

## **SCHLUSSBERICHT IAB 1817\_IP I zum FuE-Vorhaben**

**Reg.-Nr.:** MF 150010

**FuE-Einrichtung:** IAB-Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gemeinnützige GmbH

**Titel des Vorhabens:** Entwicklung eines Recyclingverfahrens für gefüllte Ziegel

**Kurztitel:** Füllziegelrecycling

**Projektlaufzeit:** 01.09.2015 bis 28.02.2018

**Berichtszeitraum:** 01.09.2015 bis 28.02.2018

**Gefördert vom:** Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

**Projekträger:** EuroNorm GmbH  
Stralauer Platz 34  
10243 Berlin

Weimar, 22.08.2018



Dr.-Ing. Ulrich Palzer  
Institutsdirektor



Dr.-Ing. Barbara Leydolph  
Leiterin des Projektes

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Technologische Zielstellung des Vorhabens .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Materialien.....</b>	<b>4</b>
2.1	Auswahl der zu untersuchenden Ziegel .....	4
2.2	Erzeugung des Probenmaterials.....	4
<b>3</b>	<b>Zerkleinerungsversuche mittels Prallbrecher und anderer Zerkleinerungsmaschinen .....</b>	<b>7</b>
3.1	Verwendete Aggregate .....	7
3.2	Aufbereitungsabläufe für die Wandsegmente .....	10
3.3	Untersuchungen an den Zerkleinerungsprodukten.....	11
<b>4</b>	<b>Merkmale der Zerkleinerungsprodukte .....</b>	<b>15</b>
4.1	Partikelgrößenverteilungen .....	15
4.2	Partikelform .....	19
4.3	Materialzusammensetzung und Aufschlussgrad .....	20
4.4	Chemische Zusammensetzung.....	23
<b>5</b>	<b>Versuche zur Sortierung der Mauerwerkgemische aus den Prallbrecher- Versuchen .....</b>	<b>27</b>
5.1	Verwendete Methoden.....	27
5.2	Aufbereitungsablauf der Windsichterversuche und Eigenschaften der Produkte.....	27
5.3	Ergebnisse der Schwimm-Sink-Versuche .....	30
<b>6</b>	<b>Untersuchungen zum Aufbereitungsablauf Backenbrecher-Klassierung- Windsichtung.....</b>	<b>30</b>
6.1	Verwendete Methoden und Probematerial .....	30
6.2	Aufbereitungsablauf.....	31
6.3	Ergebnisse .....	31
<b>7</b>	<b>Aufbereitungsabläufe für dämmstoffgefüllte Ziegel.....</b>	<b>32</b>
7.1	Gegenüberstellung von einstufigen Varianten.....	32
	Variante 1:.....	32
	Variante 2:.....	33
	Variante 3:.....	34
7.2	Verfahrensschema für einen mehrstufigen Verfahrensablauf.....	35
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>38</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>41</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>42</b>
	<b>Literatur- und Quellenverzeichnis.....</b>	<b>42</b>
	<b>Anlage .....</b>	<b>43</b>

## 1 Technologische Zielstellung des Vorhabens

Ziegel ist ein Baustoff mit langer Tradition. Seine Produkteigenschaften weiterzuentwickeln, ist Gegenstand vielfältiger Bemühungen. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Verbesserung der Wärmedämmwerte. So werden von Ziegeln mit porosiertem Scherben, deren Hohlräume zusätzlich mit wärmedämmendem Material gefüllt sind, Wärmedämmwerte erreicht, die eine zusätzliche Isolierung der Außenwände von Gebäuden überflüssig machen. Den positiven Effekt während der Nutzung können die Verwertungsmöglichkeiten am Nutzungsende, die unter dem Gesichtspunkt der Ressourceneffektivität zunehmend wichtig werden, konterkarieren. Mauerwerk aus gefüllten Ziegeln wird in Bezug auf die integrierte Wärmedämmung kaum selektiv rückbaubar sein. Die Verarbeitung muss in Recyclinganlagen erfolgen. Dort müssen die Komponenten voneinander getrennt werden, um sie dann geeigneten Verwertungsmöglichkeiten zuzuführen.

Im Projekt „Füllziegelrecycling“ sollte der technische Nachweis erbracht werden, dass Verbundbaustoffe aus Ziegel mit integriertem Wärmedämmstoff durch geeignete Aufbereitungsprozesse

- zunächst aufgeschlossen, d. h. ihre einzelnen Komponenten entlang ihrer Verbundgrenze physikalisch aufgetrennt werden können und
- im weiteren Verlauf der Aufbereitung durch Sortierverfahren als sortenreine Fraktionen zurückgewonnen werden können.

Ausgangspunkt der Untersuchungen waren zu Musterwänden vermauerte und verputzte Ziegel. Zum einen erfolgte die Zerkleinerung in einem Prallbrecher, wobei unterschiedliche Ziegelartenarten eingesetzt wurden. Die Brechprodukte ausgewählter Wände wurden anschließend mittels eines Windsichters behandelt, um die Trennbarkeit und die Trennschärfe zu ermitteln. Als Alternative wurde die Schwimm-Sink-Sortierung im Labormaßstab getestet. Zum anderen wurde ein Praxisversuch in einer Recyclinganlage, die mit einem Backenbrecher und einem Windsichter ausgerüstet war, durchgeführt. Hier kamen neben unvermaurerten gefüllten Ziegeln auch solche aus einer Musterwand, die Vor-Ort errichtet und unmittelbar vor dem Versuch abgebrochen wurde, zum Einsatz. Ebenso wurde die Korngrößenreduktion im Prallbrecher simuliert, wobei auf eine Darstellung der Ergebnisse innerhalb des Berichts verzichtet wird.

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen sollten Vorschläge für Verfahrensabläufe abgeleitet werden, mit denen eine Stofftrennung der Komponenten der gefüllten Ziegel erreicht werden kann. Als Ausgangsmaterial der Versuche wurden Musterwände verwendet, so dass zusätzlich zu den Aussagen zur Abtrennung der integrierten Wärmedämmstoffe auch das Aufschlussverhalten der Putze bewertet werden konnte. Möglichkeiten für eine Kreislaufführung der gewonnenen Stoffströme wurden aufgezeigt.

Das Vorhaben wurde unter Beteiligung folgender Projektpartner durchgeführt:

### **THERMOPOR GmbH**

Römerweg 2, 86497 Horgau

### **Deutsche POROTON GmbH**

Kochstraße 6-7, 10969 Berlin

### **Mein Ziegelhaus GmbH & Co. KG**

Rheinufer 108, 53639 Königswinter

### **DEUTSCHE ROCKWOOL GmbH & Co. KG**

Rockwool Str. 37-41, 45966 Gladbeck

## 2 Materialien

### 2.1 Auswahl der zu untersuchenden Ziegel

In Abstimmung mit den Projektpartnern wurden 3 Ziegelarten von jedem Projektpartner ausgewählt. Diese 3 Ziegelarten bilden jeweils eine Serie, innerhalb der die Einflussgrößen Art des Wärmedämmfüllmaterials, Kammergeometrie sowie Scherbenrohddichte variierten (Tabelle 1). Insgesamt wurden also 9 unterschiedliche Produkte der Ziegelindustrie untersucht, die repräsentativ für das Sortiment an Ziegeln mit integrierten Wärmedämmstoffen sind.

Tabelle 1: Überblick über die verwendeten Ziegel und die in den Serien variierten Parameter

Laufende Nummer	Produktbezeichnung	Wärmedämmfüllmaterial	Kammergeometrie der Ziegel	Scherbenrohddichte
Wand 1	T8-P	Perlit	Identisch	Identisch
Wand 2	T8-MW	Steinwolle-Pads		
Wand 3	T8 ohne Füllung	Ungefüllt		
Wand 4	MZ 90 G	Identisch: Steinwolle-Pads	Unterschiedlich	Unterschiedlich
Wand 5	MZ 70			
Wand 6	MZ 10			
Wand 7	TV 7	Identisch: Steinwolle-Pads	Identisch	Unterschiedlich
Wand 8	TV 10			
Wand 9	TV 9			

Es erfolgte die detaillierte Bestimmung der Geometrie der Ziegel sowie die Ermittlung der Masse- und Volumenanteile von den Ziegeln und den integrierten Dämmstoffen. Ausgewählte für den Zerkleinerungswiderstand relevante Größen wie der  $\text{SiO}_2$ -Gehalt und die Scherbenrohddichte wurden bestimmt (Tabelle 2).

### 2.2 Erzeugung des Probenmaterials

Aus den 9 Ziegelarten mit unterschiedlicher Füllung, Kammergeometrie und Scherbenrohddichte wurden an der IAB Weimar gGmbH jeweils 12,5 m<sup>2</sup> mit Dünnbettmörtel verklebtes Mauerwerk hergestellt. Die Wände wurden mit 1,5 cm Kalk-Gips-Innenputz und 2 cm Kalk-Zement-Außenputz versehen. So sollte nicht nur die Separierung der Füllstoffe aus den Ziegeln untersucht werden, sondern auch die Aufschlusswirkung der Zerkleinerung auf die Trennung zwischen Putz - insbesondere von Gipsputz - und Ziegelmauerwerk.

Folgende Materialien wurden dabei eingesetzt:

- Dünnbettmörtel maxit mur 900 D
- Grundierung Premium Primer DG 27 (außer Wand 1)
- Innenputz maxit ip 23 F
- Außenputz maxit ip 18 ML

Die rechnerische Zusammensetzung des jeweiligen Mauerwerks ist in Bild 1 dargestellt.

Tabelle 2: Merkmale der ausgewählten Ziegelarten

Laufende Nummer	Produktbezeichnung	Herstellwerk	Herstellerangaben	Bild	Rohdichte		
					Ziegel [g/cm <sup>3</sup> ]	Scherben [g/cm <sup>3</sup> ]	Wärmedämmstoff [g/cm <sup>3</sup> ]
Wand 1	T8-P	Eisenberg	24,8x36,5x24,9 Füllung Perlit 0,60 kg/dm <sup>3</sup> > 6 N/mm <sup>2</sup> 0,08 W/(mK)		0,61	1,44	0,12
Wand 2	T8-MW	Bad Neustadt	24,8x36,5x24,9 Füllung Steinwolle 0,65 kg/dm <sup>3</sup> > 6 N/mm <sup>2</sup> 0,08 W/(mK)		0,63	1,48	0,04
Wand 3	Ungefüllter T8-MW (als Vergleich)	Bad Neustadt	24,8x36,5x24,9 keine Füllung		0,61	1,48	-
Wand 4	MZ 90-G	Bellenberg	24,8x36,5x24,9 Füllung Steinwolle 0,7 kg/dm <sup>3</sup> 15 N/mm <sup>2</sup> 0,09 W/(mK)		0,69	1,42	0,05
Wand 5	MZ 70	Bellenberg	24,8x36,5x24,9 Füllung Steinwolle 0,55 kg/dm <sup>3</sup> 10 N/mm <sup>2</sup> 0,07 W/(mK)		0,57	1,42	0,05
Wand 6	MZ 10	Klosterbeuren	24,8x36,5x24,9 Füllung Steinwolle 0,75 kg/dm <sup>3</sup> 15 N/mm <sup>2</sup> 0,1 W/(mK)		0,73	1,45	0,05
Wand 7	TV 7	Balzhausen	24,7x36,5x24,9 Füllung Steinwolle 0,50 kg/dm <sup>3</sup> 0,07 W/(mK)		0,57	1,27	0,05
Wand 8	TV 10	Balzhausen	24,7x36,5x24,9 Füllung Steinwolle 0,75 kg/dm <sup>3</sup> 0,1 W/(mK)		0,77	1,62	0,05
Wand 9	TV 9	Balzhausen	24,7x36,5x24,9 Füllung Steinwolle 0,65 kg/dm <sup>3</sup> 0,09 W/(mK)		0,71	1,47	0,05

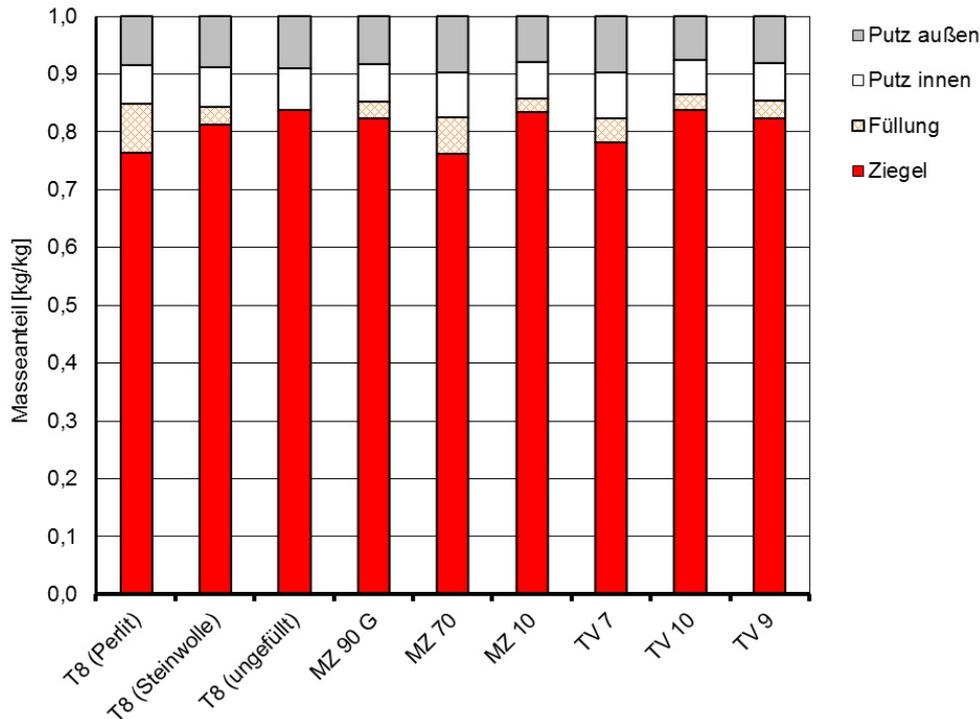


Bild 1: Rechnerische Zusammensetzung der Musterwände

In Bild 2 sind die massebezogene und die volumenbezogene Zusammensetzung des Mauerwerks aus den verwendeten verputzten, mit Steinwolle gefüllten Ziegeln als Mittelwert mit den jeweiligen Standardabweichungen gegenübergestellt. Anhand der geringen Streuung wird deutlich, dass kaum signifikante Unterschiede zwischen der Zusammensetzung der Ziegelarten und der daraus hergestellten Wände auftreten. Gleichzeitig zeigt die Gegenüberstellung der masse- bzw. volumenbezogenen Zusammensetzung, dass der Dämmstoff augenscheinlich dominiert, obwohl sein Masseanteil weniger als 5 Masse-% ausmacht.

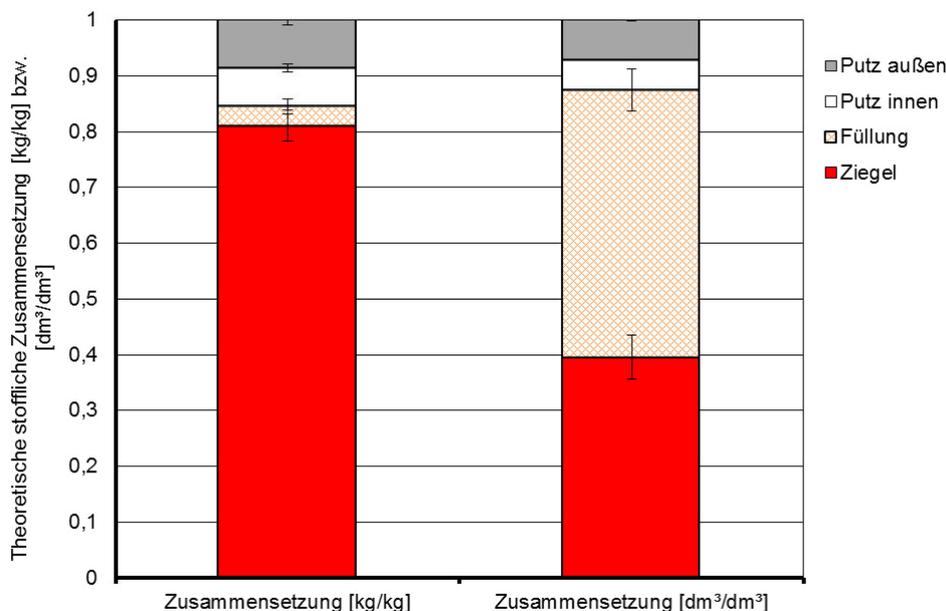


Bild 2: Gegenüberstellung von masse- und volumenbezogener, rechnerischer Zusammensetzung (Mittelwerte und Streuung)

Nach einer Standzeit von 6 Wochen erfolgte der gezielte Rückbau der Musterwände (Bild 3) zur Gewinnung von definierten Proben als Ausgangsmaterial für die Zerkleinerungsversuche im Technikum der Fa. BHS-Sonthofen GmbH (Bild 4). Hierbei wurden stückige Wandsegmente zurückgewonnen. Die Wandsegmente wurden so ausgewählt, dass ihre Zusammensetzung möglichst repräsentativ für die jeweilige Wand war.



Bild 3: Rückbau der Wände



Bild 4: Probenmaterial für weitere Versuche

### **3 Zerkleinerungsversuche mittels Prallbrecher und anderer Zerkleinerungsmaschinen**

#### **3.1 Verwendete Aggregate**

Nach dem Stand der Technik erfolgt die Zerkleinerung von Bauschutt überwiegend in Prallbrechern. Um die in diesem Fall zu erwartenden Korngrößenverteilungen und Aufschlussgrade zu ermitteln, wurden die Wandsegmente aller Musterwände in diesem Aggregat zerkleinert. Zusätzlich wurden einige ausgewählte, andere Zerkleinerungsaggregate in die Untersuchungen einbezogen, die bei der Aufbereitung nichtmineralischer Abfälle oder zur Verbesserung der Kornform und des Aufschlussgrades dienen. Alle Aggregate waren im Technikum der Firma BHS-Sonthofen GmbH verfügbar (Bild 5).

Die Zerkleinerungsprodukte wurden im Hinblick auf ihre Partikelgrößenverteilung und die Materialzusammensetzung der händisch sortierbaren Fraktionen untersucht. Zusätzlich wurde die chemische Zusammensetzung ausgewählter Körnungen bestimmt.

Für die einstufige Zerkleinerung kamen zum Einsatz:

- Prallbrecher PB (Bild 6) zur Korngrößenreduktion und zum Aufschluss aller mineralischen Bestandteile
- Rotorshredder RS (Bild 7) zur Korngrößenreduktion und zum Aufschluss. Die Eignung dieser in der Aufbereitung mineralischer Bau- und Abbruchabfälle unüblichen Aufbereitungsmaschine sollte geprüft werden.

