

IGF-Forschungsvorhaben Nr.: 18853 N
 Bewilligungszeitraum: 01.10.2015 - 30.09.2017
 Forschungsstellen: **VDZ gGmbH Forschungsinstitut der Zementindustrie**
 Forschungsthema: **Untersuchung der separaten Feinstmahlung von Zementen zur Verbesserung der Energieeffizienz und der Zementeigenschaften**

1 Ausgangssituation

Der Elektroenergieaufwand für die Zementherstellung beträgt im Mittel ca. 110 kWh/t_{Zement}. Über 60% des Elektroenergiebedarfs für die Zementherstellung entfallen auf Zerkleinerungsprozesse. Für die Zementmahlung wird mit durchschnittlich 50 kWh/t der Hauptanteil an elektrischer Energie benötigt [VDZ 2011].

Die Nachfrage nach Zementen der höheren Festigkeitsklassen ist in Deutschland über die letzten Jahre stetig angestiegen (**Bild 1-1**). Um dies zu erreichen, erhöhte sich auch die durchschnittliche Mahlfeinheit der Zemente, was zusätzliche Anforderungen an den Betrieb der Mahlanlagen stellt. [Tre 2017]

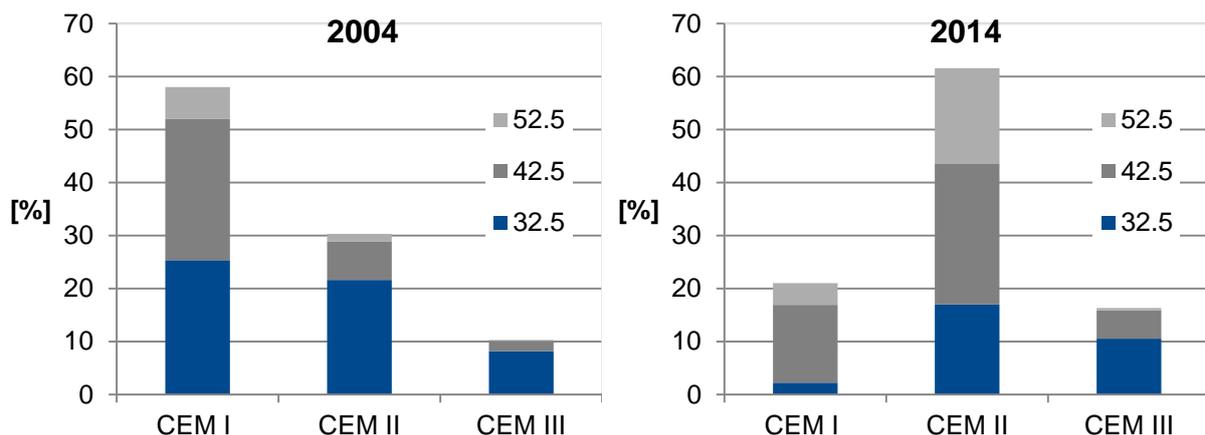


Bild 1-1 Entwicklung der Zementfestigkeiten. [VDZ 2016]

Entsprechend enthalten diese Zemente vergleichsweise große Anteile an feinen Partikeln, die wesentlich die Zementeigenschaften bestimmen. Die Menge an feinen Partikeln (kleiner 8 µm) ist kaum steuerbar und gerade bei energieeffizienten Mahlverfahren nur wenig ausgeprägt. Um die energetischen Vorteile dieser Mühlen besser nutzbar zu machen, wurde in diesem Projekt untersucht, wie die in der Korngrößenverteilung gewünschten Feinanteile durch eine separate Feinstmahlung hergestellt werden können. Dies war nach aktuellem Stand der Technik bisher nicht möglich. Während die in Deutschland überwiegend eingesetzten Kugelmühlen grundsätzlich ausreichende Feinanteile produzieren, sind die energieeffizienteren Anlagen zur Hochdruckzerkleinerung wie Vertikal- und Gutbett-Walzenmühlen je nach Betriebsweise nur eingeschränkt dazu in der Lage. Um die energetischen Vorteile dieser Mühlen besser nutzbar zu machen, wurde im vorliegenden Projekt untersucht, wie die in der Korngrößenverteilung gewünschten Feinanteile durch eine separate Feinstmahlung hergestellt werden können. [Tre 2017]

