

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



Forschungsvereinigung:	VDZ Technology gGmbH (Zementwerke)
Forschungseinrichtung 1:	VDZ Technology gGmbH Forschungsinstitut der Zementindustrie
IGF-Vorhaben-Nr.:	21791 N
Bewilligungszeitraum	01.04.2021 – 30.09.2023
Veröffentlicht VDZ-Webseite	<a href="https://www.vdz-online.de/wissensportal/forschungsprojekte/untersuchung-zum-einsatz-von-keramikmahlkoerpern-zur-energie-und-produktoptimierung-bei-der-mahlung-in-der-zementindustrie">https://www.vdz-online.de/wissensportal/forschungsprojekte/untersuchung-zum-einsatz-von-keramikmahlkoerpern-zur-energie-und-produktoptimierung-bei-der-mahlung-in-der-zementindustrie</a>

Forschungsthema:

## **Untersuchung zum Einsatz von Keramikmahlkörpern zur Energie- und Produktoptimierung bei der Mahlung in der Zementindustrie**

### **1 Ausgangssituation**

Der Elektroenergiebedarf für die Zementherstellung in Deutschland beträgt im Mittel 111 kWh/t<sub>Zement</sub> [VDZ 2018]. Dabei wird der Großteil der elektrischen Energie für die Zerkleinerung verwendet. Die Aufbereitung von Rohmaterialien (Brechen, Mahlen, Trocknen) benötigt ca. 23 % und das Vermahlen von Klinker und anderen Haupt- und Nebenbestandteilen zu Zement ca. 45 % der elektrischen Energie [ECR 2015; Fle 2014]. Die Zementmahlung in Deutschland geschieht hauptsächlich in Kugelmühlen, die geringe Wirkungsgrade aufweisen, deren Austausch durch moderne, effektivere Mahlaggregate oft nicht wirtschaftlich ist. Zudem ist die Herstellung der geforderten Produkteigenschaften auf den neueren Mühlentypen schwieriger. Somit kommt der Optimierung der bestehenden Kugelmühlen eine große Bedeutung zu.

Untersuchungen haben gezeigt, dass durch die Substitution der Stahlmahlkörper in der Feinmahlkammer durch Mahlkörper aus Keramik erhebliche Energieeinsparungen von bis zu 15 % erreichen lassen [Yan 2019]. Diese resultieren in erster Linie aus der geringeren Mahlkörpermasse im Mühlenrohr. Durch die geringere Dichte der Keramikmahlkörper geht die Energieaufnahme des Mühlenantriebes zurück, wobei die Produktionsleistung der untersuchten Mühlen nicht im gleichen Maße abgesunken ist [Yan 2019; Top 2020]. Dem umfassenden großtechnischen Einsatz stehen dabei jedoch wesentliche Probleme und ungelöste Fragestellungen im Weg. So ist der Einfluss durch die Beanspruchung der leichteren Keramikmahlkörper auf die Partikelgrößenverteilung und die daraus resultierenden Produkteigenschaften des Zementes bisher nicht systematisch untersucht worden.

Zudem liegen im Gegensatz zur Nutzung von Stahlkugeln keine allgemein anerkannten Skalierungs- und Auslegungsregeln für den Einsatz von Keramikmahlkörpern vor. Eine besondere Gefahr besteht in der Bildung von Überkorn - Material, welches durch eine zu geringe Beanspruchungsintensität der gewählten Mahlkörper nicht zerkleinert werden kann. Eine „falsche“ bzw. nicht geeignete Gattierung kann dabei erhebliche Auswirkungen auf die Betriebssicherheit der Anlage haben und diese durch die daraus bedingten Anpassungen für mehrere Tage stilllegen [Hof 2008]. Die Kombination aus der Ungewissheit über die zu erwartende Produktqualität und die Betriebssicherheit stellt in nahezu allen Fällen ein zu großes Risiko für den Betreiber dar, wodurch der Einsatz von Keramikmahlkörpern in der Praxis verhindert wird.

