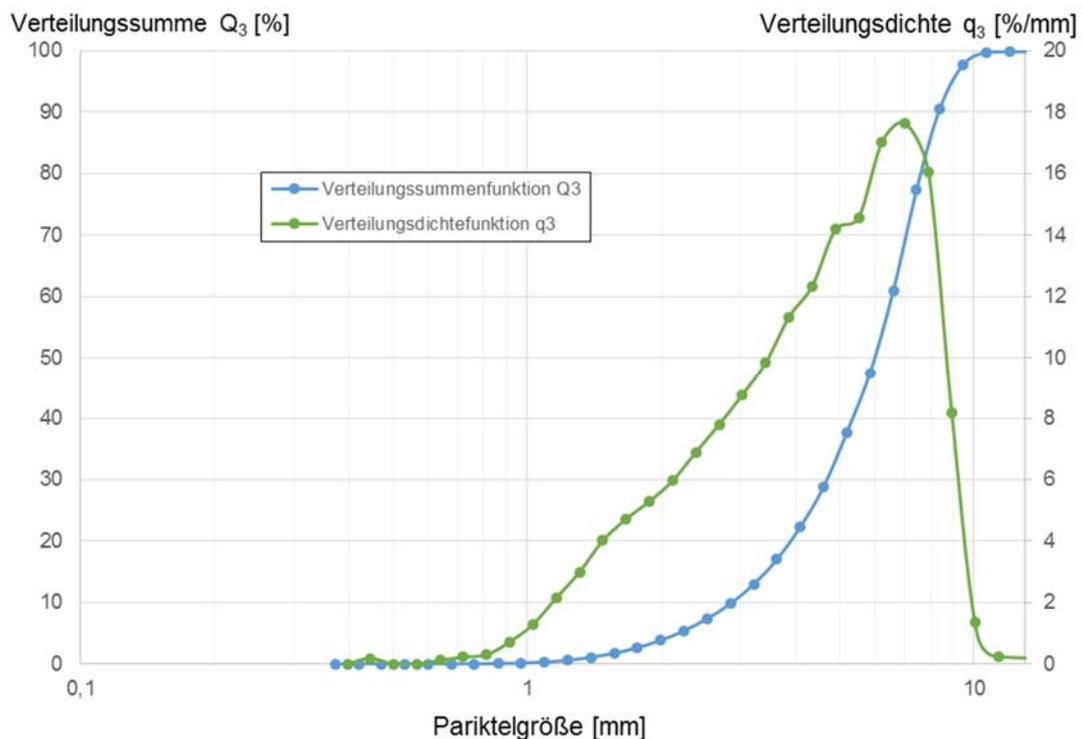


Abbildung 32: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Leichtfraktion ( $x > 1$  mm) der XPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang

Die Verteilungsdichtefunktion zeigt eine breite Verteilung. Hierbei kann erneut davon ausgegangen werden, dass der Putz während der Sichtung sich durch Partikelstöße weiter zerkleinerte. Des Weiteren befinden sich in der Leichtfraktion unterschiedliche Partikelgrößen an Dämmstoffmaterial (XPS) da dies in seinem Verbund keine einheitliche Größe besaß. Überwiegend behielt dieser in der Leichtfraktion seine elliptische Form. Das Gewichtsverhältnis der erhaltenen Schwer- und Leichtfraktion des ersten Sichterdurchganges befindet sich in *Tabelle 13*.

Tabelle 13: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Schwer- und Leichtfraktion ( $x > 1$  mm), der XPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang

Fraktion	Schwerfraktion ( $x > 1$ mm)	Leichtfraktion ( $x > 1$ mm)
Masse der Fraktion	386,8 g (79 wt.-%)	102,8 g (21 wt.-%)
Probenverlust	0,8 g	

Da bereits der Putz homogen in der Schwerfraktion vorlag, muss nun die Leichtfraktion mittels Windsichtung durch einen zweiten Sichterschnitt weiter separiert werden. Für den durchgeführten Sichterdurchgang konnte für ein bestmögliches Trennergebnis ein Volumenstrom von  $8 \text{ Nm}^3/\text{h}$  ermittelt werden. Der Volumenstrom musste hier niedriger gewählt werden, da erneut der Dichteunterschied zwischen Dämmstoffmaterial und dem Glasfasergewebe gering ist. Das Ergebnis der Sichtung der Leichtfraktion befindet sich in *Abbildung 33*.



Schwerfraktion



Leichtfraktion

Abbildung 33: Schwer- und Leichtfraktion der Grobfraktion der XPS-Modellsysteme nach dem zweiten Sichterdurchgang mit einem Volumenstrom von  $8 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Der erhaltene Dämmstoff lag nach dem zweiten Sichterdurchgang als Reifraktion vor ohne Fremdanteil anderer Materialien. In der Schwerfraktion konnte, wie bereits bei dem zweiten durchgeführten Sichterdurchgang der Systeme welche EPS enthalten, befanden sich in der Schwerfraktion Reste von Putzpartikeln. Diese lagerten sich aufgrund der hohen Putzdichte in der Schwerfraktion an. Anschließend wurden von beiden Fraktionen die jeweiligen Massen bestimmt. Das Massenverhältnis der jeweiligen Fraktion befindet sich in *Tabelle 14*.

Tabelle 14: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Schwer- und Leichtfraktion ( $x > 1$  mm) der XPS-Modellsysteme nach dem zweiten Sichterdurchgang

Fraktion	Schwerfraktion ( $x > 1$ mm)	Leichtfraktion ( $x > 1$ mm)
Masse der Fraktion	14,2 g (14 wt.-%)	87,4 g (86 wt.-%)
Probenverlust	1,2 g	

Somit konnten 87,4 g reiner Dämmstoff aus dem Materialgemisch rückgewonnen werden. Da jedoch in der erhaltenen Schwerfraktion noch ein Materialgemisch aus Putzpartikeln und Fasern aus Glasfasergewebe vorlagen, musste diese Fraktion weiter separiert werden. Ein weiterer Sichterdurchgang konnte auch bei dieser Art von WDVS nicht realisiert werden, da kein Volumenstrom eruiert werden konnte, bei dem homogene Stoffströme erzeugt wurden. Somit wurde der Putz im Materialgemisch mittels Siebklassierung durch Verwendung eines 1 mm Sieb abgetrennt. Hierdurch konnten alle Putzreste vom Glasfasergewebe entfernt und damit sortenreine Stoffströme erzeugt werden. Das Glasfasergewebe reicherte sich in der Grobfraktion an wohingegen der gesamte Putz in der Feinfraktion zu finden war. Die erhaltenen Massen befinden sich in *Tabelle 15*.

Tabelle 15: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Grob- und Feinfraktion ( $x > 1$  mm) der Leichtfraktion der XPS-Modellsysteme nach dem zweiten Sichterdurchgang

Fraktion	Grobfraktion ( $x > 1$ mm)	Feinfraktion ( $x < 1$ mm)
Masse der Fraktion	9,9 g (71 wt.-%)	4,1 g (29 wt.-%)
Probenverlust	0,2 g	

Der Gesamtgewichtsanteil welcher aus der Grobfraktion rückgewonnen werden konnte befindet sich in *Tabelle 16*.

Tabelle 16: Eingesetzte und rückgewonnene Massen der Grobfraction der XPS-Modellsysteme sowie der individuell rückgewonnene Gewichtsanteil

Fraktion	Eingesetzte Masse	Rückgewonnene Masse	Gewichtsanteil
Styropor (XPS)	123 g	87,4 g	71 wt.-%
Putz	646,5 g	390,9 g	60 wt.-%
Armierungsgewebe	11,55 g	9,9 g	86 wt.-%

Anschließend wurde damit begonnen die durch den anfänglichen Trennschnitt erhaltene Feinfraktion ( $x < 1 \text{ mm}$ ) zu separieren. Aufgrund der geringen Partikelgröße des Kollektivs in der Feinfraktion muss ein geringerer Volumenstrom gewählt werden. Es konnte jedoch kein geeigneter Volumenstrom im Zickzacksichter eruiert werden um die Mischfraktion trennen zu können. Das bestmögliche Trennergebnis wurde bei einem Volumenstrom von  $8 \text{ Nm}^3/\text{h}$  erzielt. *Abbildung 34* zeigt das Ergebnis des ersten Sichterdurchganges.

Abbildung 34: Schwer- und Leichtfraktion der Feinfraktion der XPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang mit einem Volumenstrom von  $8 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 

Jedoch lagen im Anschluss an den Sichterdurchgang die erhaltene Schwer- und Leichtfraktion als inhomogenes Materialgemisch vor. Es konnte durch die Variation des Volumenstromes kein homogener Materialstrom erzeugt werden. In der Leichtfraktion lag überwiegend fein zerkleinerter XPS vor. Es konnten auch Putz- und Gewebereste beobachtet werden. Die Schwerfraktion zeigte überwiegend Putz jedoch konnten auch Überreste von Dämmstoffpartikeln gefunden werden. Beide Fraktionen wurden anschließend mittels des CAMSIZER vermessen. Da bei beiden Fraktionen deutlich größere Partikel vorlagen als in den Fraktionen durch den zweiten Sichterdurchgang der Systeme welche EPS enthielten, wurde hierbei keine Vermessung mittels der Methode der Laserbeugung angewandt. *Abbildung 35* zeigt die Vermessung der Schwerfraktion

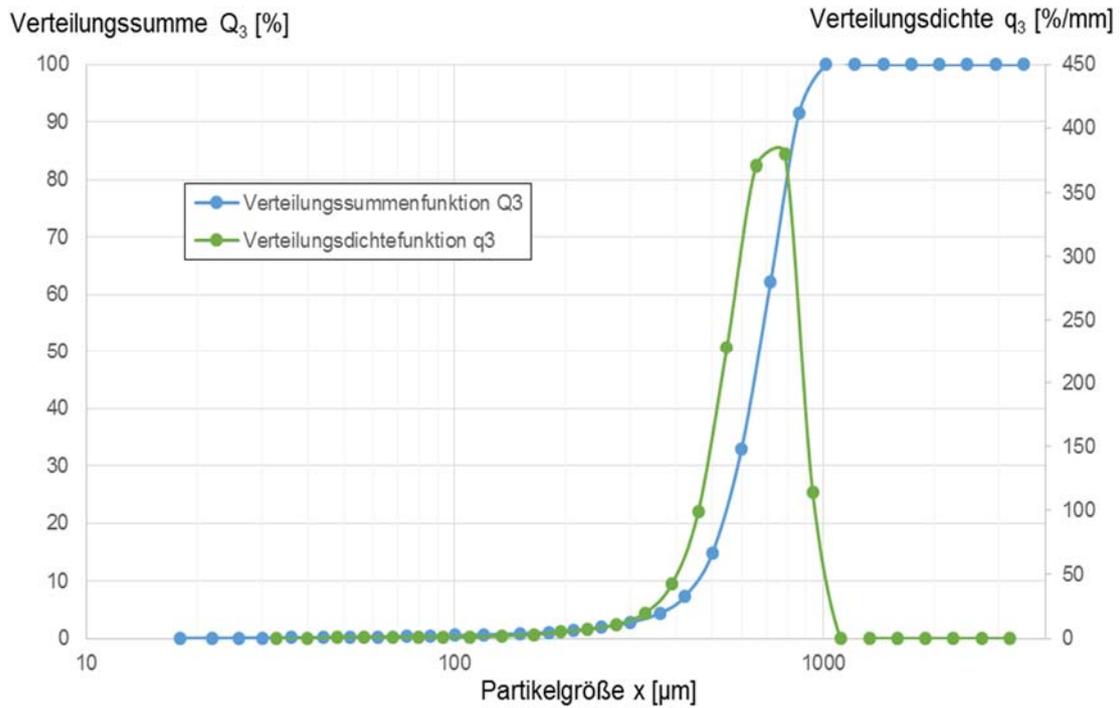


Abbildung 35: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Schwerfraktion ( $x < 1 \text{ mm}$ ) der XPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang

Die Verteilungsdichtefunktion zeigt eine enge monomodale Verteilung. Hierbei konnte eine mittlere Partikelgröße von  $x_{50} = 670 \text{ }\mu\text{m}$  erreicht werden. In *Abbildung 36* ist die Partikelgrößenverteilung der Leichtfraktion dargestellt.

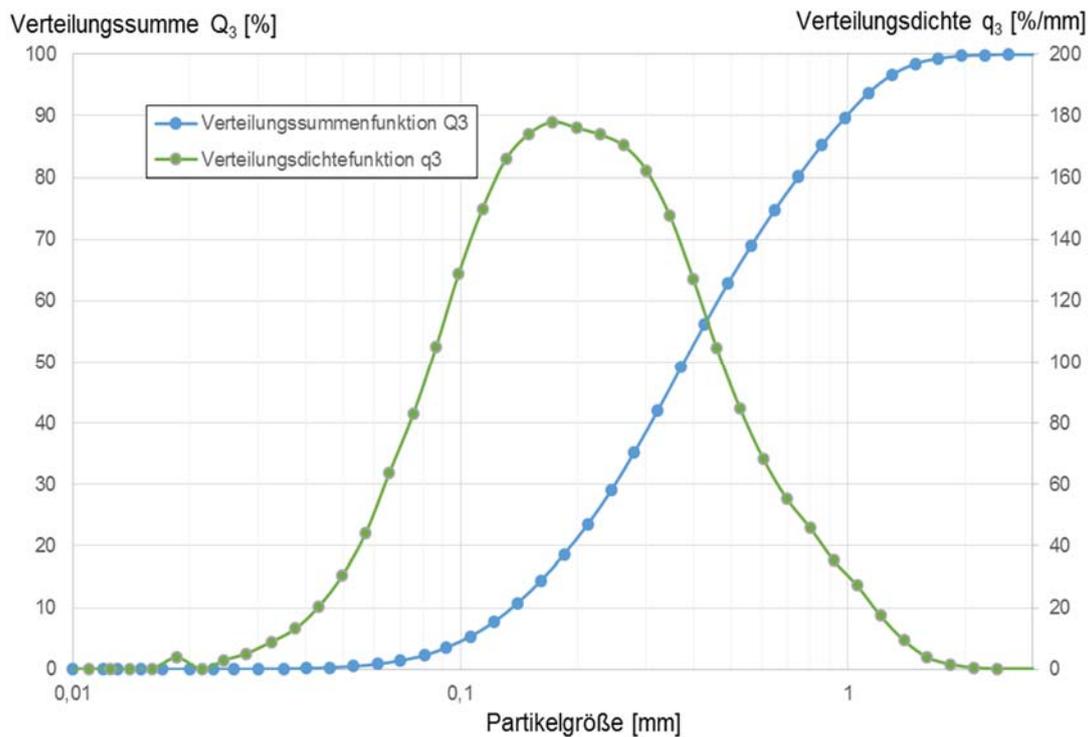


Abbildung 36: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Leichtfraktion ( $x < 1 \text{ mm}$ ), der XPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang

Hierbei handelt es sich um eine breite Verteilung an Partikeln bei einer mittleren Partikelgröße von  $x_{50} = 0,377$  mm. In beide Fraktionen wurden eine geringe Anzahl an Partikel  $x > 1$  mm durch den Sichterdurchgang verschleppt. Die beiden erhaltenen Fraktionen konnten im Anschluss nicht durch einen weiteren Sichterdurchgang aufgetrennt werden. Da die Partikel in der jeweiligen Fraktion zu fein waren, konnten die Materialien nicht voneinander getrennt werden. Ebenfalls wurde die Methode der Siebklassierung getestet. Jedoch konnte ebenfalls kein Trennergebnis erzielt werden um beide Mischfraktionen in homogene Bestandteile aufzutrennen. Somit konnte nur aus der Grobfraktion durch zwei Sichterdurchgänge die Materialien rückgewonnen werden. *Tabelle 17* zeigt die Gesamtmassenanteile der individuellen Materialien welche rückgewonnen werden konnten.

Tabelle 17: Eingesetzte und rückgewonnene Massen des gesamten Zerkleinerungsproduktes der XPS-Modellsysteme sowie der individuell rückgewonnene Gewichtsanteil

<b>Fraktion</b>	<b>Eingesetzte Masse</b>	<b>Rückgewonnene Masse</b>	<b>Gewichtsanteil</b>
Styropor (XPS)	123 g	87,4 g	71 wt.-%
Putz	646,5 g	390,9 g	60 wt.-%
Armierungsgewebe	11,55 g	9,9 g	86 wt.-%

## 8. Diskussion der Ergebnisse des angewandten Verwertungsweges auf die konstruierten WDVS-Modellsystem

Der entwickelte Verwertungsweg aus Kapitel 4 wurde auf die WDVS-Modellsysteme welche EPS und XPS als Dämmstoffmaterial enthielten angewandt. So konnte in den anfänglich durchgeführten Vorversuchen die Zerkleinerungsapparaturen wie die Schneid- und Kugelmühle ausgeschlossen werden, da hierbei die Materialien in ihrem Verbund nicht voneinander getrennt werden konnten. Jedoch zeigte sich, dass unter Verwendung der Hammermühle durch Zuhilfenahme eines Siebeinsatzes, die WDVS aus ihrem Verbund getrennt werden konnten. Die beiden konstruierten WDVS-Typen (EPS und XPS als Dämmstoffmaterial) wurden anschließend in einer größeren Stückzahl in der Hammermühle zerkleinert und mittels opto-elektronischer Messmethoden (CAMSIZER, Methode der Laserbeugung) vermessen.

Beide Partikelgrößenverteilungen zeigten eine breite bimodale Verteilung. Der Feinanteil der Verteilungsdichtefunktion der XPS-Modellsysteme zeigte hierbei einen deutlich größeren Feinanteil (Volumenbezogen) als die Verteilungsdichtefunktion der EPS-Modellsysteme. Um das erhaltene Zerkleinerungsprodukt im späteren Verlauf optimal trennen zu können, wurde das Produkt mittels Siebklassierung aufgetrennt. Bei beiden Fraktionen wurde ein Trennschnitt mittels einem Sieb von  $x = 1$  mm abgesiebt, da hierbei das Minimum bei beiden Funktionen lag. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich in den Feinfraktionen ( $x < 1$  mm) überwiegend feiner Putz- und Dämmstoffpartikel befanden. Die aus der Siebklassierung erhaltenen Grob- und Feinfraktionen zeigt im Anschluss eine monomodale Verteilung. Hierbei war bei beiden WDVS-Typen die Grobfraktion enger verteilt. In den Grobfraktionen befand sich die sphärische bzw. elliptische Form des Dämmstoffmaterials die durch Verwendung des Siebeinsatzes während der Zerkleinerung überwiegend erhalten werden konnte. Die Feinfraktion zeigte feine Putzpartikel sowie Dämmstoffrückstände wobei hierbei die sphärische bzw. elliptische Form nicht erhalten werden konnte und somit die vorherige Form zerstört wurde.

