

**Martin Reformat**

# **Mechanische Aktivierung von Altbetonbrechsand – Grundlagenuntersuchung**

## **1. Einleitung**

Die Diskussion über Ressourceneffizienz und -schonung umfasst mittlerweile alle Bereiche des Lebens. Vor allem im ressourcen-intensiven Gebiet des Baustoffrecyclings wird immer mehr Wert auf die vollständige Rückführung eines Bauwerkes in die jeweiligen Stoffkreisläufe gelegt. Der modernen Bauweise geschuldet, sind es hauptsächlich die mit Beton errichteten Gebäude, die nun nach und nach zurückgebaut und abgerissen werden. Hierbei entstehen sehr große Stoffströme. Ein großer Anteil des gebrochenen Altbetons, nämlich die Fraktionen größer 4 mm, können, nach entsprechender Analytik, nahezu ohne weitere Behandlungen als Recycling-Gesteinskörnung in das Bauwesen zurückgeführt werden. Anders gestaltet es sich mit den Recycling-Sanden. Etwa drei Millionen Tonnen Altbetonbrechsand müssen jedes Jahr in Deutschland deponiert werden [1]. Da Beton einer der weltweit am häufigsten verwendete Baustoff ist, kann hier von einer Zunahme in den nächsten Jahren, auch über Deutschland hinaus, ausgegangen werden.

Um diesen Kreislauf zu schließen wird seit mehreren Jahren am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus Universität Weimar, Arbeitsgruppe Aufbereitung und Recycling, an einer hochwertigen Wiederverwertung gearbeitet. Der Ansatz: mittels Hochenergiemahlung soll der weitestgehend abgebundene und inaktive Altbetonbrechsand nebst Gesteinskörnungsanteil zumindest teilweise reaktiviert werden. Ziel ist es, das so entstehende Mahlprodukt als Kompositmaterial in Zementsystemen zu verwenden.

## **2. Voruntersuchungen**

Seit Ende der 1990er Jahre wird in vielen Forschungsstellen an der ganzheitlichen Wiederverwertung von Altbeton und dessen Sandfraktion gearbeitet. Zu nennen sind hierbei vor allem die Arbeiten von Möbius [2], Splittgerber [3] und Müller und Schnell [4]. Unmittelbar an die hier vorliegende Arbeit vorangehenden Untersuchungen sind in [5] nachzulesen. Es stellte sich heraus, dass durch die Anwendung von gezielter Hochenergiemahlung in der Planetenkugelmühle das Reaktionspotential von Altbetonbrechsand regeneriert werden kann, so dass zumindest der Verdünnungseffekt durch die Zugabe zum Portlandzement ausgeglichen und teilweise sogar überschritten werden kann. Aufbauend auf diesen Analysen wurde ein Forschungsprogramm mit weitreichender Versuchsmatrix entwickelt und bis dato weitestgehend durchgeführt. Die wesentlichsten Ergebnisse sollen hier vorgestellt werden.

### 3. Materialien und Versuchsablauf

Wie auch in den Vorversuchen dient ein Portlandzement CEM I 42.5 R als Referenzmaterial. Bei dem Altbetonbrechsand einer nahegelegenen Deponie handelt es sich um ein Recyclingkörnung Typ II - also gebrochenen Altbeton mit einem Anteil an Ziegelresten - in der Fraktion 0/4 mm. Weiterhin liegen keine Informationen über Herkunft oder Brechverfahren vor. Als Neuerung zu den vorangehenden Untersuchungen wurde auch Zementstein in das Versuchsprogramm eingebunden. Dieser wurde aus dem Referenzzement gewonnen und mit einem w/z-Wert von 0,4 über ein halbes Jahr vorgelagert und anschließend gebrochen. Es wird auf Grund der laufenden Forschung an dieser Stelle nicht näher auf den Zementstein eingegangen. In Abbildung 1 ist der Versuchs- und Analyseplan dargestellt. In diesem Beitrag wird in erster Linie auf den Vergleich zwischen der Aufbereitung in Kugelmühle, als konventionelle Mahlung, und Planetenkugelmühle, als Hochenergiemahlung, eingegangen.