## 2 Ziel des Forschungsvorhabens

Durch das Forschungsvorhaben sollten die technisch-wissenschaftlichen Grundlagen für die Dimensionierung und den Einsatz von Keramikmahlkörpern bei der Feinstmahlung in der Zementindustrie geschaffen werden (siehe **Bild 2-1**). Die grundlegende Idee besteht darin, durch den Einsatz von leichteren Keramikmahlkörpern den Energiebedarf der Mahlanlagen mit Kugelmühlen, bei gleichbleibenden oder verbesserten Produkteigenschaften, deutlich zu reduzieren. Weitere Vorteile der Substitution von konventionellen Mahlkörpern aus Stahl bestehen in der Reduktion der Geräuschemissionen und der Mühlentemperaturen.

Durch geringere Mahltemperaturen wird eine Verringerung der Verpelzung der Mühle bei höheren Feinheiten erwartet. Damit kann der Einsatz von teuren Mahlhilfsmitteln bzw. der Wassereindüsung minimiert werden. Die geringere Dichte der Mahlkörper erlaubt es, die Beanspruchungsenergie bei der Feinstmahlung zu reduzieren ohne die Mahlkörperdurchmesser weiter zu verringern. Damit werden Probleme beim Materialtransport und ein Verstopfen der Austragswände verhindert.



**Bild 2-1** 30 mm-Keramikmahlkörper im ungenutzten Auslieferungszustand

Der Einsatz von Keramikmahlkörpern findet zum jetzigen Zeitpunkt nur vereinzelt bei der Zementmahlung Anwendung. Aufgrund vieler nicht erfasster Einflussfaktoren ist eine rein rechnerische Auslegung der Gattierung für Großanlagen aktuell nicht möglich. Um eine Auslegungsgrundlage für den Einsatz von Keramikmahlkörpern im Bereich der Zementmahlung

zu schaffen, sollten in diesem Forschungsprojekt wichtige Kenngrößen für die Auslegung und das Verhalten von Keramikmahlkörpern bei der Mahlung von Klinker und anderen Zement-Haupt- und -Nebenbestandteilen untersucht werden. Als Klinkersubstituenten wurden der häufig genutzte Kalkstein und der für die zukünftige Entwicklung Klinker-effizienter Zemente als bedeutsam eingestufte calcinierte Ton verwendet.

Auf Basis von Laborversuchen wurden Parameter für Versuche auf einer halbtechnischen Anlage im Umlaufmahlbetrieb ermittelt. Mit den aus diesen Versuchen gewonnenen Daten sollen Extrapolationen mittels einer Flow-Sheet Simulationsumgebung durchgeführt werden, um somit auf großtechnische Industrieanlagen zu extrapolieren zu können. Basierend auf validierten Modellen für die Zerkleinerung, den Materialtransport und Sichtprozesse können anschließend die Auswirkungen des Einsatzes von Keramikmahlkugeln auf einen Kugelmühlenkreislauf simuliert und vorhergesagt werden.

### 3 Umfang der Untersuchungen

Um die Eignung der keramischen Mahlkörper für die Zementproduktion bewerten zu können, wurden zunächst mittels der in der Zementindustrie standardmäßig eingesetzten Messverfahren die Ausgangsstoffe analysiert und bewertet. Um das Zerkleinerungsverhalten der Keramikmahlkörper mit konventionellen Mahlkörpern aus Stahl vergleichen zu können, wurden Labormahlungen in einer Batchkugelmühle durchgeführt, bei denen der Energiebedarf der Mühle aufgenommen wurde. Über Batchmahlversuche mit zusätzlichem Wärmeeintrag wurde anschließend die Neigung zur Verpelzung der Mahlkörper untersucht. Basierend auf den Ergebnissen wurden jeweils 3 Mahlkörpergattungen aus Stahl und aus Keramik gewählt, die auf einer Technikumsmahlanlage im geschlossenen Kreislauf eingesetzt wurden, um verschiedene Zementfeinheiten zu erzeugen (siehe **Bild 3-1**). Die 12 erzeugten Klinkermehle wurden mit einem Sulfatträger zu Zementen gemischt und die Produkteigenschaften (Festigkeitsentwicklung, Wasseranspruch, Erstarrungszeit) bestimmt. Die aufgezeichneten Analgenkennwerte aus den kontinuierlichen Mahlungen dienten zur Parametrierung einer Simulation zur Extrapolation des Einsatzes von Keramikmahlkörpern auf eine industrielle Bestandsanlage.