Im Anschluss wurde damit begonnen die Grob- und Feinfraktion mittels Strömungsklassierung durch einen Zickzacksichter in ihre homogenen Bestandteile aufzutrennen. Hierbei konnten für die WDVS-Modellsysteme ein Volumenstrom von  $15 \text{ Nm}^3/\text{h}$  ermittelt werden, um den Putz aufgrund des hohen Dichteunterschiedes vom Glasfasergewebe und des Dämmstoffes abzutrennen.

Anschließend wurde in einem zweiten Sichterdurchgang bei einem Volumenstrom von  $8 \text{ Nm}^3/\text{h}$  der Dämmstoff vom Gewebe abgetrennt. In der Leichtfraktion konnte eine homogene Fraktion an EPS erzeugt werden. In der Schwerfraktion befand sich überwiegend Glasfasergewebe wobei jedoch noch eine geringe Anzahl an Putzpartikeln beobachtet werden konnten. Da durch einen weiteren Sichterdurchgang in der Schwerfraktion das Gewebe nicht vom Putz getrennt werden konnte, wurde durch Siebklassierung unter Verwendung eines  $1 \text{ mm}$  Siebes der Putz abgetrennt. Somit konnten aus der Grobfraktion homogene Stoffströme rückgewonnen werden. Anschließend wurde damit begonnen die Leichtfraktion mittels Windsichtung zu separieren. Hierbei konnte bei einem Volumenstrom von  $7 \text{ Nm}^3/\text{h}$  eine Schwerfraktion bestehend aus reinem Putz erzeugt werden.

In der Leichtfraktion befanden sich feine Putzpartikel, Gewebereste sowie EPS Partikel welche in ihrer Struktur zerstört vorlagen. Diese konnte weder durch einen erneuten Sichterdurchgang noch durch Siebung in homogene Materialien separiert werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass während des Sichtervorgangs die feinen Partikel untereinander agglomerieren und somit teilweise vom Fluidstrom des Sichters mitgerissen wurden. Am Ende des Trennvorganges konnten  $84 \text{ wt.-%}$  EPS,  $83 \text{ wt.-%}$  Putz und  $85 \text{ wt.-%}$  aus den anfänglich eingesetzten Materialien, den WDVS-Modellsystemen, rückgewonnen werden.

Anschließend wurde damit begonnen die XPS-Modellsystemen mittels Strömungsklassierung zu separieren. Im ersten Sichterdurchgang konnte hierbei ein Volumenstrom von  $16 \text{ Nm}^3/\text{h}$  für die Grobfraktion realisiert werden. Hierbei konnte ebenfalls eine Schwerfraktion erzeugt werden, welche ausschließlich aus Putz bestand. In der Leichtfraktion konnte überwiegend Dämmstoffpartikel und Gewebereste sowie ein geringer Anteil an Putzpartikel beobachtet werden. Anschließend wurde durch einen zweiten Sichterdurchgang die erhaltene Leichtfraktion weiter separiert. Hierbei wurde ein Volumenstrom von  $8 \text{ Nm}^3/\text{h}$  eingestellt, da hierbei eine optimale Trennung erfolgte. Es befand sich in der erhaltenen Leichtfraktion ausschließlich XPS welches in seiner elliptischen Form vorlag. In der Schwerfraktion befand sich das Glasfasergewebe sowie Reste von Putzpartikeln. Um den Putz vom Glasfasergewebe trennen zu können, wurde dieser unter Zuhilfenahme eines  $1 \text{ mm}$  Siebes abgetrennt. Somit konnten wie bereits bei den EPS-Modellsystemen aus der Grobfraktion homogene Stoffströme erzeugt werden. Im Anschluss sollte das Materialgemisch der Feinfraktion separiert werden.

Es konnte jedoch kein Volumenstrom im Zickzacksichter ermittelt werden, mit welchem homogene Stoffströme erzeugt werden konnten. Da der Anteil der Feinfraktion deutlich höher war als bei den anderen WDVS-Typ und deutlich mehr XPS Partikel vorlagen, konnte keine Trennung der Mischfraktion erreicht werden. Ebenfalls kann hierbei davon ausgegangen werden, dass die Materialien der Fraktion untereinander Agglomerate bildeten und somit vom Fluid mitgerissen wurden. Letztendlich konnten aus den anfänglich eingesetzten Materialien der XPS-Modellsysteme 71 wt.-% XPS, 60 wt.-% Putz sowie 86 wt.-% Glasfasergewebe rückgewonnen werden. Der Anteil an Putz war hierbei deutlich geringer als bei den WDVS-Typ welcher EPS enthielt. Es wird vermutet, dass während der Separation der Zerkleinerungsfraktion der Putz durch die Siebung stark nachzerkleinerte und sich somit in der Feinfraktion anreicherte. Somit konnte in einem ersten Schritt der erstellten Verwertungsplan für WDVS im Labormaßstab überprüft und optimiert werden um aus den WDVS-Modellsystemen homogene Stoffströme rückzugewinnen.

## 9. Analytische Bestimmung der erhaltenen homogenen Materialfraktionen

Zur Bestimmung der von der TH Nürnberg angefertigten WDVS Proben wurden zwei Analyseverfahren genutzt. Dies war nötig, da in den WDVS-Proben sowohl organische Anteile wie Polystyrol, aber auch anorganische Teile wie verschiedene Arten von Putz vorhanden sind und diese mit einer einzigen Methode nur schwer zu detektieren sind. Im folgenden Bericht wird zuerst die thermogravimetrische Analyse (TGA) in Betracht gezogen, da es bei diesem Analyseverfahren unerheblich ist, ob die untersuchten Proben organische bzw. anorganische Teile enthalten. Die TGA hat aber, wie später im Bericht erläutert, einige limitierende Faktoren bei der Detektierung der WDVS Komponenten. Deshalb wurden zur zusätzlichen Sicherung der Ergebnisse noch weiterführende eine „Inductively coupled plasma optical emission spectrometry“ (ICP-OES) durchgeführt. Das Grundprinzip der Analyse richtet sich danach, dass erst die Reinfractionen untersucht wurden, um danach die Mischfraktionen der verschiedenen Schredderfraktionen analytisch mit den Werten der Reinfractionen zu vergleichen (*Tabelle 18*). Um eine wissenschaftlich korrekte Methode zu entwickeln, wurden die jeweiligen Schredderfraktionen vor der Analyse zerkleinert und homogenisiert. Dadurch wurde eine Probenmigration verhindert. Die Probenzerkleinerung wurden in einer Retsch ZM 100 Ultrazentrifugalmühle erst mit einer Sieblochgröße von 6 mm, dann mit einem 3 mm Sieb bei 14.000 U/min zerkleinert (*Abbildung 37*). Die erneute Zerkleinerung mit dem 3 mm Sieblocheinsatz wurde aufgrund von ungenügender Homogenisierung durchgeführt. Aufgrund von elektrostatischen Aufladungen sind kleine, aber vernachlässigbare Teile der Proben bei der Zerkleinerung verloren gegangen



Abbildung 37: Konfiguration der ZM 100 (mit 6 mm Siebeinsatz)

Tabelle 18: Systematische Benennung der WDV-S-Proben nach Polystyrol Art und Reinfraction

Reinfractionen		
THN Name	Aussehen	Systematischer Name
Scheibenputz < 1 mm	Feinstes Granulat	Scheibenputz
Außenhaftputz < 1 mm	Feinstes Granulat	Außenhaftputz
Armierungsgewebe	Orangenes Gewebe	Armierungsgewebe
EPS Leichtfraktion Sichter > 1 mm	Weißer Kügelchen, keine Rückstände	THN_EPS3
XPS Leichtfraktion Sichter > 1 mm	Orangene Schnipsel, keine Rückstände	THN_XPS3
Mischfraktionen		
EPS > 1 mm	Weißer Kügelchen und feiner Kies	THN_EPS1
EPS < 1 mm	Grauer Sand	THN_EPS2
EPS Leichtfraktion Sichter < 1 mm	Feinstes Kies mit kleinen weißen Schnipseln	THN_EPS4
EPS Schwerfraktion Sichter > 1 mm	Kies und orangene Schnipsel	THN_EPS5
EPS Schwerfraktion Sichter < 1 mm	Feines graues Kies	THN_EPS6
XPS > 1 mm	Orangene Flocken und feiner Kies	THN_XPS1
XPS < 1 mm	Kleine orange Schnipsel und feinsten Kies	THN_XPS2
XPS Leichtfraktion Sichter < 1 mm	Kleine orange Schnipsel und feinsten Kies	THN_XPS4
XPS Schwerfraktion > 1 mm	Grobes graues Kies	THN_XPS5
XPS Schwerfraktion Sichter < 1 mm	Feines graues Kies	THN_XPS6

## 9.1 TGA Prinzip und Auswertung

Bei der thermogravimetrischen Analyse werden die Zersetzungskurven von Proben gemessen. Dazu werden sie auf einem temperaturbeständigen Aluminiumoxidtegel platziert und in einem mit Stickstoff inertisiertem Ofen langsam erhitzt. Durch die Erhitzung des Ofens werden die zuvor festen Proben in teils flüchtige Anteile zersetzt, eine Mikrowaage analysiert den Gewichtsverlust. Durch die entstehenden Zersetzungskurven lassen sich Stoffe und Stoffgemische qualitativ, aber auch quantitativ voneinander unterscheiden. Die am ICT verwendete Thermowaage Netzsch TG 209 F1 Iris kann Stoffzersetzen mit einer Genauigkeit von 0,1 µg erfassen. Der Temperaturbereich von 25 – 950 °C wurde mit einer Heizrate 10 K/min abgefahren.

Um statistische Abweichungen der Messergebnisse zu minimieren wurden die Proben jeweils zweimal gemessen, die Messergebnisse unterschieden sich jedoch nur geringfügig, was einen kleinen, vernachlässigbaren Fehler von ca.  $\pm 1\%$  des Gesamtergebnisses ausmacht. Als Referenz wurden zuerst die Reinfractionen gemessen. Dabei wurden die erste Zersetzungsstufe bei  $350 - 450\text{ }^{\circ}\text{C}$  für die organischen Polystyrolteile und die zweite Zersetzungsstufe bei  $600 - 850\text{ }^{\circ}\text{C}$  für die anorganischen Putzteile erfasst. Die Ergebnisse sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt. Aufgrund von Überlagerungen der Zersetzungsstufen des Außenhaftputzes und des Scheibenputzes wird der Putz nur als Ganzes betrachtet. Durch die Vermischung der Polystyrolzerlegung und der Zersetzung des Armierungsgewebes, lässt sich kein quantitativer Nachweis für den Gehalt der verschiedenen Schredderfraktionen bestimmen. Da diese Methode nicht eindeutig genug ist, wird sie nur zur Überprüfung der ICP-OES und zur Aussage über mineralische Bestandteile verwendet. Der erste Zersetzungspunkt bei  $350 - 450\text{ }^{\circ}\text{C}$  wird durch die Zersetzung der beiden Polystyrolsorten bestimmt, da sich bei diesen Temperaturen organische Polymere zersetzen. Eine Unterscheidung von EPS und XPS via TGA ist nicht möglich. Aus der Literatur ist bekannt, dass bei den Temperaturen von ca.  $500 - 750\text{ }^{\circ}\text{C}$  sauerstoffreiche mineralische Verbindungen wie Calciumhydroxid ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), Magnesiumhydroxid ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), Calciumcarbonat ( $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ ), Magnesiumcarbonat ( $\text{Mg}(\text{CO}_3)$ ), Calciumsulfat ( $\text{CaSO}_4$ ) zersetzt werden. Damit ist der Temperaturbereich, in dem die zweite Zersetzung stattfindet zu erklären. Die dabei entstehenden Zersetzungsprodukte sind Wasser, Kohlenstoffdioxid und elementarer Sauerstoff. Die Restmasse der Proben entspricht dem Anteil, der bei  $950\text{ }^{\circ}\text{C}$  noch nicht flüchtig wurde. Dieser Anteil wird hauptsächlich durch die Metalle, welche zuvor als Anionen in den Mineralien gebunden waren, charakterisiert. Die kleinen Restmassen sind ein klarer Hinweis, dass die Proben EPS/XPS 1, sowie EPS/XPS 3 hauptsächlich nur Polystyrol enthalten. Die Restmassen von  $4,0 - 14,1\%$  könnten schwerflüchtige, verkockte Kohlenstoffmodifikationen sein, eine eindeutige Identifizierung ist nicht möglich.

## 9.2 ICP-OES Prinzip und Auswertung

Bei der ICP-OES werden Proben in ein heißes Argon Plasma von rund 5.000 – 7000 K gegeben, dadurch werden die in den Proben enthaltenen Elemente ionisiert. Grundsätzlich werden dabei nur Metalle ionisiert, aber auch einige Halbmetalle und Nichtmetalle können gemessen werden.

Die gebildeten Ionen emittieren Licht in einem spezifischen Wellenlängenbereich. Die Intensität dieser Strahlung wird gemessen um dadurch eine quantitative Aussage über die Zusammensetzung der gemessenen Probe zu treffen. Die Bestimmungsgrenze liegt im Bereich weniger  $\mu\text{g/L}$ , je nach Ion auch darunter. Zur Messung der Proben wurden ca. 500 mg der Fraktionen in 6 mL HCL und 2 mL  $\text{HNO}_3$  gelöst und anschließend per Mikrowellendruckaufschluss in Lösung gebracht. Die Proben wurden auf ein Volumen von 35 mL mit demineralisiertem Wasser aufgefüllt. Unlöslich Rückstände wurden abfiltriert, das Gewicht der Probe wurde erfasst. Danach wurden die Proben pur, in 1:10- und 1:100-Verdünnung gemessen, der Messbereich war linear. Die ICP-Messung liefert einen Nachweis für 15 Elemente, welche in den Proben vorhanden sind. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in diesem Bericht nur 5 Elemente betrachtet, die restlichen Daten sind im Anhang zu finden. Die betrachteten Elemente reichen aus um die Proben quantitativ zu unterscheiden. Aluminium, Eisen, Kalium, Magnesium und Schwefel werden hier zur Berechnung der Gewichtsanteile betrachtet. Diese Elemente wurden in der ICP-OES ausreichend detektiert und sind somit nur mit einem kleinen totalen Fehler der Untersuchungsmethode belastet. Sie sind in

Probe	wt-% Putz		wt-% PS		wt-% Armierungsgewebe
	Außenhaftputz	Scheibenputz	EPS	XPS	
Außenhaftputz	100	-	-	-	-
Scheibenputz	-	100	-	-	-
Armierungsgewebe	-	-	-	-	100
THN_EPS_3	-	-	100	-	-
THN_XPS_3	-	-	-	100	-
THN_EPS_1	5,2	8,4	86,1	-	0,3
THN_EPS_2	55,4	36,2	-	-	2,0
THN_EPS_4	57,2	40,8	-	-	2,0
THN_EPS_5*	20,1	6,8	72,5	-	0,6
THN_EPS_6*	28,1	3,9	67,5	-	0,5
THN_XPS_1	4,0	5,5	-	90	0,4
THN_XPS_2	46,8	52	-	-	1,2
THN_XPS_4	45,2	52,4	-	-	2,4
THN_XPS_5*	11,7	12,4	-	75,4	0,5
THN_XPS_6*	27,7	11,1	-	60,9	0,4

aufgelistet. Zur Berechnung der Massenanteile werden die gemessenen Reinfractionen mit den gemessenen Mischfractionen verglichen. Als Optimierungsmethode wird das kleinste Fehlerquadrat benutzt. Dieses wurde per Solver-Verfahren minimiert und auf lokale Minima überprüft.

$$wt_{errechnet,i,y,MF} = x_{i,y,RF} * \sum_x wt_{i,y,gemessen,RF}$$

$$\sum_i (wt_{gemessen,i,y,MF} - wt_{errechnet,i,y,MF})^2 \stackrel{!}{=} \text{minimal}$$

Mit:

wt = Massenanteil [mg/kg]

x = Massenanteilanteil [%]

i = Betrachtetes ionisiertes Element

y = Nummer der EPS/XPS Fraktion

MF = Mischfraktion, RF = Reinfraction

Tabelle 19: Durch Optimierung berechnete Massenanteile der WDV-Modellsysteme

Probe	wt-% Putz		wt-% PS		wt-% Armierungsgewebe
	Außenhaftputz	Scheibenputz	EPS	XPS	
Außenhaftputz	100	-	-	-	-
Scheibenputz	-	100	-	-	-
Armierungsgewebe	-	-	-	-	100
THN_EPS_3	-	-	100	-	-
THN_XPS_3	-	-	-	100	-
THN_EPS_1	5,2	8,4	86,1	-	0,3
THN_EPS_2	55,4	36,2	-	-	2,0
THN_EPS_4	57,2	40,8	-	-	2,0
THN_EPS_5*	20,1	6,8	72,5	-	0,6
THN_EPS_6*	28,1	3,9	67,5	-	0,5
THN_XPS_1	4,0	5,5	-	90	0,4
THN_XPS_2	46,8	52	-	-	1,2
THN_XPS_4	45,2	52,4	-	-	2,4
THN_XPS_5*	11,7	12,4	-	75,4	0,5
THN_XPS_6*	27,7	11,1	-	60,9	0,4

Die hier ermittelten Massenanteile stimmen für die Proben EPS/XPS 1/2/4 mit den Zersetzungspunkten der TGA gut überein. Auch die vorherige visuelle Sichtung der Proben bestätigt die Ergebnisse. Für Proben EPS/XPS 5/6 stimmen weder die visuelle Sichtung, noch die TGA Ergebnisse mit den berechneten Ergebnissen der ICP-OES überein. Laut ICP-OES bestehen diese Anteile zu rund 70 % aus Polystyrol, dies ist aber eindeutig ein Fehler. Der Fehler kann durch menschliche Fehler (z.B. falsche Beschriftung nach der Homogenisierung) entstanden sein, er lässt sich schließlich aber nicht eindeutig erklären. Eine Möglichkeit zur Beseitigung des Fehlers könnte eine Bestimmung der Bestandteile über die Massenbilanz sein. Da alle eingesetzten Massen auch detektiert werden müssen, würde man dabei die Vereinfachung treffen, dass Proben 5 und 6 nur zusammen ermittelt werden können.