Eine separate Feinstmahlung von Zementen wurde in der Zementindustrie bislang nicht realisiert. Theoretische Abschätzungen zeigen, dass es möglich ist, den Energiebedarf bei mehrstufiger, angepasster Zerkleinerung zu senken. Zudem lassen sich Festigkeitsentwicklung und Wasseranspruch durch aktive Beeinflussung der Korngrößenverteilung steuern. Kleine Feinstmahlaggregate sind zudem weniger kapitalintensiv als Mahlanlagen mit üblichen Produktionskapazitäten. Die Mischung von hochfein aufgemahlten Anteilen aus der separaten Feinstmahlung mit groben Zwischenprodukten könnte direkt in vorhandenen Mischeinrichtungen umgesetzt werden. [Tre 2017]

2 Ziele des Forschungsvorhabens

Durch das Forschungsvorhaben sollten die Grundlagen für einen Einsatz von Mühlen zur gezielten Feinstmahlung von Zementfraktionen und zementartigen Produkten geschaffen werden. Die grundlegende Idee dabei ist, einen weit größeren Anteil der Zementmahlung mit hocheffizienten Mahlsystemen durchzuführen und einen kleineren Anteil mit einer dafür geeigneten Mühle deutlich über das bisher übliche Maß hinaus fein aufzumahlen. Auf diese Weise werden einerseits die Möglichkeiten zur Minimierung des spezifischen Energiebedarfs bei der Herstellung von Zementen im Rahmen des bekannten Sortenportfolios untersucht. Andererseits sollen die Möglichkeiten zur gezielten Optimierung der Korngrößenverteilung von Zementen durch Feinstanteile betrachtet werden. Die angestrebten Ergebnisse sollen die bisher bestehende Wissenslücke zwischen theoretisch optimalen und industriell herstellbaren Korngrößenverteilungen schließen.

Durch teilweise Feinstmahlung mit einem separaten Mahlaggerat, das speziell auf die hochfeine Aufmahlung ausgelegt ist, können die Zementeigenschaften wie die Festigkeits- und Verarbeitungseigenschaften der hergestellten Zemente gezielt beeinflusst werden. Dies ermöglicht eine gezielte Eliminierung von teils negativen Eigenschaften, die der Hochdruckzerkleinerung zugeschrieben werden. Hierdurch könnten effizientere Mahlaggregate weit stärker als bisher in den Produktionsprozess integriert werden.

Zur Optimierung der Zerkleinerungsvorgänge und der Produkteigenschaften sollten wissenschaftlich fundierte Regeln für die industriell realisierbare Beeinflussung der Korngrößenverteilung und deren Einfluss auf die Zementeigenschaften durch Vermischung von konventionell gemahlten Zementen mit separat hochfein aufgemahlten Anteilen erarbeitet werden.

Es wird erwartet, dass die separate Feinstmahlung von Zement bzw. Anteilen des Zementes und dessen Bestandteilen zu einer besseren Energieausnutzung im Zerkleinerungsprozess führt. Dieses soll durch Bestimmung von spezifischen Energieverbräuchen und anschließenden Variationsrechnungen in Abhängigkeit der zuvor als ideal bestimmten Mischungsverhältnisse geschehen. Derart kann die praktische Applikation direkt bewertet werden.

3 Umfang der Untersuchungen

Zur Beurteilung des Einflusses der Feinstmahlung auf typische Zementhauptbestandteile wurde eine kleintechnische Rührwerkskugelmühle genutzt, auf der iterative Zerkleinerungsversuche mit den wesentlichen Zement-Hauptbestandteilen (Klinker, Hüttensand, Kalkstein und Flugasche) durchgeführt wurden.

Die Eignung der separaten Feinstmahlung wurde an zahlreichen kleintechnischen Untersuchungen bestätigt. Hierzu wurden eine kleintechnische Vertikal-Wälzmühle und eine kleintechnische Rührwerkskugelmühle (siehe **Bild 3-1** links) verwendet, um die separate Feinstmahlung exemplarisch durchzuführen. Zum Vergleich der Daten aus der separaten Feinstmahlung wurde eine halbtechnische Umlaufmahanlage mit Kugelmühle (siehe **Bild 3-1** rechts) genutzt. Hierzu wurden zwei Klinker unterschiedlicher chemisch-mineralogischer Zusammensetzung verwendet.

Modellrechnungen wurden durchgeführt, um die bestmöglichen Mischungszusammensetzungen zu identifizieren. Die Zementeigenschaften von 28 Mischungen sowie von 4 Referenzmahlungen von Umlaufmahanlage und Vertikal-Wälzmühle wurden bestimmt, um den Einfluss der separaten Feinstmahlung zu ermitteln. Der zur Mahlung der Mischungskomponenten nötige spezifische Energiebedarf wurde berechnet.