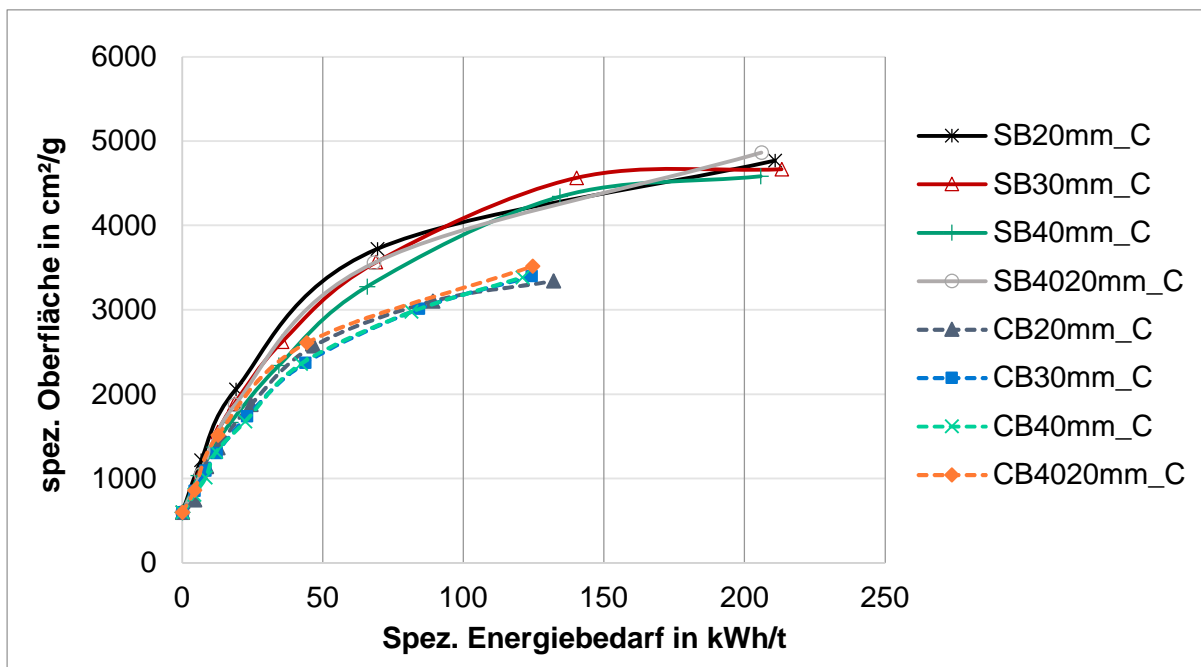


**Bild 3-1** Semi-industrielle-Kugelmühle betrieben im Umlauf mit Stabkorbsichter (li.) und Innenraumansicht beim Einsatz von 30 mm-Keramikmahlkörpern und Klinker (re.)