Tabelle 20: Gemessener und berechneter Anteil der Reinfractionen und der WDV-Schredderfractionen

Probe	Al [mg/kg]		Fe [mg/kg]		K [mg/kg]		Mg [mg/kg]		S [mg/kg]	
	gemessen	berechnet	gemessen	berechnet	gemessen	berechnet	gemessen	berechnet	gemessen	berechnet
Außenhaftputz	4132,0		3042,0		1130,5		4475,0		1938,5	
Scheibenputz	3885,0		710,3		1235,0		16645,0		1490,0	
Armierungsge- webe	49495,0		1467,0		3533,5		2330,5		1217,5	
EPS_3	1435,0		489,0		440,5		3521,0		1247,5	
XPS_3	1289,0		428,4		382,0		2794,5		1073,5	
THN_EPS_1	1435,0	1475,1	489,0	530,3	440,5	381,1	3521,0	3854,1	1247,5	854,6
THN_EPS_2	3980,5	3957,5	1992,5	1976,7	1079,5	1106,4	8807,0	8722,9	1683,5	1676,3
THN_EPS_4	4972,5	4927,7	2424,0	2058,8	1308,0	1220,7	11385,0	9401,7	2273,0	1741,1
THN_EPS_5	1976,5	2064,5	1018,0	926,2	671,8	508,4	3900,5	3920,5	780,6	1024,2
THN_EPS_6	2069,0	2155,5	1231,0	1129,5	708,0	545,4	3632,0	3664,6	857,2	1098,5
THN_XPS_1	1289,0	1326,6	428,4	464,4	382,0	330,2	2794,5	3035,1	1073,5	753,5
THN_XPS_2	4589,0	4544,0	1892,0	1810,1	1221,5	1213,5	11805,0	10781,1	2027,5	1696,6
THN_XPS_4	5143,5	5083,2	2016,0	1781,6	1317,5	1242,6	13575,0	10806,7	2305,5	1686,1
THN_XPS_5	1764,5	1838,1	759,8	700,5	621,3	472,5	4210,5	4208,6	700,5	910,4
THN_XPS_6	2204,5	2268,0	1182,0	1127,2	705,5	600,0	4358,0	4391,6	933,6	1103,9

### 9.3 Berechnung der eingesetzten Massen

Die errechneten Massenanteile werden mit den von der TH-Nürnberg gemessenen Einwaagen verrechnet um den Gesamtgehalt der eingesetzten Reinfractionen zu bestimmen. Die Ergebnisse sind in *Tabelle 21* dargestellt. Zur Berechnung wurde folgende Formel genutzt, wobei  $i$  für das Edukt und  $x$  für die Fraktionsnummer steht:

$$m_i = \sum_x wt_{i,x} * m_{i,x}$$

Diese Ergebnisse sollten den eingewogenen Mengen der Bauteile des Modell WDV-System entsprechen. Wichtig ist dabei zu beachten, dass die gemessenen Werte ohne die Anwesenheit von Wasser detektiert wurden, die Werte entsprechen den Trockenmassen der eingesetzten Bestandteile. Eine entsprechende Messungenauigkeit, auch aufgrund anderer Messfehler ist zu erwarten.

Tabelle 21: Gemessener und berechneter Anteil der Reinfractionen und der WDV-Schredderfractionen

Probe	Gewicht	Gewicht Scheiben- putz	Gewicht Außenhaftputz	EPS	XPS	Gewebe	Summe
	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]
THN_EPS1	22,8	1,2	1,9	19,6	-	0,1	22,8
THN_EPS2	46,0	25,5	16,6	4	-	0,2	46,0
THN_EPS3	9,3	-	-	9,3	-	-	9,3
THN_EPS4	86,9	49,7	35,5	0	-	1,7	86,9
THN_EPS5	57,1	11,5	3,9	41,4	-	0,4	57,1
THN_EPS6	38,6	10,8	1,5	26,1	-	0,2	38,6
THN_XPS1	54,2	2,2	3,0	-	48,8	0,2	54,2
THN_XPS2	58,1	27,2	30,2	-	0,0	0,7	58,1
THN_XPS3	37,1	-	-	-	37,1	-	37,1
THN_XPS4	68,9	31,1	36,1	-	0,0	1,6	68,9
THN_XPS5	51,0	6,0	6,3	-	38,5	0,2	51,0
THN_XPS6	28,3	7,8	3,1	-	17,2	0,1	28,3
Summe	558,2	173,0	138,2	100,0	141,6	5,4	558,2
Prozentualer Massenanteil am Gesamtsystem		30,98 %	24,76 %	17,92 %	25,36 %	0,97 %	<b>100 %</b>

Der Unterschied der realen Messungen zu den per Optimierung bestimmten Gehalten von Aluminium, Eisen, Kalium, Magnesium und Schwefel (siehe dazu **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) beträgt im Durchschnitt rund 10,7 %, maximal 13,9 %. Dieser Fehler ist im Rahmen der Standardabweichungen der Messungen, sowie in der, trotz sorgfältiger Homogenisierung, wechselnder Zusammensetzung der Proben. Ein Massenanteil von rund 55,7 % Putz und 18 – 25 % Polystyrol des WDV-Modellsystems erscheint realitätsnah, da trotz deutlich geringerem Volumen des Putzes, die geringe Dichte des Polystyrols einen deutlichen Massenunterschied aufzeigen kann. Auch der mitgeschleppte Fehler durch die falsche Messung der jeweiligen EPS/XPS Proben 5/6 kann hier einen deutlichen Unterschied zu den eingesetzten Rohstoffen für das Modellsystem führen.

## 9.4 Diskussion

Die Bestimmung des WDVS-Modellsystems wurde mittels TGA und ICP-OES durchgeführt. Die Schwierigkeit war es eine Messmethode zu finden, die sowohl anorganische, als auch organische Bestandteile quantifizieren kann. Die Ergebnisse von EPS/XPS 1/2/4 sind im Rahmen der Standardabweichung belastbar, durch ICP-OES kann man dabei klar die Bestandteile der Fraktionen voneinander trennen. Für die Fraktionen EPS/XPS 5/6 können die Bestandteile der jeweiligen Fraktionen nur bedingt aufgrund von Fehlern angegeben werden, der Fehler selbst kann nur abgeschätzt oder durch eine nachträgliche Massenbilanz beseitigt werden

## 10. Analyse von WDVS-Abbruchmaterialien

Alle Analysedaten stammten bisher nur von in Nürnberg nachgestellten WDVS Proben aus Neumaterial. Vom ICT konnten im Raum Karlsruhe „reales WDVS-Abbruchmaterialien“ beschafft werden. Die ersten Proben kamen am 20. Juni von der Firma Maler Füg aus Karlsruhe, die wahrscheinlich im Jahr 2000 verbaut wurden. Ein zweites Muster kam am 22. Juni bei uns an, welches von der Firma Arcadis aus Karlsruhe kam und wahrscheinlich im Jahr 1997 verbaut wurde. Anschließend wurden die vorliegenden „original WDVS Proben“ genauestens analysiert. Hierbei ist angedacht das bisher vernachlässigte HBCD über den langen Zeitraum von 30 Jahren zu verfolgen. Mit Pyrolyse GC/MS soll qualitativ ermittelt werden welche Additive insbesondere HBCD in den diversen Kunststoffmatrices enthalten sind. Über geeignete Elutionsverfahren sollen die Additive aus den Matrices entfernt werden. Besonderes Augenmerk liegt hierbei wieder auf dem HBCD. Die quantitative Erfassung erfolgt anschließend mittels HPLC/MS. Um die vorliegende Verteilung der Additive im Kunststoff zu erfassen muss an verschiedenen Stellen mehrfach beprobt werden. Die vorliegenden Originalproben wurden nach folgenden Methoden untersucht:

### Zu analysierende WDVS:

Da die Angaben zu den verschiedenen Schichten bei einem WDVS von Anbieter zu Anbieter unterschiedlich sind, ist hier eine Auflistung der nachfolgend durchgeführten Analysen aufgeführt:

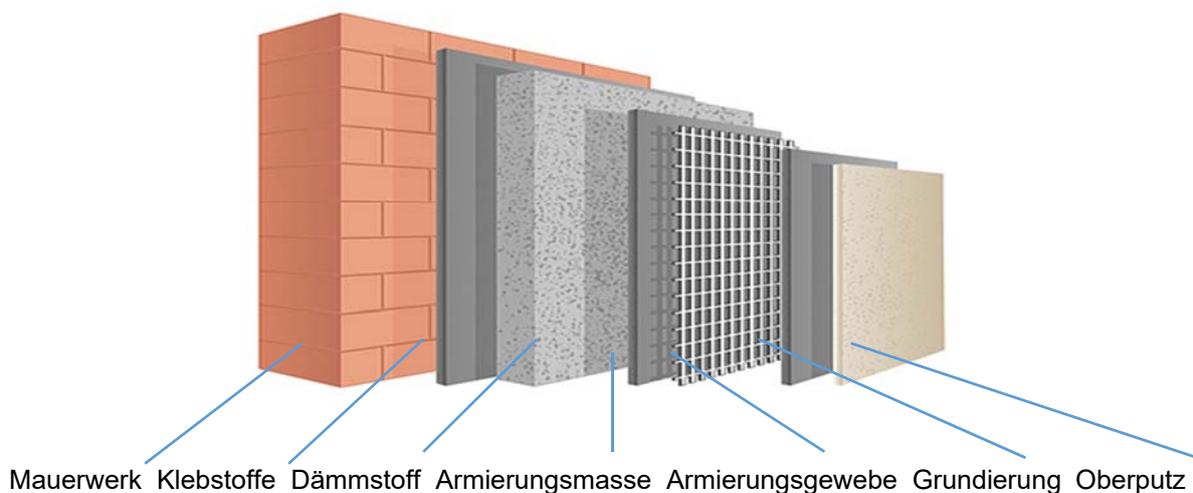


Abbildung 38: Detailliertes Schichtmodell eines WDVS

Zwei der untersuchten WDVS Muster stammten von Sanierungsobjekten im Großraum Karlsruhe. Beide wurden im Juni 2018 ausgebaut, wobei das eine wahrscheinlich im Jahr 2000 verbaut wurde und das andere in 1997. Die Schichten wurden manuell getrennt und nach den unten beschriebenen Analyse-verfahren genauestens untersucht. Das dritte Muster stammte von einer Großbaustelle in Stuttgart.

## 10.1 Probenvorbereitung

Für die Analyse wurden Wärmedämmverbundsysteme von 3 verschiedenen Firmen aus den letzten 20 Jahren (Verbaujahr) bereitgestellt.

**Probe 1:** Fa. Füg; Karlsruhe; Probe etwa im Jahr 2000 verbaut

**Probe 2:** Fa. Arcadis; Karlsruhe; Probe etwa im Jahr 1997 verbaut

**Probe 3:** Fa. Mack; Stuttgart; Probe etwa in den Siebzigern verbaut

Ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) wird zum Dämmen von Außenwänden an Gebäuden angebracht und besteht in der Regel aus ca. 6 Einzelschichten (Kleber, Dämmstoff, Armierungsmasse mit Gewebe, Grundierung und Oberputz). Diese Schichten wurden bei den Prüfmaterialien in einem ersten Schritt mechanisch voneinander getrennt. Bei Probe 1 und 2 konnten auch alle 6 Schichten sauber separiert werden. Bei Probe 3 hingegen konnten nur 3 Schichten gewonnen werden, da hier nur ein Stück Dämmstoff mit Armierungsgitter zur Verfügung stand.

### 10.1.1 Dokumentation der Probenvorbereitung:

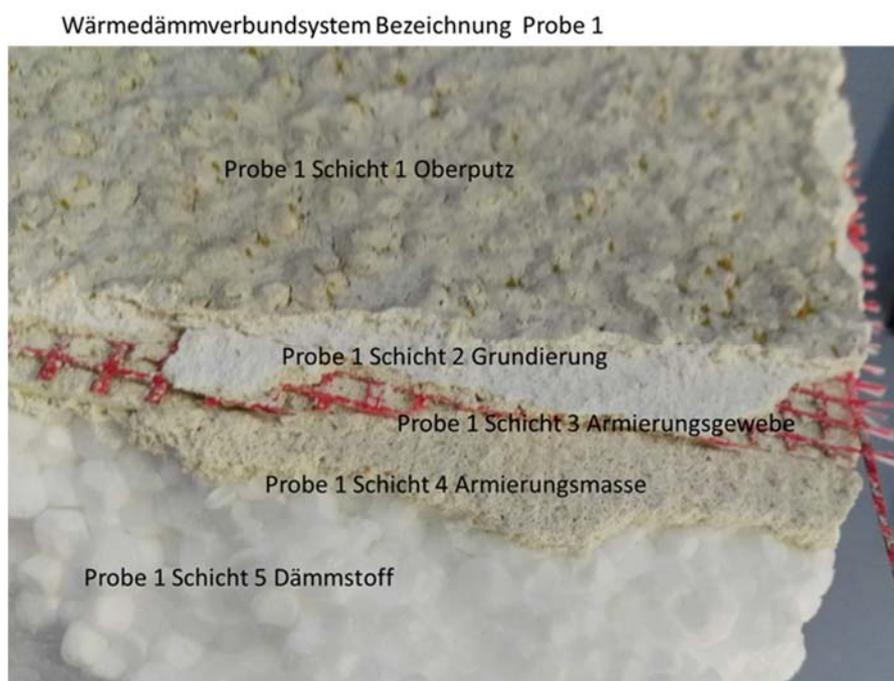


Abbildung 39: Probe 1 WDVS Fa. Füg; Karlsruhe

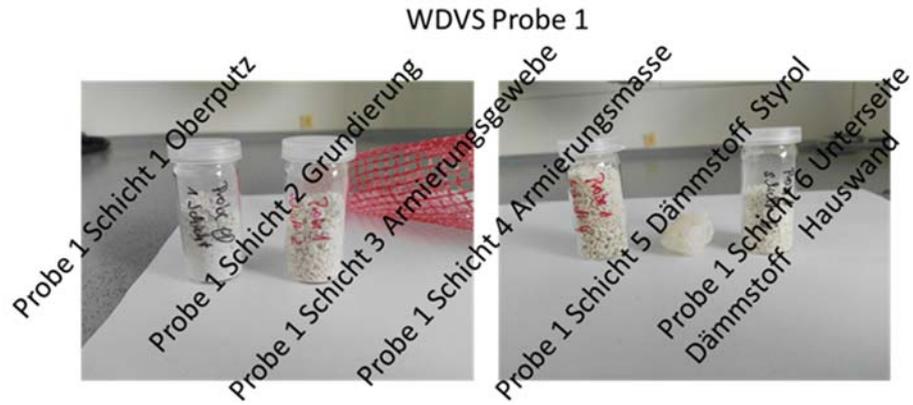


Abbildung 40: Probe 1 WDVS getrennt in 6 Fraktionen und zerkleinert



Abbildung 41: Probe 2 WDVS Fa. Arcadis; Karlsruhe

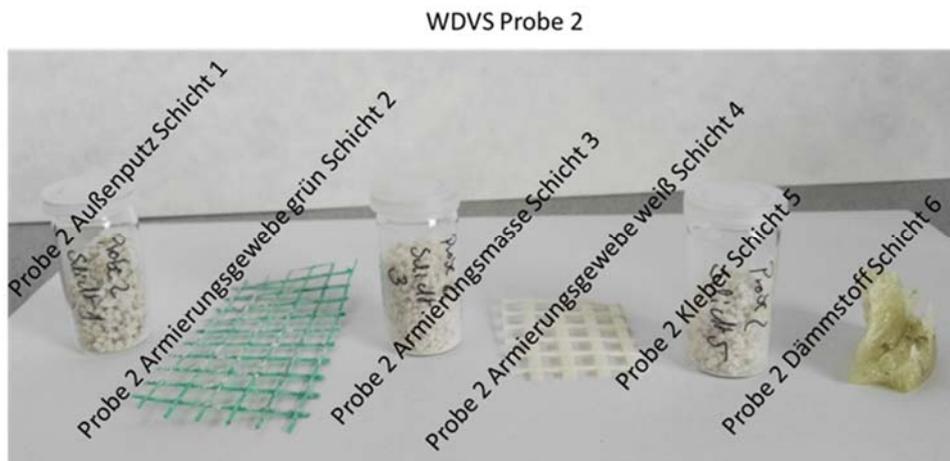


Abbildung 42: Probe 2 WDVS getrennt in 6 Fraktionen und zerkleinert



Abbildung 43: Probe 3 Fa. Mack; Stuttgart

Die so generierten Proben sollten hinsichtlich ihrer Elementzusammensetzung (ICP, XRF) und ihres thermischen Verhaltens (TGA) untersucht werden.

## 10.2 Auswertung der ICP-Messungen zur Elementaranalyse

### 10.2.1 Durchführung

Die 15 Proben wurden jeweils in Doppelbestimmung in der Mikrowelle unter Zusatz von 6 ml HCl 37% und 2 ml HNO<sub>3</sub> aufgeschlossen. Es wurden etwa 500 mg Probenmaterial eingesetzt. Der in dieser Säuremischung unlösliche Anteil wurde über ein Weißbandfilter abfiltriert und die klare Lösung mittels ICP gemessen. Das Volumen des leichten Dämmstoffes Styrol musste vor der Analyse über Lösen in Aceton und wieder auskristallisieren, verringert werden. Nach dem Aufschluss in der Mikrowelle blieben auch hier Kunststoffrückstände übrig, die im Falle des Styrols nur durch Auflösen in Aceton entfernt werden konnten. In Anlehnung an erste Vorversuche an Modell-WDVS aus dem Jahr 2017 wurden im vorliegenden Projekt die damals in großen Mengen gefundenen Elemente Aluminium, Eisen, Kalium, Magnesium und Schwefel analysiert. Zusätzlich wurde noch Natrium und Calcium ausgewertet. Alle Elemente wurden im Bereich von 0-100 mg/L kalibriert und waren in diesem Kalibrierbereich linear. Die Proben wurden falls erforderlich entsprechend verdünnt.