Einige der durch den Prallbrecher zerkleinerten Materialgemenge wurden in einer zweiten Zerkleinerungsstufe den folgenden Aufbereitungsmaschinen zugeführt:

Rotorschleuderbrecher RSMX (

- Bild 8) auch Kubikator genannt, zur Verbesserung der Partikelform und zur selektiven Zerkleinerung unerwünschter Bestandteile, wie dem Gipsputz sowie
- Rotorprallmühle RPMX (Bild 9) zur Feinzerkleinerung der mineralischen Bestandteile für die Erschließung weiterer Verwertungswege, zum Beispiel als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Aufbaukörnungen [1].



Bild 5: Aufbereitungstechnikum der Fa. BHS mit Zerkleinerungsmaschinen

Prallbrecher bestehen aus dem Gehäuse und dem Rotor mit waagerechter Welle. Beide sind mit Prallelementen ausgerüstet (Bild 6). Die Zerkleinerung des Materials erfolgt durch das Auftreffen des Materials auf die am Rotor befestigten Pralleisten, durch den Aufprall des beschleunigten Materials auf die Prallplatten im Brechergehäuse und durch die Beanspruchung der Partikel untereinander.

Die anderen hier verwendeten Brecher sind mit einem Rotor mit senkrecht stehender Welle ausgerüstet, an dem die Brechwerkzeuge angebracht sind. Der Materialfluss durch den Brecher erfolgt senkrecht ohne Umlenkung. Die Zerkleinerungswerkzeuge des Rotorshredders sind Schläger, die sich durch die Fliehkraft waagrecht ausrichten (Bild 7). Die Wände des Mahlraums werden durch einen Rost gebildet, durch den das Material austritt, wenn es die entsprechende Partikelgröße aufweist. Beim Rotorschleuderbrecher wird das Material, das auf Korngrößen von etwa 45 mm vorzerkleinert werden muss, durch den Rotor beschleunigt und gegen eine Prallwand geschleudert (

Bild 8). Der Aufprall führt zum Bruch der Partikel. Bei der Rotorprallmühle findet die Zerkleinerung in einem Ringspalt zwischen dem Schlägerrotor und der verzahnten Ringpanzerung statt (Bild 9). Die Weite des Ringspalts, die minimal bei ca. 2 mm liegt, bestimmt die Partikelgröße des Austragsgutes.

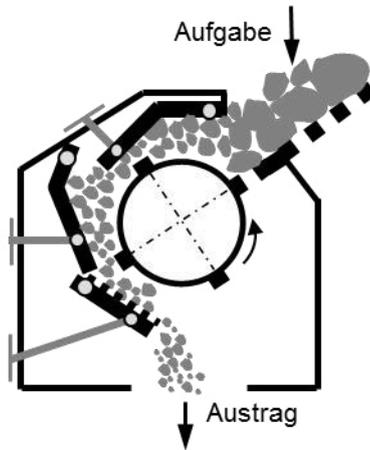
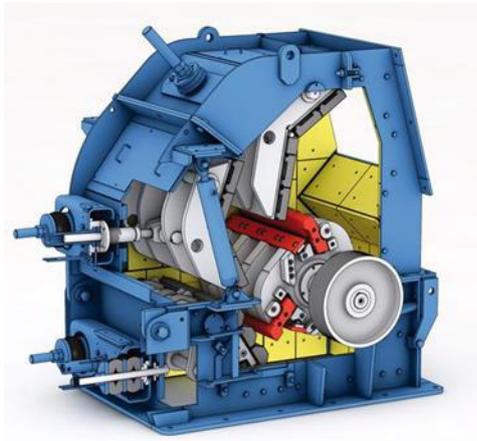


Bild 6: Aufbau des Prallbrechers PM (Bild BHS, Schema eigene Darstellung)

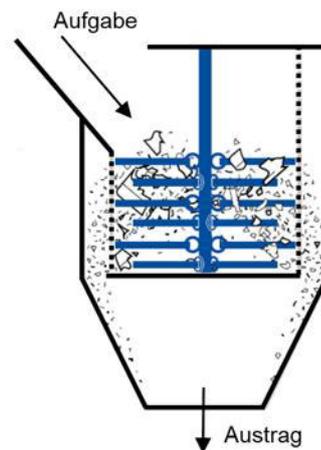


Bild 7: Aufbau des Rotorshredders RS (Bild BHS, Schema eigene Darstellung)

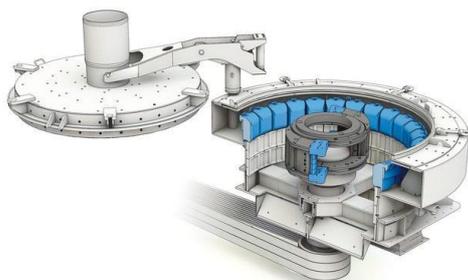


Bild 8: Aufbau des Rotorschleuderbrechers RSMX zur Nachzerkleinerung (Bild BHS)

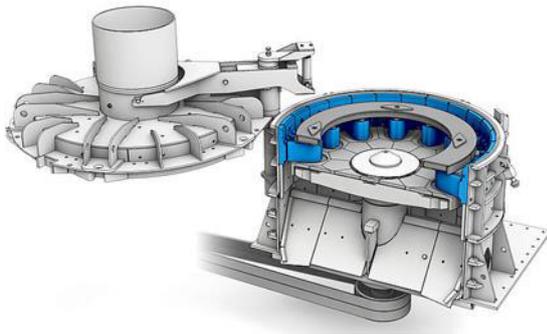


Bild 9: Aufbau der Rotorprallmühle RPMX zur Nachzerkleinerung (Bild BHS)

Die Umfangsgeschwindigkeit des verwendeten Prallbrechers betrug 37,4 m/s. Die des Rotorschredders lag mit 40,0 m/s wenig darüber. Der Rotorschleuderbrecher hatte mit 56,9 m/s eine deutlich höhere Umfangsgeschwindigkeit. Mit der Rotorprallmühle kann der Übergang von der Grobzerkleinerung zur Mahlung realisiert werden. Ihre Umfangsgeschwindigkeit betrug 80 m/s.

Den eigentlichen Brechprozessen folgte eine über dem Austragsförderband angebrachte Staubabsaugung, um die Staubemission hinsichtlich eines verbesserten Arbeitsschutzes zu senken (Bild 10). Die Mengen der durch die Absaugung abgetrennten Bestandteile betragen zumeist < 10 Masse-% für den Prallbrecher PB und den Rotorschleuderbrecher RS sowie < 20 Masse-% für den Rotorschleuderbrecher RSMX und die Rotorprallmühle RPMX. Da eine exakte Bestimmung der ausgeschleusten Materialmenge nicht möglich war, konnten sie in den Massebilanzen nicht berücksichtigt werden.

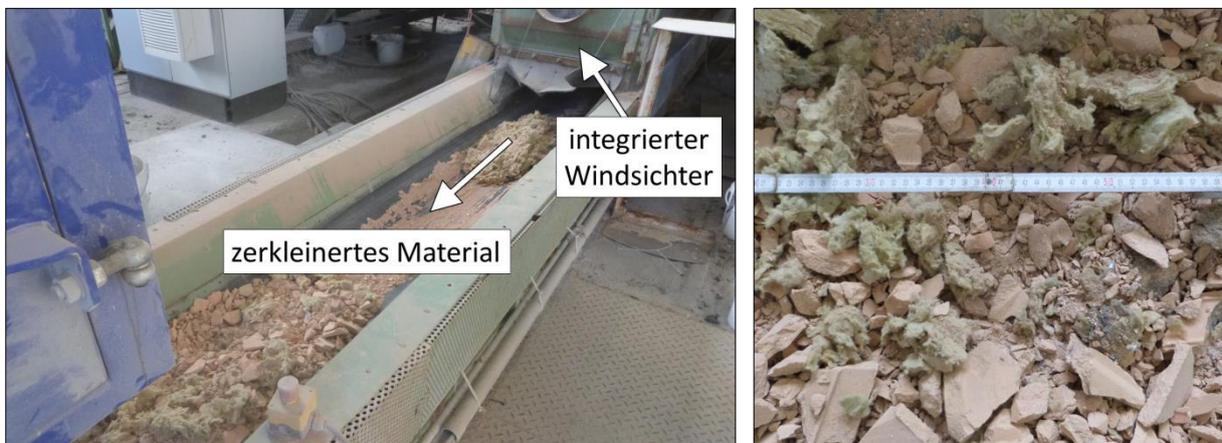


Bild 10: Austragsband mit integrierter Leicht- und Feinstoffabsaugung (Windsichter, links) und zerkleinertem Material mit aufgeschlossener Steinwolle nach der Zerkleinerung im Prallbrecher (rechts)

### 3.2 Aufbereitungsabläufe für die Wandsegmente

Die Wandsegmente wurden unterschiedlichen Aufbereitungsabläufen unterzogen (Bild 11), wobei alle Wände mit Hilfe des Prallbrechers zerkleinert wurden. Allerdings kamen unterschiedliche Brechereinstellungen zur Anwendung. Die Wände 1 bis 6 wurden mit PM 0806 bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 37,4 m/s, die Wände 7 bis 9 mit PM 8040 mit 48,6 m/s zerkleinert. Innerhalb dieser Versuche sollte der Einfluss der verwendeten Ziegelarten auf das Zerkleinerungsergebnis festgestellt werden. Die Wände 1 und 3 wurden parallel dazu mit dem Rotorshredder zerkleinert, so dass ein Vergleich zwischen dem für die Bauschutttaufbereitung typischen Zerkleinerungsaggregat Prallbrecher und einem eher untypi-

schen Aggregat möglich ist. Die Brechprodukte der Wände 7,8,9 wurden nach der Zerkleinerung im Prallbrecher im Rotorschleuderbrecher bzw. in der Rotorprallmühle weiter zerkleinert. Ein solcher Prozess könnte die Vorstufe für ein rohstoffliches Recycling der gefüllten Ziegel ohne Abtrennung der Steinwolle oder der Putze sein.

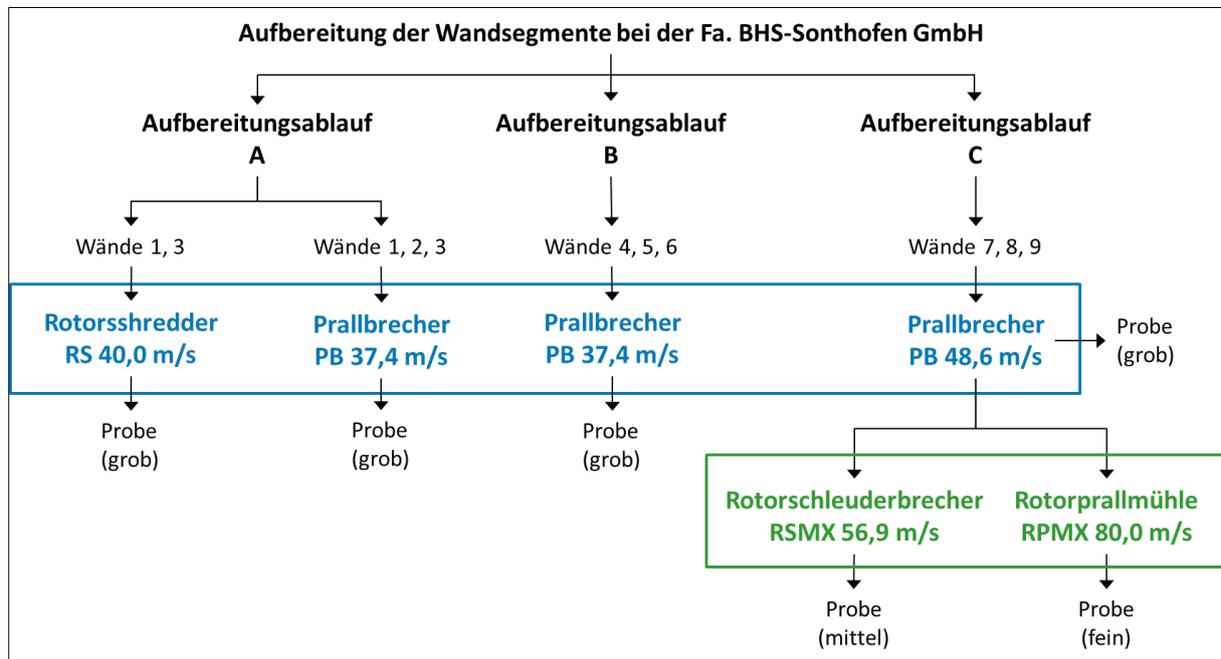


Bild 11: Versuchsabläufe für die einstufige Zerkleinerung (dargestellt in blau) und die zweistufige Zerkleinerung (dargestellt in grün)

Die Zerkleinerungsprodukte bildeten die Basis für weitergehende Untersuchungen, wie beispielsweise die Windsichtungsversuche.

### 3.3 Untersuchungen an den Zerkleinerungsprodukten

Die Zerkleinerungsprodukte lagen in einer Menge von 75 bis 670 kg vor. Nach dem Rücktransport an die IAB Weimar gGmbH erfolgte zunächst eine sorgfältige Probenentteilung. An den Teilproben wurden die in Tabelle 3 angegebenen Untersuchungen vorgenommen. Die Scherbenrohichte wurde bereits an den unvermauerten Ziegeln des Ausgangsmaterials bestimmt. Gleiches gilt für die Dichten der Dämmstofffüllungen.

Tabelle 3: Untersuchungen an den Zerkleinerungsprodukten

Scherbenrohichte der Ziegel im ofentrockenen Zustand	Unterwasserwägung entsprechend DIN EN 993-1
Rohdichte der Dämmstofffüllung im ofentrockenen Zustand	Berechnung über volumetrische Maße der Steinwolle-Pads
Partikelgrößenverteilung	Siebturm mit Sieben der Maschenweiten von 0,063 bis 63 mm
Partikelform	Optische Kornformanalyse mittels „Camsizer P4“ der Fa. Retsch Technology GmbH
Materialzusammensetzung	Händische Sortierung der Fraktionen 8/11,2, 11,2/16, 16/22,4, 22,4/31,5, >31,5 mm
Chemische Zusammensetzung	Röntgenfluoreszenzanalyse an Schmelztabletten bzw. Pulverpresslingen

Die Bestimmung der Materialzusammensetzung erfolgte durch händische Sortierung. Um repräsentative Ergebnisse zu erzielen und Messungenauigkeiten zu reduzieren, müssen entsprechende Maßnahmen ergriffen werden. Die Ungenauigkeiten resultieren aus

- Fehlern bei der Probenahme
- Fehlern bei der Identifizierung und Zuordnung der Partikel zu bestimmten Stoffgruppen und/oder
- Wahl einer unzureichenden Probemenge oder Partikelanzahl.

Die Messungenauigkeiten aus der Probenahme wurden durch eine entsprechende Probe- teilung unter Zuhilfenahme eines Teilerkreuzes oder Riffelteilers reduziert (Bild 12). Die Identifizierung der Partikel war für die Bestandteile Ziegel, Mineralwolle und Putz einfach und unzweideutig möglich. Die Unterscheidung zwischen Kalk-Gips-Innenputz und Kalk-Zement- Außenputz war nicht möglich. Zusätzlich wurde zwischen aufgeschlossenen Ziegelpartikeln, d.h. anhaftungsfreien Partikeln und solchem mit Putzanhaftungen unterschieden.



Bild 12: Probeteilung mittels Teilerkreuz (links) und händische Sortierung der Einzelpartikel je Fraktion (rechts)

Für die Wahl einer ausreichenden Probemenge oder Partikelanzahl können verschiedene Probenahmemodelle verwendet werden. Beispiele hierfür sind das Probenahmemodell nach Gy [2] aus der klassischen Aufbereitungsindustrie (Gewinnung von Metallen) oder Probenahmemodelle für heterogene Stoffgemische aus der Sekundärrohstoffindustrie, wie beispielsweise nach Rasemann [3]. Letzteres beschreibt die Abhängigkeit zwischen der Partikelanzahl und dem Erwartungswert bzw. dessen Schwankungsbreite. Hierbei ist festzustellen, dass mit sinkendem nachzuweisendem Anteilen an Putz-, Mörtel-, Steinwolle- und Verbundpartikel entsprechend weniger nachzuweisende Partikel in einer Fraktion vorzufinden sind.

Zur Begrenzung der Schwankungsbreite muss die zu sortierende Mindestpartikelanzahl erhöht werden. Als Richtwert gilt, dass etwa 1000 Partikel für die Ermittlung des Erwartungswertes bzw. Störstoffanteils von 3 M.-% erforderlich sind. Die resultierende Probenmasse beträgt für die Fraktion 22,4/31,5 mm ca. 15 kg, während für die Fraktion 8/11,2 mm 0,7 kg ausreichen (Tabelle 4). In die berechnete Probemasse geht die Partikelmasse, die unter Zugrundelegung kugelförmiger Partikel berechnet wurde, ein. Bild 13 zeigt, dass die so berechnete Partikelmasse gut mit der gemessenen übereinstimmt.

Tabelle 4: Abschätzung der Probemasse für unterschiedliche Fraktionen

Fraktion	Mittlere Partikelgröße	Partikelvolumen	Rohdichte	Partikelmasse	Masse von 1000 Partikeln = Probemasse
	[mm]	[cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g]	[kg]
8/11,2 mm	9,6	0,46	1,461	0,68	0,68
11,2/16 mm	13,6	1,32	1,461	1,92	1,92
16/22,4 mm	19,2	3,70	1,461	5,41	5,41
22,4/31,5 mm	26,95	10,24	1,461	14,97	14,97
>31,5 mm	38,25	29,29	1,461	42,79	42,79

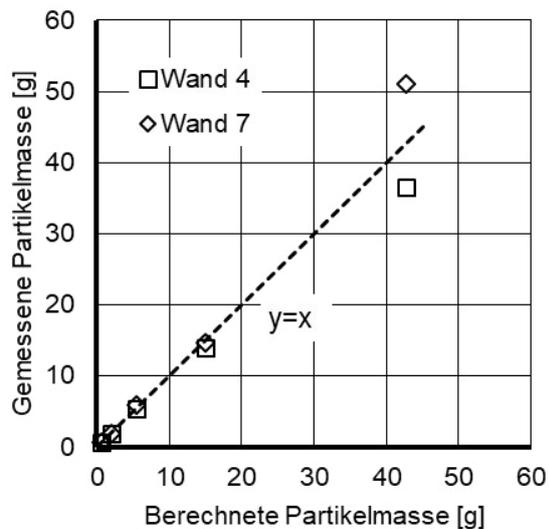


Bild 13: Gegenüberstellung von berechneter und gemessener Partikelmasse

Zur Überprüfung dieser Abschätzung wurde in Voruntersuchungen die Bestimmung der notwendigen Partikelanzahl durchgeführt. Die gesamte gebrochene Masse des Gemenges aus Aufbereitungsablauf B wurden durch ein Teilerkreuz auf Einzelgemengen mit etwa jeweils 1000 Einzelpartikel > 8 mm heruntergeteilt und chargenweise händisch analysiert.