Die konventionelle Mahlung erfolgte mit der Kugelmühle von LAARMANN im Ivers Aufbereitungstechnikum der Bauhaus-Universität Weimar mit folgenden Parametern:

- Länge: 40 cm
- Durchmesser: 30 cm
- l/d-Verhältnis: 1,33
- $n_{\text{krit}}$ : 77,23 U/min
- Drehzahl: 58 U/min
- Gattierung: 26 kg  $\varnothing$  11,5 - 30mm
- Mahlhilfsmittel: Diethylenglycol (DEG)

Die Hochenergiemahlung in der Planetenkugelmühle PULVERISETTE 5/2 von FRITSCH wurde mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Behälterzahl: 2
- Behältervolumen: 500 ml, gehärteter Stahl
- Mahlkörper: je 100 Stk. Zirkonoxid ( $\text{ZrO}_2$ ),  $\varnothing$  10 mm
- Drehzahl: 250 U/min
- Mahlhilfsmittel: Diethylenglycol (DEG)

Der Altbetonbrechsand wurde in jeder Mühle auf 5.000 und 10.000  $\text{cm}^2/\text{g}$  nach Blaine gemahlen. Die Messung erfolgte mittels Hand-Blainegerät. Die gewonnenen Materialien wurden hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilung mittels Lasergranulometrie (COULTER LS 13320) und ihrer spezifischen Oberfläche nach BET (Gasadsorptions-Messegerät COULTER SA 3100S) untersucht. Zur strukturellen Untersuchung wurden Röntgenbeugungsanalysen mit dem Diffraktometer SIEMENS D5000 (Coupled Two Theta/Theta,  $\text{CuK}\alpha$ -Röhre bei 40 mA und 40 kV) durchgeführt. Als unterstützende Untersuchung wurden die Kornformen mit dem MALVERN MORPHOLOGI G3 analysiert.

Aus den gemahlenen Altbetonbrechsanden wurden Zemente mit Kompositanteilen von 5, 20 und 35 M.-% hergestellt und auf Hydratationswärmeentwicklung hin untersucht (Differentialkalorimeter TONICAL ZEMENT von TONI TECHNIK). Weiterhin wurden an dem mit 20 % homogenisierten Zement Druckfestigkeiten und Verarbeitungseigenschaften untersucht.