## 10.2.2 Ergebnisse

Tabelle 22: Konzentrationsbestimmung der Elemente in WDVS-Schichten mittels ICP-OES

	Element	Al [mg/kg]	Ca [mg/kg]	Fe [mg/kg]	K [mg/kg]	Mg [mg/kg]	Na [mg/kg]	S [mg/kg]
	Wellenlänge in [nm]	396.1	317.9	259.9	766.4	279	589.5	182
	BG in [mg/l]:	0.0372	0.0076	0.0052	0.1294	0.0424	0.0387	0.0264
<b>Probe</b>	<b>ICP Nummer</b>							
Probe1 Oberputz	1b	3563	421880	734	574.2	2221	443.9	1228
	1c	4229	455000	706.8	672.5	2549	567.7	1367
Probe 1 Grundierung	2a	4195	440700	560.3	656.7	2451	518.9	1881
	2b	4489	481800	565.5	715.4	2603	566.3	1955
	2c	4845	409200	573.3	747.9	2654	571.9	2171
	2d	4243	459500	542.4	665.9	2510	547.1	1731
Probe 1 Gewebe rot	3a	34170	99600	773.1	1940	3204	1627	638.2
	3b	33020	105600	761.3	1915	3174	1657	641.5
Probe1 Armierungsmasse	4a	4551	455500	570.3	733.6	2604	544.6	1556
	4b	4391	465100	557.2	650.7	2466	483	1577
Probe 1 Dämmstoff Styrol	5a	274	16810	41.5	169.7	210.8	314.4	180.9
	5b	149.7	8952	23.21	71.58	141.5	350.8	122
Probe 1 Hauswand Putz	6a	4776	461900	635.3	1187	2773	543.8	2077
	6b	4857	430200	606.1	1369	2894	622.7	2080
Probe 2 Außenputz	7a	36140	165700	481.3	907.9	1651	801.3	1205
	7b	34330	197500	578.5	1108	2141	807.8	1522
Probe 2 Gewebe grün	8a	44600	132200	1317	3265	4275	1886	521.1
	8b	44770	142400	1374	3456	4397	1849	818.4
Probe 2 Armierungsmasse	9a	4462	160900	919.1	1902	2137	739.9	4484
	9b	4002	161200	689.3	1699	1975	695.5	4076
Probe 2 Gewebe weiß	10a	51580	143800	867.7	1861	1806	2148	297.8
	10b	56300	154400	937.1	1957	1912	2418	298.2
Probe 2 Kleber	11a	4466	187300	780.1	2040	1924	786.3	2066
	11b	3847	155500	613.3	1644	1648	628.1	1439
Probe 2 Dämmstoff Styrol	12a	420.9	12510	207.4	259.1	248.3	386.9	228.2
	12b	469.7	13490	279.5	292.9	319.6	454	300.4
Probe 3 Außenputz	13a	3923	42040	523.2	976.6	2337	295.9	1680
	13b	4133	47430	536.4	1232	2385	296.6	1732
Probe 3 Gitternetz rot	14a	28720	87360	679.2	1727	2938	1041	829.2
	14b	25100	84980	650.4	1831	2835	985.4	915.2

Probe 3 Dämmstoff Styrol	15a	77.34	2177	392.1	531.7	35.01	95.83	65.15
	15b	97.56	1974	885.7	319.8	36.72	76.71	84.18

Erwartungsgemäß enthalten die Dämmstoffe (Styrol) die geringsten Mengen an mineralischen Bestandteilen/Elementen. Innen-und Außenputz sowie die Armierungsmassen sind in ihren Gehalten an analysierten Elementen innerhalb eines Materials in etwa vergleichbar und zeigen zwischen den 3 Proben nur geringfügige Unterschiede. Der größte Anteil wird durch das Calcium bestimmt, gefolgt von Magnesium und Aluminium. Größere Unterschiede zwischen den Proben treten vor allem beim Kalzium auf. Hier enthält Probe 1 einen deutlichen höheren Anteil als Probe 3.

**Einwaagen der Proben für den Mikrowellenaufschluss:**

Tabelle 23: Dokumentation der Probenvorbereitung

Proben Bezeichnung	ICP Nummer	Einwaage Probe in [g]	Gelöst in [g]	Tara Filter[g]	Filter nach Filtration[g]	Unlöslicher Anteil in[g]	Unlöslicher Anteil in[%]
Probe1 Oberputz	1b	0.506	30.234	0.812	0.8524	0.0404	7.98
	1c	0.51	31.771	0.7966	0.8447	0.0481	9.43
	1d	0.532	31.347	0.7959	0.8595	0.0636	11.95
Probe 1 Grundierung	2a	0.5386	30.894	0.8149	0.8548	0.0399	7.41
	2b	0.5118	29.414	0.8014	0.8463	0.0449	8.77
	2c	0.5515	33.771	0.8062	0.8528	0.0466	8.45
	2d	0.5245	32.337	0.78	0.8296	0.0496	9.46
Probe 1 Gewebe rot	3a	0.4989	35.569	0.7978	0.9713	0.1735	34.78
	3b	0.5112	37.667	0.8279	1.1182	0.2903	56.79
Probe1 Armierungsmasse	4a	0.479	33.485	0.8001	0.8451	0.045	9.39
	4b	0.5212	31.321	0.8255	0.8712	0.0457	8.77
Probe 1 Dämmstoff Styrol	5a	0.4716	30.848	0.7833	0.7691	-0.0142	-3.01
	5b	0.5379	29.564	0.8086	0.709	-0.0996	-18.52
Probe 1 Hauswand Putz	6a	0.5012	29.493	0.8009	0.8478	0.0469	9.36
	6b	0.5284	29.206	0.8394	0.8975	0.0581	11.00
Probe 2 Außenputz	7a	0.5304	29.617	0.7961	1.0239	0.2278	42.95
	7b	0.5153	29.077	0.8068	0.9253	0.1185	23.00
Probe 2 Gewebe grün	8a	0.4869	33.735	0.7842	1.0667	0.2825	58.02
	8b	0.4918	30.18	0.8198	1.066	0.2462	50.06
Probe 2 Armierungsmasse	9a	0.5093	29.456	0.8142	1.1239	0.3097	60.81
	9b	0.5001	29.513	0.8169	1.1408	0.3239	64.77
Probe 2 Gewebe weiß	10a	0.53	30.926	0.7896	1.1421	0.3525	66.51
	10b	0.533	31.372	0.7978	1.1277	0.3299	61.89
Probe 2 Kleber	11a	0.475	33.139	0.8137	1.1581	0.3444	72.51
	11b	0.4714	29.179	0.8242	1.089	0.2648	56.17
Probe 2 Dämmstoff Styrol	12a	0.4877	29.574	0.8074	0.7892	-0.0182	-3.73
	12b	0.5099	33.586	0.8067	0.7884	-0.0183	-3.59
Probe 3 Außenputz	13a	0.5132	29.954	0.8019	0.8547	0.0528	10.29
	13b	0.4916	29.599	0.8068	0.8495	0.0427	8.69
Probe 3 Gitternetz rot	14a	0.3556	33.172	0.8054	1.0192	0.2138	60.12
	14b	0.3968	28.008	0.8066	1.0851	0.2785	70.19
Probe 3 Dämmstoff Styrol	15a	0.4969	29.81	0.7988	0.8194	0.0206	4.15

	15b	0.5325	30.58	0.8058	0.8266	0.0208	3.91
--	-----	--------	-------	--------	--------	--------	------

## 11. Auswertung der XRF-Messungen zur Brombestimmung

### 11.1 Durchführung

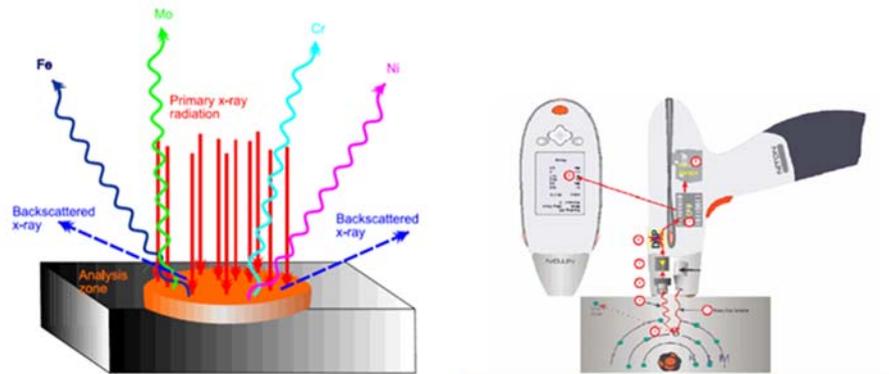


Abbildung 44: XRF-X-Ray Florescence Sepctrosopy

**Verwendete Unterlagen** RÖV; Bedienungsanleitung RFA Analysator

**Einrichtungen:** Niton XLt 10095 ,Bleikammer

**Bedingungen:** Normklima

Die Einzelproben wurden in die Bleikammer gelegt und vermessen. Lose Pulver wurden vor der Messung in einen Mylarfolien Behälter überführt.

Brom wurde im Plastik/ROHS-Modus gemessen.

### 11.2 Ergebnisse

Tabelle 24: Bromgehalte bestimmt über XRF

Probe	Br [ppm]	Br Error [Stdw]
Probe1 Oberputz	19	4.16
Probe 1 Grundierung	16	4.39
Probe 1 Gewebe rot	6	1.21
Probe1 Armierungsmasse	40	4.42
Probe 1 Dämmstoff Styrol	5403	50.81
Probe 1 Hauswand Putz	21	4.38
Probe 2 Außenputz	13	2.98
Probe 2 Gewebe grün	6	1.84
Probe 2 Armierungsmasse	13	3.21
Probe 2 Gewebe weiß	9	2.49
Probe 2 Kleber	12	3.12

Probe 2 Dämmstoff Styrol	4565	45.05
Probe 3 Außenputz	27	5.47
Probe 3 Gitternetz rot	7	1.48
Probe 3 Dämmstoff Styrol	5690	72.47

Brom kann hauptsächlich im Styrol nachgewiesen werden und kommt da vermutlich aus den bromhaltigen Flammschutzmitteln, die allerdings über diese Methode nicht näher beschrieben werden können.

## 12. Auswertung des thermischen Verhaltens über TGA

### 12.1 Durchführung

Die Zersetzungskurve der Probe wurden mit der vakuumdichten Thermowaage NETZSCH TG 209 F1 Iris® gemessen. Mit dieser Waage können Untersuchungen im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 1000°C mit einer Auflösung von 0,1µg durchgeführt werden. Für die Analysen stehen 2 Spülgaszugänge und ein Schutzgas zur Verfügung, die exakt über einen im Gerät integrierten Massflowregler kontrolliert werden. Die Datenerfassung sowie die Steuerung und Auswertung der Messungen wurde mit der Proteus Software von Netzsch realisiert. Von den Proben wurden ca. 10 mg in Aluminiumoxidtiegel eingewogen. Die Tiegel wurden in die Thermowaage eingebracht und das Messprogramm (siehe unten *Tabelle 25*) gestartet.

Tabelle 25: Arbeitsparameter an der TG

<b>Parameter</b>	<b>Geräteeinstellung</b>
<b>Temperaturbereich</b>	25 - 950°C
<b>Gase</b>	Stickstoff
<b>Heizrate</b>	10 K/min
<b>Durchfluss Gas</b>	20 ml/min
<b>Tiegel</b>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

## 12.2 Ergebnisse

### Probe 1:

- Schicht 1

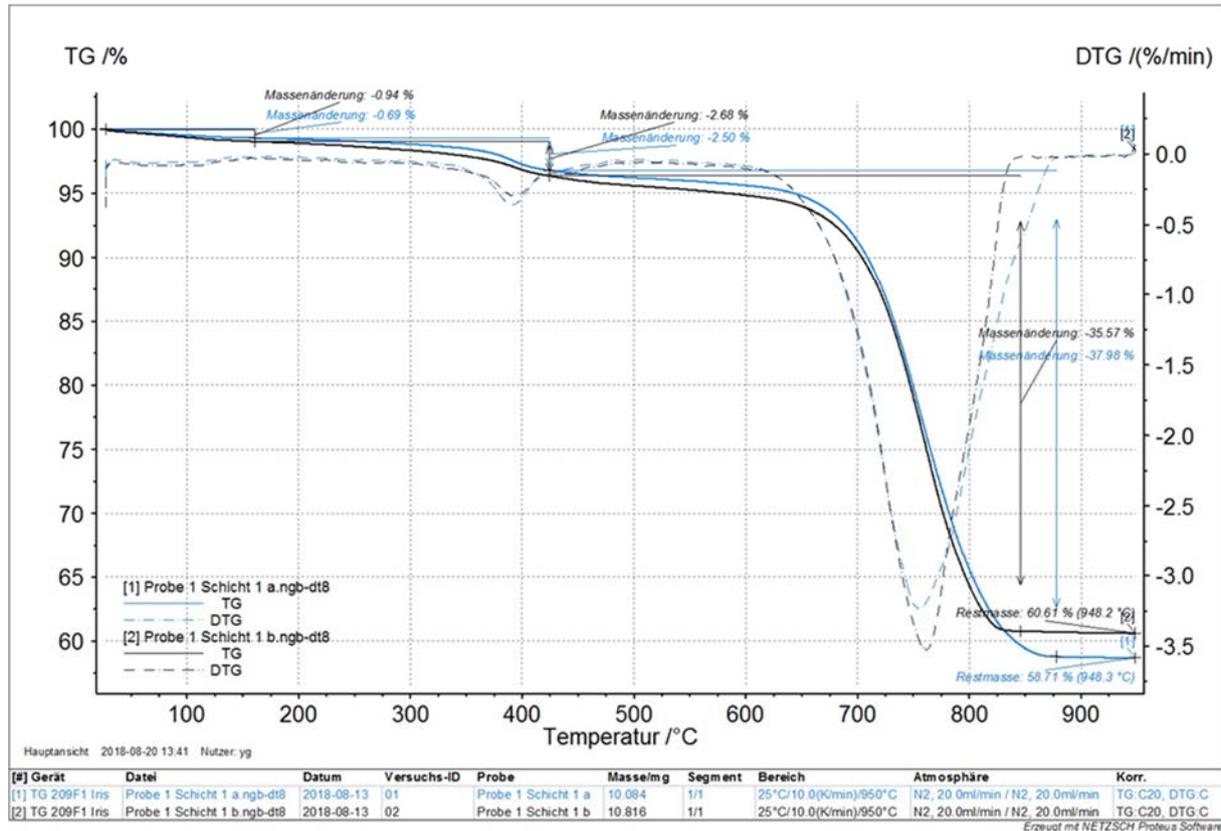


Abbildung 45: Thermogramm Probe1 / Schicht 1

Im Thermogramm der Probe 1 Schicht 1 zeigt sich ein erster kleiner Massenverlust von <1% im Temperaturbereich von RT bis 150°C. Hier entweicht wahrscheinlich Wasser aus dem Material. Zwischen 340 – 420°C beträgt der Massenverlust 2,5 / 2,7%. Die Hauptzersetzungsstufe liegt im Bereich von etwa 600 – 850°C mit ca. 36% Massenverlust. Die Restmasse nach Erreichen von 950°C beträgt 60,6 / 58,7%. Die Restmasse ist hauptsächlich mineralischen Ursprungs.

Der Massenverlust von 40% kommt zum einem aus dem Abbau von Carbonaten in Oxide unter CO<sub>2</sub> Abspaltung und zum anderen aus ev. enthaltenen Kunststoffanteilen.

- Schicht 2

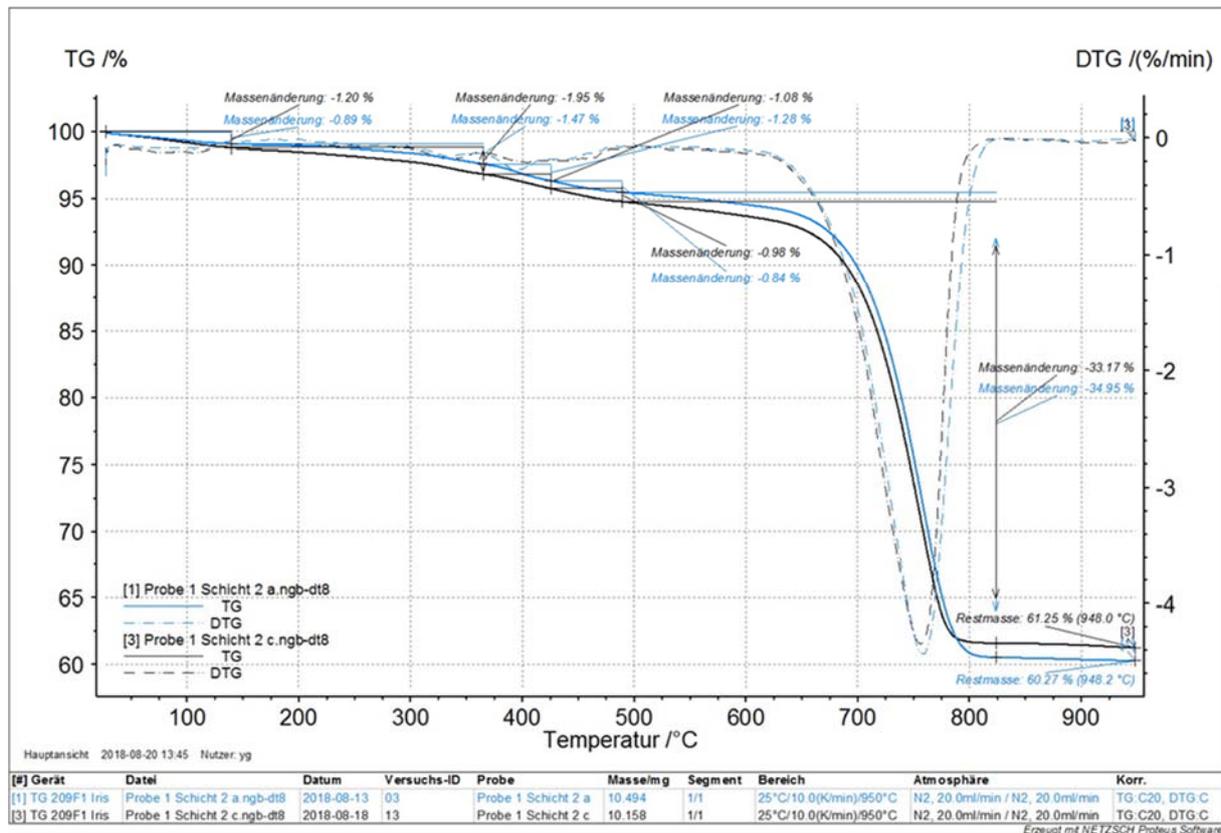


Abbildung 46: Thermogramm Probe 1 / Schicht 2

Im Thermogramm der Probe 1 Schicht 2 zeigt sich ein erster kleiner Massenverlust von ca. 1% im Temperaturbereich von RT bis 140°C. Hier entweicht wahrscheinlich Wasser aus dem Material. Direkt anschließend bis 500°C zeigen sich mehrere kleine Massenstufen. Die Hauptzersetzungsstufe liegt im Bereich von etwa 550 – 820°C mit ca. 34% Massenverlust. Die Restmasse nach Erreichen von 950°C beträgt 60,3 / 61,3%.