Die Ergebnisse wurden chargenweise zusammengefasst. Die ersten im Bild 14 bzw. Bild 15 angegebenen Mittelwerte und Variationskoeffizienten beziehen sich auf 2 Chargen, d.h. auf 2000 Partikel bzw. eine Probenmasse von ca. 30 kg. Als Maximum wurden 8 Chargen zusammengefasst, was einer Probenmasse von ca. 120 kg entspricht. Den Bildern ist zu entnehmen, dass sich die mittleren Anteile an Steinwolle, Putz und Ziegel ab einer Partikelzahl von etwa 4000 bzw. einer Partikelmasse von ca. 60 kg kaum noch ändern. Der Variationskoeffizient nimmt dagegen mit zunehmender Probenmasse kontinuierlich ab.

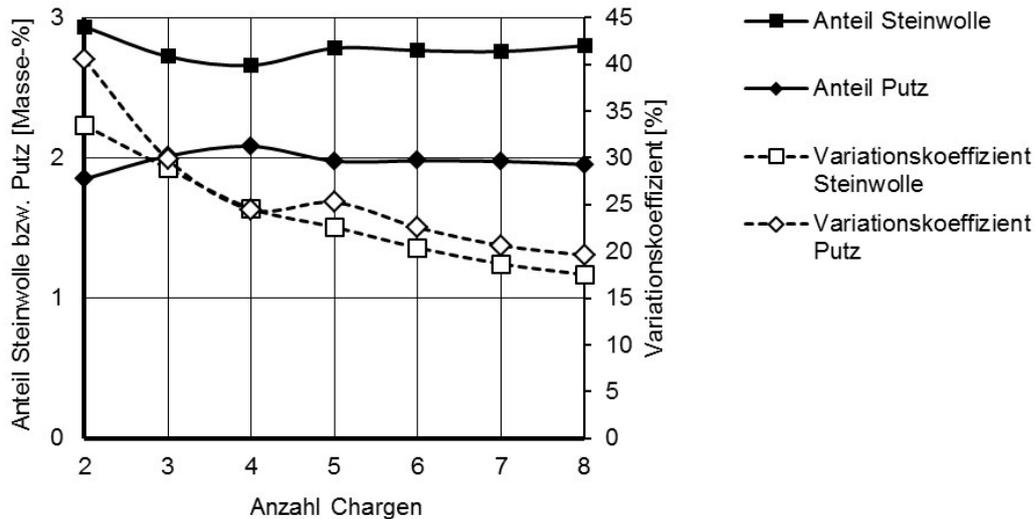


Bild 14: Abhängigkeit der ermittelten Gehalte der Probenbestandteile Steinwolle und Putz sowie deren Variationskoeffizienten von der untersuchten Anzahl von Chargen zu je etwa 1000 Partikeln der Fraktion > 8 mm am Beispiel von Wand 4

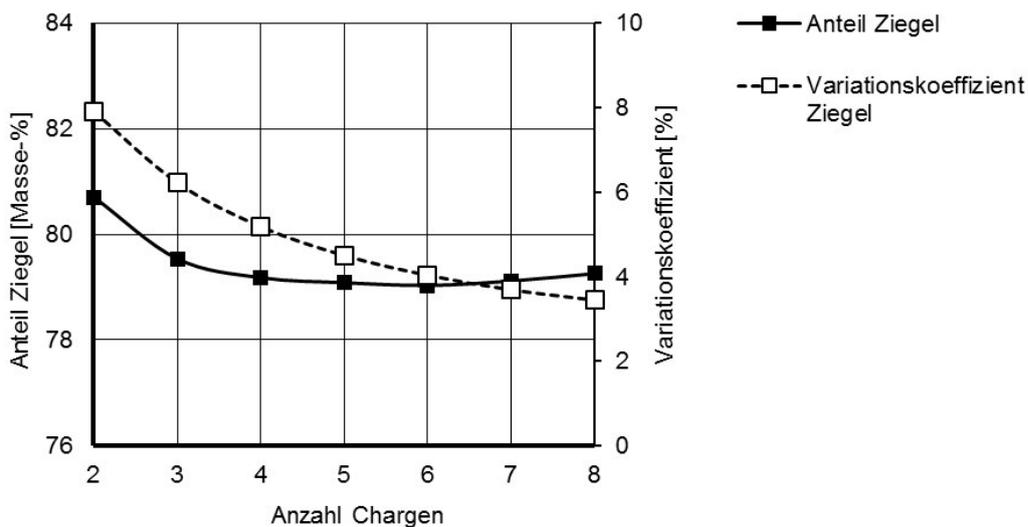


Bild 15: Abhängigkeit des ermittelten Gehalts an Ziegel und dessen Variationskoeffizient von der untersuchten Anzahl von Chargen zu je etwa 1000 Partikeln der Fraktion > 8 mm am Beispiel von Wand 4

Aufbauend auf den Ergebnissen der Voruntersuchungen wurden die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen an jeweils 8 Chargen von jeweils ca. 10 – 14 kg Material aus der Probenteilung vorgenommen, was nach Abtrennung der feinen Bestandteile zu 1500 - 1800 Partikeln > 8 mm je Charge führte.

## 4 Merkmale der Zerkleinerungsprodukte

Die entstandenen Zerkleinerungsprodukte wurden hinsichtlich der Partikelgrößenverteilung, der Kornform, der Materialzusammensetzung und der chemischen Zusammensetzung charakterisiert. Aus den Ergebnissen zur Zusammensetzung wurden Aussagen zum Aufschlussgrad abgeleitet.

### 4.1 Partikelgrößenverteilungen

Die Siebdurchgänge der untersuchten Proben sind in Bild 16 zusammengefasst. Die farbige Markierung kennzeichnet den jeweiligen Siebdurchgang bei 8 mm Maschenweite. Alle Partikel  $\leq 8$  mm werden im Weiteren als Feinanteile bezeichnet. Diese Festlegung wurde zum einen getroffen, weil sich die Sortieranalysen auf die Körnungen  $> 8$  mm beziehen. Zum anderen sind praktikable Lösungen für eine trockene Sortierung unterhalb 8 mm bisher nicht verfügbar. Die Feinanteile müssen als Gemisch verwertet werden. Der Übersicht in Tabelle 5 ist zu entnehmen, dass die Feinanteile in folgender Reihenfolge zunehmen:

- Produkte aus dem Rotorshredders RS < Produkte aus dem Prallbrecher PB < Produkte aus dem Rotorschleuderbrecher RSMX < Produkte aus der Rotorprallmühle RPMX

Beim Einsatz des Prallbrechers betrug der produzierte Feinanteil im Mittel  $(38,8 \pm 12,4)$  Masse-%. Die Siebdurchgangslinien aller innerhalb des einstufigen Zerkleinerungsprozesses mit dem Prallbrecher zerkleinerten Wände zeigt Bild 16.

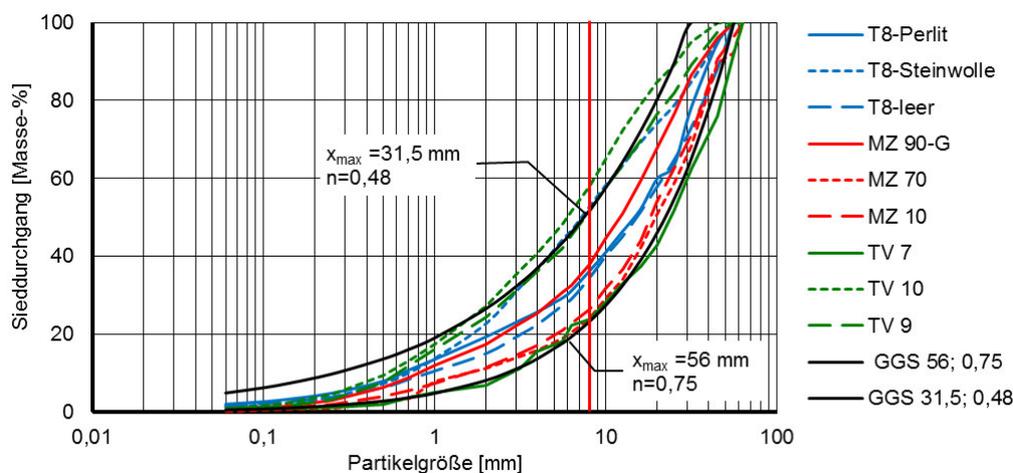


Bild 16: Sieblinien für alle Wände nach der einstufigen Zerkleinerung im Prallbrecher

Die Verläufe der Kurven lassen sich mit einer Gates-Gaudin-Schuhmann-Verteilung beschreiben. Diese Verteilung wird typischerweise für Zerkleinerungsprodukte im Grobbereich verwendet.

$$Q_3 = 100 * \left( \frac{x}{x_{max}} \right)^m$$

mit

$Q_3$ : Verteilungssumme in Masse – %  
 $x$ : Partikelgröße  
 $x_{max}$ : Größtkorn des Partikelkollektivs  
 $m$ : Verteilungsparameter

Die Einflüsse der variierten Parameter (siehe Tabelle 1) lassen sich aus den Versuchsergebnissen nicht ablesen (Bild 17). Die Unterschiede zwischen den Parametern waren wahrscheinlich zu gering. Innerhalb einer Serie variierten zum Teil parallel mehrere Parameter.

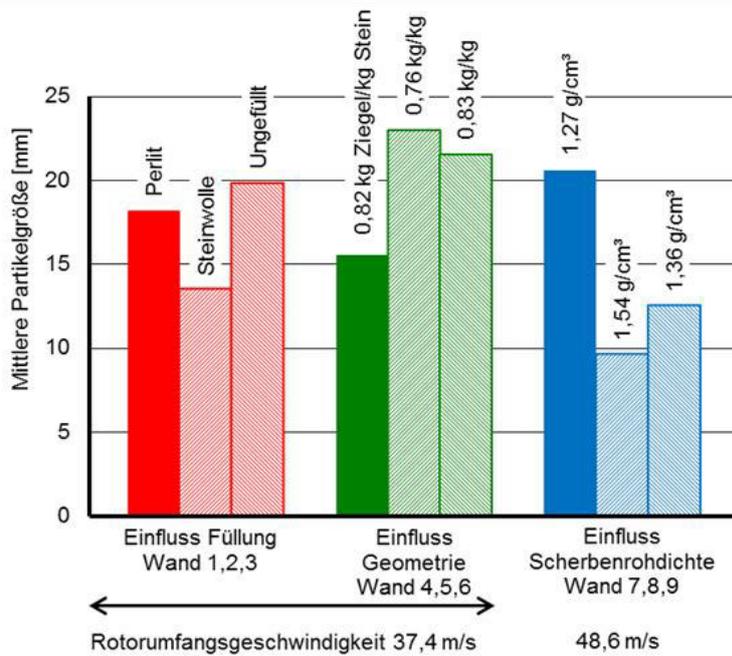


Bild 17: Einfluss der variierten Parameter auf die mittlere Partikelgröße der im Prallbrecher zerkleinerten Produkte

Tabelle 5: Ergebnisse der Siebanalysen der Zerkleinerungsprodukte

			Partikelgröße [mm]																							Ø x	
			RUG	0,06	0,09	0,13	0,25	0,5	0,71	1	2	3,15	4	5,6	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	45	56	63		
			[m/s]	Siebdurchgang [Masse-%]																							[mm]
Wand 1	Prallbrecher	PB 0806	37,4	2,1	2,6	3,2	4,9	8	10,9	13,6	19,4	23,6	25,8	29,4	31,2	36,2	41,1	46,4	52,2	60	63,3	78,1	94,8	100	100	18,2	
Wand 2		PB 0806	37,4	1,4	1,8	2,2	3,9	7,4	10,2	13,8	22,8	32,1	36,7	44,4	46,7	52,7	58,3	63,3	69,3	74,2	78,7	84,7	95,1	100	100	13,5	
Wand 3		PB 0806	37,4	1,7	2,1	2,6	3,9	6,4	8,5	10,6	15,1	19,9	22,6	27,5	29,1	34,4	40,1	45,1	51,5	58	64,7	73	88,3	100	100	19,8	
Wand 4		PB 0806	37,4	0,9	1,3	1,6	3	6,3	9	12	17,4	22,7	25,5	30,7	32,6	38,1	44,7	51,1	59,5	67,8	76,6	86,5	96,1	100	100	15,6	
Wand 5		PB 0806	37,4	0,3	0,4	0,6	1,1	2,4	3,5	7,9	11,2	14,3	16	19	20,6	24,2	29,2	34,2	42,3	50,8	58,8	68,4	89,7	92,3	100	23	
Wand 6		PB 0806	37,4	0,6	0,9	1,1	2	4	5,6	7,4	11,4	15,2	17,2	20,9	22,9	26,4	31,9	36,7	44,1	54,2	62,6	71,1	90,7	96,3	100	21,5	
Wand 7		PB 8040	48,6	0,8	1	1,3	2,1	3,8	5,2	6,9	11,2	15,6	18,2	22,2	23,8	28,1	33,1	37,4	42,8	51,9	62,5	76,1	91,8	100	100	20,6	
Wand 8		PB 8040	48,6	1,1	1,6	2,2	4,6	9,5	13,3	17,3	27,2	36,5	40,9	48,3	51,5	58,1	65	72,3	79	84,7	89,2	95	100	100	100	9,6	
Wand 9		PB 8040	48,6	0,9	1,2	1,6	3,2	7,7	11,9	16,2	24,4	32,1	36,1	42,2	45,3	51,5	57,8	63,3	69,7	76,6	81,8	89,2	97,6	100	100	12,5	
Wand 1	Rotorschredder	RS 2018	40	1,2	1,5	1,8	2,6	3,9	5,1	6,2	8,8	10,7	11,8	13,5	14,5	16,7	20,4	22,5	26,6	30,9	40,6	54	84,3	95,5	100	32,0	
Wand 3		RS 2018	40	1,4	1,8	2,2	3,4	5,5	7,1	8,6	11,9	15,3	17,1	20,2	21,7	25	28,2	32,2	37	42,7	49,6	59,7	77,3	84,8	93	32,1	
Wand 7	Rotorschleuderbrecher	RSMX	56,9	3,5	5,3	8	15,2	26,4	34,8	43	59,8	72	77	81,9	84,9	89,7	92,8	95,7	97,5	99,1	100						3,1
Wand 8		RSMX	56,9	2,7	4,2	6,8	13,9	24,9	32,2	39,3	55,2	67,6	72,8	80,3	82,9	88,2	92,5	95,7	97,5	99	100						3,3
Wand 9		RSMX	56,9	3	4,5	6,7	12,6	22,3	29,5	36,8	52,6	63,5	68,3	74,8	76,5	82	85,5	90,2	94	96,9	98,4	99,3	100				4,4
Wand 7	Rotorprallmühle	RPMX	80	11	14,9	20	30,8	46	55,3	63,4	78,3	86,8	89,9	93	94,8	96,8	98,4	99,2	99,8	100							1,5
Wand 8		RPMX	80	3,4	6	9,9	21,5	40,4	52,6	63,4	83,1	92,9	95,4	97,9	98,4	99,1	99,7	99,9	100								1,2
Wand 9		RPMX	80	4,9	9,4	13,3	24	38,9	50,3	60,5	79,4	89,6	92,6	95,9	97,1	98,4	99,2	99,7	100								1,4

RUG: Rotorumfangsgeschwindigkeit  
 Ø x: Gewichtete, mittlere Partikelgröße

Die Sieblinien der im Rotorshredder zerkleinerten Produkte sind trotz der höheren Rotorumfangsgeschwindigkeit größer als die Pralldrecherprodukte (Bild 18). Die Ursache kann sein, dass das Aufgabematerial nur von den am Rotor beweglich angebrachten Schlägern beansprucht wird. Ein Aufprall auf Prallplatten wie beim Pralldrecher findet nicht statt, weil der Brechraum zumindest teilweise durch Roste gebildet wird. Als Ergebnis der zweistufigen Zerkleinerungen entstanden erwartungsgemäß höhere Anteile < 8 mm (Bild 19). Beim Einsatz des Rotorschleudbrechers RSMX lagen diese bei 80 bis 90 Masse-%. Bei der Rotorprallmühle wies mit Anteilen > 95 Masse-% nahezu das gesamte Mahlprodukt Partikelgrößen unter 8 mm auf.

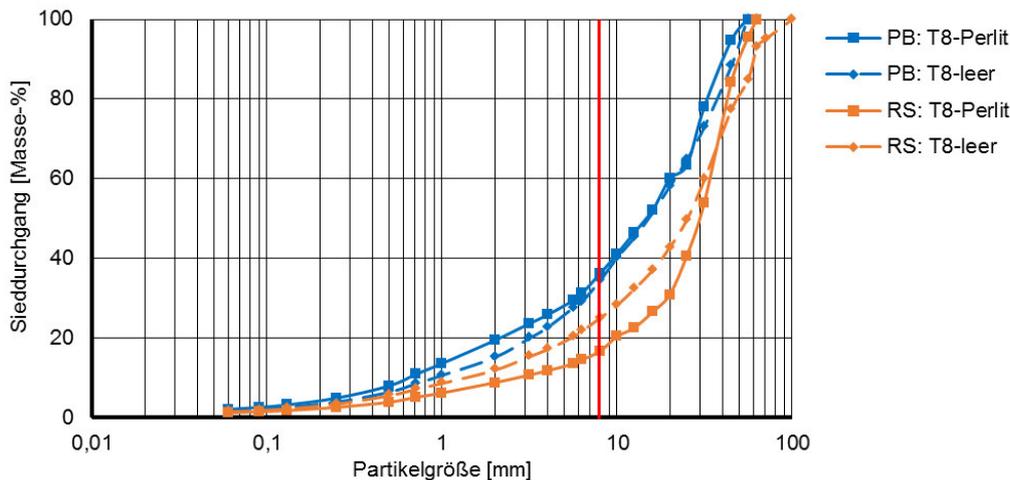


Bild 18: Sieblinien der Wände 1 und 3 nach einer einstufigen Zerkleinerung im Rotorshredder

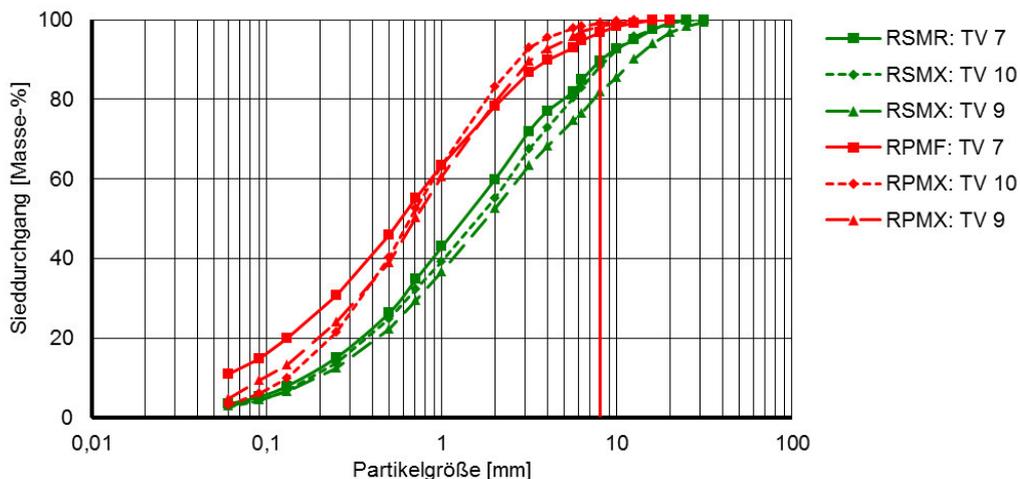


Bild 19: Sieblinien der Wände 7, 8 und 9 nach der zweistufigen Zerkleinerung im Rotorschleudbrecher RSMX bzw. in der Rotorprallmühle

Werden alle Zerkleinerungsergebnisse aus Bild 16, Bild 18 und Bild 19 gemeinsam betrachtet, ist zu erkennen, dass ein Zusammenhang zwischen dem Energieeintrag während des Brechvorgangs, ausgedrückt als Rotorumfangsgeschwindigkeit der Zerkleinerungsmaschine, und dem Anteil der Feinfraktion  $\leq 8$  mm existiert (Bild 20). Mit steigender Rotorumfangsgeschwindigkeit der Zerkleinerungsmaschinen, steigt der Anteil der Feinfraktion. Hierbei ist ein logarithmischer Zusammenhang zu erkennen, der vermutlich damit begründet werden kann, dass mit sinkender Partikelgröße ein höherer Energieeintrag zur weiteren Korngrößenreduktion benötigt wird. Bis auf den Rotorshredder entstehen bei allen untersuchten Zer-

kleinerungsaggregaten höhere Feinkornanteile im Vergleich zu der Zerkleinerung in Backen- und Walzenbrechern.