Bild 3-1 Links: Rührwerkskugelmühle. Rechts: Mahlraum der Vertikal-Wälzmühle [Tre 2017]

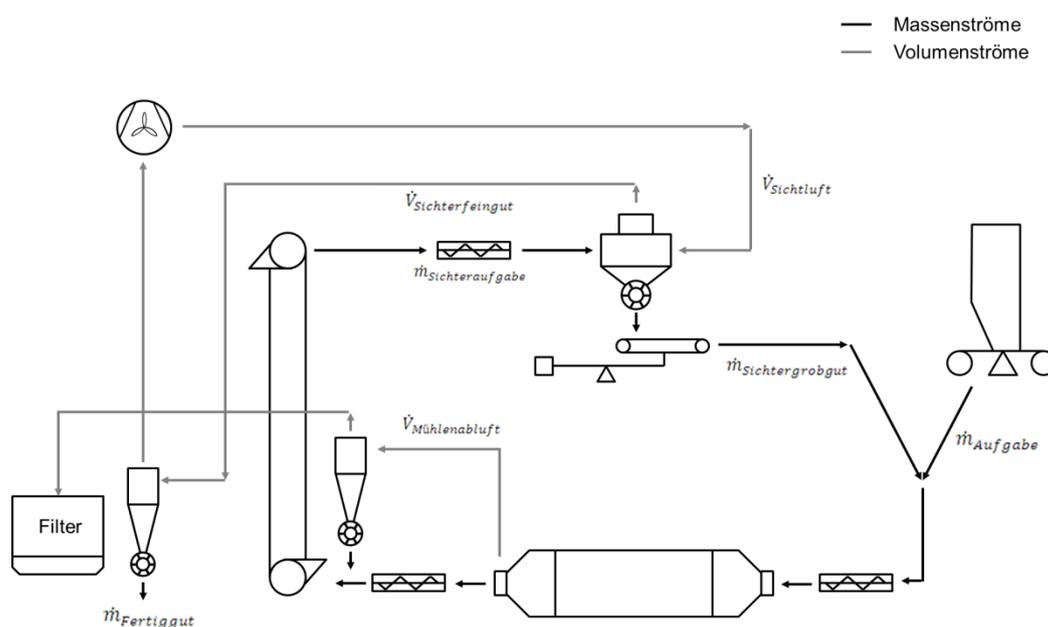


Bild 3-2 Fließbild der halbtechnischen Umlaufmahanlage mit Kugelmühle.

4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Eignung der Feinstmahlung für die Zement-Hauptbestandteile Klinker, Hüttensand, Flugasche und Kalkstein wurde zu Beginn des Projektes grundsätzlich bewertet. Es wurde bestätigt, dass Feinstmühlen deutlich größere Feinanteile erzeugen können als die üblichen Anlagen der Zementindustrie. Zur weiteren Charakterisierung wurden die Mahlbarkeiten der untersuchten Zement-Hauptbestandteile bestimmt. Beide verwendete Klinker verfügten trotz unterschiedlicher chemisch-mineralogischer Zusammensetzung über eine vergleichbar gute Mahlbarkeit (**Bild 4-1**). Dies ermöglichte es, im weiteren Projektverlauf die Einflüsse der Reaktivität der Klinker auf die separate Feinstmahlung bei gleicher Zerkleinerungshistorie zu untersuchen. [Tre 2017]