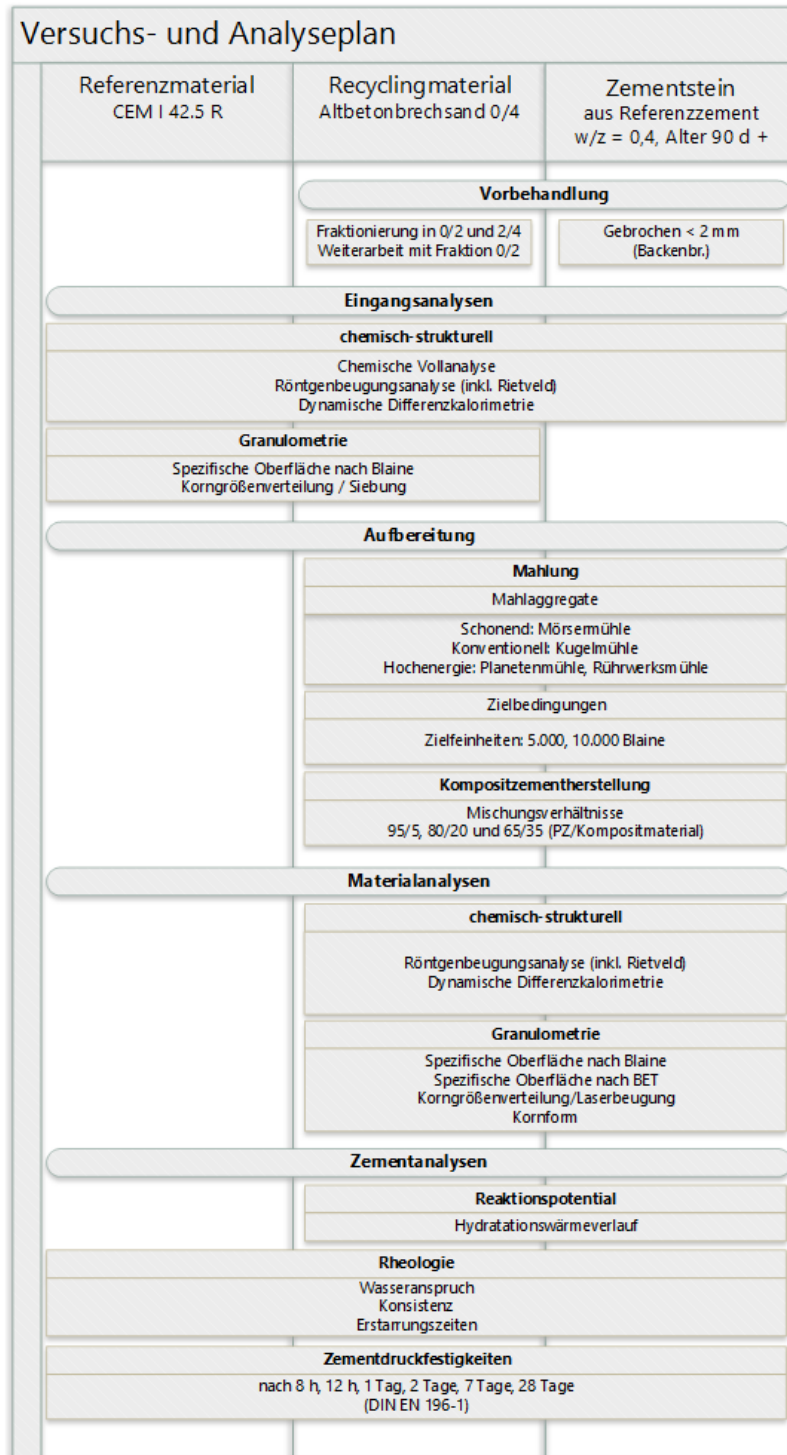


Abb. 1: Versuchsplanung

## 4. Ergebnisse

In Abbildung 2 sind die Mahlkurven der Altbetonbrechsandmahlung dargestellt. Die dazugehörigen RRSB-Werte sind in Tabelle 1 zu finden.

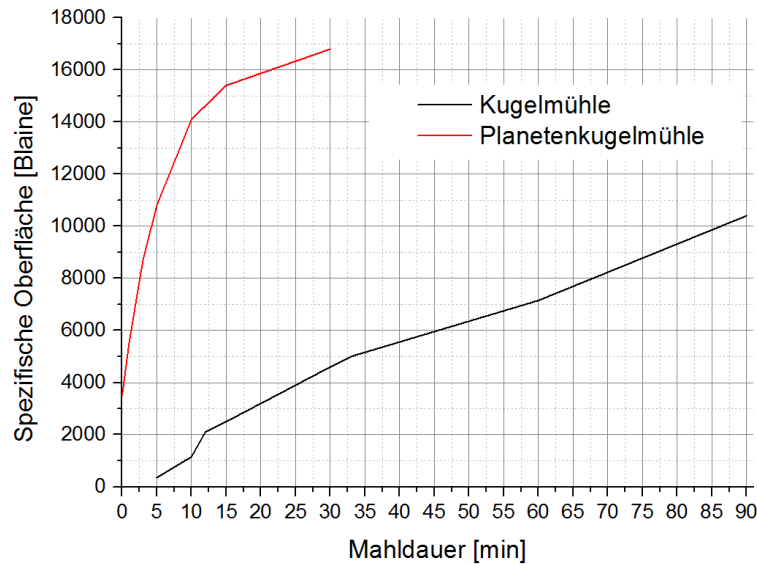


Abb. 2: Mahlkurven des Altbetonbrechsandes

Tab. 1: RRSB-Kennwerte

Mahlaggregat	Mahldauer	Blaine	BET	$x'$ (RRSB)	n (RRSB)
Kugelmühle	33 min	4.950 cm <sup>2</sup> /g	7,221 m <sup>2</sup> /g	92,87 µm	0,83
	90 min	10.350 cm <sup>2</sup> /g	8,042 m <sup>2</sup> /g	20,21 µm	0,77
Planetenmühle	4 min	5.400 cm <sup>2</sup> /g	6,674 m <sup>2</sup> /g	69,75 µm	0,65
	8 min	10.300 cm <sup>2</sup> /g	8,086 m <sup>2</sup> /g	15,75 µm	0,85

Es zeigte sich, dass die Mahldauern in der Kugelmühle um ein Vielfaches von denen der Planetenmühle abweichen. Entsprechend ist auch der Energieeintrag ein Vielfaches. Die Mahlprodukte sind hinsichtlich ihrer Korngrößenparameter sehr gut vergleichbar.