#### 4 Zusammenfassung der Ergebnisse

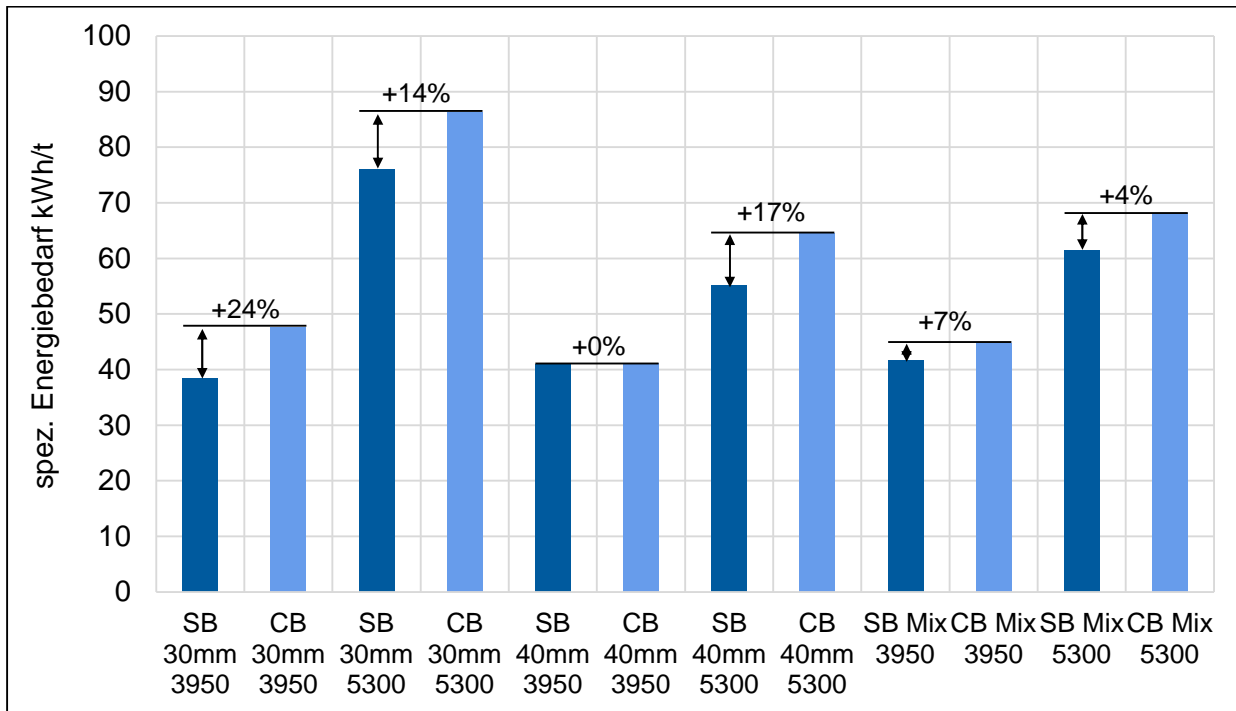
Das Hauptaugenmerk des vorliegenden Projektes lag darin, einen Nachweis des Energieeinsparpotentials durch den Einsatz von keramischen Mahlkörpern in Kugelmöhlen zur Zementmahlung im Vergleich zum Einsatz konventioneller Stahlkörper zu erbringen. In Pilotversuchen aus der Literatur wurden Energieeinsparpotentiale von 10-20 % ausgewiesen. Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes widerlegen diese Aussagen jedoch zumindest in den betrachteten Labor- und halbtechnischen Maßstäben.

Bei den Versuchen im Labormaßstab in einer Batchmühle zeigte sich, dass bei gleicher Produktfeinheit und Mahlkörpergröße ein erhöhter Energiebedarf von ca. 37 % gegenüber Stahlmahlkörpern benötigt wird (vgl. **Bild 4-1**). Gleichzeitig bestand eine Limitierung in der maximal erreichbaren spezifischen Oberfläche nach Blaine (Feinheit). Diese resultiert aus dem gewichtsbedingten geringeren Energieeinsatz der Keramikmahlkörper gegenüber Stahlkugeln bei den Stoßvorgängen.