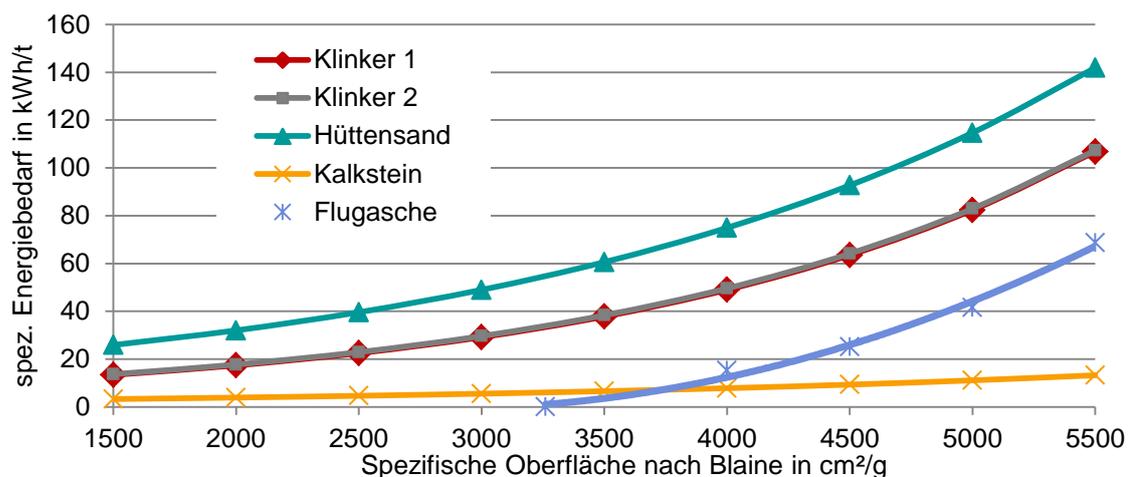


Bild 4-1 Mahlbarkeit der untersuchten Zement-Hauptbestandteile. [Tre 2017]

Zur Charakterisierung der Korngrößenverteilungen war die Prüfung der Eignung der Lasergranulometrie zur Messung der Feinstanteile notwendig. Es hat sich herausgestellt, dass besonders die übliche Dispergierung im Lasergranulometer nicht ausreichend ist, um Agglomerationen des Feinstmaterials aufzubrechen. Die durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass sich die üblicherweise verwendete Fraunhofer-Näherung zur Beschreibung der Zwischenprodukte und des Gesamtproduktes der separaten Feinstmahlung grundsätzlich eignet. Die Eignung der RRSB-Verteilung zur Charakterisierung der Gesamtprodukte konnte ebenfalls nachgewiesen werden. [Tre 2017]

Aufbauend auf diesen Grundlagen wurden die maximal erreichbaren Feinheiten in der trocken arbeitenden Rührwerkskugelmühle mittels iterativen Versuchsreihen bestimmt. Mit diesem Verfahren sind Lageparametern nach RRSB zwischen 6 und 10 μm erreichbar. Für die verwendete Mühle wurde eine starke Abhängigkeit der Aufgabekorngröße ermittelt. Grobe Partikel können nur schlecht durch das Feinstmahlverfahren zerkleinert werden. [Tre 2017]

Um separat feinstgemahlene Materialien gezielt mit weiteren Zwischenprodukten zu einer gewünschten Korngrößenverteilung zusammenstellen zu können, wurde ein Modell entwickelt. Dadurch lässt sich mit Korngrößenverteilungen unterschiedlicher Mahlanlagen in Abhängigkeit verschiedener Randbedingungen die bestmögliche Zusammensetzung der Mischung berechnen. Als Indikator für die Güte der Mischung wird eine Abweichung zu einer Referenzkorngrößenverteilung ermittelt. Diese kann dann dem spezifischen Energiebedarf

zur Mahlung der notwendigen Komponenten der Mischung gegenübergestellt werden. [Tre 2017]

Mit den vorhandenen Zwischenprodukten können Korngrößenverteilungen mit unterschiedlichen Feinheiten und Verteilungsbreiten hergestellt werden. Damit ermöglichen bereits wenige Zwischenprodukte die Herstellung von Zementen verschiedener Festigkeitsklassen. Zudem können, in den Grenzen der verfügbaren Zwischenprodukte, auch die Verteilungsbreiten der Korngrößenverteilungen eingestellt werden. [Tre 2017]

Die separate Feinstmahlung zeigt große Vorteile hinsichtlich der Beeinflussung der Korngrößenverteilung. Zum einen haben durchgeführte Modellrechnungen gezeigt, dass es durch die separate Feinstmahlung möglich ist, die Zemente aus Kugelmühlen nachzubilden. Zum anderen können mit entsprechenden Zwischenprodukten sowohl feine als auch grobe Mischungen unterschiedlicher Verteilungsbreiten hergestellt werden. Dies ist bislang mit einstufigen industriell verwendeten Mahlverfahren nicht möglich und stellt einen wesentlichen Vorteil dieser Technologie dar. Exemplarisch ist in **Bild 4-2** eine Modellrechnung zur Mischung einer Korngrößenverteilung aus den Mahlversuchen auf der Umlaufmahlanlage mit Kugelmühle dargestellt. Ziel war es einen CEM I 52.5 mit einer spezifischen Oberfläche von etwa 5000 cm²/g nach Blaine nachzubilden. Es wurden mehrere Randbedingungen vorgegeben. Zum einen wurden die zur Verfügung stehenden groben Zwischenprodukte eingegrenzt (#A1,#A2,#A3). Zum anderen wurde der minimal enthaltene Anteil Materials aus der Vormahlung auf der Vertikal-Wälzmühle durch eine eigene Randbedingung variiert. Dies ist durch die farbliche Codierung der Einzelpunkte dargestellt. Anhand der Grafik ist zu erkennen, dass mit steigendem Anteil aus dem Feinstmahlaggregat die Abweichung zur Referenz-Korngrößenverteilung sinkt. Die Verfügbarkeit von möglichst feinem Material (#A3) aus der Vertikal-Wälzmühle reduziert zudem den notwendigen Anteil separat feinstgemahlene Materials. Aufgrund der Modellierungsergebnisse kann empfohlen werden feine und grobe Zwischenprodukte aus der Vormahlung sowie einen geringen Anteil separat feinstgemahlene Materials zu verwenden, um ein bestmögliches Ergebnis hinsichtlich Zementeigenschaften und der Nutzung der Hochdruckzerkleinerung zu erzielen. [Tre 2017]