- Schicht 3

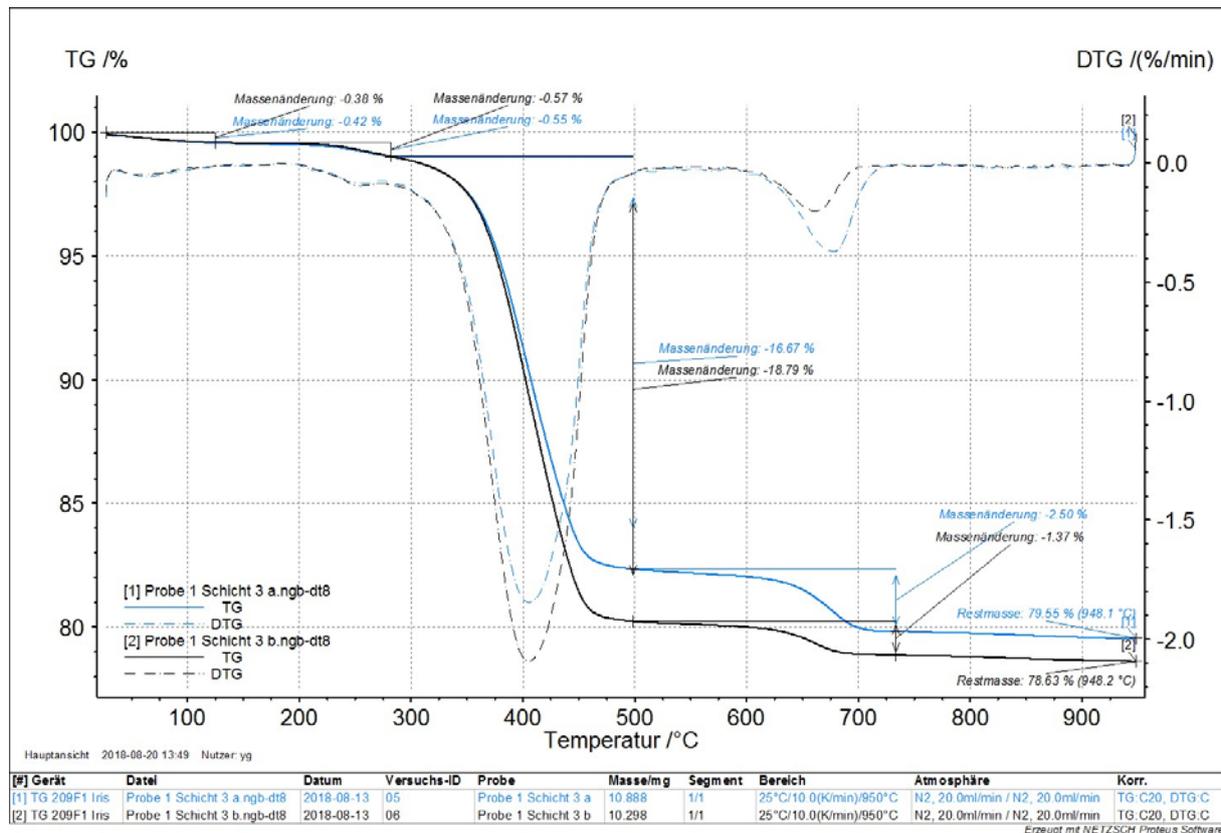


Abbildung 47: Thermogramm Probe 1 / Schicht 3

Im Thermogramm der Probe 1 Schicht 3 zeigt sich ein erster kleiner Massenverlust von <1% im Temperaturbereich von RT bis 130°C. Hier entweicht wahrscheinlich Wasser aus dem Material. Bis 280°C zeigt sich ein weiterer minimaler Massenverlust. Die Hauptzersetzungsstufe liegt im Bereich von etwa 300 – 500°C mit ca. 16,6 / 18,8% Massenverlust. Bis 720°C verliert die Probe weitere 1,4 / 2,5% an Masse. Die Restmasse nach Erreichen von 950°C beträgt 78,6 / 79,6%.

- Schicht 4

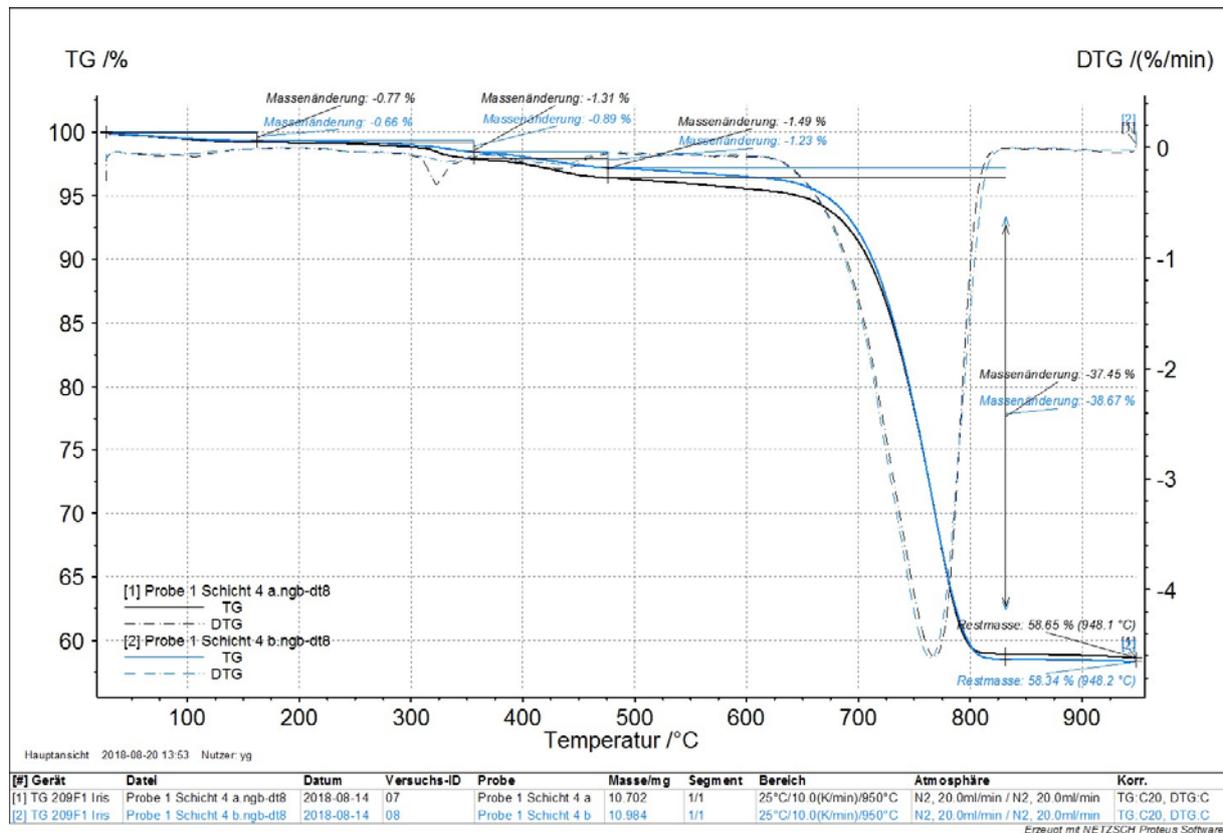


Abbildung 48: Thermogramm Probe 1 / Schicht 4

Im Thermogramm der Probe 1 Schicht 4 zeigt sich ein erster kleiner Massenverlust von <1% im Temperaturbereich von RT bis 160°C. Hier entweicht wahrscheinlich Wasser aus dem Material. Bis 480°C schließen sich 2 kleine Massenstufen mit Massenverlusten <1,5% an. Die Hauptzersetzungsstufe liegt im Bereich von etwa 600 – 820°C mit ca. 37,5 / 38,7% Massenverlust. Die Restmasse nach Erreichen von 950°C beträgt ca. 58,5%.

- Schicht 5

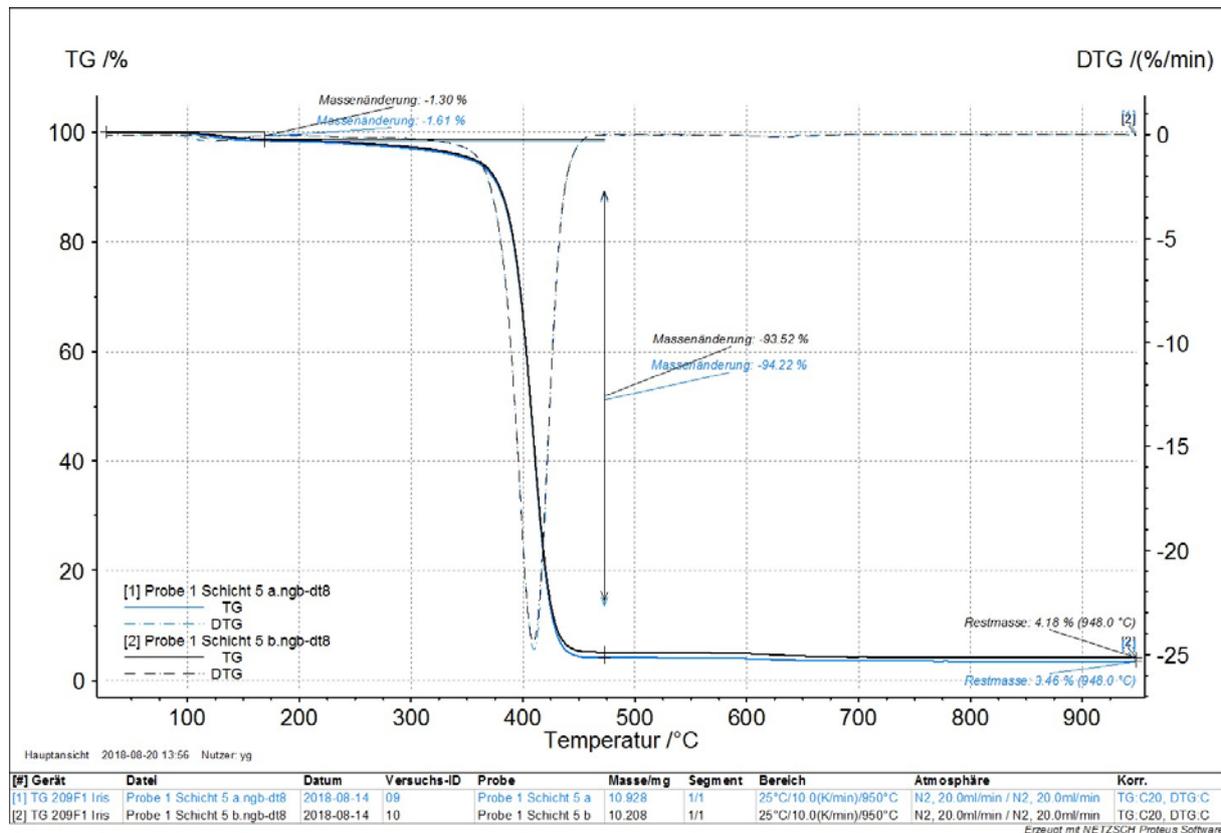


Abbildung 49: Thermogramm Probe 1 / Schicht 5

Im Thermogramm der Probe 1 Schicht 5 zeigt sich ein kleiner Massenverlust von 1,3 / 1,6% bis 175°C. Die sich anschließende Hauptzersetzungsstufe bis 450°C weist einen Massenverlust von 93,5 / 94,2% auf. Restmasse beträgt nur noch 3,5-4% Mineralien. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Gehalten an Elementen aus der ICP Analyse. Der Dämmstoff enthält nur geringe Mengen an Mineralien.

- Schicht 6

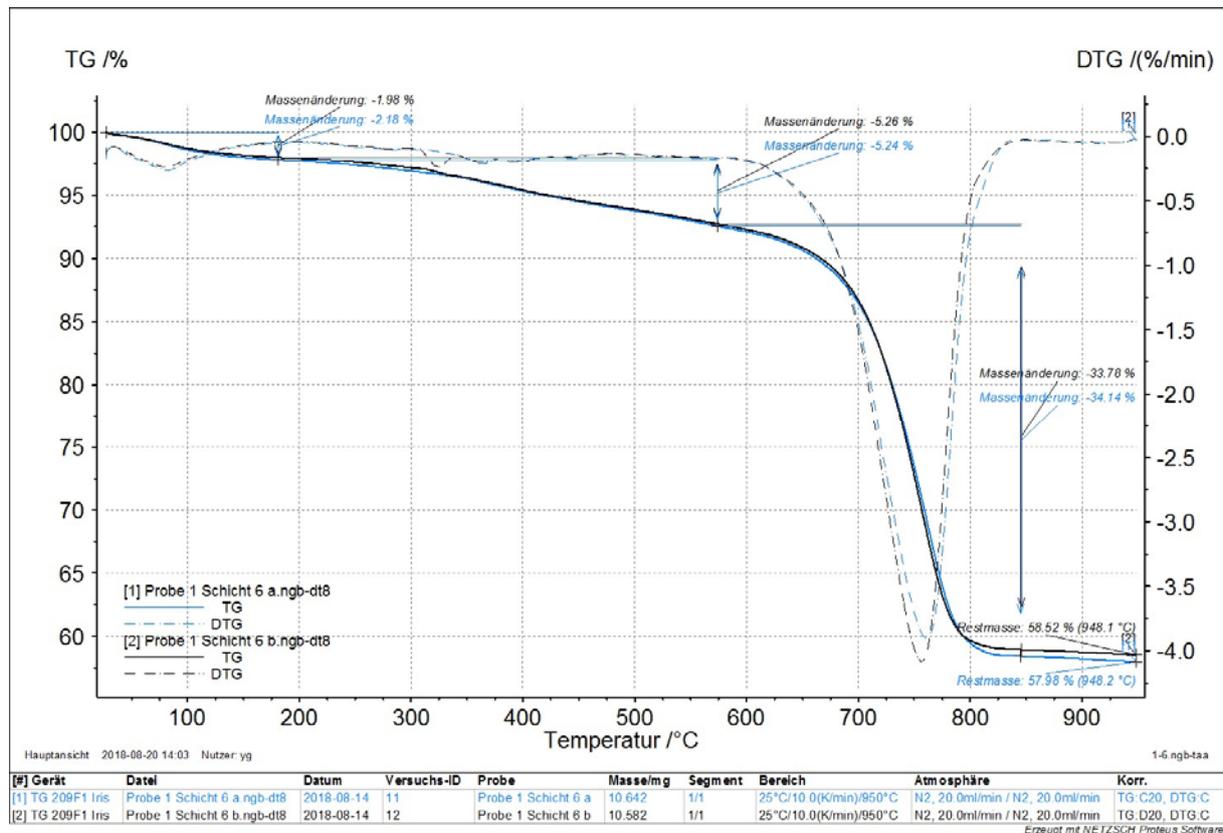


Abbildung 50: Thermogramm Probe 1 / Schicht 6

Im Thermogramm der Probe 1 Schicht 6 zeigt sich ein erster kleiner Massenverlust von 2 / 2,2% im Temperaturbereich von RT bis 180°C. Hier entweicht wahrscheinlich Wasser aus dem Material. Bis 580°C verliert die Probe allmählich 2,2% an Masse. Die Hauptzersetzungsstufe liegt im Bereich von etwa 600 – 840°C mit ca. 33,8 / 34,1% Massenverlust. Die Restmasse nach Erreichen von 950°C beträgt ca. 58 / 58,5%.