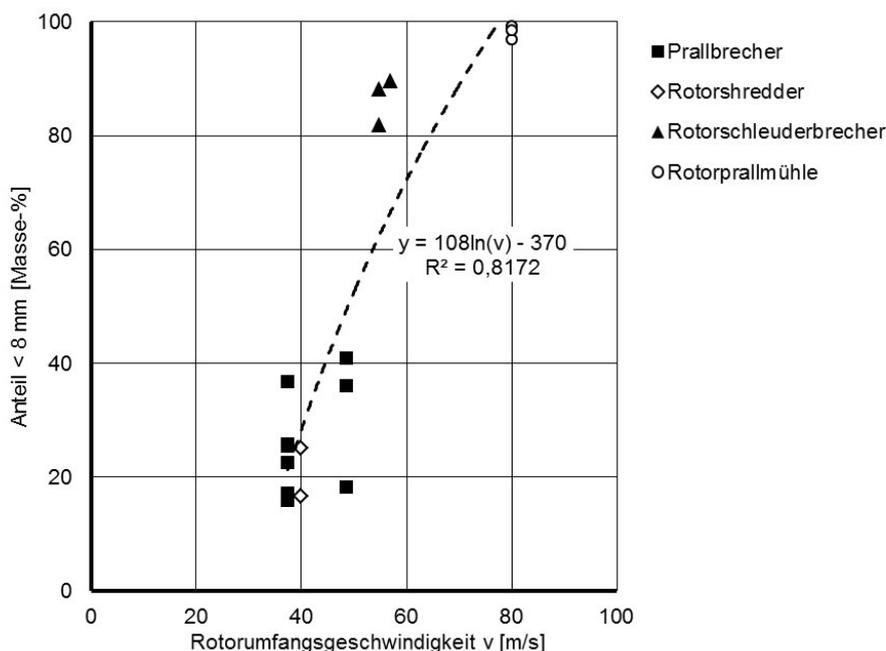


Bild 20: Zusammenhang zwischen der Rotorumfangsgeschwindigkeit und dem Anteil  $\leq 8$  mm

## 4.2 Partikelform

Für die Kornformanalyse wurden die Parameter Sphärizität und Breite/Länge- (B/L-) Verhältnis der Ziegelpartikel  $> 4$  mm bestimmt. Die Sphärizität beschreibt den Quotienten aus dem Umfang eines flächengleichen Kreises und dem gemessenen Partikelumfang. Das B/L-Verhältnis ist der Quotient aus Breite und Länge des Partikels. Ist die Sphärizität gleich 1, handelt es sich um kreisrunde, ist  $B/L = 1$  um quadratische Partikel. In Tabelle 6 und Tabelle 7 sind die Werte für die Sphärizität und das B/L-Verhältnis in Abhängigkeit der Fraktionen für die Produkte dargestellt, die durch die einstufige Zerkleinerung mittels Prallbrecher gebildet wurden. Aus den Ergebnissen lässt sich keine Abhängigkeit von Scherbenrohddichte, Steindichte, Füllung oder Kammergeometrie ableiten.

Tabelle 6: Sphärizität der zerkleinerten Produkte nach einer einstufigen Zerkleinerung mittels Prallbrecher (PB)

	Fraktion [mm]			
	4/8	8/11,2	11,2/16	16/22,4
Wand 1	0,76	0,77	0,79	0,78
Wand 2	0,76	0,76	0,76	0,75
Wand 3	0,77	0,78	0,78	0,77
Wand 4	0,74	0,73	0,76	0,66
Wand 5	0,62	0,77	0,78	0,79
Wand 6	0,73	0,75	0,76	0,71
Wand 7	0,76	0,78	0,79	0,79
Wand 8	0,75	0,77	0,78	0,75
Wand 9	0,77	0,78	0,80	0,78
Ø Sphärizität ± Standardabweichung	0,74 ± 0,05	0,77 ± 0,02	0,78 ± 0,01	0,75 ± 0,04

Tabelle 7: B/L-Verhältnis der zerkleinerten Produkte nach einer einstufigen Zerkleinerung mittels Prallbrecher (PB)

	Fraktion [mm]			
	4/8	8/11,2	11,2/16	16/22,4
Wand 1	0,64	0,64	0,66	0,64
Wand 2	0,64	0,64	0,64	0,63
Wand 3	0,64	0,64	0,65	0,65
Wand 4	0,63	0,64	0,66	0,65
Wand 5	0,64	0,64	0,65	0,65
Wand 6	0,63	0,64	0,66	0,64
Wand 7	0,64	0,65	0,65	0,65
Wand 8	0,64	0,64	0,65	0,64
Wand 9	0,64	0,65	0,66	0,64
Ø B/L-Verhältnis ± Standard-abweichung	0,64 ± 0,00	0,64 ± 0,00	0,65 ± 0,01	0,64 ± 0,01

Bei der Verwendung des Rotorschleuderbrechers (RSMX) weisen vor allem größere Partikel eine gleichmäßigere Form auf als bei Einsatz des Prallbrechers, was durch höhere Werte für die Sphärizität und das B/L-Verhältnis zum Ausdruck kommt. Ursache ist die höhere Feinheit durch die zweite Beanspruchung an der Prallwand.

#### 4.3 Materialzusammensetzung und Aufschlussgrad

Für alle mit dem Prallbrecher zerkleinerten Wände wurden die Partikel > 8 mm mittels Siebung abgetrennt und händisch sortiert, ausgezählt und ausgewogen. Die Brechprodukte ausgewählter Wände wurden zusätzlich in einzelne Korngruppen fraktioniert und analysiert. Bei der Sortierung wurde zwischen Steinwolle, Ziegel, Verbundpartikeln und Putz unterschieden (Bild 21). Ziegel mit geringen, nicht abreibbaren Anhaftungen wurden ebenfalls als aufgeschlossen betrachtet und den Ziegeln völlig ohne Anhaftung zugerechnet. Eine Unterscheidung der Putze war nicht möglich. Die Ergebnisse für die Zusammensetzung der Körnungen > 8 mm sind in dem Bild 22 der Zusammensetzung des jeweiligen Ausgangsmaterials gegenübergestellt. Danach nimmt der Ziegelgehalt des gebrochenen Materials > 8 mm gegenüber dem Ziegelgehalt, der in den Wänden vorlag, etwas zu. Ursache ist die Abnahme des Putzes in der Fraktion > 8 mm. Der Putz geht in die feinen Fraktionen über. Der Anteil im Ausgangsmaterial liegt deutlich über dem der Fraktion > 8 mm. Bei der Steinwolle sind die Unterschiede zwischen dem Gehalt, der im jeweiligen Ausgangsmaterial vorlag, und dem Gehalt in der Fraktion > 8 mm gering. In fast allen Fällen kommt es zu einer leichten Anreicherung.



Bild 21: Sortiertes Material aus Steinwolle, Ziegel, Verbundpartikel, Putz (von links nach rechts)

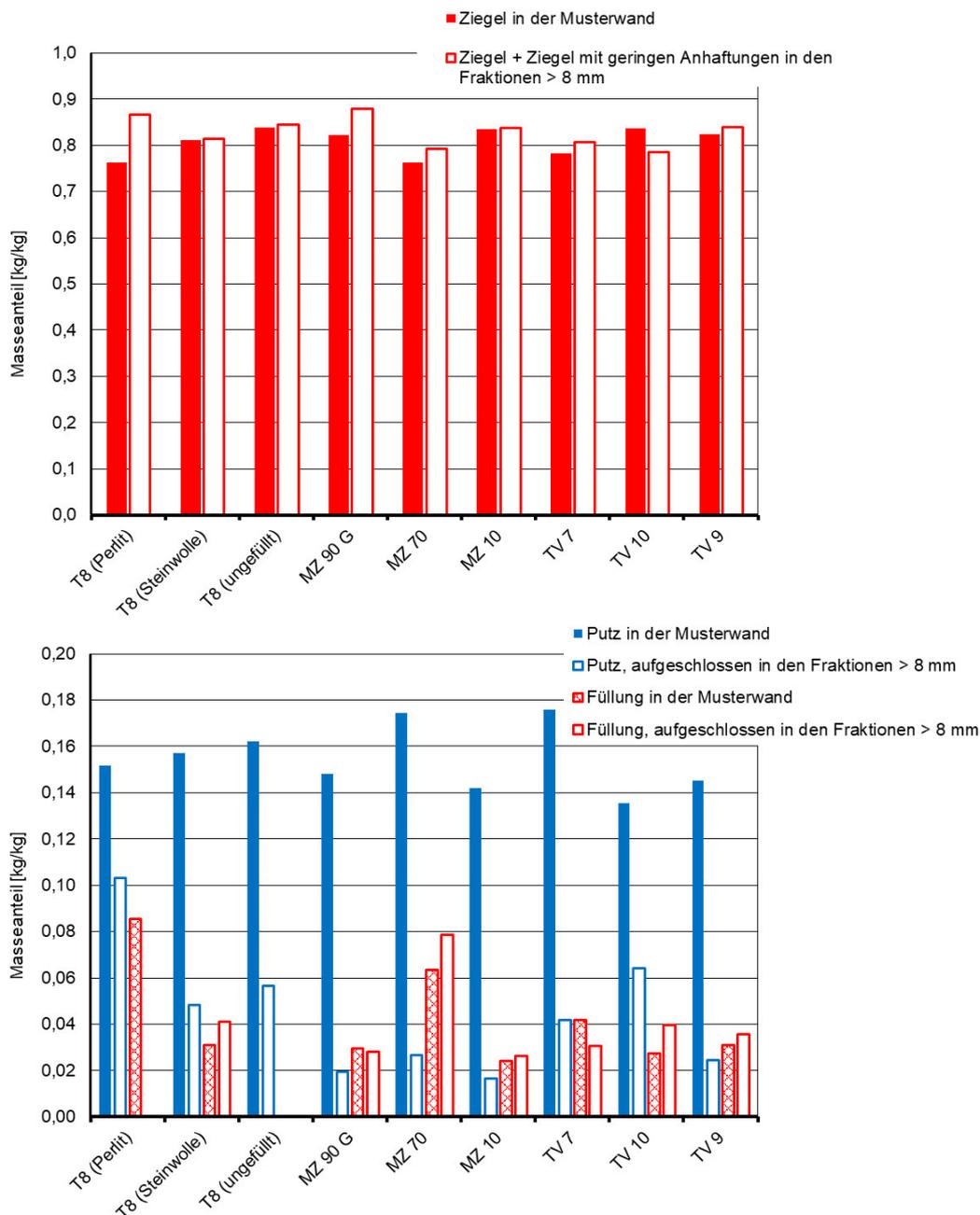


Bild 22: Gegenüberstellung der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials mit der Zusammensetzung der Körnungen > 8 mm für alle Wände

Der Einfluss der Partikelgröße wurde für fünf ausgewählte Wände detaillierter untersucht. Die Ergebnisse sind im Bild 23 zusammengefasst. Daraus gehen folgende Aussagen hervor:

- Die Ziegelanteile in den untersuchten Fraktionen zeigen nur geringe Veränderungen. Sie sind in den mittleren Fraktionen etwas angereichert. In der größten Fraktion ist eine leichte Abreicherung zu erkennen.
- Die Putzanteile nehmen mit zunehmender Partikelgröße eindeutig ab. Ab einer Partikelgröße von 22,4 mm sind die Körnungen nahezu putzfrei.
- Der Anteil der Verbundpartikel nimmt mit zunehmender Partikelgröße eindeutig zu.
- Für die Steinwolle sind keine so eindeutigen Abhängigkeiten zu erkennen. Tendenziell nimmt aber der Anteil mit zunehmender Partikelgröße zu.

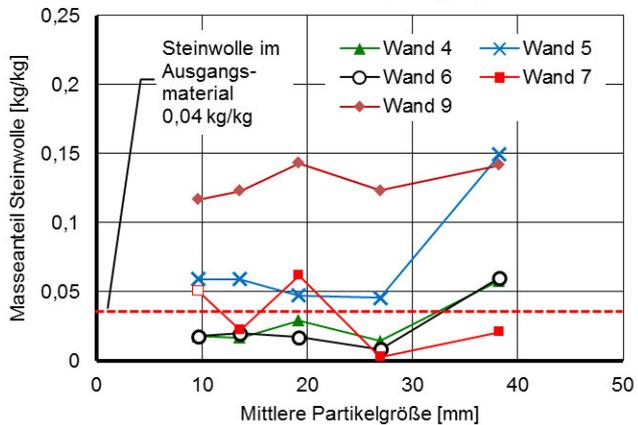
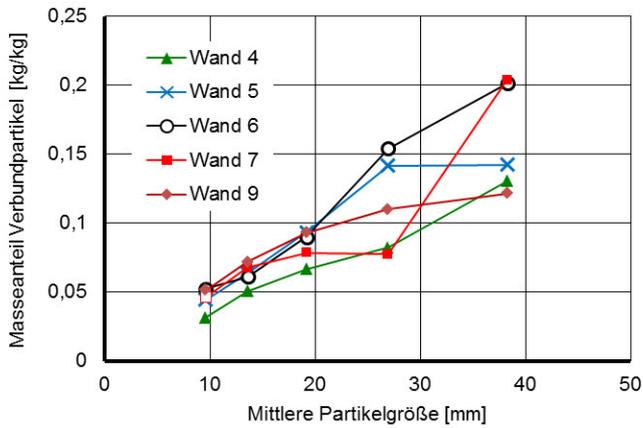
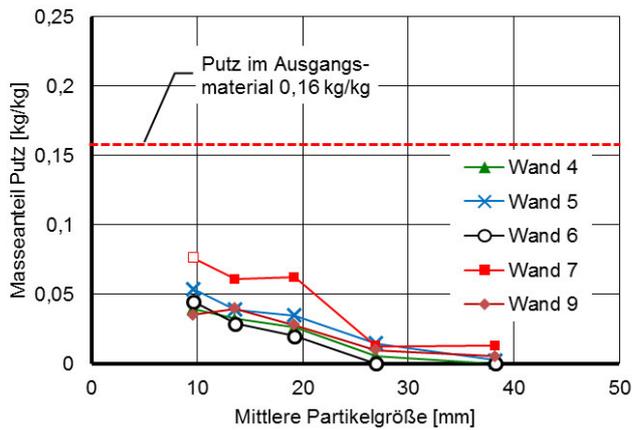
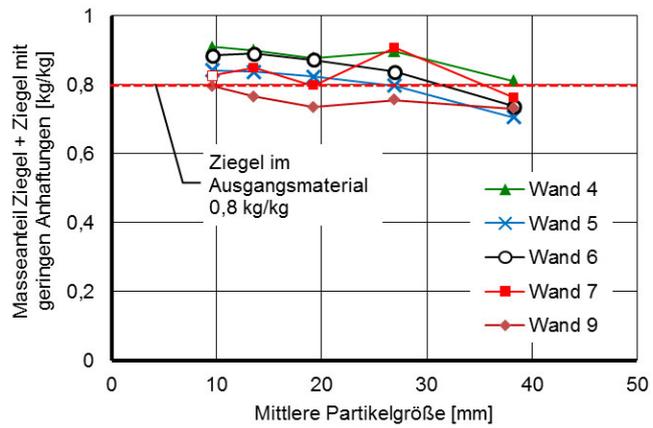


Bild 23: Masseanteile an Ziegeln, Putzen, Verbundpartikeln sowie Steinwolle in den Fraktionen 8/11,2, 11,2/16, 16/22,4, 22,4/31,5 und > 31,5 mm der Zerkleinerungsprodukte unterschiedlicher Wände

Haupteinflussgrößen für das Aufschlussverhalten von Stoffverbänden sind die Art und die Geometrie des Verbundes, die Zerkleinerungswiderstände der Verbundpartner sowie die Partikelgröße der Zerkleinerungsprodukte. Im vorliegenden Fall gilt, dass die Putze mit den Ziegeln stoffschlüssig verbunden sind, während die Verbindung zwischen den Ziegeln und der Steinwolle als formschlüssig betrachtet werden kann. Für die Zerkleinerungswiderstände gilt, dass der Widerstand der Ziegel größer als der der Putze ist. Die Steinwolle weist praktisch keinen Zerkleinerungswiderstand auf. Der experimentelle Befund, dass der Masseanteil der Verbundpartikel, die nach der Zerkleinerung im Produkt vorgefunden werden, mit zunehmender Partikelgröße zunimmt, folgt aus der Verbundgeometrie. Als Grenzwert kann ein unzerkleinertes Wandsegment, das einen Anteil an Verbundpartikeln von 1 kg/kg aufweist bei einer Partikelgröße von 50,6 cm, die der Raumdiagonalen entspricht, angesehen werden. Der Befund, dass sich der Putz in den feineren Fraktionen anreichert, ergibt sich aus den unterschiedlichen Zerkleinerungswiderständen. Der leichter zerkleinerbare Putz geht in den feineren Fraktionen über. Für die Steinwolle sind keine so eindeutigen Aussagen möglich.