Wie schon in den Voruntersuchungen wurden die strukturellen Parameter verglichen. In Tabelle 2 sind die Phasenzusammensetzungen der Mahlprodukte aufgezeigt. Es ist an diesen Zahlen sehr gut zu erkennen, dass mit steigender Mahlintensität der röntgen-amorphe Anteil sinkt (Ausgangsmaterial 30,5 %; Planetenmühle nach 8 Minuten 23,3 %). Es kann hieraus ziemlich eindeutig auf eine Entwässerung der Zementsteinphasen geschlossen werden, da nur dieser Mechanismus von einer Rekristallisation gekennzeichnet ist.

Tab. 2: Phasenzusammensetzung (XRD)

Mahlprodukt	Phasenanteil [M.-%]				
	Quarz SiO <sub>2</sub>	Orthoklas KAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Albit NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	Calcit CaCO <sub>3</sub>	Amorph
Ausgangsmat.	51,9	7,5	3,7	6,4	30,5
KM 33 min	53,2	7,8	4,1	6,5	28,3
KM 90 min	53,4	8,6	5,4	6,6	26,0
PKM 4 min	53,6	9,2	4,0	6,7	26,5
PKM 8 min	55,0	9,4	6,3	6,1	23,3

Die Kornformanalyse ist in Abbildung 3 dargestellt. Wie zu erwarten, wird mit zunehmender Feinheit bzw. Mahlintensität auch die Kornform im Allgemeinen runder, glatter und gedrungener. Zum einen liegt dies an der steigenden Anzahl von Mahlkontakten zwischen Kugeln und Partikeln. Zum anderen ist auch die Messmethode mittels optischer Pixel-Auflösung geneigt, kleinere Partikel runder bzw. quadratisch darzustellen und zu berechnen [6].

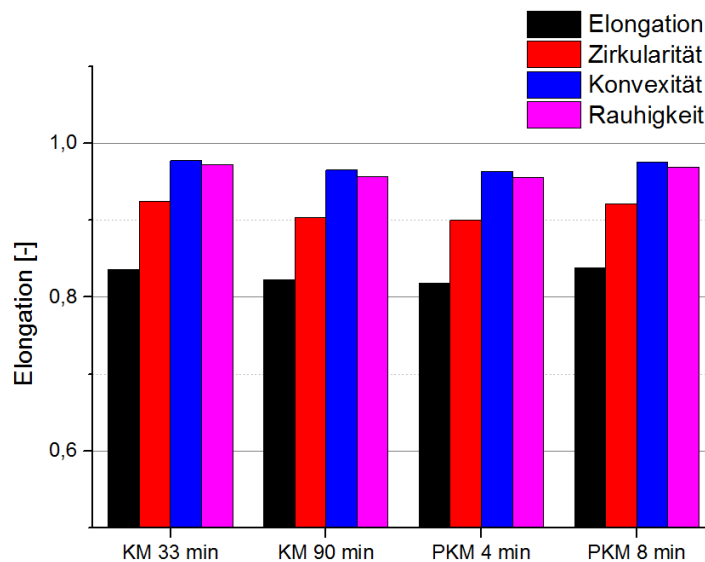


Abb. 3: Kornformen der Mahlprodukte

In starker Anlehnung an die granulometrischen Eigenschaften sind die Verarbeitungseigenschaften in der Abbildungen 4 dargestellt. Obwohl die Kornformparameter bei niedriger Feinheit zwischen den Mühlen relativ ähnlich sind, gibt es doch nicht unerhebliche Unterschiede beim Ausbreitmaß. Diese lassen sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf die Unterschiede im Steigungsmaß der RRSB-Verteilung (KM 33 min: 0,83, PKM 4 min: 0,65) zurückführen.