**Probe 2:**

- Schicht 1

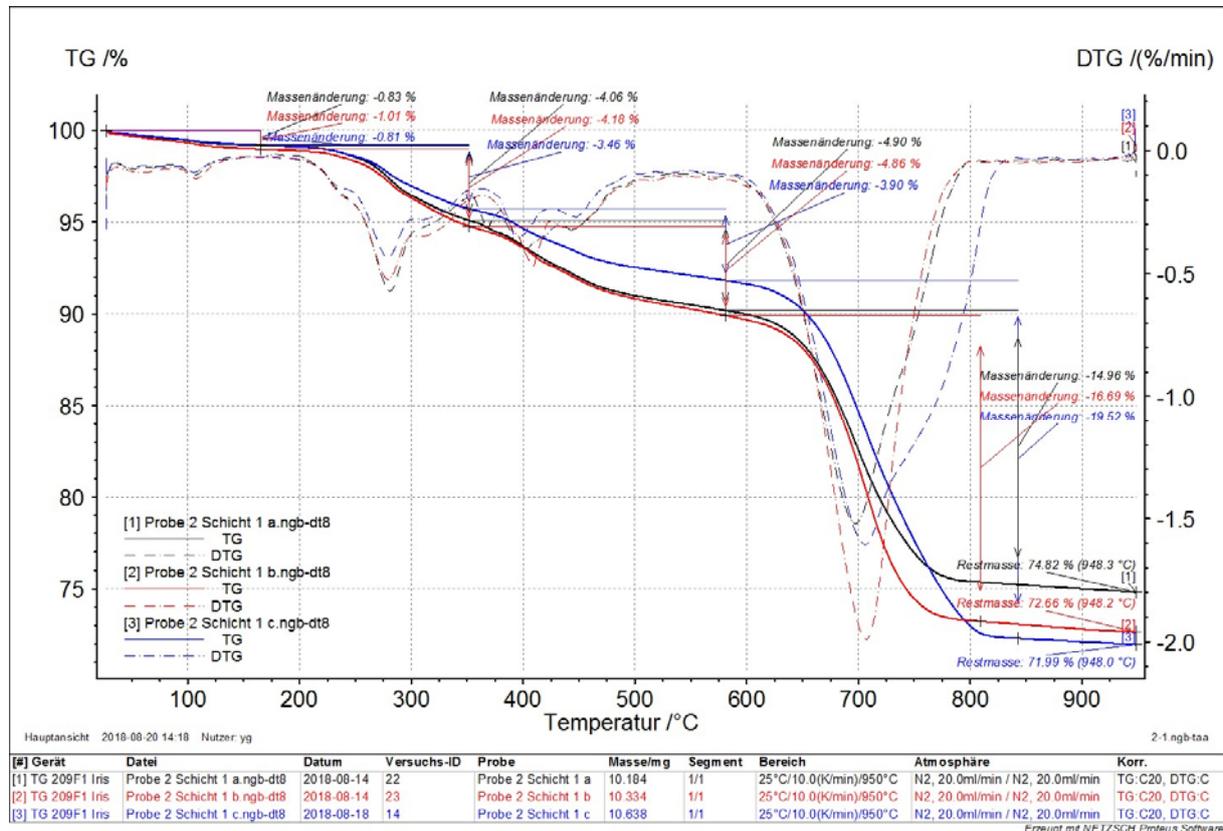


Abbildung 51: Thermogramm Probe 2 / Schicht 1

Die Probe 2 Schicht 1 zeigt ein inhomogenes Verhalten auf. Bis 170°C zeigt sich ein Massenverlust von etwa 1%, der von Feuchtigkeit in der Probe herrührt. Bis 350°C schließt sich eine Massenstufe an, die 3,5 – 4,2% Massenverlust mit sich bringt. Bis 580°C zeigt sich eine weitere Stufe mit 3,9 – 4,9% Verlust. Die sich anschließende Massenstufe bis ca. 850°C weist einen Massenverlust von 15 – 19,5% auf. Aufgrund der Inhomogenität schwankt der Wert der Restmasse zwischen 72 – 74,8%.

- Schicht 2

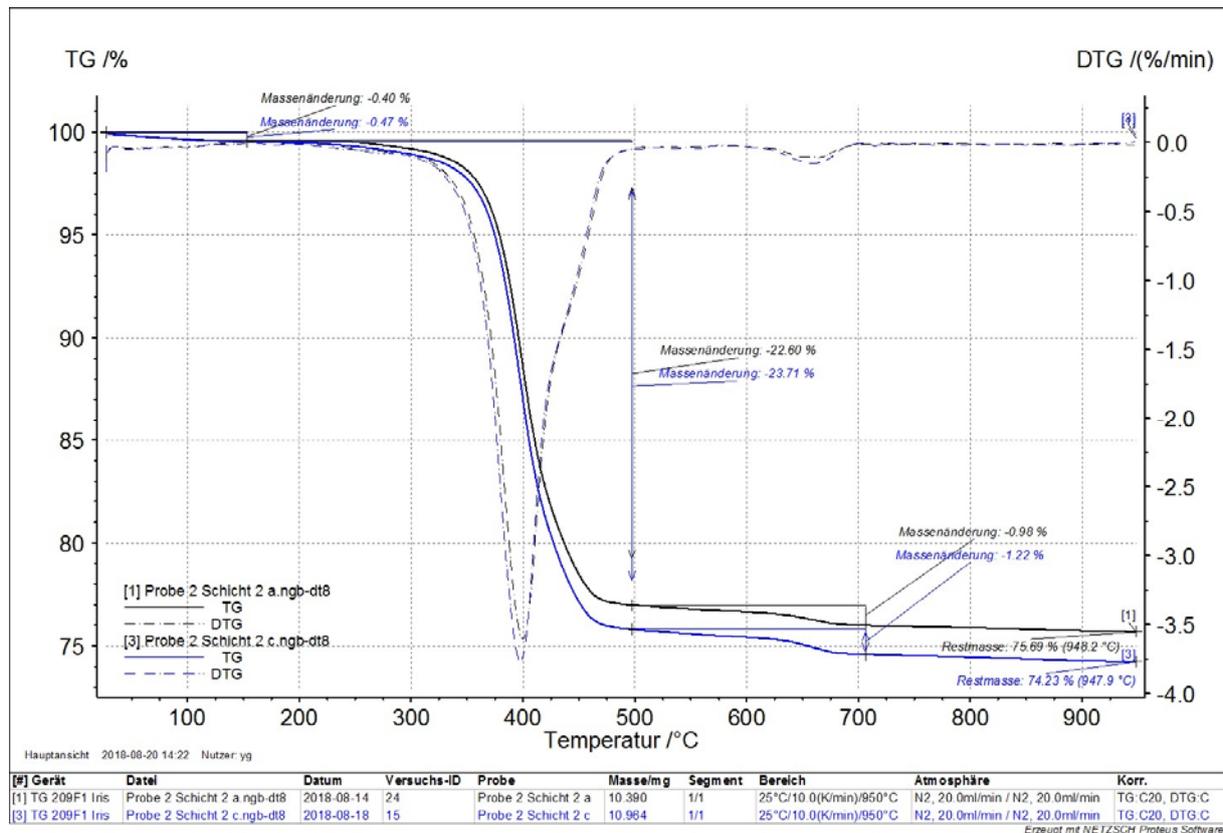


Abbildung 52: Thermogramm Probe 2 / Schicht 2

Im Thermogramm der Probe 2 Schicht 2 zeigt sich ein erster kleiner Massenverlust von <1% im Temperaturbereich von RT bis 150°C. Hier entweicht wahrscheinlich Wasser aus dem Material. Die Hauptzersetzungsstufe liegt im Bereich von etwa 250 – 500°C mit ca. 22,6 / 23,7% Massenverlust. Bis 710°C verliert die Probe weitere 1 / 1,2% an Masse. Die Restmasse nach Erreichen von 950°C beträgt 74,2 / 75,7%.

- Schicht 3

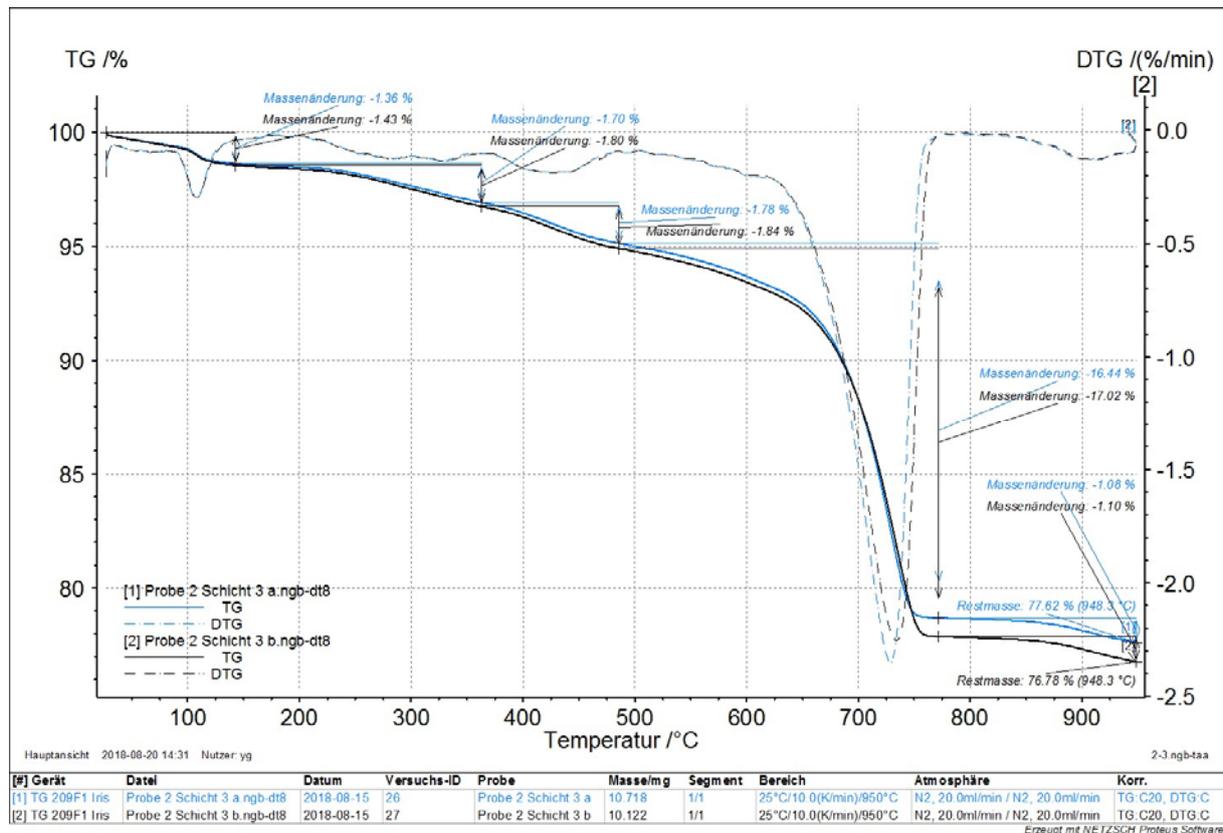


Abbildung 53: Thermogramm Probe 2 / Schicht 3

Die Probe 2 Schicht 3 zeigt bis 140°C ein Massenverlust von etwa 1,4%, der von Feuchtigkeit in der Probe herrührt. Bis 350°C schließt sich eine Massenstufe an, die 1,7 / 1,8% Massenverlust mit sich bringt. Bis 480°C zeigt sich eine weitere Stufe mit 1,8% Verlust. Die sich anschließende Hauptzersetzungsstufe bis ca. 775°C weist einen Massenverlust von 16,4 / 17% auf. Bis 950°C verliert die Probe weitere 1% an Masse. Die Restmasse beträgt 76,8 / 77,6%.

- Schicht 4

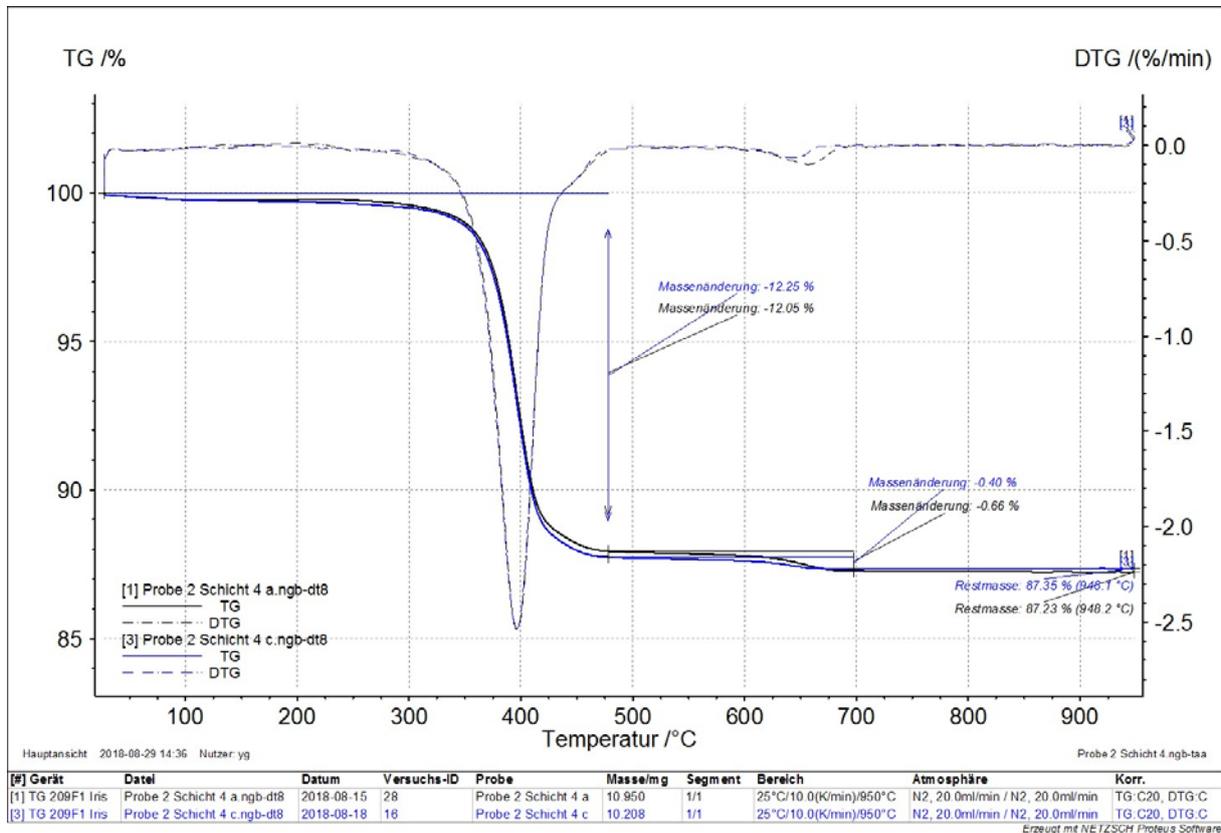


Abbildung 54: Thermogramm Probe 2 / Schicht 4

Die Hauptzersetzungsstufe der Probe 2 Schicht 4 liegt im Temperaturbereich von 250 – 450°C und weist einen Massenverlust von 12 / 12,3% auf. Bis 680°C schließt sich noch eine sehr kleine Massenstufe < 1% an. Die Restmasse nach Erreichen von 950°C beträgt 87%.

- Schicht 5

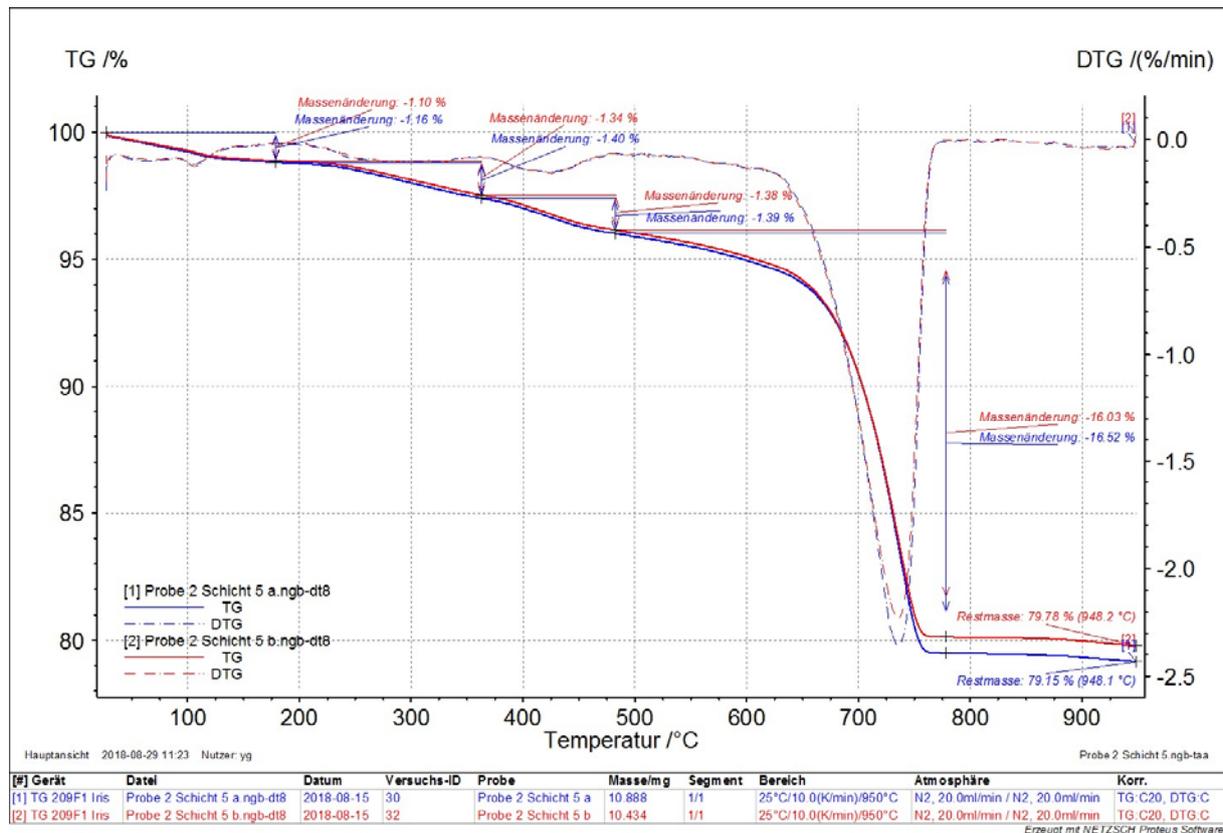


Abbildung 55: Thermogramm Probe 2 / Schicht 5

Die Probe 2 Schicht 5 zeigt bis 140°C ein Massenverlust von etwa 1,1%, der von Feuchtigkeit in der Probe herrührt. Bis 350°C schließt sich eine Massenstufe an, die 1,4% Massenverlust mit sich bringt. Bis 480°C zeigt sich eine weitere Stufe mit 1,4% Verlust. Die sich anschließende Hauptzersetzungsstufe bis ca. 775°C weist einen Massenverlust von 16 / 16,5% auf. Die Restmasse nach Erreichen der Endtemperatur von 950°C beträgt 79,2 / 79,8%.