#### 4.4 Chemische Zusammensetzung

Für die Ermittlung der chemischen Zusammensetzung der Ausgangskomponenten wurden die gefüllten Ziegel händisch zerlegt. Ebenso wurden getrennte Proben aus Putz hergestellt. Bei den Zerkleinerungsprodukten konzentrierte sich die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung auf die feinen Fraktionen, die nicht händisch sortiert werden konnten. Alle zu untersuchenden Materialien wurden zunächst auf Korngrößen  $< 63 \mu\text{m}$  gemahlen. Daran wurden folgende Messungen vorgenommen:

- Der Glühverlusts GV wurde gravimetrisch anhand der Massenänderung beim Glühen (1 h bei  $(1025 \pm 5)^\circ\text{C}$ ) bestimmt. Die Angaben des Glühverlustes beziehen sich auf die bei  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$  getrockneten Proben.
- Die Oxidzusammensetzung wurde mittels Röntgenfluoreszenzanalyse unter Einsatz eines energiedispersiven Spektrometers mit Sekundärtargets (NEX CG; Pd-Anode; max. 50 W, max. 50 kV) der Firma Rigaku ermittelt. Die Ermittlung der chemischen Zusammensetzung der sortenreinen Ausgangsmaterialien Ziegel, Steinwollen und Perlit erfolgte an Schmelztabletten. Die Messung der chemischen Zusammensetzung der Putze und der Zerkleinerungsprodukte erfolgte an Pulverpresslingen.
- Der Schwefelgehalt wurde zusätzlich an den bei  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$  getrockneten Proben mittels katalytischer Verbrennung mit reinem Sauerstoff an einem Kohlenstoff-Schwefel-Analysator CS-2000 der Firma Eltra bestimmt.

Anhand der chemischen Zusammensetzung der sortenreinen Ausgangskomponenten erfolgte die Auswahl geeigneter, chemischer Leitoxide zur Unterscheidung zwischen Ziegel, Dämmstoff und Putz. Die Ergebnisse im Bild 24 und Tabelle 8 zeigen die systematischen, herstellungsbedingten bzw. auf die Entstehung zurückgehenden Unterschiede zwischen den Ziegeln, den Steinwollen und dem Perlit einerseits und den Putzen andererseits. Die CaO-Gehalte und die Sulfatgehalte sind für die Ziegel, Steinwollen und den Perlit geringer als bei den Putzen. Bei den Gehalten an  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , MgO und  $\text{K}_2\text{O}$  liegen die Werte der Ziegel, Steinwollen und des Perlits über denen der Putze. Beide Putze weisen deutlich höhere Glühverluste als alle anderen Komponenten auf. Für den Kalk-Gips-Putz ist ein hoher  $\text{SO}_3$ -Gehalt kennzeichnend. Der Kalk-Zement-Putz hat den höchsten CaO-Gehalt von allen gegenübergestellten Bestandteilen. Glühverlust, Sulfatgehalt und CaO-Gehalt können somit als Leitgrößen für die Putze angesehen werden. Bei den Ziegeln, den Steinwollen und dem Perlit ist die Auswahl von Leitoxiden nicht so eindeutig. Nach einer statistischen Analyse bestehen zwischen dem Glühverlust und den Gehalten der Oxide  $\text{SiO}_2$ , CaO, MgO und  $\text{K}_2\text{O}$  der Ziegel einerseits und der Steinwolle andererseits signifikante Unterschiede. Zwischen den Gehalten an  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  und  $\text{SO}_3$  bestehen keine Unterschiede. Werden der Glühverlust und der CaO-Gehalt ausgeklammert, weil diese stark von den Putzen beeinflusst werden, stellen  $\text{SiO}_2$ , MgO und  $\text{K}_2\text{O}$  mögliche Leitgrößen dar.

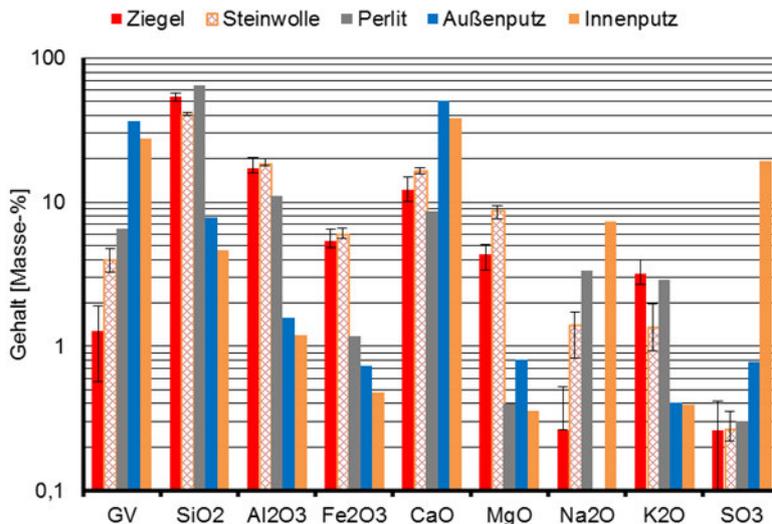


Bild 24: Chemische Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien

Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien, mögliche Leitoxide sind gelb bzw. grün hinterlegt

		GV	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Summe (Oxide+GV)
		[Masse-%]									[Masse-%]
Ziegel Wände 1,2,4,5,6,8,9	Mittel	1,27	54,18	17,14	5,39	12,19	4,36	0,26	3,21	0,26	98,27
	Standardabw.	0,54	2,65	1,44	0,62	1,82	0,55	0,27	0,50	0,16	
	Min	0,62	50,98	14,02	4,31	9,38	3,64	0,00	2,46	0,10	
	Max	1,97	58,07	18,43	5,95	14,31	5,33	0,67	3,75	0,51	
Steinwolle Wände 2,4,5,6,8,9	Mittel	3,98	40,71	18,47	6,02	16,48	8,77	1,40	1,35	0,26	97,44
	Standardabw.	0,58	0,67	0,87	0,40	0,65	0,74	0,32	0,49	0,05	
	Min	3,23	39,77	16,93	5,39	15,50	8,05	1,07	0,73	0,17	
	Max	4,68	41,70	19,17	6,45	17,24	9,85	1,97	1,77	0,30	
Preilit, Wand 1		6,54	64,67	11,03	1,17	8,67	0,40	3,36	2,91	0,30	99,05
Kalk-Zement-Außenputz		36,80	7,90	1,57	0,73	50,88	0,80	n.d.	0,41	0,78	99,87
Kalk-Gips-Innenputz		27,50	4,68	1,20	0,48	38,57	0,35	7,32	0,39	19,43	99,92

Um die An- und Abreicherungs Vorgänge auch in den händisch nicht sortierbaren Fraktionen zu ermitteln, wurden die Zerkleinerungsprodukte der Wände 4, 5 und 6 in die Korngruppen < 4, 4/8 und > 8 mm fraktioniert. Die Gegenüberstellung der Gehalte an CaO und SO<sub>3</sub> sowie des Glühverlustes als Leitgrößen für die Putze zeigen eine Abnahme von der feinsten zur größten Fraktion (Bild 25). Die bereits bei der händischen Sortierung ermittelte Zunahme des Putzgehaltes mit abnehmender Partikelgröße setzt sich also in den feinen Fraktionen fort.

Bei den Oxiden, die für eine Unterscheidung zwischen Ziegel und Steinwolle herangezogen werden können, zeigt sich keine so eindeutige Abhängigkeit (Bild 26). Aus den Abhängigkeiten der SiO<sub>2</sub>- und K<sub>2</sub>O-Gehalte von den Partikelgrößen der Fraktionen ergibt sich eine Anreicherung des Ziegels in den groben Fraktionen. Ebenso spricht der Verlauf des MgO-Gehaltes für eine Anreicherung der Steinwolle in der Grobfraktion.

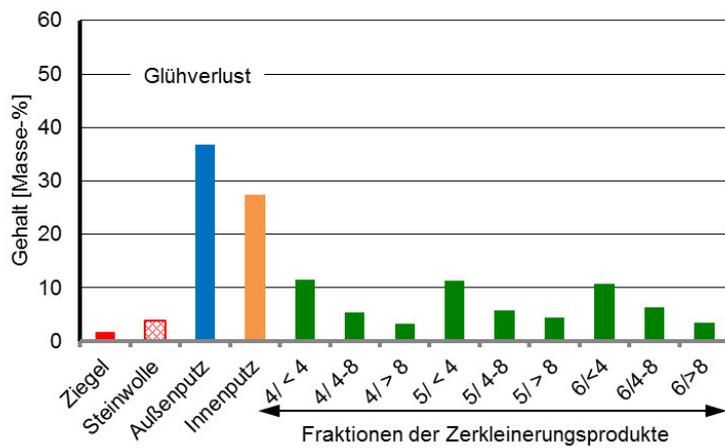
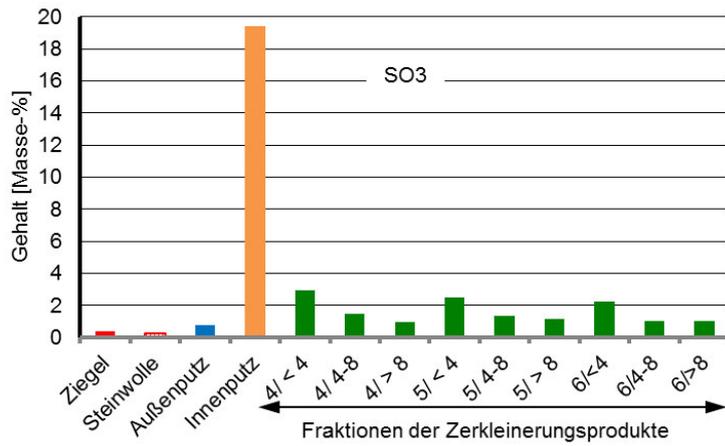
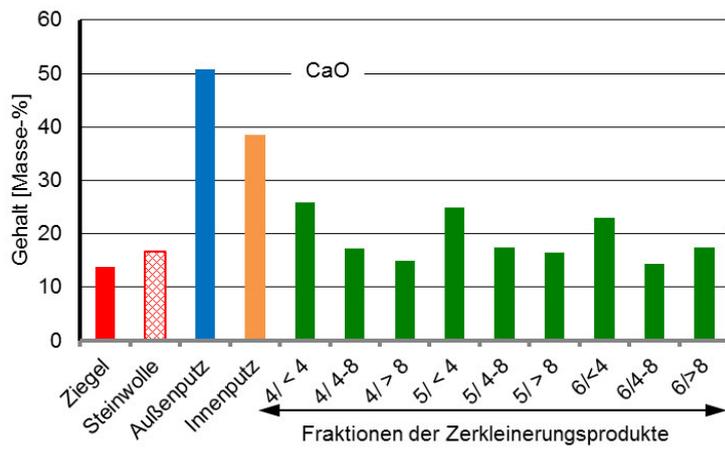


Bild 25: CaO- und SO<sub>3</sub>-Gehalte sowie Glühverluste von Fraktionen der Zerkleinerungsprodukte der Wände 4,5 und 6

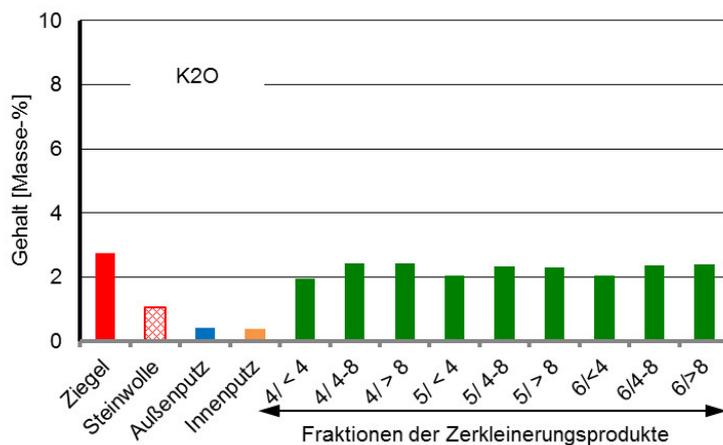
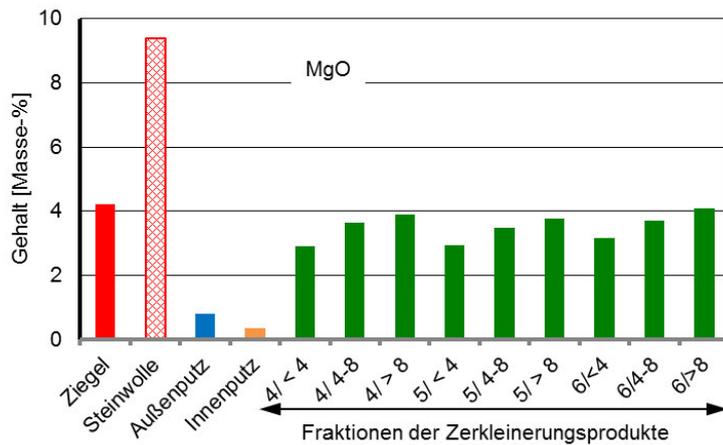
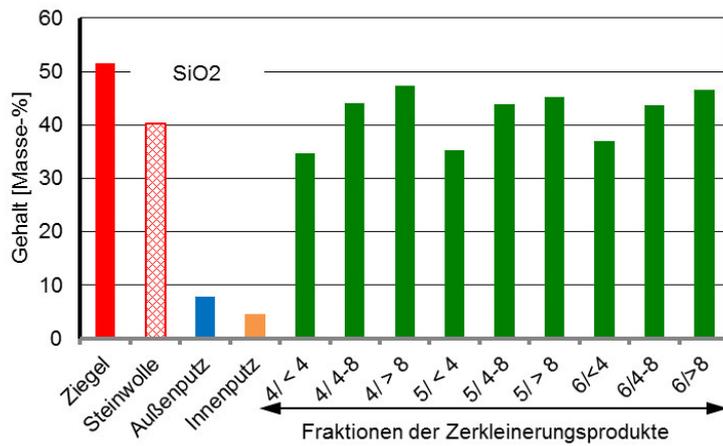


Bild 26: SiO<sub>2</sub>-, MgO- und K<sub>2</sub>O-Gehalte von Fraktionen der Zerkleinerungsprodukte der Wände 4,5 und 6

Eine Zusammenführung der mit den unterschiedlichen Methoden erzielten Sortierergebnisse wäre von wissenschaftlichem Interesse, würde den Rahmen dieser Auswertung aber sprengen.

## 5 Versuche zur Sortierung der Mauerwerkgemische aus den Prallbrecher-Versuchen

### 5.1 Verwendete Methoden

Aus den Brechprodukten sollten möglichst sortenreine Ziegelkörnungen und Mineralwollkonglomerate zurückgewonnen werden. Dafür wurden die Eignung der Windsichtung als trockenes Verfahren und der Schwimm-Sink-Trennung als nasses Verfahren untersucht. Die Windsichtung wurde im großtechnischen Maßstab bei der Fa. H. Werner Recycling GmbH & Co. KG in Aschara erprobt. Die Schwimm-Sink-Trennung wurde im Labormaßstab untersucht.

Für die Windsichtungsversuche wurde ein Trommelwindsichter der Marke AirMaster verwendet, welcher aus einem Zuführband, einer Luftdüse, einer Rotations- bzw. Separiertrommel  $\varnothing$  800 mm und einem Abführband besteht (Bild 27).

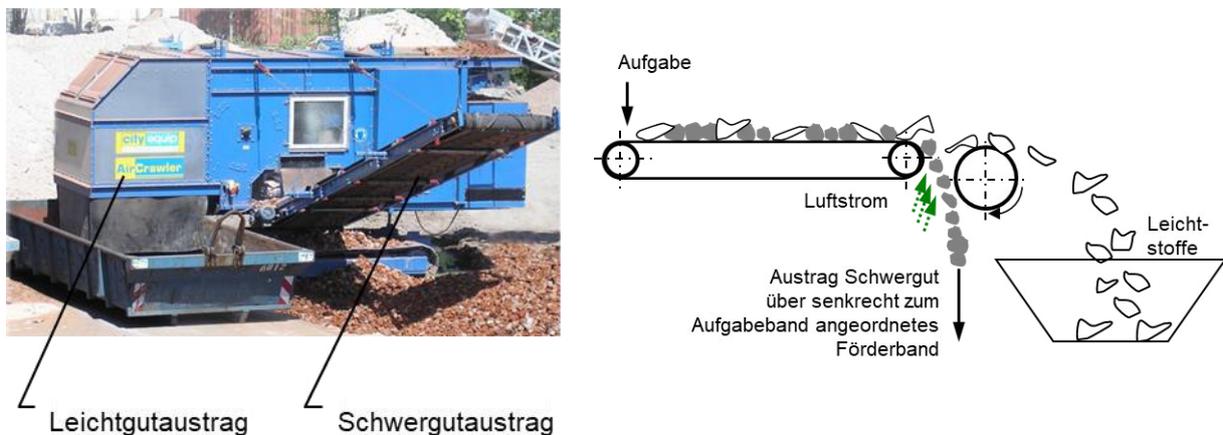


Bild 27: Aufbau des Windsichters (Bild Christophel, Schema eigene Darstellung)

Die Schwimm-Sink-Trennung wurde nach entsprechender Probenentnahme an Abbruchmaterial der Fraktionen 4/8 und  $> 8$  mm in einem Eimer mit einem Volumen von 10 l durchgeführt. Als Trennflüssigkeit wurde Wasser (20 °C) verwendet. Die aufschwimmenden Bestandteile wurden mittels Sieb abgeschöpft. Die Schwimm- und die Sinkfraktionen wurden jeweils bis zur Massekonstanz bei 40 °C getrocknet und dann gewogen.

### 5.2 Aufbereitungsablauf der Windsichterversuche und Eigenschaften der Produkte

Das Korngemisch, das aus den Wänden 4,5 und 6 nach der Zerkleinerung im Prallbrecher stammte, wurde einer dem Windsichter vorgeschalteten Schwingsiebmaschine aufgegeben, um das Feinkorn  $< 10$  mm abzutrennen, das nicht mittels Windsichtung verarbeitet werden kann.

Das Grobgut  $> 10$  mm wurde dem Sichter aufgegeben und dort in Schwergut und Leichtgut getrennt (Bild 28). Von dem Schwer- und dem Leichtgut wurde die Partikelgrößenverteilung mittels Siebung bestimmt. Beide Produkte wurden händisch sortiert und die Ergebnisse denen des ungesichteten Materials sowie der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials gegenüber gestellt.