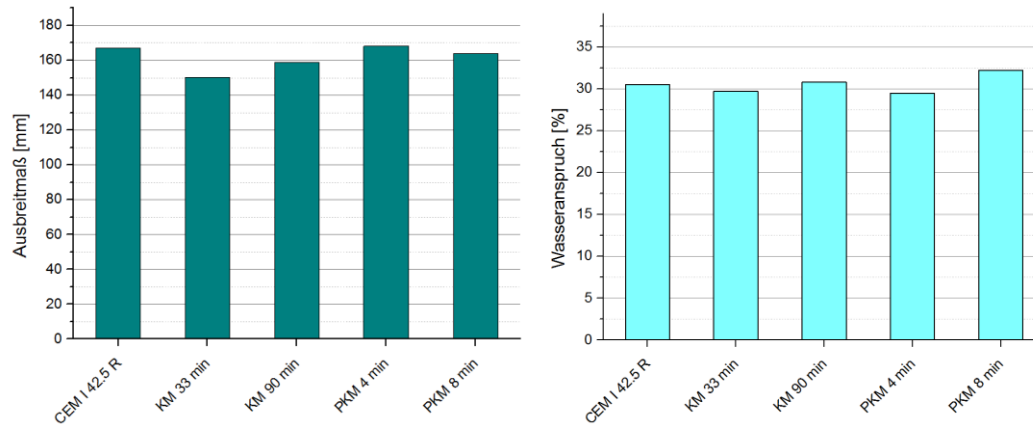


Abb. 4: Verarbeitungseigenschaften der Kompositzemente

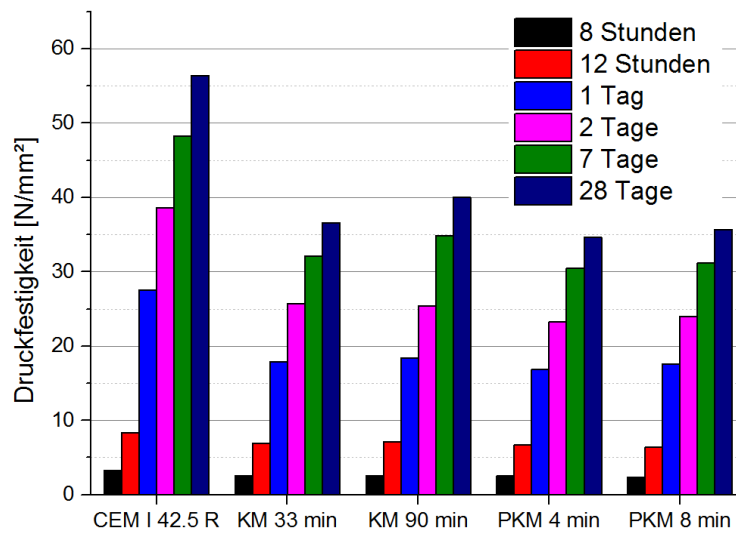


Abb. 5: Druckfestigkeiten der Kompositzemente

Die in Abbildung 5 dargestellten Druckfestigkeiten bestätigen die Annahme, dass eine feinere Aufmahlung positiven Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung hat. Eine signifikante Verbesserung durch Hochenergiemahlung kann jedoch nicht verzeichnet werden. Die Zemente der konventionellen Kugelmühle übertreffen stellenweise sogar die Werte der Planetenmühle. Dies kann an der deutlich höheren Dauer der und Anzahl der Bruchereignisse liegen. In Anlehnung an [5] kann man aus den Druckfestigkeitswerten die Effizienzen berechnen:

$$E = \frac{\text{Verhältnis Druckfestigkeit Referenzzement zu Kompositzement}}{100 - \text{Substitutionsrate}}$$

Tab. 3: Effizienzen der Druckfestigkeiten

Zement	Effizienzen nach [%]					
	8 h	12 h	1 d	2 d	7 d	28 d
CEM I 42.5 R	100%	100%	100%	100%	100%	100%
KM 33 min	95%	104%	81%	83%	83%	81%
KM 90 min	95%	107%	84%	82%	90%	89%
PKM 4 min	95%	101%	77%	75%	79%	77%
PKM 8 min	91%	96%	80%	78%	81%	79%

Es geht deutlich hervor, dass die Kompositzemente hinsichtlich Frühfestigkeiten, insbesondere nach 12 Stunden, sehr gute Effizienzen besitzen. Allerdings verschwindet dieser Effekt im weiteren Verlauf der Hydratation, sodass der Verdünnungseffekt durch das Altbetonbrechsandmehl überwiegt.

