

Schnell, A.; Müller, A.; Ludwig, H.-M.

Heterogener Mauerwerkbruch als Rohstoffbasis zur Herstellung von leichten Gesteinskörnungen

1 Problemstellung

Jährlich fallen in Deutschland etwa 60 Millionen Tonnen Bauschutt, bestehend aus Beton- und Mauerwerkbruch, an. Der aktuelle Monitoringbericht der Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau belegt, dass sich die Recyclingquoten um 70 Prozent bewegen [1]. Das in stationären oder mobilen Anlagen aufbereitete Material wird hauptsächlich im Tief- und Landschaftsbau eingesetzt. Nur durch einzelne Unternehmen erfolgt ein Einsatz von aufbereitetem Betonbruch als rezyklierte grobe Gesteinskörnung für Normalbeton. Für heterogenen Mauerwerkbruch, der Wandbaustoffe, Mörtel, Putz, Fliesen und weitere Bestandteile enthält, oder für die bei der Aufbereitung zwangsläufig entstehenden Feinfraktionen existieren dagegen bislang keine höherwertigen Verwertungswege. Nach wie vor resultieren die Herausforderungen im Baustoffrecycling also vor allem aus den bei der Aufbereitung entstehenden hohen Anteilen feiner, schwer sortierbarer Fraktionen bei gleichzeitig fehlenden Verwertungstechnologien für diese Materialien. Des Weiteren ist die Heterogenität des anfallenden mineralischen Bauschutts auch bei gewissenhaft durchgeführten Abbruch- und Rückbaumaßnahmen nicht zu verhindern. Für eine effektive Trennung nach Baustoffarten gibt es bislang keine geeigneten Sortierverfahren. Mit der Zunahme der Materialvielfalt im Bauwesen und dem stetig zunehmenden Einsatz von Verbundbaustoffen ist dieser Problematik in zukünftigen Jahrzehnten sogar eine noch größere Rolle beizumessen. Eine Verbesserung der Ressourceneffizienz im Bauwesen kann nur durch den Einsatz innovativer Herstellungstechnologien für hochwertige Produkte erreicht werden.

Ausgangsmaterial	Vorbehandlung	Mahlung	Formgebung und Homogenisierung	Stabilisierung	Produkt
	Brecher, Siebmaschine	Kugelmühle	Intensivmischer, oder Pflugscharmischer + Granulierteller / + Matrizenpresse	Drehrohrofen (thermisch) bzw. Autoklav (hydrothermal)	

Abbildung 1: Prozessschema und eingesetzte Aggregate

Im Beitrag werden Ergebnisse aus einem Forschungsprojekt vorgestellt, dessen Ziel es ist, die Eignung von heterogenem Mauerwerkbruch als Rohstoff für die Herstellung leichter Gesteinskörnungen zu untersuchen. Nach der Aufbereitung des Ausgangsmaterials werden Mehle aus Mauerwerkbruch granuliert und in einem thermischen Prozess im Drehrohrofen stabilisiert und porosiert (Abbildung 1), um die erforderlichen Eigenschaften eines solchen Produkts zu erzielen. Alternativ hierzu wurde auch die Eignung eines hydrothermalen Erhärtungsprozesses untersucht. Der vorliegende Artikel ist jedoch auf die thermische Variante fokussiert.

2 Leichte Gesteinskörnungen: Anforderungen an Ausgangsmaterialien und Endprodukte

Leichte Gesteinskörnungen können nach unterschiedlichen Technologien erzeugt werden. Natürlich vorkommende Gesteine mit geringer Rohdichte, wie Naturbims, Tuff oder Lava, werden abgebaut und mechanisch aufbereitet. Natürliche Tone oder Schiefer werden nach der mechanischen Aufbereitung, in Analogie zur Genese von natürlichen leichten Gesteinskörnungen, mittels eines thermischen Prozesses stabilisiert und porosiert. Die Ausgangsmaterialien für diesen Blähprozess müssen prinzipiell die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Der Rohstoff muss einen pyroplastischen Zustand mit günstiger Viskosität erreichen.
- Im Temperaturbereich des pyroplastischen Zustands muss eine ausreichende Gasmenge entwickelt werden, die den Rohstoff unter Porenbildung auftreibt und so die Rohdichte herabsetzt.