**Bild 4-1** Spezifische Oberfläche bezogen auf den spezifischen Energiebedarf bei Batchmahlungen von Klinker (C) mit Stahlmahlkörpern (SB) und Keramikmahlkörpern (CB)

Die weiteren Untersuchungen auf einer semi-industriellen-Versuchsmahlanlage belegen die Ergebnisse. Jedoch waren die Unterschiede zwischen Stahl- und Keramikmahlkörpern nicht so ausgeprägt wie bei den Batchmahlungen. Bei einer Produktfeinheit des Klinkers von 3950 cm²/g benötigten die keramischen Mahlkörper in zwei der drei untersuchten Fälle etwa genauso viel Energie wie die Stahlmahlkörper. Auch bei den höheren Feinheiten mit 5300 cm²/g sind die Unterschiede nicht so gravierend wie in den Batchmahlungen. Die Mahlungen mit keramischen Mahlkörpern wiesen einen 4 % bis 17 % höheren Energiebedarf bei diesen Versuchen auf (vgl. **Bild 4-2**). Obwohl die Größe der Mahlanlage einen entscheidenden Einfluss auf den Energiebedarf hat, liegt der Energiebedarf bei der Mahlung mit Keramikugeln jeweils deutlich höher als beim Einsatz von Stahlkugeln.



**Bild 4-2** Vergleich des spezifischen Energiebedarfs der Umlaufmahlversuche nach Korrektur der Produktfeinheiten (CB = keramische Mahlkörper; SB = Stahlmahlkörper)

Inwiefern dieser Unterschied durch ein mehrtägiges Einfahren der halbtechnischen Anlage verringert wird, kann auf Basis der Versuche nicht geschlussfolgert werden. Daher sollten in einem weiteren Projekt auch das Langzeitverhalten untersucht werden, da optimale Einstellungen der Mühle mit neuen Gattierungen in der Praxis häufig erst nach mehreren Tagen erreicht werden. Tendenziell zeigen die Kurzzeitversuche, dass der spezifische Energiebedarf der Mahlung mit keramischen Mahlkörpern mit zunehmender Feinheit gegenüber den Stahlmahlkörpern überproportional zunimmt.

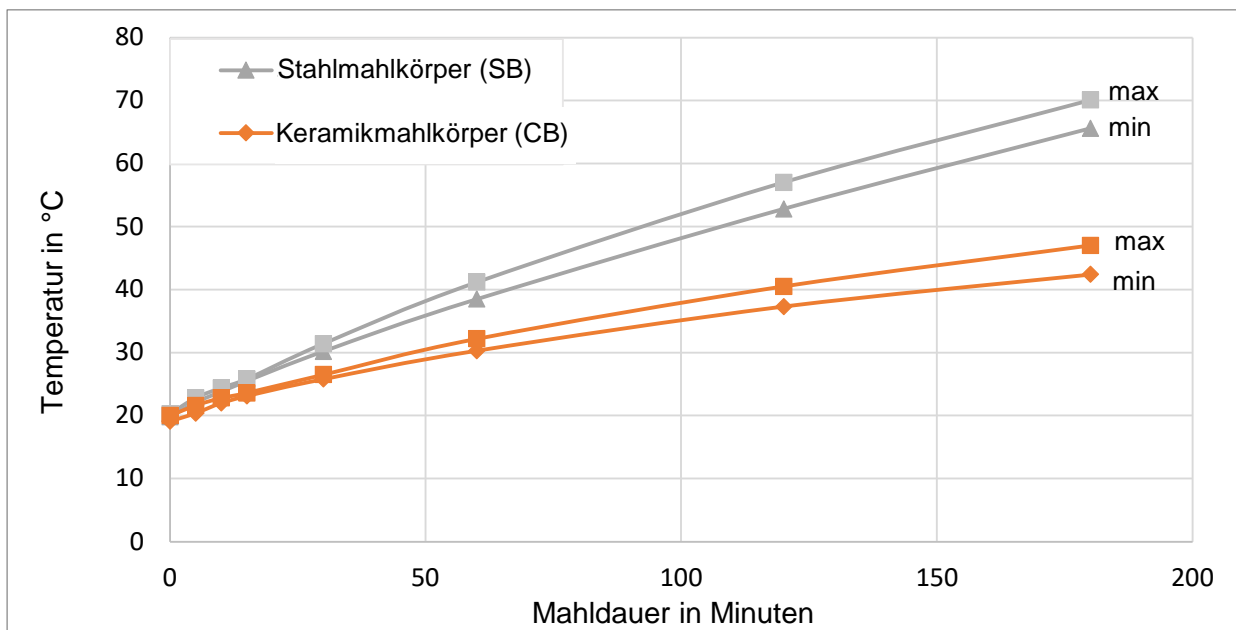
Auf Basis bisheriger Untersuchungen wurde ein geringer Rückgang der Produktionsleistung einer Kugelmühle beim Einsatz der Keramikmahlkörper erwartet. Dieser fällt auf Basis der Versuche mit 50 % bis 60 % jedoch deutlich höher aus. Für die meisten Anwendungen in der Zementproduktion stellt dies bereits ein Ausschlusskriterium für den Einsatz der Keramikmahlkörper dar. Aufgrund der insgesamt geringeren Mahlkörpermasse im Mühlenrohr ist es möglich, durch eine Erhöhung des Füllgrades diesen Produktionsabfall etwas abzufangen. Die meisten modernen Kugelmühlen haben aufgrund ihrer Konstruktion eine Füllgrenze, die häufig schon beim Einsatz von Stahlmahlkörpern fast erreicht wird. Somit ist durch eine höhere Mahlkörperfüllung keine deutliche Verbesserung des Durchsatzes zu erwarten.