Bild 28: Materialausträge während der Windsichterversuche: Siebfraction < 10 mm (links), Steinwolle als Leichtgut (rechts)

An den Partikelgrößenverteilungen kann abgelesen werden (Bild 29), dass durch die Vorabsiebung keine vollständige Abtrennung der Partikel < 10 mm erreicht wurde. Der dem Sichter zugeführte Materialstrom enthielt noch Partikel < 10 mm, die zum überwiegenden Teil in das Leichtgut übergehen. Die Sortierergebnisse der Sichterversuche (Bild 30) zeigen, dass die Schwerfraktion nur noch aus Ziegel-, Putz- und Verbundpartikeln besteht. Die gesamte Steinwolle ist in das Leichtgut übergegangen. Allerdings enthält das Leichtgut neben der Steinwolle noch deutliche Anteile an Ziegel- und Putzpartikeln.

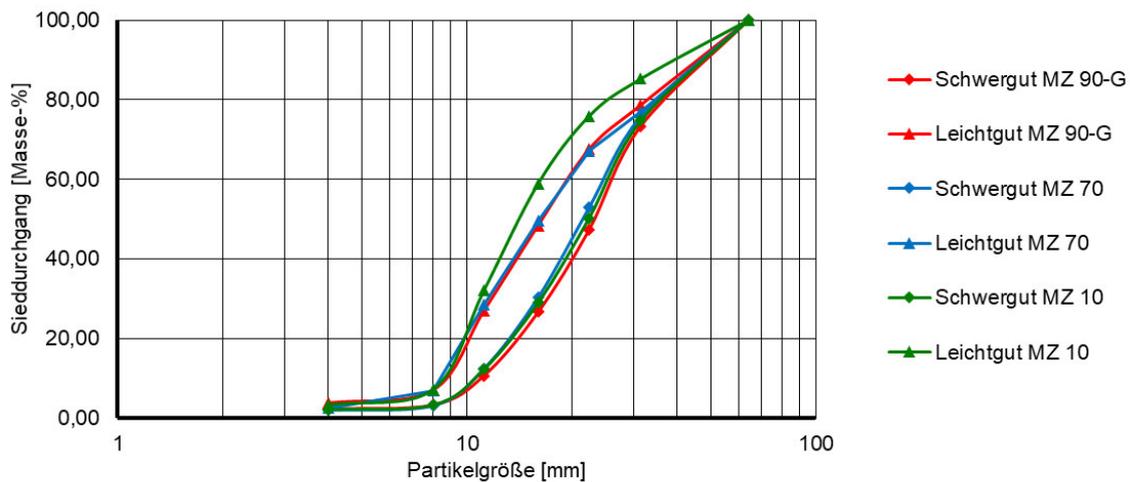


Bild 29: Sieblinien von Schwergut und Leichtgut nach der Windsichtung

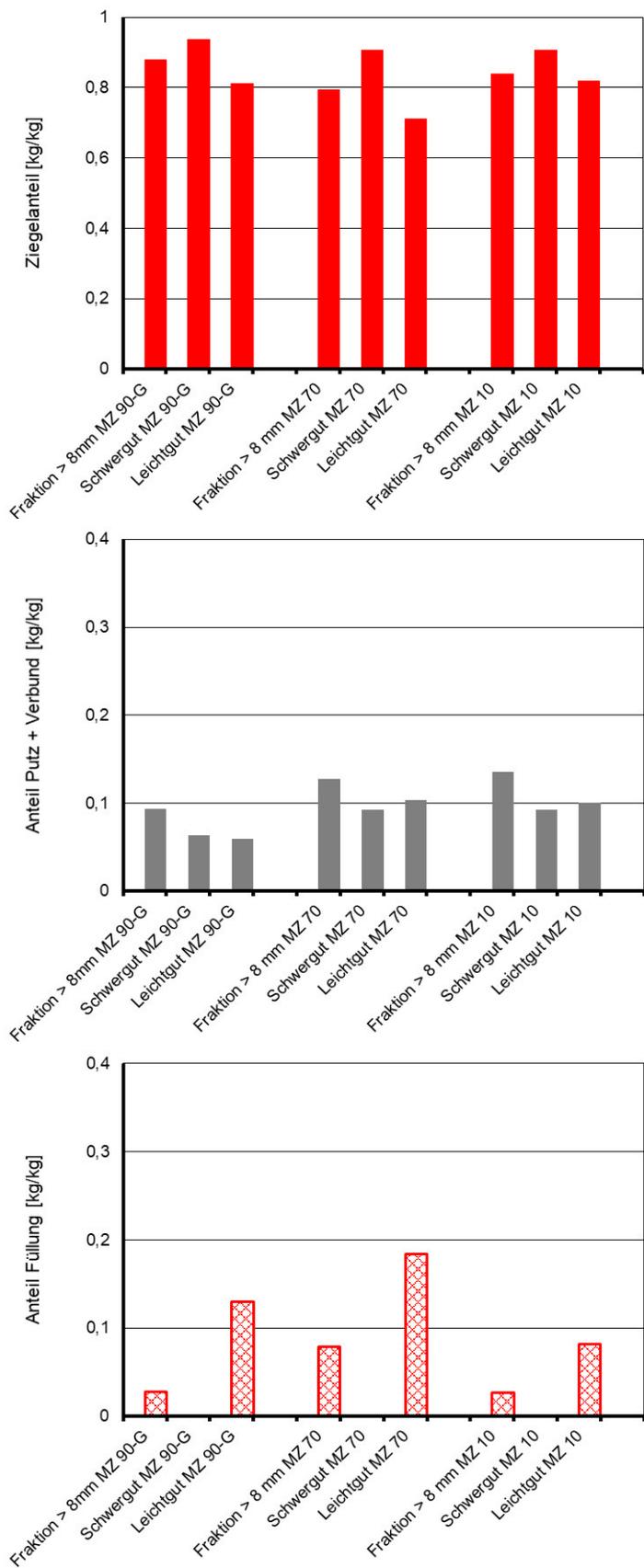


Bild 30: Masseanteile an Ziegeln, Putzen und Verbundpartikeln sowie Steinwolle im Aufgabematerial und im Schwer- und Leichtgut der Windsichtung

**Annahme:** Die Zusammensetzung des Aufgabematerials entspricht der der Fraktion > 8 mm.

### 5.3 Ergebnisse der Schwimm-Sink-Versuche

Die Schwimm-Sink-Analyse wurde an den Fraktionen 4/8 und > 8 mm durchgeführt. Es eröffnet sich also die Möglichkeit, auch feine Körnungen zu sortieren, was allerdings im technischen Maßstab zu überprüfen wäre. Die Schwimmfraktionen der Aufgabematerialien 4/8 und > 8 mm belaufen sich auf 0,01 bis 0,038 kg pro kg Materialaufgabe. Die Sinkfraktion beträgt 0,895 bis 0,998 kg/kg (Tabelle 9).

Tabelle 9: Ergebnisse der Schwimm-Sink-Sortierung

	Fraktion	Schwimmfraktion	Sinkfraktion	Windsichtung	Händische Sortierung	
				Stein (Schwergut)	Steinwolle	Stein
				[kg/kg]	[kg/kg]	[kg/kg]
Wand 2	4/8	0,004	0,995		0,005	0,995
	> 8	0,038	0,960		0,041	0,959
Wand 4	4/8	0,001	0,998			
	> 8	0,020	0,979	0,744	0,028	0,972
Wand 5	4/8	0,029	0,967			
	> 8	0,104	0,895	0,726	0,079	0,921
Wand 6	4/8	0,005	0,991			
	> 8	0,030	0,969	0,693	0,026	0,974
Wand 7	4/8	0,017	0,969		0,021	0,979
	> 8	0,022	0,971		0,031	0,969
Wand 8	4/8	0,034	0,952		0,041	0,959
	> 8	0,030	0,966		0,040	0,960
Wand 9	4/8	0,006	0,988		0,008	0,992
	> 8	0,031	0,967		0,036	0,964

Fasst man die Ergebnisse der händischen Sortierung in den Kategorien "Mineralwolle" und "Stein" zusammen, ergibt sich für die betrachteten Fraktionen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Schwimm-Sink-Trennung. Die Masseanteile "Stein" im Schwergut der Windsichtung sind demgegenüber deutlich geringer, da im Leichtgut noch ein nicht zu vernachlässigender Anteil schweres Material enthalten ist.

## 6 Untersuchungen zum Aufbereitungsablauf Backenbrecher-Klassierung-Windsichtung

### 6.1 Verwendete Methoden und Probematerial

Da aus den vorliegenden Untersuchungen und Erfahrungen bekannt ist, dass die Verwendung eines Prallbrechers zu einem ausreichenden Aufschluss der Steinwolle-Pads aus den Hintermauerziegeln führt, jedoch gleichzeitig mit einer größeren Entstehung von RC-Sanden verbunden ist, wurden großtechnische Versuche zur einstufigen Zerkleinerung durch einen Backenbrecher bei der Fa. H. Werner Recycling GmbH & Co.KG in Aschra durchgeführt. Hierbei wurde eine gesamte Aufbereitungsstrecke betrachtet, bestehend aus:

- mobilem Backenbrecher mit Vibrationsaufgeber, aktiver Vorabsiebung und Überbandmagnet der Baureihe Premiertrak 300 der Fa. Powerscreen,
- Trommelwindsichter der Marke AirMaster, welcher aus einem Zuführband, einer Luftdüse, einer Rotationstrommel bzw. Separiertrommel  $\varnothing$  800 mm und einem Abführband besteht (entsprechend der Versuche in Kap. 5.1).

Das Aufgabematerial (Bild 31) bestand aus:

- unverputzten, unvermauerten mit Steinwolle-Pads gefüllten Ziegeln unterschiedlicher Varietäten entsprechend Tabelle 2 und
- Abbruchmaterial einer Ziegelmauer mit zuvor vermauerten, unverputzten, mit Steinwolle-Pads gefüllten Hochlochziegeln.

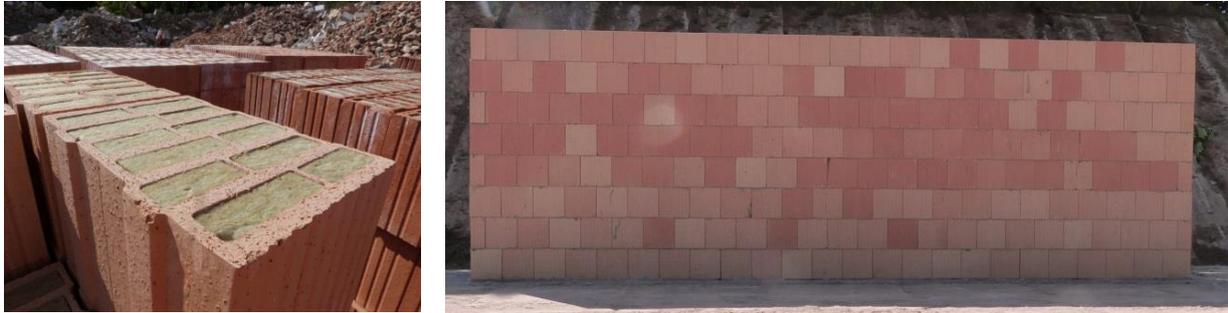


Bild 31: Mauerziegel (links) und mit Dünnbettmörtel vermauerte Ziegel (rechts)

## 6.2 Aufbereitungsablauf

Die Ausgangsstoffe wurden mittels eines Backenbrechers bei einer Spaltweite von 80 mm aufgebrochen (Bild 32).



Bild 32: Backenbrecher (links) mit Materialzuführung (mittig) und Brechbacken (rechts)

Das Bruchmaterial wurde einer dem Windsichter vorgeschalteten Schwingsiebmaschine aufgegeben (Maschenweite 10 mm). Das Grobgut > 10 mm wurde dem Windsichter zugeführt und in Schwergut und Leichtgut getrennt. Das zu trennende Material wurde mit einer Zuführungsgeschwindigkeit von 1,6 m/s bis zur Abwurfkante transportiert. Die Zusammensetzung des gesichteten Materials wurde augenscheinlich begutachtet. Es erfolgte keine Probenahme.

## 6.3 Ergebnisse

Bild 33 zeigt die zurückgewonnenen Fraktionen nach der Zerkleinerung und Windsichtung. Die Versuche an den Einzelsteinen und dem unverputztem Mauerwerk im Backenbrecher lieferten im Gegensatz zu den Prallbrechern sehr geringe Mengen an Feinkorn (ca. < 5 Masse-%) und sowohl Leicht- als auch Schwergut in hohen Reinheitsgraden. Das Leichtgut bestand zum größten Teil aus der Steinwolle, die zum Teil noch in Form von Pads vorlag.



Bild 33: Feinfraktion nach Vorabsiebung (links) sowie nach der Windsichtung sortenrein zurückgewonnene Ziegelscherben (Schwerfraktion, mittig) und Steinwolle-Pads (Leichtgut, rechts)

Aufgrund dieses hohen Reinheitsgrads ist eine Rückführung der Steinwolle-Fraktion in den Rockwool-Recyclingprozess möglich. Für die Bestimmung der maximal erlaubten Restmenge an Ziegelbruch im Leichtgut wären Folgeuntersuchungen mit stufenweise verringerten Reinheitsgraden empfehlenswert.

## 7 Aufbereitungsabläufe für dämmstoffgefüllte Ziegel

### 7.1 Gegenüberstellung von einstufigen Varianten

Anhand der Untersuchungen lassen sich verschiedene Aufbereitungsabläufe zur sortenreinen Rückgewinnung von Ziegel und Steinwolle aufzeigen. Dargestellt sind im Folgenden drei mögliche Varianten (Bild 34 bis Bild 36). Die Varianten 1 und 2 wurden hinsichtlich verputzter, gefüllter Ziegelwände untersucht. Variante 3 wurde an nicht verputzten, gefüllten Ziegeln und einer unverputzten Wand untersucht.

#### Variante 1:

Entspricht dem bei der Bauschutttaufbereitung häufig anzutreffenden Verfahrensablauf. In Bezug auf das Vorsiebmaterial wird angenommen, dass es wie bei der Aufbereitung von herkömmlichem Bauschutt aus Boden und beim Abbruch entstehenden Bruchstücken verschiedenster Materialarten besteht. Dieses Material wird hier aus der Betrachtung ausgeklammert.

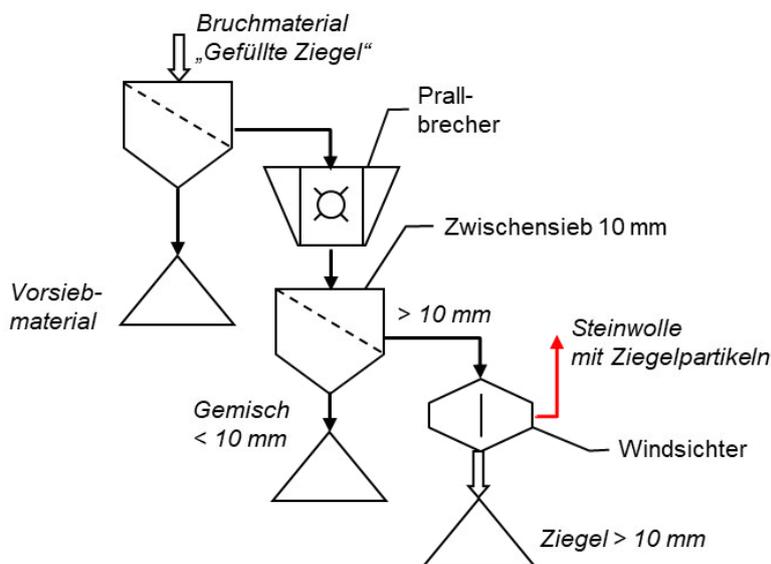


Bild 34: Verfahrensablauf mit Prallbrecher und Windsichter

### Hauptaussagen:

- 30 bis 60 % des Aufgabematerials gehen nach der Zwischenabsiebung in das Gemisch < 10 mm über und können nicht gesichtet werden.
- Das Schwergut aus dem Windsichter ist steinwollefrei, enthält aber Putzanteile.
- Im Leichtgut aus dem Windsichter bleiben Ziegelpartikel zurück.

### Mögliche Verwertungen:

- Fraktion < 10 mm aus der Zwischenabsiebung: Verfüllungen oder alternative Verwertungen wie Aufbaukörnungen
- Schwergut: Vegetationstechnische Anwendungen, Sulfatgehalt muss überprüft werden
- Leichtgut: Steinwolleherstellung, wenn Ziegelanteil nicht stört

### Variante 2:

Entspricht dem bei der Bauschutttaufbereitung in einigen stationären Anlagen anzutreffenden Verfahrensablauf. Als Schwimm-Sink-Sortierer kann beispielsweise ein Leichtstoffabscheider mit Schneckenaustrag eingesetzt werden.

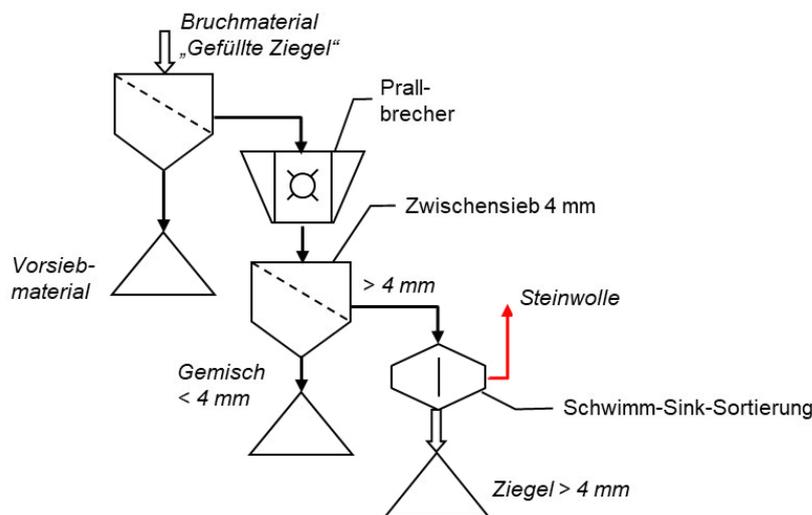


Bild 35: Verfahrensablauf mit Prallbrecher und Schwimm-Sink-Sortierung

### Hauptaussagen:

- 15 bis 40 % des Aufgabematerials gehen in das Gemisch < 4 mm über und können nicht sortiert werden.
- Das Schwergut aus der Schwimm-Sink-Sortierung ist steinwollefrei, enthält Putzanteile als Nebenbestandteil.
- Leichtgut aus der Schwimm-Sink-Sortierung besteht nur aus Steinwolle.
- Es ist keine Kreislaufführung des Waschwassers erforderlich, weil nur das mit den Produkten ausgetragene Wasser ergänzt werden muss. Bei Reinigungsvorgängen fällt diskontinuierlich Schlamm an.