Neben natürlichen Rohstoffen eignen sich auch Abfälle bzw. industrielle Nebenprodukte für die Herstellung leichter Gesteinskörnungen. Die Kraftwerksnebenprodukte gesinterte Steinkohlenflugasche und Kesselsand können nach einer mechanischen Aufbereitung direkt eingesetzt werden. Bei der Herstellung von Blähglas aus aufbereitetem Altglas wird wiederum ein thermischer Schritt zur Stabilisierung und Porosierung zwischengeschaltet [2][3]. Die Eignung weiterer industrieller Nebenprodukte als Ausgangsstoff für die Herstellung leichter Gesteinskörnungen ist Gegenstand aktueller Veröffentlichungen [4] und beinhaltet beispielsweise:

- Steinkohlewaschberge und Flotationsrückstände der Kohleaufbereitung
- Aschen aus Verbrennungsprozessen
- Feinkörnige Abfälle aus der Bimsaufbereitung
- Nicht kontaminierte oder kontaminierte Sedimente und Schlämme aus Flüssen, Seen, Wasserreservoirs, Klärschlämme

Die gegenwärtig am Markt verfügbaren leichten Gesteinskörnungen weisen Schüttdichten von 100 bis 1200 kg/m³ auf. Während die sehr leichten Qualitäten hauptsächlich in Produkten zur Wärmedämmung eingesetzt werden, dienen die Gesteinskörnungen mit mittleren und höheren Schüttdichten zur Leichtbetonherstellung. Leichte Gesteinskörnungen für die Betonherstellung müssen in erster Linie die in Tabelle 1 zusammengefassten physikalischen Anforderungen erfüllen.

Tabelle 1: Anforderungen an leichte Gesteinskörnungen abgeleitet aus EN 13055-1 und aus Vergleichswerten für handelsübliche Leichtgranulate

	Zielparameter lt. Normung	Vergleichswerte
Schüttdichte	< 1200 kg/m ³	100 bis 1200 kg/m ³
Rohdichte	< 2000 kg/m ³	< 1000 kg/m ³
Kornfestigkeit	keine Anforderung	> 1,0 N/mm ²

Des Weiteren resultieren aus den DIBt-Grundsätzen „Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser“ und aus der DIN 1045-2 Anforderungen an die Umweltverträglichkeit bzw. die chemischen Eigenschaften, die von den hergestellten Leichtgranulaten erfüllt werden müssen.

3 Überprüfung der Eignung der Ausgangsstoffe in Laborversuchen

Als Ausgangsmaterialien für die Untersuchungen wurde Mauerwerkbruch von unterschiedlichen Recyclingunternehmen in verschiedenen Körnungen und stofflichen Zusammensetzungen eingesetzt. Es wurde also mit Materialien gearbeitet, die in der Praxis als Abbruchabfälle anfallen. Insgesamt standen Ausgangsstoffe von 4 unterschiedlichen Recyclingbetrieben zur Verfügung. Alle Ausgangsmaterialien wurden zunächst mittels Sortier- und Siebanalysen sowie mit einer chemischen Analyse der Hauptbestandteile charakterisiert. Zusätzlich erfolgte die Bestimmung der Schwermetall- und Salzgehalte im Feststoff und im wässrigen Eluat des Mauerwerkbruchs im Ausgangszustand. Ebenso wurden die Zwischenprodukte (Mehle und Grüngranulate) charakterisiert. Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse, die für die Beurteilung der Eignung des Mauerwerkbruchs als Ausgangsmaterial für den Gesamtprozess wichtig sind, vorgestellt.

3.1 Stoffliche Zusammensetzung

Aus Sicht der stofflichen Zusammensetzung lassen sich die Ausgangsmaterialien in erster Linie anhand ihrer Ziegelanteile unterscheiden, die in Abhängigkeit von Herkunft und Körnung stark schwanken können und zwischen 25 und 90 Prozent liegen. Die restlichen Bestandteile der untersuchten Proben sind jeweils Beton und andere mineralische Bestandteile wie Mörtel. Die Anteile an Fremdbestandteilen, wie z.B. Kunststoffe, Glas oder Papier, liegen maximal bei 5 Prozent. Alle untersuchten Ausgangsmaterialien sind selbst bei augenscheinlich guter Aufbereitung stofflich gesehen sehr inhomogen zusammengesetzt [4]. Die Sieblinien der ungemahlener Ausgangsmaterialien spielen für den Gesamtprozess eine untergeordnete Rolle, da das Material vor der Granulierung ohnehin weiter aufgemahlen wird.