Ein ähnliches Muster ergab die Analyse der Hydratationswärmern, weshalb darauf hier nicht weiter eingegangen wird.

## 5. Zusammenfassung

In der hier vorgestellten Arbeit sollten Grundlagen für die von Altbetonbrechsand als Kompositmaterial durch die Anwendung der Hochenergiemahlung erörtert werden. Als Hauptuntersuchungsmethode dienten granulometrische Untersuchungen (Blaine, Gasadsorption, Lasergranulometrie und optische Kornformmessung), Röntgenbeugungsuntersuchungen (XRD), wärmekalorimetrische Analysen (DCA und SDT) sowie Druckfestigkeitsuntersuchungen. Die Mahlungen fanden in der Planetenkugelmühle und Kugelmühle, als konventionelle Vergleichsmahlung, statt. Das zu untersuchende Material war ein realer Altbetonbrechsand unbekanntes Ursprungs. Es wurden sowohl die reinen Recyclingmaterialien als auch die damit hergestellten Kompositzemente untersucht. Folgende Schlussfolgerungen können getroffen werden:

1. Mit steigender Mahlbeanspruchung des Altbetonbrechsandes treten strukturelle Änderungen auf, erkennbar am sich verringerndem röntgenamorphem Anteil.
2. Die Art der Mühle hat Einfluss auf Granulometrie und somit auf Anwendungseigenschaften des Zements.
3. Die Effizienz des Altbetonmehls hinsichtlich Druckfestigkeiten ist, anders als erwartet, unter dem Verdünnungseffekt.

Zur Auswertung des gesamten Versuchsplans (Abb. 1) sind noch wesentliche Untersuchungen ausstehend. Es werden weitere Mühlen und Materialien zu untersuchen sein, um allgemeingültige Aussagen bezüglich der Verwendung von Altbetonbrechsand als Zement-Kompositmaterial zu treffen.

## 6. Ausblick

Zu den weitergehenden Untersuchungen gehören:

- Hinzunahme der Ergebnisse aus den Versuchen mit den anderen Mühlen,
- Detailliertere Betrachtung des scheinbaren Entwässerungsvorgangs der C-S-H-Phasen,
- Findung der optimalen Mahldauer (Verhältnis Energieeintrag - Mahlfortschritt),
- Untersuchungen bezüglich Beton-Performance (Porosität, Dauerhaftigkeit, usw.),
- Anwendung des „Effizienzenmodells“ auf weitere Kennwerte,
- Erörtern von potentiellen Anwendungsgebieten sowie
- Ökobilanzielle Energiebetrachtungen.

## Literatur

- [1] Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2012. Berlin, 2015.
- [2] Möbius, Anke: Neue Perspektiven zur Verwertung von Recycling-Betonsand: Produktideen und erste Ergebnisse. 1999
- [3] Splittgerber, Frank: Identifizierung der Zementart in Zementsteinen und die Übertragbarkeit auf Mörtel und Betone. Weimar, Bauhaus-Universität, Diss., 2012
- [4] Schnell, Alexander ; Müller, Anette: Verwertungsmöglichkeiten für die Sandfraktion von Recyclingbaustoffen aus Beton. 2001
- [5] Ludwig, H.-M.; Reformat, M.; Linß, E.: Potentiale der Verwertung von mechanisch aktiviertem Altbetonbrechsand als alternatives Kompositmaterial im Zement. Fachtagung Recycling R` 13, 19. - 20. September 2013.
- [6] Malvern Instruments: Morphologi G3. Worcestershire (UK), 2010.