In Hinsicht auf die bei den keramischen Mahlkörpern gemessenen Materialumläufe ist ein Einsatz auf Bestandsanlagen nur durch den zuvor beschriebenen Produktionsrückgang möglich. Während auf der semi-industriellen-Umlaufmahlanlage Umläufe von bis zu 9 und bei den Simulationen von bis zu 12 ermittelt wurden, sind die Transportkapazitäten vieler industrieller Bestandsanlagen ab einem Umlauf von 6-7 bereits überlastet. Aufgrund des zu erwartenden starken Produktionsrückganges beim Einsatz der Keramikmahlkörper steigen die absoluten Massenströme des Umlaufes jedoch nur leicht an, wodurch ein Einsatz auf Bestandsanlagen grundsätzlich möglich ist.



Ein Faktor, der in diesem Projekt ebenfalls untersucht wurde, ist die Verpelzungsneigung der Keramikmahlkörper. Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte Methode zur Bestimmung der Materialbelastung der Mahlkörper plausible Werte generiert. Welche Aussagekraft diese haben und wie die Werte sich bei der Mahlung anderer Materialien entwickeln, kann noch nicht abschließend beurteilt werden. Hierfür sind weiterführende Versuche notwendig.

Die aus der Literatur beschriebene geringere Temperaturentwicklung beim Einsatz keramischer Mahlkörper in der Mühle konnte in diesem Projekt bestätigt werden. Bei den Laborversuchen stellten sich um ca. 20 °C geringere Temperaturen in der Mühle ein und auch bei den Umlaufmahlungen zeigten sich trotz sehr niedriger absoluter Mühlentemperaturen von maximal 50°C Unterschiede von 14°C zu den Stahlmahlkörpern. Diese praktisch bestimmten Werte bestätigen die in den Simulationen berechnete Temperaturdifferenz von ca. 13°C.