3.2 Granulierbarkeit

Vor der Herstellung geeigneter Grüngranulate müssen die Ausgangsmaterialien je nach Ausgangskorngröße zunächst auf Korngrößen < 4 mm vorzerkleinert und anschließend aufgemahlen werden. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde ein Backenbrecher zur Vorzerkleinerung des Mauerwerkbruchs eingesetzt. Die anschließende Mahlung auf Korngrößen < 100 μ m erfolgte mittels Chargenkugelmühle bzw. Kugelmahlsichtanlage. Diese Prozessschritte dienen zum einen der Homogenisierung des Materials, sind zum anderen aber auch notwendig, um eine hinreichend gute Granulierbarkeit gewährleisten zu können. Materialien mit einem Größtkorn unter 100 μ m und multimodale Verteilungen der Partikelgrößen wirken sich positiv auf die Granulierbarkeit aus. Dies konnte durch Untersuchungen an der Bauhaus-Universität Weimar, der Ohm-Hochschule Nürnberg und der E.S.C.H. GmbH Unterwellenborn nachgewiesen werden [5]. Alle im Labor getesteten Ausgangsmehle konnten zu Grüngranulaten mit ausreichender Transport- bzw. Dosierstabilität für die nachfolgende Beschickung des Drehrohrofens verarbeitet werden.

3.3 Einfluss der chemischen Zusammensetzung auf das Sinter- und Schmelzverhalten

Die Voraussetzung für die Herstellung von Leichtgranulaten auf thermischem Wege ist die Blähfähigkeit des Ausgangsmaterials. Wie bereits oben beschrieben, muss hierzu zunächst ein pyroplastischer Zustand in einem bestimmten Temperaturbereich bei gleichzeitiger Freisetzung von Blähgasen erreicht werden. Anhand der chemischen Zusammensetzung der Abbruchmaterialien kann abgeschätzt werden, ob diese erste Voraussetzung erfüllt werden kann [6].

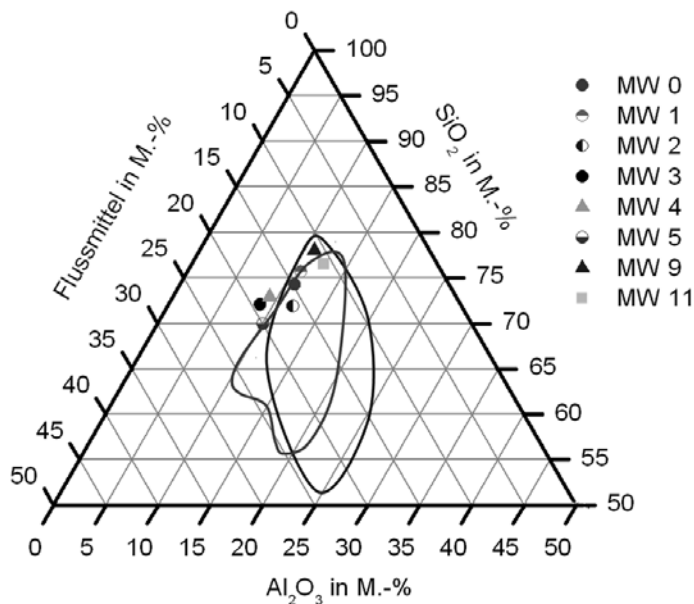


Abbildung 2: Ausgangsmaterialien im ternären System $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Flussmittel}$ mit den Bereichen für blähfähige Tonrohstoffe nach RILEY und WILSON