- Schicht 6

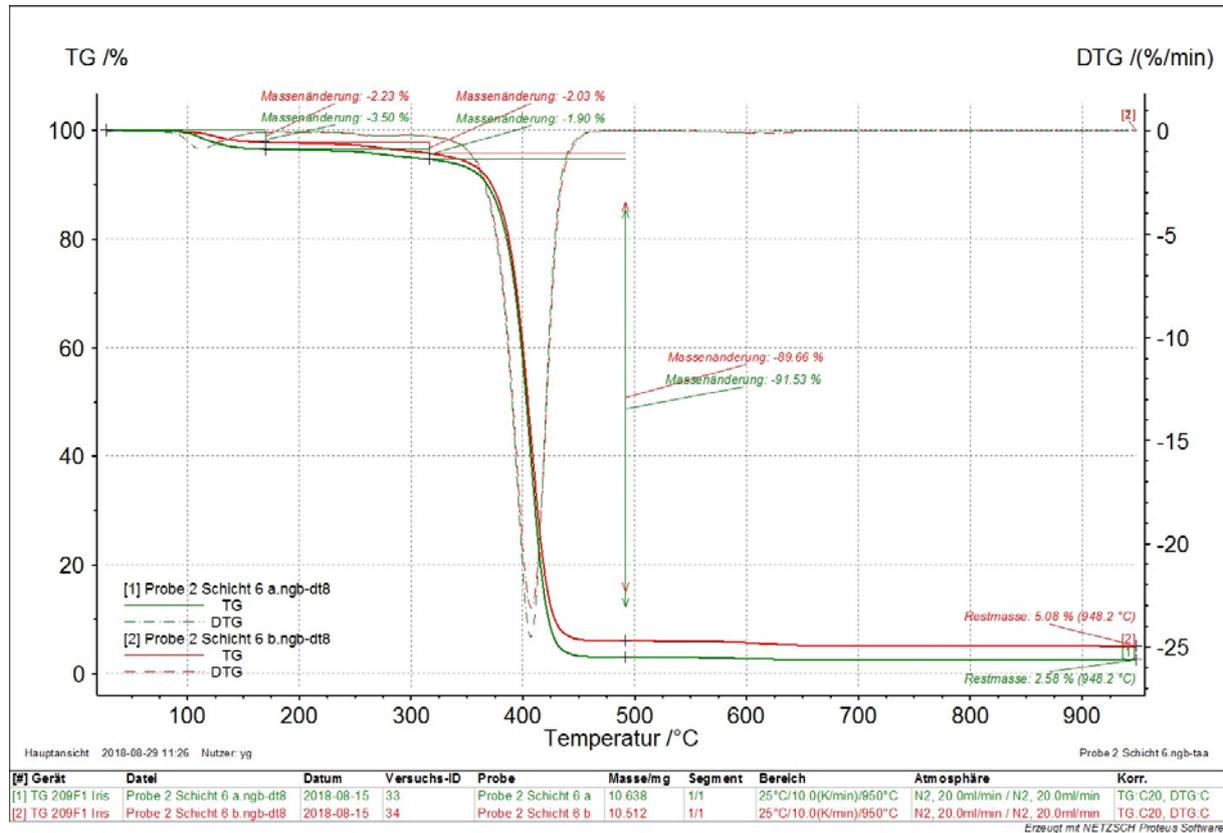


Abbildung 56: Thermogramm Probe 2 / Schicht 6

Im Thermogramm der Probe 2 Schicht 6 zeigt sich ein kleiner Massenverlust von 2,2 / 3,5% bis 170°C, bis 310°C weitere 2%. Die anschließende Hauptzersetzungsstufe bis 500°C weist einen Massenverlust von 89,7 / 91,5% auf. Die Restmasse nach Erreichen von 950°C beträgt 2,6 / 5,1%.

**Probe 3:**

- Schicht 1

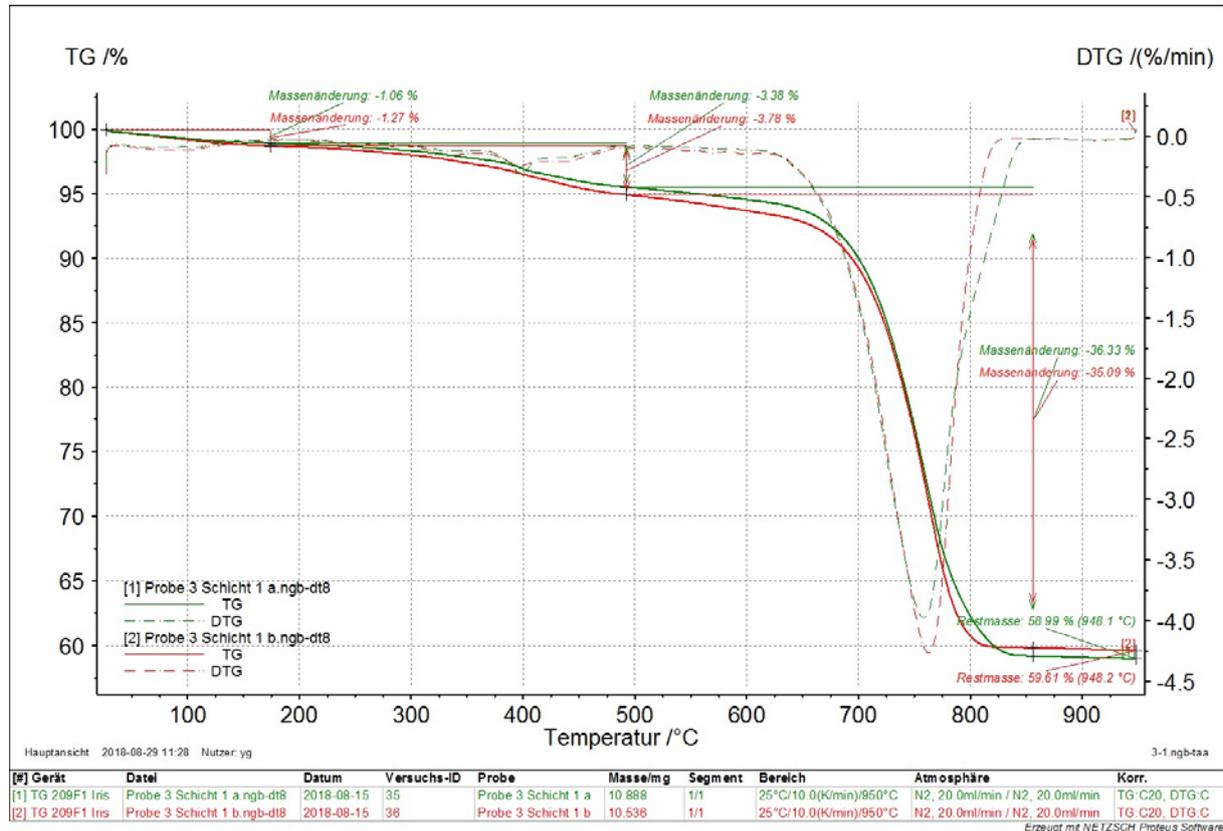


Abbildung 57: Thermogramm Probe 3/ Schicht 1

Die Probe 3 Schicht 1 zeigt eine kleine Massenstufe von 1 / 1,3% im Bereich von RT bis 175°C. Direkt anschließend verliert die Probe weitere 3,4 / 3,8% an Massen bis 500°C. Die Hauptzersetzungsstufe liegt im Temperaturbereich von 600 – 850°C und bringt einen Massenverlust von 35 / 36,3% mit sich. Die Restmasse beträgt ca. 59%.

- Schicht 2

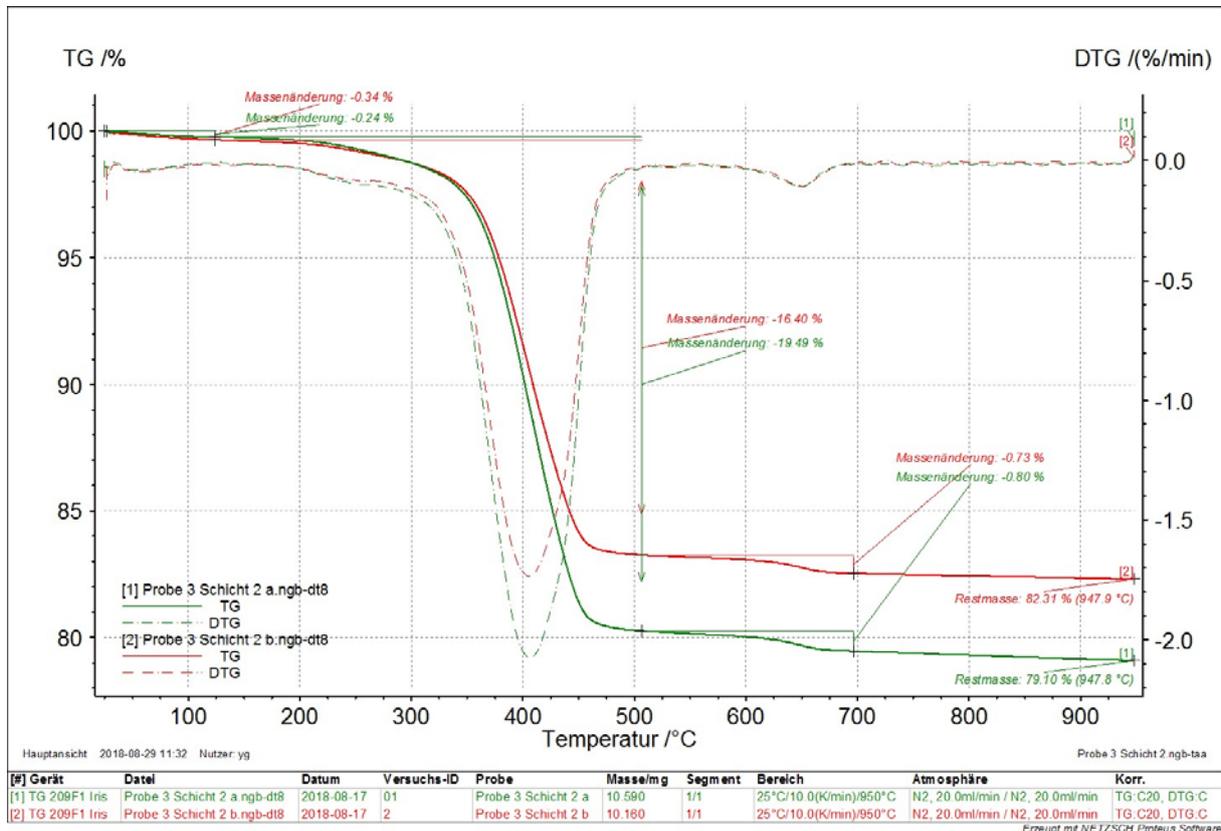


Abbildung 58: Thermogramm Probe 3 / Schicht 2

Im Thermogramm der Probe 3 Schicht 2 zeigt sich ein erster kleiner Massenverlust von <1% im Temperaturbereich von RT bis 130°C. Hier entweicht wahrscheinlich Wasser aus dem Material. Die Hauptzersetzungsstufe liegt im Bereich von etwa 220 – 480°C mit ca. 16,4 / 19,5% Massenverlust. Bis 700°C verliert die Probe weitere 0,8% an Masse. Die Restmasse nach Erreichen von 950°C beträgt 79,1 / 82,3%.

- Schicht 3

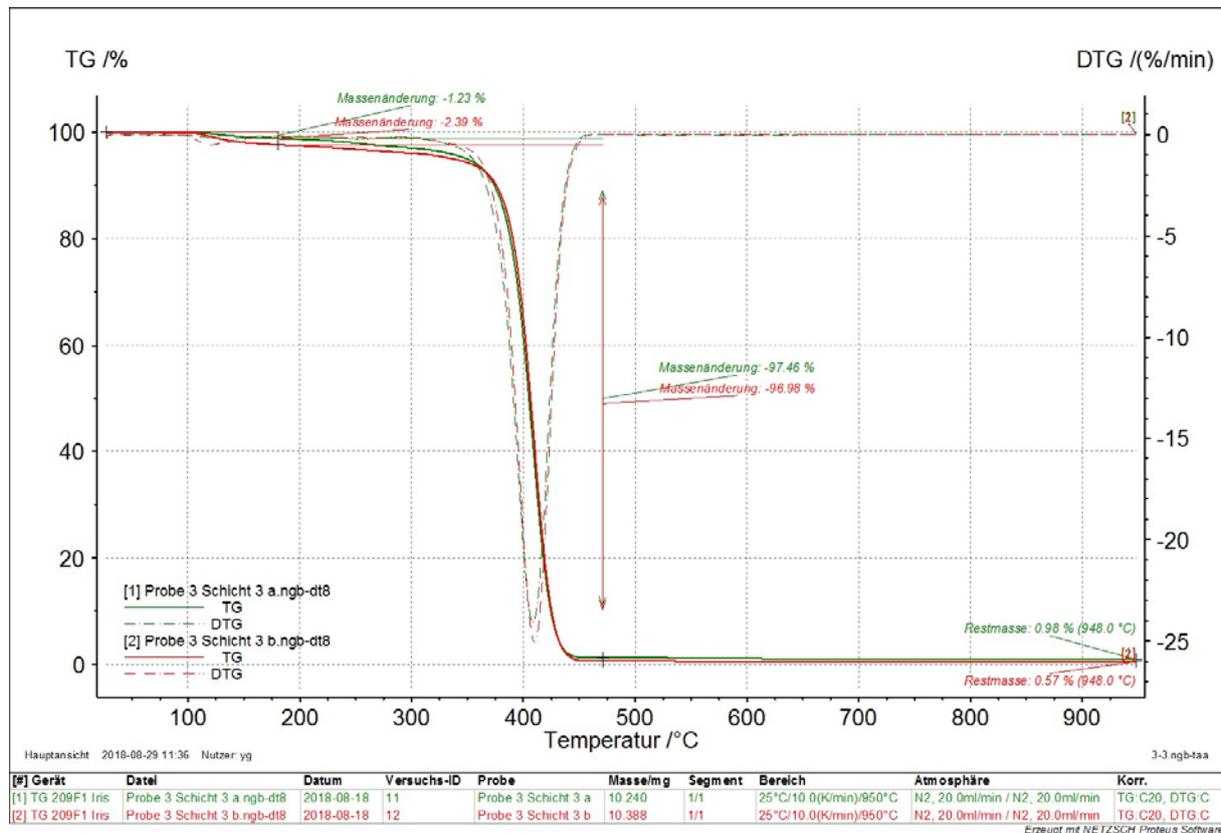


Abbildung 59: Thermogramm Probe 3 / Schicht 3

Die Probe 3 Schicht 3 zeigt im Temperaturbereich von RT bis ca. 180°C einen kleinen Massenverlust von 1,2 / 2,4%. Die Hauptzersetzungsstufe 97% Massenverlust zeigt sich zwischen 350 – 450°C. Die Restmasse nach Erreichen der Endtemperatur von 950°C beträgt < 1%.

Styrol zeigt deutlich weniger Elemente in der ICP-OES und in geringerer Konzentration. Dies bestätigt sich auch durch die TGA-Analysen, bei der die Restmasse im Bereich von 2-4 % liegt. Alle anderen Proben enthalten deutlich mehr mineralische Bestandteile bis zu 78%. Hauptanteil dabei trägt der Putz.

### 13. Zusammenfassung

Ziel dieses Forschungsvorhabens war die werkstoffliche Aufbereitung von Wärmedämmverbundsystemen so, dass die individuellen Materialien aus dem komplexen Komposit rückgewonnen und erneut als Sekundärrohstoff am Markt etabliert werden können. Aktuell existieren in der Wirtschaft noch keine etablierten Verfahren, welche sich mit der vollständigen Rückgewinnung von WDVS-Abfällen befassen. Des Weiteren enthält ein Großteil der anfallenden EPS-Dämmstoffe das seit 2008 verbotene Flammschutzmittel HBCD: Dies erschwert eine Wiederverwertung zusätzlich. Da die WDVS-Abfälle überwiegend in Müllverbrennungsanlagen thermisch verwertet werden, geht ein erhebliches Recyclingpotential in der Bundesrepublik Deutschland verloren. Nachdem die makroskopischen und mikroskopischen Eigenschaften der in den letzten 40 Jahren verbauten WDVS überwiegend bekannt waren, wurde damit begonnen, ein Verwertungsweg für die komplexe Komposite zu entwickeln. Hierbei spielte im Verwertungsplan die Abfolge der einzelnen Prozessschritte, wie die Zerkleinerung, Klassierung und Sichtung eine entscheidende Rolle. So müssen die Zerkleinerungsapparaturen wie z. B. die Hammermühle, die Schneidmühle oder die Kugelmühle für die jeweiligen Dämmstoffmaterialien bzw. die mineralischen Bestandteile geeignet sein. Im Anschluss wurden die im Recyclingweg definierten verfahrenstechnischen Apparaturen auf deren Eignung hin im Labormaßstab überprüft. Aufgrund der vielfältigen komplexen WDVS welche im Abfallstrom vorkommen, wurden in einem ersten Schritt WDVS-Modellsysteme konzipiert. Es kamen die am Häufigsten verbreiteten Dämmstoffmaterialien EPS und XPS zum Einsatz. Diese wurde anschließend anhand der konzipierten Recyclingstrategie verwertet, um homogene Massenströme der individuellen Materialien zu erzeugen. Bereits in den Vorversuchen konnte festgestellt werden, dass nur unter Verwendung einer Hammermühle die jeweiligen Materialien aus ihrem Verbund gelöst werden konnten. Begleitend wurde zu den jeweiligen Versuchen die Partikelgrößenverteilungen mittels einer optoelektronischen Messapparatur (CAMSIZER) bestimmt. Durch den Erhalt der Verteilungsdichte- und Summenfunktion konnten Aussagen über das Partikelkollektiv getroffen werden und somit der Prozess quantifiziert und optimiert werden.

Da hierbei im Zerkleinerungsprodukt eine breite Korngrößenverteilung vorlag, wurde diese mittels Siebklassierung in eine Grob- und Feinfraktion klassiert. Eine breite mehrmodale Partikelgrößenverteilung ist für eine mechanische Trennung

überwiegend ungeeignet, weshalb dies einen essentiellen Schritt darstellte. Bei den konstruierten EPS-Modellsystemen war der Grobanteil deutlich höher als der Feinanteil. Bei den XPS-Modellsystemen viel der Feinanteil deutlich höher aus. Dies ist auf das spröde Material des XPS zurückzuführen.