**Bild 4-3** Minimale und maximale Temperaturen der Stahl- (SB) und Keramikmahlkörper (CB) bei der Mahlung von Klinker und Kalkstein in der Batchmühle

Die Temperaturdifferenz kann für den Einsatz in industriellen Anlagen sowohl positive als auch negative Folgen haben. So begünstigt die niedrigere Temperaturentwicklung die Kühlung der Mühle. Dies bedeutet, dass die Luftgeschwindigkeiten zur Kühlung der Mühle reduziert werden können, was den Steuerbereich der Mühlenentstaubung erhöht und eine genauere Einstellung der Mühle auf verschiedene Produkte zulässt. Der niedrigere Wärmeeintrag der Mahlkörper erlaubt es zudem, ein wärmeres Aufgabegut einzusetzen, bevor eine zusätzliche Kühlung installiert werden muss. Vorrangig im Sommer, bei höheren Außentemperaturen, kann die Kühlleistung der Mühlenbelüftung eingeschränkt sein. Wird gleichzeitig warmer Klinker auf die aufgegeben, kommt häufig eine Wassereindüsung zur Kühlung der Mühle zum Einsatz. Diese birgt bei der Zementmahlung die Gefahr einer Vorhydratation des Zementes. Der Einsatz der keramischen Mahlkörper würde es ermöglichen, die Wassereindüsung zu vermindern oder gar ganz zu verhindern. Die Kehrseite des geringeren Energieeintrages der Keramikmahlkörper besteht darin, dass die Mühle unter Umständen nicht die benötigte Arbeitstemperatur erreicht, um den als Erstarrungsregler eingesetzten Gips zu entwässern. In diesem Fall müsste eine Anpassung des Sulfatträgers bzw. die Verwendung bereits von bereits vorentwässertem Halbhydrat in Betracht gezogen werden.

Hinsichtlich der Zementeigenschaften hat das Forschungsprojekt gezeigt, dass die keramischen Mahlkörper keinen direkten Einfluss auf die Festigkeiten, Wasseranspruch oder Hydratation haben. Die geringen messbaren Unterschiede zu den mit Stahlmahlkörpern hergestellten Produkte ergeben sich aus einem geringeren Anteil an Feinstgut und einer etwas engeren Korngrößenverteilung der Produkte.

Aufgrund der stark schwankenden Energiekennwerte während der Mahlungen auf der Batchmühle sowie der semi-industriellen Mahlanlage und den nicht im Rahmen des Projektzeitraums lösbaren Problemen bei der Energieberechnung der Simulationen war es nicht möglich, allgemeine Gattierungsvorschriften für den Einsatz der keramischen Mahlkörper bei der Zementmahlung abzuleiten.

Unter Einbeziehung aller in diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse muss abschließend angemerkt werden, dass das Energieeinsparpotenzial durch den Einsatz von keramischen Mahlkörpern als begrenzt bzw. nicht vorhanden anzusehen ist. Abseits des Verschleißverhaltens, welches weiterer Untersuchungen bei der Mahlung von Zement bedarf, bestehen keine Bedenken gegenüber den hergestellten Zementeigenschaften. Hinsichtlich der Temperaturentwicklung und Verpelzung der Keramikmahlkörper ist ein Einsatz bei stark haftenden Materialien und Anwendungsfällen denkbar, bei denen der Energiebedarf eine untergeordnete Rolle spielt.

## 5 Literatur

- [ECR 2015] European Cement Research Academy (ECRA) (2015). *ECRA Future Grinding Technologies Project - Report about Phase 1. Evaluation of Roundtable event*, (Technical report TR 127/2015). Düsseldorf.
- [Fle 2014] Fleiger, P. (2014): *Herausforderungen in der Zementmahlung: Energie- und Ressourcen-effiziente Produktion* (Präsentation). Jahrestreffen der Process-Net- Fachgruppe Zerkleinerung und Klassieren 2014. Kaiserslautern.
- [Top 2020] Topnewer Technology Development Co.,Ltd. (2020). Abgerufen 06.06.2020, von <http://www.cementceramicballs.com/gongsianli/>.
- [VDZ 2018] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2018) *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie*. Düsseldorf.
- [Yan 2019] Elite Yang (2019). *Milling with ceramic media*. Indian Cement Review.

## Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben Nr. **21791 N** der VDZ Technology gGmbH, Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.