Die Lage der untersuchten Ausgangsmaterialien im Dreistoffsystem $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Flussmittel}$ ist in Abbildung 2 dargestellt. Das Flussmittel ist hierbei die Summe der Oxide CaO , MgO , Fe_2O_3 , Na_2O und K_2O . Im Vergleich zur stofflichen Zusammensetzung zeigt sich hier ein einheitlicheres Bild. Die Materialien liegen im oder an der Grenze des Bereichs für blähfähige Tonrohstoffe nach RILEY [7] und WILSON [8]. Dabei weisen die ziegelreichen Ausgangsmaterialien MW 9 und MW 11 den größten SiO_2 -Gehalt, aber den geringsten Gehalt an Flussmittel auf. Die untersuchten Materialien sind aus Sicht der chemischen Zusammensetzung prinzipiell als Rohstoff für die Herstellung von Leichtgranulaten in einem thermischen Prozess geeignet. Es kann auch davon ausgegangen werden, dass der CaO -Gehalt einen entscheidenden Einfluss auf das Sinter- und Schmelzverhalten und die Blähfähigkeit ausübt [9].

Das Sinter- und Schmelzverhalten wurde mittels Heitzschmikroskopie an Mehlen der Ausgangsmaterialien sowie an einem Ausgangsstoff für die Blähtonherstellung untersucht. Im Ergebnis konnte festgestellt werden, dass die Materialien mit mittleren Ziegelgehalten von 25 bis etwa 75 Prozent ein ähnliches Sinter- und Schmelzverhalten mit 2 Sinterintervallen zwischen etwa 900 und 1300 °C aufweisen. Bei höheren Ziegelgehalten vergrößert sich das zweite Sinterintervall. Das Vergleichsmaterial weist lediglich ein Sinterintervall auf, das sich über einen breiten Bereich von 920 °C bis 1250 °C erstreckt. [4]

3.4 Bildung von Blähgasen und Einfluss der Brenntemperatur und Blähmitteldosierung

Die Bildung von Gasen im Temperaturbereich der günstigen Viskosität ist die zweite Voraussetzung für die Eignung eines Ausgangsmaterials zur Herstellung von Leichtgranulaten in einem thermischen Prozess. Bei Mauerwerkbruch wird diese Bedingung jedoch nicht von vornherein erfüllt. Die Zugabe eines sogenannten Bläh- oder Porosierungsmittels, das im angezielten Temperaturbereich Gase freisetzt, ist notwendig. In Vorversuchen [10] wurde die Eignung verschiedener Blähmittel untersucht. Die auf $< 100 \mu\text{m}$ zerkleinerten Materialien wurden den gemahlenen Ausgangsstoffen jeweils in einem Anteil von 3 % zugegeben. Um die Wirkung der Blähmittel zu beurteilen, wurden die Kornrohdsichten der gebrannten Granulate mit denen der Grüngranulate verglichen. Die besten Ergebnisse konnten bei Zugabe von Siliciumcarbidpulver (SiC) als Blähmittel erzielt werden. Dieses Blähmittel wurde dann bei allen im Rahmen des Projekts hergestellten Leichtgranulaten eingesetzt.

Durch Brennversuche im Labor mit unterschiedlich zusammengesetzten Materialien als Ausgangsmaterial wurde bereits die Eignung von Mauerwerkbruch für die Herstellung leichter Gesteinskörnungen nachgewiesen [4].

Zur Prozessoptimierung wurde der Einfluss der Brenntemperatur und der Blähmitteldosierung untersucht. Hierzu wurde der Mauerwerkbruch MW 1 (50 % Ziegel) aufgemahlen, mit 1 bis 9 Ma.-% SiC gemischt und zu Grüngranulaten verarbeitet. Die thermische Behandlung im Drehrohrofen erfolgte zunächst am Material mit 3 Ma.-% SiC bei unterschiedlichen Brenntemperaturen von 1100 bis 1200 °C mit einer Abstufung in Schritten von 20 K. Zur Bewertung der hergestellten Granulate dienten die wichtigsten physikalischen Materialparameter für Leichtgranulate, die Rohdichte und die Kornfestigkeit. Die Messung der Kornfestigkeit erfolgte mit einem Tablettenprüfgerät. Die Eignung dieser für Leichtgranulate unüblichen Methode konnte in früheren Untersuchungen nachgewiesen werden [11]. Die Rohdichte wurde mittels Feststoffpyknometer bestimmt.