### Mögliche Verwertungen:

- Fraktion < 4 mm aus der Zwischenabsiebung: Verfüllungen oder alternative Verwertungen wie Aufbaukörnungen
- Schwergut: vegetationstechnische Anwendungen, Sulfatgehalt muss überprüft werden
- Leichtgut: Steinwolleherstellung
- Schlamm: abhängig von der Zusammensetzung, Aufbaukörnungen oder alternative Verwertungswege

### Variante 3:

Austausch des Prallbrechers durch einen Backenbrecher

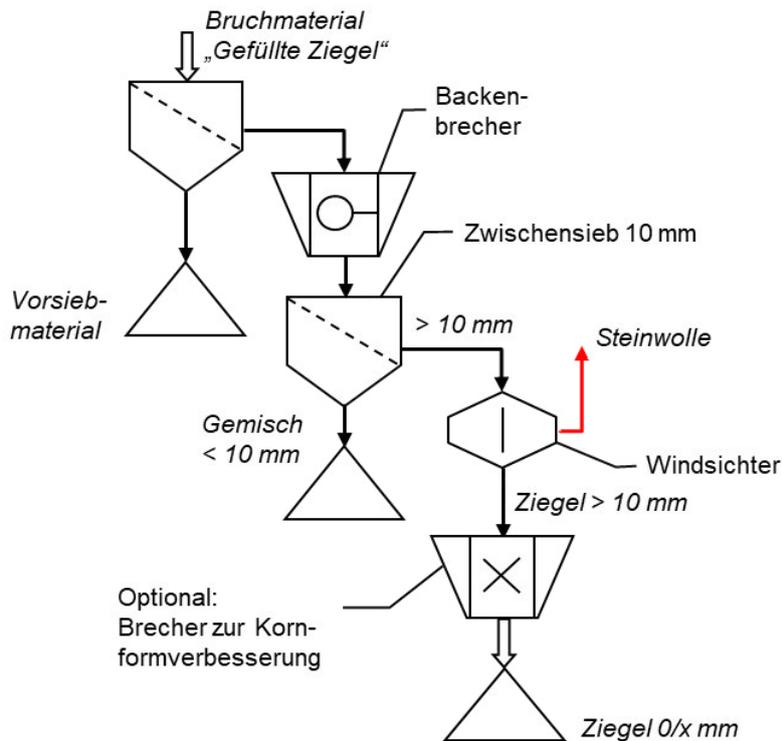


Bild 36: Verfahrensablauf mit Backenbrecher und Windsichter

#### Hauptaussagen:

- Im Vergleich zum Prallbrecher geht eine geringere Menge des Aufgabematerials in das Gemisch < 10 mm über und kann nicht sortiert werden.
- Im Vergleich zu den Prallbrecherprodukten entsteht ein grobes Schwergut mit einem hohen Anteil plattiger Partikel. Es ist augenscheinlich steinwollefrei.
- Im Leichtgut aus dem Windsichter bleiben augenscheinlich keine Ziegelpartikel zurück.
- Zur Verbesserung der Kornform können die Ziegelkörnungen in einem Prallbrecher oder Rotorshredder nachzerkleinert werden. Das entstehende Korngemisch, beispielsweise 0/32 mm kann per Siebung in eine Sand- und eine Splittfraktion getrennt werden.

#### Mögliche Verwertungen:

- Fraktion < 10 mm: Verfüllungen oder alternative Verwertungen wie Aufbaukörnungen
- Splittfraktion des Schwerguts: vegetationstechnische Anwendungen, Sulfatgehalt muss überprüft werden
- Sandfraktion des Schwerguts: Verwendungen in wassergebundenen Schichten für Sport-, Tennis- und Reitplätze, nach Mahlung ggf. Rückführung in die Ziegelherstellung
- Leichtgut: Steinwolleherstellung

Mit dem Backenbrecher wurden die besten Trennergebnisse erzielt. Die Aufbereitung mittels Backenbrecher stellt in Bezug auf die Rückgewinnung einer sortenreinen Fraktion aus Steinwolle und einer steinwollefreien Ziegelfraktion die Vorzugsvariante dar. Insofern ist dieser Brechertyp zu empfehlen.

## 7.2 Verfahrensschema für einen mehrstufigen Verfahrensablauf

Die Ziegelfraktion muss in Abhängigkeit von der vorgesehenen Verwertung ggf. weiter aufbereitet werden, um beispielsweise die Kornform und den Aufschluss zwischen Ziegel und Mörtel/Putz zu verbessern.

In Auswertung der durchgeführten Untersuchungen wurde ein mehrstufiges Verfahrensschema (Bild 37) entworfen zur möglichen Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus dem Abbruch von Ziegelmauerwerk. Dieser Verfahrensablauf ist speziell für Mauerwerk aus Hochlochziegeln mit Steinwolle-Füllung ausgelegt. Modifizierungen für andere Füllungen sind möglich. In dem erweiterten Verfahrensablauf ist eine optionale Schwimm-Sink-Trennung zur Rückgewinnung sortenreiner Mineralwollefraktionen auch für Fraktionen < 10 mm, die nicht mittels Windsichtung getrennt werden können, integriert. Die technologischen Parameter wurden für die untersuchten Steine anhand der eingesetzten Technik gewählt. Weitere Parameter, Energiebedarf und Kosten ergeben sich u. a. aus den Anfallmengen, Transport- und Lagerkapazitäten, Medienver- und Entsorgung. Erste Informationen dazu enthält Tabelle 10.

Nicht erfasst sind die benötigten Transporteinrichtungen und -maschinen sowie die nach Anfallstoff und Bundesland stark differierenden Deponierungskosten für nicht-verwertbare Bestandteile, wie beispielsweise die nicht-sortierbaren Feinfraktionen. Abhängig vom Aufstellort der Anlage können zusätzliche Maßnahmen für den Gesundheits- und Arbeitsschutz notwendig werden (z. B. Einhausung, Entstaubung u. ä.).

Der Verfahrensablauf kann durch eine sensorgestützte Sortierung der gröberen Fraktionen > 10 mm ergänzt werden. Der Einsatz sensorgestützter Sortiermaschinen befindet sich im Bereich der Bauindustrie derzeit noch in der Erprobung und weiteren Entwicklung.

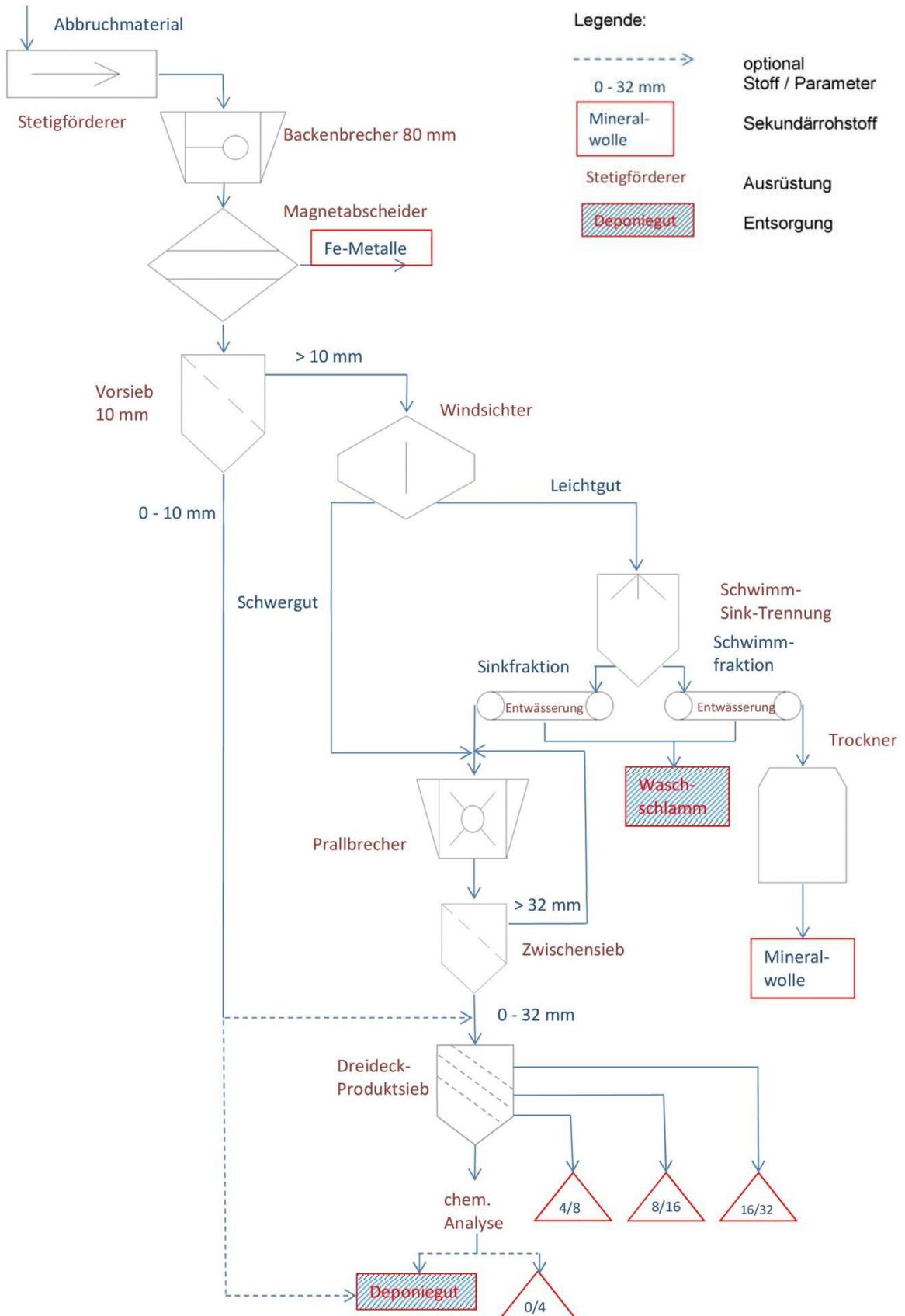


Bild 37: Mehrstufiger Verfahrensablauf für die Aufbereitung gefüllter Ziegel

Tabelle 10: Erläuterung zum Verfahrensablauf, Technikbedarf

Maschine / Arbeitsschritt	Spezifikation	Input	Output	Energiebedarf	Sonstiges
				kWh/t	
<b>Backenbrecher</b>	Spaltweite 80 mm	Abbruch, großformatig			
<b>Magnetabscheider</b>	Überbandmagnet		Fe-Metalle	0,11	Sekundärrohstoff
<b>Siebschnitt</b>	Maschenweite 10 mm	gebrochenes Material	Feinfraktion 0/10	0,036	
<b>Windsichter</b>	$\delta = 80 \%$	gebrochenes Material >10 mm	Schwergut / Leichtgut	0,385	
<b>Schwimm-Sink-Trennung</b>		Leichtgut	Schwimm- / Sinkfraktion		Wasserbedarf
<b>Entwässerungssieb</b>		Schwimmfraktion	Waschschlamm		Entsorgung
<b>Trockner</b>	105 °C	Schwimmfraktion	Mineralwolle		Sekundärrohstoff
<b>Prallbrecher</b>	37,4 m/s	Schwergut und Rücklauf aus Prallbrecher		1,6	
<b>Zwischensieb</b>	Maschenweite 32 mm			0,185	
<b>Produktsieb</b>	Dreideck 4/8/16	0/32, auch Feinfraktion aus Vorsieb	Fraktionen 4/8, 8/16, 16/32	0,185	Sekundärrohstoff
<b>chem. Analyse</b>	Leitparameter, Glühverlust, Eluat	Fraktion 0/4	Fraktion 0/4		Sekundärrohstoff
		Fraktion 0/4	Deponiegut		Entsorgung

## 8 Zusammenfassung

Innerhalb des Projektvorhabens wurde untersucht, durch welche Aufbereitungsprozesse Verbundbaustoffe aus Ziegeln mit integriertem Wärmedämmstoff zunächst aufgeschlossen, d. h. physikalisch in ihre einzelnen Komponenten aufgetrennt werden können und im weiteren Verlauf durch geeignete Sortierverfahren als sortenreine Fraktionen zurückgewonnen werden können.

Unter Beteiligung der Projektpartner:

- THERMOPOR GmbH
- Deutsche POROTON GmbH
- Mein Ziegelhaus GmbH & Co. KG
- DEUTSCHE ROCKWOOL GmbH & Co. KG

wurden hierfür neun unterschiedliche Produkte der Ziegelindustrie ausgewählt, die repräsentativ für das Sortiment an Ziegeln mit integrierten Wärmedämmstoffen sind. Diese wurden mit Dünnbettmörtel vermauert und mit Innen (Kalk-Gips)- und Außenputz (Kalk-Zement) versehen. Nach einer Standzeit von 6 Wochen erfolgte der gezielte Rückbau in stückige Wandsegmente, die durch verschiedene Aggregate zerkleinert wurden:

- Prallbrecher zur einstufigen Zerkleinerung
- Rotorshredder zur einstufigen Zerkleinerung
- Prallbrecher und nachfolgend Rotorschleuderbrecher oder Rotormühle zur zweistufigen Zerkleinerung.

An einer ausreichenden Probemenge erfolgten im Weiteren Untersuchungen an den Zerkleinerungsprodukten, darunter die Korngrößenanalyse und die händische Sortierung. Hierbei konnte ein Zusammenhang zwischen der Rotorumfangsgeschwindigkeit der Zerkleinerungsmaschinen und dem Anteil der Fraktion  $\leq 8$  mm, die hier als Feinfraktion definiert wird, festgestellt werden. Mit steigender Rotorumfangsgeschwindigkeit steigt der Anteil der Feinfraktion.

Da der verwendete Prallbrecher zu einer Erzeugung von bis zu 50 Masse-% der Feinfraktion führen kann, wurden weitere großtechnische Versuche zur einstufigen Zerkleinerung mittels eines Backenbrechers durchgeführt. Untersucht wurden hierbei unverputzte Ziegel mit integrierten Wärmedämmstoffen und eine unverputzte, mit Dünnbettmörtel gemauerte Ziegelwand.

Der Aufschluss - d. h. die physikalische Trennung von Materialverbänden entlang ihrer Verbundgrenze - hängt von der Art des Verbundes, den Zerkleinerungswiderständen der Verbundpartner und der Partikelgröße des Zerkleinerungsprodukts ab:

- Die Wärmedämmfüllungen der untersuchten Ziegel werden vollständig aufgeschlossen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die integrierten Wärmedämmstoffe einer formschlüssigen und keiner stoffschlüssigen Verbindung (z. B. durch Verklebung mit den Kammerwänden der Ziegel) unterliegen. Der Verbund aus den Ziegeln und den Steinwolle-Pads bzw. dem Perlit lässt sich in allen untersuchten Fällen durch die Zerkleinerungsaggregate vollständig aufschließen. Dünnbettmörtel beeinträchtigen den Aufschluss der integrierten Wärmedämmstoffe nicht.
- Die Stoffverbände aus Ziegeln und Putzen werden nur teilweise aufgeschlossen. Wegen der unterschiedlichen Zerkleinerungswiderstände von Ziegel und Putz kommt es zu einer selektiven Zerkleinerung, so dass sich die Zusammensetzung der Zerkleinerungsprodukte in Abhängigkeit von der Partikelgröße ändert. Da sich die Putze leichter zerkleinern lassen als die Ziegel, reichen sie sich in gewissem Umfang in der Feinfraktion an. In den groben Fraktionen bleiben Reste in Form von Verbundpartikeln zurück.

Hinsichtlich der Abtrennung der Dämmstoffe aus dem aufschlusszerkleinerten Gemenge lässt sich Folgendes festhalten:

- Perlite lassen sich durch eine Absiebung der Feinfraktion aus dem aufschlusszerkleinerten Gemenge abtrennen. Die Feinfraktion bildet ein Gemisch aus Perlit, Ziegel und Putzen.
- Zur Rückgewinnung der Steinwolle ist in allen Fällen eine Sortierung erforderlich. Hierfür wurden großtechnische Versuche unter Verwendung eines Windsichters und ergänzende Untersuchungen zur Schwimm-Sink-Sortierung durchgeführt. Mit beiden Sortiermethoden konnten gute Trennergebnisse erzielt werden. Bei einer sehr feinkornreichen Zerkleinerung, z. B. mit Prallbrechern, enthielt die abgetrennte Steinwolle allerdings einen nicht zu vernachlässigenden Anteil feiner Ziegel- und Putzpartikel.

Schlussfolgernd können zwei Aufbereitungsvarianten vorgeschlagen werden:

1. "Feinkornreiche" Aufbereitungsvariante unter Nutzung eines Prallbrechers mit anschließender Windsichtung und/oder Schwimm-Sink-Sortierung. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Steinwolle lässt sich in allen Fraktionsbereichen, vorwiegend aber in der Fraktion  $> 8$  mm, auffinden.
- Perlite werden vollständig in der Feinfraktion  $\leq 8$  mm angereichert.
- Aufgebrachte Innen- und Außenputze unterliegen einer stärkeren Korngrößenreduktion als die Ziegel. Dadurch wird ein Aufschluss erzielt. Chemische Untersuchungen zeigen, dass eine Anreicherung der Putze in der Feinfraktion stattfindet.
- Zur Abtrennung der aufgeschlossenen Steinwolle ist eine Windsichtung geeignet, mit der allerdings nur die Fraktion  $> 8$  mm bzw.  $> 10$  mm behandelt werden kann. Mit einer zusätzlichen Schwimm-Sink-Sortierung können auch feinere Fraktionen ab 4 mm ortiert werden. Die Trennschärfe ist höher, es verbleibt ein geringerer Anteil an feinen Ziegelkörnungen in der abgetrennten Steinwolle.

2. "Feinkornarme" Aufbereitungsvariante unter Nutzung eines Backenbrechers mit anschließender Windsichtung, wobei bei der Wahl einer entsprechenden Austragsspaltweite vermehrt Grobkorn und weniger Feinkorn produziert wird. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Grobzerkleinerung im Backenbrecher führt zu einem geringeren Anfall von Sand- und Mehlfraktionen.
- Die aus dem Materialverbund befreiten Steinwolle-Pads sind bei einer entsprechenden Wahl der Brechspaltweite vorwiegend grobstückig im zerkleinerten Materialgemenge vorzufinden.
- Die grobstückigen Steinwolle-Pads können im Vergleich zu stark zerkleinerter Steinwolle wesentlich einfacher und mit einer höheren Sortenreinheit zurückgewonnen werden. Zur Abtrennung der aufgeschlossenen Steinwolle aus dem Brechprodukt ist eine Windsichtung ausreichend. Der mit der Windsichtung behandelbare Anteil des Brechprodukts ist höher als bei der feinkornreichen Zerkleinerung.

Die "feinkornarme" Aufbereitungsvariante mit dem Backenbrecher stellt in Bezug auf die Rückgewinnung der Steinwolle die Vorzugsvariante dar, weil der Anteil des Brechprodukts, der auf Grund seiner Partikelgröße nicht gesichtet werden kann, gering ist und weil die Steinwolle-Pads nur wenig zerkleinert werden und nahezu sortenrein abgetrennt werden können. In Bezug auf die Rückgewinnung des Ziegels muss differenziert werden: Die Trennung von Ziegel und Steinwolle ist ebenfalls problemlos möglich. Die erzeugten Ziegelkörnungen sind allerdings vergleichsweise grob. Dadurch entsteht eine ungünstige plattige Kornform. Putzanhaftungen verbleiben auf den Ziegelkörnern. Durch eine zweite Zerkleinerungsstufe lässt sich die Kornform verbessern und die Putzanhaftungen verringern.