Im Anschluss wurden die erhaltenen Grob- und Feinfraktionen der jeweiligen konstruierten Systeme mittels Strömungsklassierung in ihre homogenen Materialien aufgetrennt. Hierbei waren zwei Sichterschritte notwendig. Bei beiden Systemarten konnte die Grobfraktion überwiegend in ihre homogenen Materialien aufgetrennt werden. Im Anschluss wurden die erhaltenen Feinfraktionen mittels Windsichtung separiert. Dies war aufgrund der geringen Partikelgröße der Putz- und Dämmstoffpartikel deutlich komplexer. Es konnte lediglich ein geringer Anteil an Putz vom Materialgemisch separiert werden. Aufgrund von starken Haftkräften zwischen dem Dämmstoffmaterial und Putzpartikeln entstanden Agglomerate. Somit entstand eine Mischfraktion, da hierbei Agglomerate vom Volumenstrom mitgerissen wurden und sich somit in einer anderen Fraktion anlagerten. Da jedoch bei beiden Systemarten die Grobfraktion einen deutlich höheren Gewichtsanteil ausmachte, konnte aus den komplexen Kompositen ein überwiegender Anteil an Materialien rückgewonnen werden.

Da die Massen der eingesetzten Materialien der Modellsysteme bekannt waren, konnte eine plausible Aussage getroffen werden, welcher Gewichtsanteil rückgewonnen werden konnte. Der entwickelte Verwertungsweg konnte somit qualifiziert und optimiert werden. Es konnten aus den EPS-Modellsystemen 84 wt.-% EPS, 83 wt.-% Putz sowie 85 wt.-% Glasfasergewebe rückgewonnen werden. Aus den konstruierten XPS-Modellsystemen konnten 71 wt.-% XPS, 60 wt.-% Putz und 86 wt.-% Glasfasergewebe rückgewonnen werden. Da der Feinanteil bei den XPS-Modellsystemen deutlich höher und hierdurch deutlich komplexer zu separieren war, konnten weniger homogene Materialien als bei den EPS-Modellsystemen erhalten werden. Da ein hoher Anteil der im WDVS verbauten Dämmstoffmaterialien das umweltbelastende Flammschutzmittel HBCD enthalten, steht dies nicht für eine Wiederverwertung zur Verfügung. Somit muss in Zukünftigen Projekten eine Methode entwickelt werden, um das im Dämmstoffmaterial enthaltene Flammschutzmittel extrahieren zu können. Somit erstünde bei erfolgreicher Abtrennung, dass sortenreine Dämmstoffmaterial für eine Wiederverwertung zur Verfügung.

Durch die durchgeführten Analysen des Fraunhofer ICT konnten die individuellen erhaltenen Fraktionen qualitativ mittels ICP-OES und TGA-Analyse überprüft werden. Die durchgeführten Messungen zeigten, dass aus der Grobfraction überwiegend homogene Fraktionen rückgewonnen werden konnten. Zusätzlich zeigte die schichtweise Analyse der WDVS-Abbruchmaterialien die genauen elementarten Bestandteile der individuellen enthaltenen Materialien. Diese erhaltenen Informationen stellen einen essentiellen Schritt für zukünftige Forschungsvorhaben dar, um Abbruchmaterialien nach der entwickelten Verwertungsstrategie aufbereiten zu können.

## Literaturverzeichnis

- [1] W. Riedel und H. Oberhaus, Von der Thermohaut bis zur transparenten Wärmedämmung, Stuttgart: Baulino-Verlag, 2010.
- [2] B. Schulze und K. Zwiauer, „Materialien WDVS,“ E-genius open content platform, August 2015. [Online]. Available: [http://www.e-genius.at/fileadmin/user\\_upload/gebaeudesanierung\\_einfuehrung/de/web/materialien\\_wdvs.html](http://www.e-genius.at/fileadmin/user_upload/gebaeudesanierung_einfuehrung/de/web/materialien_wdvs.html). [Zugriff am 5 Juni 2018].
- [3] A. Demharter, „Aktuelles zur Entsorgung von Styropor-WDVS,“ *Informationsdienst für das Bayerische Baugewerbe, Blickpunkt Bau*, 7 August 2016.
- [4] „FNR, "Gesamtmarkt Dämmstoffe in Deutschland 2013,“ 2014. [Online]. Available: <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/biobasierte-produkte/gesamtmarkt-dammstoffe-in-deutschland.html>.. [Zugriff am 17 Mai 2017].
- [5] Dresch, 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, Würzburg, 2015.
- [6] „United States Environmental Protection Agency: Flame retardant alternatives for hexabromcyclodecane (HBCD), Final report,“ Juni 2014. [Online]. Available: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/hbcd\\_report.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2014-06/documents/hbcd_report.pdf).
- [7] R. Binner, BVL-Report, Bericht zur Lebensmittelsicherheit, Monitoring, Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 2013.
- [8] W. Albrecht und C. Schwitalla, Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS, Stuttgart: IRB-Verlag Fraunhofer, 2015.
- [9] N. Heller und S. Flamme, „Entwicklung, Modellierung und Bewertung von Verwertungswegen für Wärmedämmverbundsysteme,“ *Abfall- und Ressourcenwirtschaft*, pp. 53 - 57, 2017.
- [10] Fachverband und Innendämmung, Praxishandbuch Innendämmung, Planung-Konstruktion-Details-Beispiele, Köln: Rudolf-Müller-Verlag, 2016.
- [11] „Technisches Merkblatt, Sakret Außenhaftputz,“ 8 März 2017. [Online]. Available: [https://www.heimwerker.sakret.de/assets/fileassets/a8046645/TM\\_DIY\\_SAKRET\\_Aussenhaftputz\\_2017-03-08\\_Final.pdf](https://www.heimwerker.sakret.de/assets/fileassets/a8046645/TM_DIY_SAKRET_Aussenhaftputz_2017-03-08_Final.pdf). [Zugriff am 8 Mai 2017].
- [12] „Technisches Merkblatt zu SAKRET Scheibenputz, Edelputz auf Kalk-Zement-Basis,“ März 2013. [Online]. Available: [https://www.sakret.de/shared/tm/tm\\_sakret\\_scheibenputz\\_scp\\_sbp\\_19710\\_muennen\\_140109.pdf](https://www.sakret.de/shared/tm/tm_sakret_scheibenputz_scp_sbp_19710_muennen_140109.pdf). [Zugriff am 8 Mai 2017].
- [13] „Technisches Merkblatt, StarTex Fein Armierungsgewebe, Firma Baumit,“ 9 April 2016. [Online]. Available: [http://www.baumit.de/pimd/DE/pdb/PDBL\\_StarTex\\_Fein.pdf](http://www.baumit.de/pimd/DE/pdb/PDBL_StarTex_Fein.pdf). [Zugriff am 9 Mai 2017].
- [14] F. Siebtechnik, „Handbuch der Hammermühle des Typs HM1,“ 2008.
- [15] F. Alpine, „Handbuch zum Zickzacksichter vom Typ 1-40 MZN,“ München, 1976.
- [16] F. Retsch, „Handbuch zur Schneidmühle des Typs SM200,“ Haan, 2006.

- [17] C. Prasher, „Crushing and Grinding Process Handbook,“ New York, John Wiley & Sons, 1987.
- [18] DIN 66165-1:2016-08, Partikelanalyse - Siebanalyse - Teil 1 : Grundlagen, Berlin: Beuth Verlag, 2016.
- [19] R. Technologie, „Retsch Technologie zur Dynamischen Bildanalyse (DIA),“ [Online]. Available: <https://www.retsch-technology.de/de/produkte/dynamische-bildanalyse/camsizer-p4/funktion-merkmale/>. [Zugriff am 16 September 2018].
- [20] M. Stieß, „Mechanische Verfahrenstechnik 2,“ Nürnberg, Springer Lehrbuch, 1997.
- [21] O. Orumwese und E. Forssberg, „Einfluss der Mühlengröße bei der Mahlung von Dolomit in Schwingmühlen,“ 1990, pp. 531-538.
- [22] Firma und Retsch, Hanbuch für den Backenbrecher Typ BB 250 XL, Haan, 1996.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Üblicher Aufbau eines Wärmedämmverbundsystems (WDVS) mit Benennung der individuellen Komponenten [2].....	2
Abbildung 2: Marktanteil der am häufigsten verwendeten Dämmstoffe in WDVS der Bundesrepublik Deutschland (Stand 2014) [4] .....	3
Abbildung 3: Anwendungsbereiche des Flammschutzmittels HBCD (Stand 2008) [6]	4
Abbildung 4: Arbeitsprogramm des Forschungsvorhabens "Recycling von Wärmedämmverbundsystemen (WDVS).....	6
Abbildung 5: Verwertungsweg zur Werkstofflichen Verwertung von WDVS .....	7
Abbildung 6: Schematischer Verwertungsweg für WDVS-Abfälle im Labormaßstab... 8	
Abbildung 7: Konzipierte WDVS-Modellsysteme mit EPS (links) und XPS (rechts) als Dämmstoffmaterial .....	10
Abbildung 8: Zerkleinerungsprodukt (Systeme mit EPS als Dämmstoff) durch Verwendung der Schneidmühle ohne Siebeinsatz .....	15
Abbildung 9: Blockierung des Mahlraumes der Schneidmühle während der Zerkleinerung von definierten WDVS mit EPS und XPS als Dämmstoffmaterial .....	15
Abbildung 10: Zerkleinerungsprodukt (Systeme mit EPS und XPS als Dämmstoff) durch Verwendung der Kugelmühle bei maximaler Leistung mit 14 Mahlkugeln .....	17
Abbildung 11: Zerkleinerungsprodukt (Systeme mit EPS als Dämmstoff) durch Verwendung der Hammermühle ohne Siebeinsatz .....	17
Abbildung 12: Zerkleinerungsprodukt (Systeme mit EPS als Dämmstoff) durch Verwendung der Hammermühle mit einem 10 mm Siebeinsatz.....	18
Abbildung 13: Siebanalyse mittels R20/3 Siebreihe an zerkleinerte WDVS-Modellsysteme .....	19
Abbildung 14: Verteilungssummen- und Verteilungsdichtefunktion der zerkleinerten EPS-Modellsysteme .....	21
Abbildung 15: Verteilungsdichtefunktion der zerkleinerten EPS-Modellsysteme mit angesetztem Trennschnitt bei 1mm .....	22
Abbildung 16: Siebklassierung der zerkleinerten EPS-Systeme. Trennung bei 1 mm. ....	23
Abbildung 17: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Grobfraktion ( $x > 1$ mm) der EPS-Modellsysteme .....	23
Abbildung 18: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Feinfraktion ( $x < 1$ mm) der EPS-Modellsysteme .....	24
Abbildung 19: Schwer- und Leichtfraktion der Grobfraktion der EPS-Modellsysteme, nach dem ersten Sichterdurchgang mit einem Volumenstrom von 15 Nm <sup>3</sup> /h.....	25
Abbildung 20: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Schwerfraktion ( $x > 1$ mm), der EPS-Modellsysteme, nach dem ersten Sichterdurchgang.....	26
Abbildung 21: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Leichtfraktion ( $x > 1$ mm) der EPS-Modellsysteme, nach dem ersten Sichterdurchgang .....	26
Abbildung 22: Schwer- und Leichtfraktion der Grobfraktion der EPS-Modellsysteme, nach dem zweiten Sichterdurchgang mit einem Volumenstrom von 7 Nm <sup>3</sup> /h.....	27

Abbildung 23: Schwer- und Leichtfraktion der Feinfraktion der EPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang mit einem Volumenstrom von 8 Nm <sup>3</sup> /h.....	29
Abbildung 24: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Schwerfraktion (x < 1 mm) der EPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang.....	30
Abbildung 25: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Leichtfraktion (x < 1 mm) der EPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang .....	30
Abbildung 26: Verteilungssummen- und Verteilungsdichtefunktion der zerkleinerten XPS-Modellsysteme .....	33
Abbildung 27: Verteilungsdichtefunktion der zerkleinerten XPS-Modellsysteme mit angesetztem Trennschnitt bei 1 mm .....	34
Abbildung 28: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Grobfraktion (x > 1 mm) der XPS-Modellsysteme .....	35
Abbildung 29: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Feinfraktion (x < 1 mm) der XPS-Modellsysteme.....	36
Abbildung 30: Schwer- und Leichtfraktion der Grobfraktion der XPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang mit einem Volumenstrom von 16 Nm <sup>3</sup> /h.....	37
Abbildung 31: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Schwerfraktion (x > 1 mm) der XPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang.....	38
Abbildung 32: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Leichtfraktion (x > 1 mm) der XPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang .....	38
Abbildung 33: Schwer- und Leichtfraktion der Grobfraktion der XPS-Modellsysteme nach dem zweiten Sichterdurchgang mit einem Volumenstrom von 8 Nm <sup>3</sup> /h.....	39
Abbildung 34: Schwer- und Leichtfraktion der Feinfraktion der XPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang mit einem Volumenstrom von 8 Nm <sup>3</sup> /h.....	41
Abbildung 35: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Schwerfraktion (x < 1 mm) der XPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang.....	42
Abbildung 36: Verteilungssumme- und Verteilungsdichtefunktion der Leichtfraktion (x < 1 mm), der XPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang .....	42
Abbildung 37: Konfiguration der ZM 100 (mit 6 mm Siebeinsatz) .....	47
Abbildung 38: Detailliertes Schichtmodell eines WDVS.....	56
Abbildung 39: Probe 1 WDVS Fa. Füg; Karlsruhe .....	57
Abbildung 40: Probe 1 WDVS getrennt in 6 Fraktionen und zerkleinert .....	58
Abbildung 41: Probe 2 WDVS Fa. Arcadis; Karlsruhe.....	58
Abbildung 42: Probe 2 WDVS getrennt in 6 Fraktionen und zerkleinert .....	58
Abbildung 43: Probe 3 Fa. Mack; Stuttgart .....	59
Abbildung 44: XRF-X-Ray Florescence Sepctroscopy.....	63
Abbildung 45: Thermogramm Probe1 / Schicht 1 .....	65
Abbildung 46: Thermogramm Probe 1 / Schicht 2 .....	66
Abbildung 47: Thermogramm Probe 1 / Schicht 3 .....	67
Abbildung 48: Thermogramm Probe 1 / Schicht 4 .....	68

Abbildung 49: Thermogramm Probe 1 / Schicht 5 .....	69
Abbildung 50: Thermogramm Probe 1 / Schicht 6 .....	70
Abbildung 51: Thermogramm Probe 2 / Schicht 1 .....	71
Abbildung 52: Thermogramm Probe 2 / Schicht 2 .....	72
Abbildung 53: Thermogramm Probe 2 / Schicht 3 .....	73
Abbildung 54: Thermogramm Probe 2 / Schicht 4 .....	74
Abbildung 55: Thermogramm Probe 2 / Schicht 5 .....	75
Abbildung 56: Thermogramm Probe 2 / Schicht 6 .....	76
Abbildung 57: Thermogramm Probe 3/ Schicht 1 .....	77
Abbildung 58: Thermogramm Probe 3 / Schicht 2 .....	78
Abbildung 59: Thermogramm Probe 3 / Schicht 3 .....	79

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Daten der eingesetzten Baustoffe zur Konstruktion der WDVS-Modellsysteme [11, 12, 13] .....	9
Tabelle 2: Eingesetzte Massen der EPS-Modellsysteme und erzielte Massenströme in der Hammermühle.....	20
Tabelle 3: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Fein- und Grobfraction der zerkleinerten EPS-Modellsysteme .....	22
Tabelle 4: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Schwer- und Leichtfraction ( $x > 1\text{mm}$ ), der EPS-Modellsysteme, nach dem ersten Sichterdurchgang.....	27
Tabelle 5: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Schwer- und Leichtfraction ( $x > 1\text{mm}$ ) der EPS-Modellsysteme nach dem zweiten Sichterdurchgang .....	28
Tabelle 6: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Grob- und Feinfraction ( $x > 1\text{mm}$ ), der Leichtfraction der EPS-Modellsysteme nach dem zweiten Sichterdurchgang.....	28
Tabelle 7: Eingesetzte und rückgewonnene Massen der Grobfraction der EPS-Modellsysteme sowie der rückgewonnene Gewichtsanteil.....	29
Tabelle 8: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Schwer- und Leichtfraction ( $x < 1\text{mm}$ ) der EPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang.....	31
Tabelle 9: Eingesetzte und rückgewonnene Massen der Feinfraction, der EPS-Modellsysteme, sowie der individuell rückgewonnene Gewichtsanteil.....	31
Tabelle 10: Eingesetzte und rückgewonnene Massen des gesamten Zerkleinerungsproduktes der EPS-Modellsysteme sowie der individuell rückgewonnene Gewichtsanteil.....	32
Tabelle 11: Eingesetzte Massen der XPS-Modellsysteme und erzielte Massenströme in der Hammermühle.....	32
Tabelle 12: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Fein- und Grobfraction der zerkleinerten XPS-Modellsysteme .....	34
Tabelle 13: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Schwer- und Leichtfraction ( $x > 1\text{mm}$ ), der XPS-Modellsysteme nach dem ersten Sichterdurchgang .....	39
Tabelle 14: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Schwer- und Leichtfraction ( $x > 1\text{mm}$ ) der XPS-Modellsysteme nach dem zweiten Sichterdurchgang .....	40
Tabelle 15: Gewichtsverhältnis der erhaltenen Grob- und Feinfraction ( $x > 1\text{mm}$ ) der Leichtfraction der XPS-Modellsysteme nach dem zweiten Sichterdurchgang.....	40
Tabelle 16: Eingesetzte und rückgewonnene Massen der Grobfraction der XPS-Modellsysteme sowie der individuell rückgewonnene Gewichtsanteil.....	41
Tabelle 17: Eingesetzte und rückgewonnene Massen des gesamten Zerkleinerungsproduktes der XPS-Modellsysteme sowie der individuell rückgewonnene Gewichtsanteil.....	43
Tabelle 18: Systematische Benennung der WDVS-Proben nach Polystyrol Art und Reinfraction.....	48
Tabelle 19: Durch Optimierung berechnete Massenanteile der WDV-Modellsysteme .....	52
Tabelle 20: Gemessener und berechneter Anteil der Reinfractionen und der WDVS Schredderfractionen .....	53
Tabelle 21: Gemessener und berechneter Anteil der Reinfractionen und der WDVS Schredderfractionen .....	54
Tabelle 22: Konzentrationsbestimmung der Elemente in WDVS-Schichten mittels ICP-OES.....	60

Tabelle 23: Dokumentation der Probenvorbereitung .....	62
Tabelle 24: Bromgehalte bestimmt über XRF .....	63
Tabelle 25: Arbeitsparameter an der TG .....	64