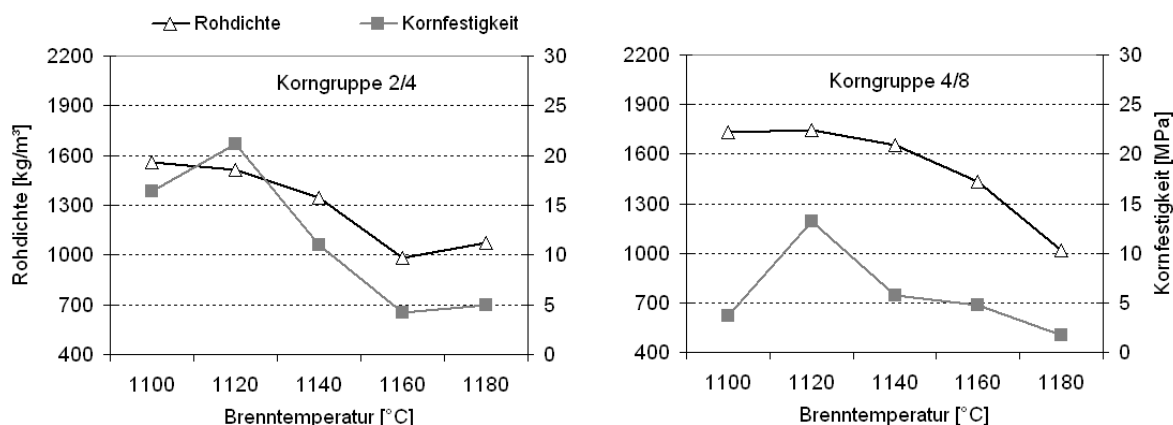


Abbildung 3: Kornfestigkeit und Rohdichte der Granulate bei unterschiedlichen Brenntemperaturen (3 Ma.-% SiC, einfacher Brand)

Aus der Gegenüberstellung der Messwerte für Kornfestigkeit und Rohdichte für die beiden hergestellten Fraktionen 2/4 und 4/8 mm in Abbildung 3 geht hervor, dass bei

zunehmender Brenntemperatur, 3 Ma.-% SiC-Dosierung und ansonsten gleichen Prozessbedingungen die Rohdichte der Leichtgranulate abnimmt. Die Kornfestigkeiten liegen bei allen Granulaten deutlich über dem angezielten Wert von 1 MPa, wobei die Maximalwerte für beide Kornfraktionen bei einer Brenntemperatur von 1120 °C erreicht werden. Bei der ebenfalls getesteten maximalen Brenntemperatur von 1200 °C waren keine verwertbaren Granulate herstellbar, da das Material bereits zu schmelzen begann und daher im Rohr miteinander verklebte.

Für die anschließenden Laboruntersuchungen zur Optimierung des SiC-Gehalts wurde eine Brenntemperatur von 1180 °C ausgewählt, da bei dieser Temperatur auch die Granulate mit größerem Korndurchmesser eine minimale Rohdichte bei ausreichender Kornfestigkeit hatten. Um mögliche Restpotentiale zur weiteren thermischen Porosierung auszuloten, wurden die Materialien mit unterschiedlichen SiC-Gehalten sowohl einfach als auch zweifach im Drehrohrföfen gebrannt. Die Ergebnisse bezüglich der erzielten Rohdichten sind in Abbildung 4 dargestellt. Abbildung 5 zeigt die Granulate der Korngruppe 2/4 mm nach der thermischen Behandlung bei 1180 °C.