Die Verbesserung der Qualität der Ziegelrezyklate führt allerdings zu einem höheren Anfall an (gips-) putzhaltigen Körnungen  $\leq 4$  mm. Sensorgestützte Sortierverfahren zur Rückgewinnung der Ziegelpartikel bzw. zur Abtrennung der Gipsputze sind für diese feinen Körnungen vorerst nicht in Sicht. Für diese sulfathaltigen Fraktionen müssen deshalb Verwertungswege entwickelt werden.

Als Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen können folgende Kernsätze formuliert werden:

- Mit Dämmstoffen gefüllte Ziegel lassen sich mit den gegenwärtig zur Verfügung stehenden Aufbereitungstechniken in Steinwolle/Perlite und Ziegel trennen. Bei der Verwendung eines Backenbrechers ist der entstehende Anteil an Partikeln  $\leq 8$  mm, die nicht mittels Windsichtung behandelt werden können, gering.
- Anhaftungen von Dünnbettmörteln an Ziegeln treten wegen ihres geringen Anteils kaum in Erscheinung. Sie sind in Bezug auf die Abtrennung der Steinwolle/Perlite und die Verwertung vernachlässigbar.
- Auf Ziegel aufgetragene Gipsputze stellen eine Herausforderung dar, weil sie die Verwertung verhindern können. Die Möglichkeiten der Abtrennung und/oder der Verwertung ohne Stofftrennung müssen in Folgeprojekten geklärt werden.
- Für die Verwertung ohne Stofftrennung bietet sich die Herstellung poröser Leichtgranulate als eine Variante mit großem Potenzial an. Sie kann sowohl für die feinen Fraktionen, die nicht sortierbar sind, als auch für die groben Körnungen mit Gipsputzanhaftungen genutzt werden. Mit dieser Technologie könnte eine Rückgewinnung des Gipses möglich sein, was aber durch systematische Untersuchungen verifiziert werden muss.

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Rechnerische Zusammensetzung der Musterwände .....	6
Bild 2:	Gegenüberstellung von masse- und volumenbezogener, rechnerischer Zusammensetzung (Mittelwerte und Streuung) .....	6
Bild 3:	Rückbau der Wände .....	7
Bild 4:	Probenmaterial für weitere Versuche .....	7
Bild 5:	Aufbereitungstechnikum der Fa. BHS mit Zerkleinerungsmaschinen .....	8
Bild 6:	Aufbau des Prallbrechers PM (Bild BHS, Schema eigene Darstellung) .....	9
Bild 7:	Aufbau des Rotorshredders RS (Bild BHS, Schema eigene Darstellung).....	9
Bild 8:	Aufbau des Rotorschleuderbrechers RSMX zur Nachzerkleinerung (Bild BHS).....	9
Bild 9:	Aufbau der Rotorprallmühle RPMX zur Nachzerkleinerung (Bild BHS) .....	10
Bild 10:	Austragsband mit integrierter Leicht- und Feinstoffabsaugung (Windsichter, links) und zerkleinertem Material mit aufgeschlossener Steinwolle nach der Zerkleinerung im Prallbrecher (rechts) .....	10
Bild 11:	Versuchsabläufe für die einstufige Zerkleinerung (dargestellt in blau) und die zweistufige Zerkleinerung (dargestellt in grün) .....	11
Bild 12:	Probeteilung mittels Teilerkreuz (links) und händische Sortierung der Einzelpartikel je Fraktion (rechts) .....	12
Bild 13:	Gegenüberstellung von berechneter und gemessener Partikelmasse .....	13
Bild 14:	Abhängigkeit der ermittelten Gehalte der Probenbestandteile Steinwolle und Putz sowie deren Variationskoeffizienten von der untersuchten Anzahl von Chargen zu je etwa 1000 Partikeln der Fraktion > 8 mm am Beispiel von Wand 4 .....	14
Bild 15:	Abhängigkeit des ermittelten Gehalts an Ziegel und dessen Variationskoeffizient von der untersuchten Anzahl von Chargen zu je etwa 1000 Partikeln der Fraktion > 8 mm am Beispiel von Wand 4 .....	14
Bild 16:	Sieblinien für alle Wände nach der einstufigen Zerkleinerung im Prallbrecher .....	15
Bild 17:	Einfluss der variierten Parameter auf die mittlere Partikelgröße der im Prallbrecher zerkleinerten Produkte .....	16
Bild 18:	Sieblinien der Wände 1 und 3 nach einer einstufigen Zerkleinerung im Rotorshredder .....	18
Bild 19:	Sieblinien der Wände 7, 8 und 9 nach der zweistufigen Zerkleinerung im Rotorschleuderbrecher RSMX bzw. in der Rotorprallmühle .....	18
Bild 20:	Zusammenhang zwischen der Rotorumfangsgeschwindigkeit und dem Anteil ≤ 8 mm .....	19
Bild 21:	Sortiertes Material aus Steinwolle, Ziegel, Verbundpartikel, Putz (von links nach rechts) .....	20
Bild 22:	Gegenüberstellung der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials mit der Zusammensetzung der Körnungen > 8 mm für alle Wände .....	21
Bild 23:	Masseanteile an Ziegeln, Putzen, Verbundpartikeln sowie Steinwolle in den Fraktionen 8/11,2, 11,2/16, 16/22,4, 22,4/31,5 und > 31,5 mm der Zerkleinerungsprodukte unterschiedlicher Wände .....	22
Bild 24:	Chemische Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien .....	24
Bild 25:	CaO- und SO <sub>3</sub> -Gehalte sowie Glühverluste von Fraktionen der Zerkleinerungsprodukte der Wände 4,5 und 6 .....	25
Bild 26:	SiO <sub>2</sub> -, MgO- und K <sub>2</sub> O-Gehalte von Fraktionen der Zerkleinerungsprodukte der Wände 4,5 und 6.....	26
Bild 27:	Aufbau des Windsichters (Bild Christophel, Schema eigene Darstellung) .....	27
Bild 28:	Materialausträge während der Windsichterversuche: Siebfraktion < 10 mm (links), Steinwolle als Leichtgut (rechts) .....	28
Bild 29:	Sieblinien von Schwergut und Leichtgut nach der Windsichtung .....	28
Bild 30:	Masseanteile an Ziegeln, Putzen und Verbundpartikeln sowie Steinwolle im Aufgabematerial und im Schwer- und Leichtgut der Windsichtung .....	29

Bild 31:	Mauerziegel (links) und mit Dünnbettmörtel vermauerte Ziegel (rechts) .....	31
Bild 32:	Backenbrecher (links) mit Materialzuführung (mittig) und Brechbacken (rechts) .....	31
Bild 33:	Feinfraktion nach Vorabsiebung (links) sowie nach der Windsichtung sortenrein zurückgewonnene Ziegelscherben (Schwerfraktion, mittig) und Steinwolle-Pads (Leichtgut, rechts) .....	32
Bild 34:	Verfahrensablauf mit Prallbrecher und Windsichter .....	32
Bild 35:	Verfahrensablauf mit Prallbrecher und Schwimm-Sink-Sortierung .....	33
Bild 36:	Verfahrensablauf mit Backenbrecher und Windsichter.....	34
Bild 37:	Mehrstufiger Verfahrensablauf für die Aufbereitung gefüllter Ziegel .....	36

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Überblick über die verwendeten Ziegel und die in den Serien variierten Parameter .....	4
Tabelle 2:	Merkmale der ausgewählten Ziegelarten.....	5
Tabelle 3:	Untersuchungen an den Zerkleinerungsprodukten.....	11
Tabelle 4:	Abschätzung der Probemasse für unterschiedliche Fraktionen .....	13
Tabelle 5:	Ergebnisse der Siebanalysen der Zerkleinerungsprodukte .....	17
Tabelle 6:	Sphärizität der zerkleinerten Produkte nach einer einstufigen Zerkleinerung mittels Prallbrecher (PB).....	19
Tabelle 7:	B/L-Verhältnis der zerkleinerten Produkte nach einer einstufigen Zerkleinerung mittels Prallbrecher (PB) .....	20
Tabelle 8:	Chemische Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien, mögliche Leitoxide sind gelb bzw. grün hinterlegt.....	24
Tabelle 9:	Ergebnisse der Schwimm-Sink-Sortierung .....	30
Tabelle 10:	Erläuterung zum Verfahrensablauf, Technikbedarf .....	37

## Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Müller, A und Schnell, A. Rübner, K.: Die Herstellung von Leichtgranulaten aus Mauerwerkbruch. Mauerwerk 17 (2013).
- [2] Gy, P.: The sampling of particulate materials - a general theory. In: International Journal of Mineral Processing Vol. 3. S. 289-312 (1976).
- [3] Rasemann, W.: Mobile Vor-Ort-Analytik als Element richtiger Probenahme. Clausthal-Zellerfeld : Trans Tech Publications, 1999.
- [4] Schubert, H.: Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe. Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1968.
- [5] Bunge, R.: Mechanische Aufbereitung - Primär- und Sekundärrohstoffe. Weinheim : Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2012.
- [6] Itasca: PFC3D 5.0. [Online] <http://www.itascacg.com/pfc3d>.
- [7] Herbst, T.: Konzept zur ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbewertung des Abbruchs und der Aufbereitung. Berlin : BAM-Dissertationsreihe • Band 151, 2016.
- [8] Löhr, K., Melchiorre, M. und Kettemann, B.-U.: Aufbereitungstechnik. s.l. : Carl Hanser Verlag München Wien, 1995.
- [9] Müller, A.: Ressourcen- und klimaschonendes Bauen: Übereinstimmende oder widersprüchliche Ziele. Marienthal : Vortrag DBU, 2016.
- [10] Kohler, G., Kurkowski, H. und Eden, W.: Arbeitsentwurf SIM. 2007.
- [11] Aufschlussverfahren zur Trennung von Verbundkonstruktionen im Mauerwerksbau. s.l. : 16617 BG, 2012.

# Anlage

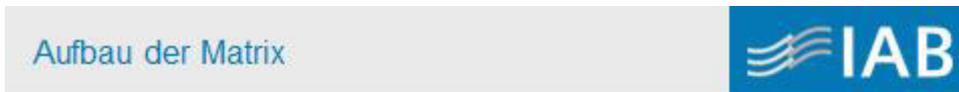
Verwertungsmatrix



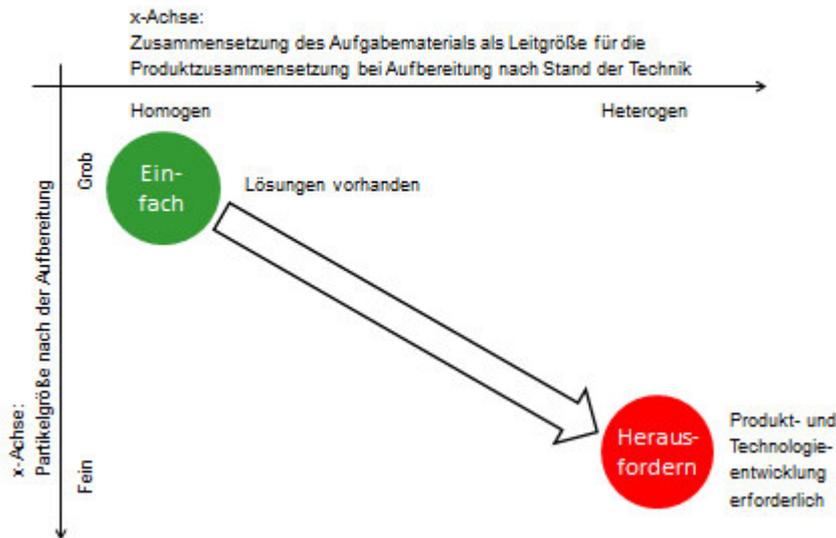
## FüllZiegelRecycling

Verwertungsmatrix

22.03.2018



Projektabschlussberatung 22. März 2018 2



Verwertungsmatrix für Recycling-Baustoffe aus Ziegel/Mauerwerkbruch			
Partikelgröße [mm]	Materialzusammensetzung [Masse-%]	Zunehmende Heterogenität →	
		100 % Ziegel	100 % Ziegelmauerwerk mit ca. 80 % Ziegel und 20 % Mörtel ohne Gips
Abnehmende Partikelgröße ↓	Gesamtes Korngemisch		Verfüllbaustoff Deponierung
	0/8, 0/11, 0/16, 0/22, 0/32, 0/45, 0/56, 0/63	bis 30 Masse-% in Frostschuttschichten	
	0/32, 0/45, 0/56	bis 30 Masse-% in Schottertragschichten	
	0/X	Verwertung als Baumsustrat	
	0/X	Verwertung für Schotterrasen	
	Fraktionen		Verfüllbaustoff Deponierung
	2/16, 2/22	bis 35 Masse-% in Konstruktionsbeton	
	2/16, 2/22	Betonwaren	
	4/8, 8/16	Dachbegrünung	
	0/2, 0/4	Tennisflächen	

Frostschuttschichten und Schottertragschichten

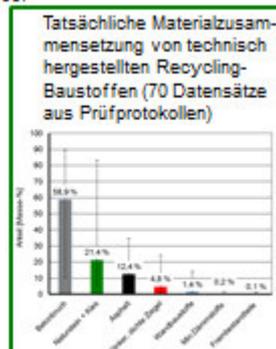
Vorschriften

- Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau TL Gestein-StB. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. FGSV-Verlag Köln 2004.
- Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau TL SoB-StB. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. FGSV-Verlag Köln 2004/Fassung 2007.
- LAGA-Mitteilung 20: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). Magdeburg 2003.

Anforderungen

- Stetige Partikelgrößenverteilung in vorgegebenen Bereichen
- Begrenzter Anteil an Feinanteilen < 0,063 mm und an Überkorn
- Ausreichender Anteil an Partikeln mit gebrochener Oberfläche
- Geringer Anteil an ungünstig geformten, d.h. plattigen Partikeln ?
- Geringer Anteil an huminen Bestandteilen ?
- Materialzusammensetzung entsprechend Tabelle [Masse-%]

Asphaltgranulat im Anteil > 4 mm	≤ 30
Klinker, Ziegel und Steinzeug im Anteil > 4 mm	≤ 30
Kalksandstein, Putze und ähnliche Stoffe im Anteil > 4 mm	≤ 5
Mineralische Leicht- und Dämmstoffe im Anteil > 4 mm	≤ 1
Fremdstoffe wie Holz, Gummi, Kunststoffe und Textilien im Gemisch	≤ 0,2



## Gesteinskörnungen für Konstruktionsbeton

### Vorschriften

- DIN EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton. DIN Deutsches Institut für Normung. Beuth-Verlag Berlin 2008
- DIN 4226-101: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen. DIN Deutsches Institut für Normung. Beuth-Verlag Berlin 2017.
- DIN 4226-102: Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 102: Typprüfung und Werkseigene Produktionskontrolle. DIN Deutsches Institut für Normung. Beuth-Verlag Berlin 2017.
- Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 - Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1. Beuth-Verlag Berlin 2010.
- LAGA-Mitteilung 20: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen – Technische Regeln. Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA). Magdeburg 2003.

### Anforderungen

- Kornfraktionen in vorgegebenen Bereichen
- Begrenzter Anteil an Feinanteilen < 0,063 mm
- Rohdichte und Wasseraufnahme
- Begrenzte Sulfat- und Chloridgehalte ?
- Materialzusammensetzung entsprechend Tabelle [Masse-%]

Tatsächlich realisierter Ziegelgehalt 6,8...26,9 Masse-%

Beton, Betonprodukte, Mörtel	
Ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein	≥ 70
Mauerziegel aus gebranntem Ton, Kalksandsteine, nicht schwimmender Porenbeton	≤ 30
Bitumenhaltige Materialien	≤ 1
Glas + sonstige Materialien + bindige Materialien	≤ 2
Schwimmendes Material im Volumen	≤ 2 cm³/kg

Projektabschlussberatung 22. März 2018

7

## Gesteinskörnungen für vegetationstechnische Anwendungen

Anwendungsgebiet	
Tennisflächen, z.B. Tennisplätze (20 x 40 m²)	
Verbrauch pro Platz bei einer Schichtstärke von 5 cm	40 m³ bzw. 48 t
Jährliche Aufbesserung (Annahme 10 % vom Verbrauch)	5 t
Begrünung von Dächern, Dachterrassen, Tiefgaragen etc.	
Extensive Dachbegrünung, bei 10 cm Schichtdicke	120 kg/m²
Intensive Dachbegrünung	> 150 kg/m²
Schotterterrassen	
Einschichtig, Belastungsklasse 1 bei 20 cm Schichtdicke	240 kg/m²
Zwischenschicht, Belastungsklasse 4 bei 40 cm Schichtdicke	480 kg/m²
Baumgrube bei 20 m² Wurzelraum	2,4 t



Bildquelle:  
H. Kurkowski,  
Bimolab gGmbH

Projektabschlussberatung 22. März 2018

8

#### Zwischenfazit

Verwertungspotenziale für Ziegelrezyklate in ungebundenen Anwendungen und bei der Betonherstellung vorhanden

- werden nicht ausgeschöpft
- gezielte Einstellung des Ziegelgehaltes nur bei Verwendung von Ziegel und Ziegelmauerwerk möglich
- bei Verwendung von Mauerwerkbruch nicht möglich

Verwertungspotenziale für Vegetationstechnik u.a. gering, ebenfalls nur für Ziegel und Ziegelmauerwerk nutzbar

Zusätzliche Einschränkungen infolge des Einsatzes von Gipsputzen

#### Lösungswege

Technologieentwicklungen zur Trennung von Mauerwerkbruch in seine Bestandteile mit den Schwerpunkten

- Entwicklung eines feinkornarmen Zerkleinerungsverfahrens
  - Oberflächenreinigung der groben Körnungen (durch Attrition?) zur Abtrennung insbesondere von Gipsputzen einschließlich Sulfatabtrennung/-rückgewinnung aus dem Waschwasser
  - Entwicklung eines sensorbasierten Sortierverfahrens mit den Zielstellungen Farbtrennung und Dichtentrennung

Produktentwicklungen für die sortenreinen groben Ziegelrezyklate, die unsortierten feinen Rezyklate und ggf. entstehender Schlämme

- Entwicklung von zusätzlichen Einsatzgebieten für grobe Körnungen
- Realisierung des Verwertungswegs „Aufbaukörnungen“
  - Entwicklung eines puzzolanischen Zusatzstoffes für die Zementherstellung
  - Entwicklung eines eigenen „Kammerfüllstoffes“ auf Basis der feinen Rezyklate