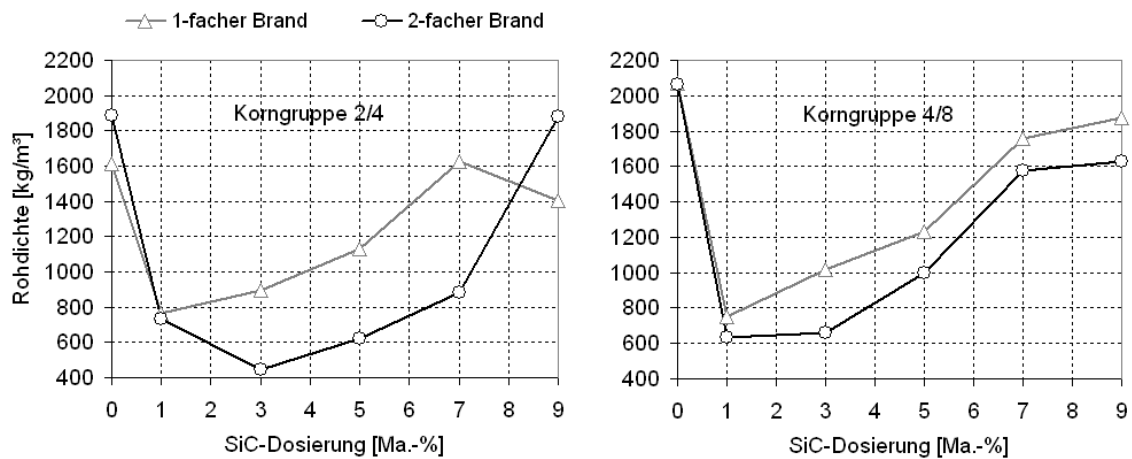


Abbildung 4: Rohdichte der Granulate bei Variation der SiC-Dosierung (einfacher Brand und zweifacher, Brenntemperaturen 1180 °C)

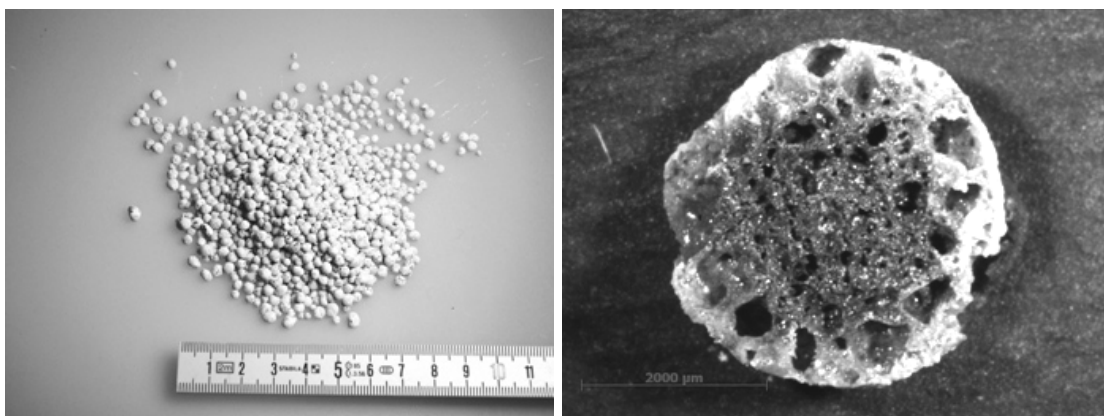


Abbildung 5: Leichtgranulate aus Mauerwerkbruch (Brenntemperatur 1180 °C, Einfachbrand, Korngruppe 2/4 mm)

Die Rohdichten der Granulate aus dem Einfachbrand verdeutlichen, dass bereits bei einem SiC-Gehalt von 1 Ma.-% im Ausgangsmaterial Leichtgranulate mit Rohdichten unter 800 kg/m^3 erzeugt werden können. Im Falle der Granulate der Korngruppe 4/8 mm werden hier sogar die geringsten Werte innerhalb der Korngruppe erzielt. Eine weitere wichtige Schlussfolgerung ist, dass eine SiC-Zugabe von mehr als 3 Ma.-% technologisch nicht sinnvoll ist. Ebenso wird klar, dass ohne eine Blähmittelzugabe nur eine sehr geringe Porosierung möglich ist.

Die zweifach thermisch behandelten Granulate weisen im Vergleich zu den einfach gebrannten Materialien bis zu einer Blähmitteldosierung von 7 Ma.-% eine zum Teil deutlich geringere Rohdichte auf. Insbesondere bei 3-prozentiger SiC-Dosierung besteht hier das technologische Potential, die Rohdichte in Bereiche unter 600 kg/m^3 abzusenken und so gegebenenfalls höhere Marktpreise zu erzielen.

3.5 Umweltverträglichkeit der Ausgangsstoffe

Die Herstellung von leichten Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch ist der Entwicklung eines neuen Bauprodukts gleichzusetzen. Somit müssen neben den Endprodukten auch die Ausgangsstoffe im Hinblick auf ihre Umweltverträglichkeit getestet werden. Die erforderlichen Untersuchungen am Feststoff und am Eluat wurden im Rahmen des Forschungsprojekts durch die BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung durchgeführt. Die Bewertung der Umweltverträglichkeit der Ausgangsstoffe ergab, dass alle geforderten Grenzwerte der geltenden Regelwerke eingehalten werden. [4]

4 Halbtechnische Erprobung des Granulier- und Brennprozesses

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde eine halbtechnische Erprobung der gesamten Prozesskette durchgeführt. Als Ausgangsmaterial diente wiederum exemplarisch der Mauerwerkbruch MW 1. Etwa 1,5 Tonnen des Materials wurden in einer Kugelmahlsichtanlage auf eine Korngröße $< 100 \mu\text{m}$ aufgemahlen. Die Versuche wurden mit zwei Aggregaten zur Aufbauagglomeration (Intensivmischer und Granulierteller) im halbtechnischen Maßstab durchgeführt.

Bei der halbtechnischen Erprobung der Granulierung mittels Intensivmischer wurde das entstandene Zwischenprodukt in einem Eirich R11 Aggregat mit 250 Litern Volumen mit 3 Ma.-% des Blähmittels SiC homogenisiert. Die Granulierung erfolgte in einem Arbeitsschritt im selben Aggregat. Es konnte festgestellt werden, dass eine Granulatherstellung möglich war. Die erforderliche Granuliertdauer war ähnlich wie im Labormaßstab vergleichsweise groß. Jedoch war die Materialausbeute im Bereich der Zielkorngröße für die Grüngranulate (1 bis 8 mm) zu gering. Es entstanden jeweils größere Mengen an Unter- und Überkorn, die vor dem anschließenden Brennprozess abgeseibt werden mussten. Die Wasserzugabemenge, die auf der Grundlage der Laborversuche festgelegt wurde, musste im halbtechnischen Prozess aber um bis zu 20 % erhöht werden.

Die halbtechnische Erprobung der Granulatherstellung auf dem Granulierteller erfolgte mit dem gleichen Ausgangsmaterial beim Projektpartner E.S.C.H. GmbH und lieferte stabile Granulate in der gewünschten Korngröße und in einem engen Partikelgrößenbereich. Erheblicher Optimierungsbedarf besteht jedoch hinsichtlich der bei den Versuchen erreichten Durchsätze. Als Alternative zur Aufbauagglomeration

wurde eine Matrizenpresse zur Herstellung von Pellets mit 4 mm und 6 mm Durchmesser erprobt. Hier entstanden sehr stabile Pellets bei jedoch großem Werkzeugverschleiß. Es konnten jedoch 250 kg Pellets hergestellt werden, die neben dem mittels Granulierteller bzw. Intensivmischer hergestellten Grüngranulaten bei den halbtechnischen Brennversuchen eingesetzt wurden.

Die halbtechnischen Brennversuche wurden mit einer direkt beheizten Drehrohrofenanlage der IBU-tec AG Weimar durchgeführt. Die beheizte Länge des Rohres betrug 7 Meter bei einem lichten Durchmesser von 0,3 Metern. In einem 72-stündigen Versuch wurden verschiedene Prozessparameter variiert. Im Ergebnis wurde erkannt, dass die erreichte Qualität von zwei gegenläufigen Prozessen abhängt. Bei zu hohen Temperaturen wurden hohe Blähgrade erreicht, allerdings kam es zu einem Verkleben der Granulate untereinander. Durch Herabsetzen der Brenntemperatur konnte das Verkleben verhindert werden, aber die Rohdichte der Granulate stieg über 1000 kg/m³. Hier besteht weiterer Optimierungsbedarf. Die hergestellten Granulate konnten dennoch für Betonversuche beim Projektpartner BAM eingesetzt werden. Über die Ergebnisse hierzu wird in einem separaten Beitrag im vorliegenden Tagungsband berichtet [12][13].

5 Zusammenfassung und Ausblick

In Laborversuchen und im halbtechnischen Maßstab konnte gezeigt werden, dass sich Mauerwerkbruch als Rohstoff zur Herstellung von hochwertigen Leichtgranulaten mit vielseitigen Einsatzmöglichkeiten im Bauwesen eignet. Es kamen Ausgangsmaterialien mit für Mauerwerkbruch durchschnittlichen Ziegelgehalten von 25 bis 50 Prozent, die in Voruntersuchungen ein ähnliches Sinter- und Schmelzverhalten zeigten, zum Einsatz. Eine Formgebung ist mit Aufbau- und Pressagglomeration mittels Intensivmischer, Matrizenpresse und Granulierteller möglich.

Die Ergebnisse der Untersuchungen im Labor belegen, dass bereits die Zugabe von einem Prozent Siliciumcarbid zur Porosierung der Granulate in einem thermischen Prozess ähnlich dem der Blähtonherstellung ausreicht. Bei der halbtechnischen Erprobung des Brennprozesses in einem direkt beheizten Drehrohrofen erschwerte der relativ enge Blähbereich die Ofenführung. Trotzdem konnten ausreichend große Mengen an leichten Gesteinskörnungen für ausführliche Betonuntersuchungen hergestellt werden.

Dank

Das Forschungsprojekt „Aufbaukörnungen“ wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die am Verbundprojekt beteiligten Partner aus Forschung und Praxis sind auf der Webseite www.aufbaukoernung.de aufgeführt.

Literatur

- [1] Mineralische Bauabfälle Monitoring 2008. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2008. Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V. Berlin 2011.
- [2] Ducman, V.; Mladenovic, A.; Šuput, J.S: Lightweight aggregate based on waste glass and its alkali-silica reactivity. *Cement and Concrete Research*, 32 (2002), pp 223-226.
- [3] Nanes, R.: Strength of Lightweight Glass Aggregate Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18 (2006), pp 710-714.
- [4] Schnell, A., Müller, A., Rübner, K., Ludwig, H.-M.: Mineralische Bauabfälle als Rohstoff für die Herstellung leichter Gesteinskörnungen. In: *Recycling und Rohstoffe Band 5*, TK Verlag, Neuruppin, 2012, S. 469-494
- [5] Schindhelm, S.; Schnell, A., Hennig, M.; Schwieger, B.; Müller, A.; Teipel, U.: Agglomeration partikulärer mineralischer Rohstoffe. In: *Chemie Ingenieur Technik, Themenheft Ressourceneffizienz*, 2012 (eingereicht)
- [6] Schellmann, W.; Fastabend, H.: Laboratoriumsuntersuchungen zur Beurteilung von Blättonen. *Ziegelindustrie* 25 (1972), S. 79-86.
- [7] Riley, C.: Relation of Chemical Properties to the Bloating of Clays. *Journal of the American Ceramic Society* 34 (1951), 4, pp 121-128.
- [8] Wilson, H.: Lightweight Aggregates for the Construction Industry. *Journal of the Canadian Ceramic Society* 22 (1953), pp 44-48.
- [9] Müller, A.; Schnell, A., Rübner, K.: Aufbaurückstände aus Mauerwerkbruch. In: *Chemie Ingenieur Technik, Themenheft Ressourceneffizienz*, 2012 (eingereicht)
- [10] Müller, A.; Sokolova, S.N; Vereshagin, V.I.: Characteristics of lightweight aggregates from primary and recycled raw materials. *Construction and Building Materials* 22 (2008), pp 703–712.
- [11] Ernst, D.: Einzelkornfestigkeit von Leichtgranulaten. Bachelorarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, 2009.
- [12] Rübner, K.; Schnell, A., Haamkens, F.; Jakubcová, P.; Müller, A.: Leichtbeton aus Aufbaurückständen. In: *Chemie Ingenieur Technik, Themenheft Ressourceneffizienz*, 2012 (eingereicht)
- [13] Rübner, K. et al.: Leichte Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch für die Betonherstellung. In: *Tagungsband der 18. Internationalen Baustofftagung ibausil*, Bauhaus-Universität Weimar, 2011 (eingereicht)

Ansprechpartner:

Alexander Schnell
Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystr. 7
99423 Weimar

alexander.schnell@uni-weimar.de