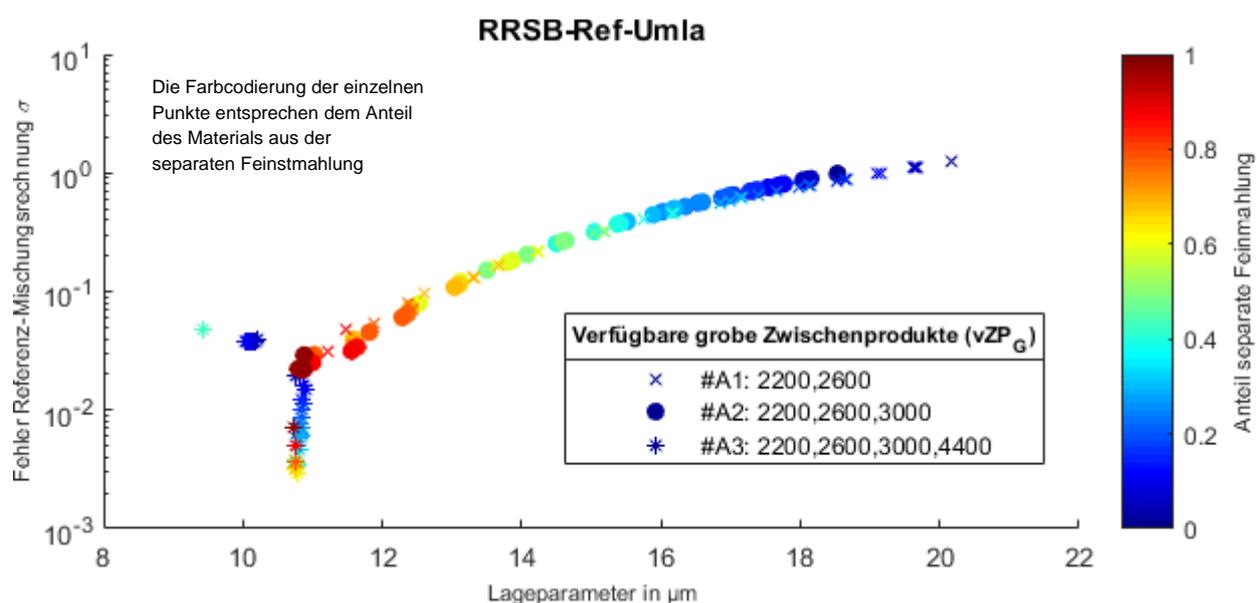


Bild 4-2 Modellrechnungen für Klinker-A, Modellszenario Referenzmahlung [Tre 2017]

Bereits die ohne weitere Optimierung ausgewählten Zwischenprodukte können in den meisten Fällen mit geringen Abweichungen die Referenzprodukte ausreichend genau nachbilden und entsprechen damit in vielen Fällen den angestrebten Produkteigenschaften gemäß DIN EN 197-1 (siehe auch **Bild 4-3**). Bedingt durch die unterschiedlichen Reaktivitäten der untersuchten Klinker ist es schwierig, im ersten Ansatz den einzelnen Festigkeitsklassen zu entsprechen. Um diese zu verbessern, können zum einen die Zwischenprodukte optimiert und zum anderen die Vorgaben an die Modellrechnung entsprechend angepasst werden. Um die Abweichungen der Mischung im Hinblick auf die Zementeigenschaften beurteilen zu können, muss die chemisch-mineralogische Zusammensetzung des verwendeten Klinkers berücksichtigt werden. Bei Klinkern hoher Reaktivität ist der Einfluss der Korngrößenverteilung besonders auf die Festigkeitsentwicklungen geringer als bei Klinkern niedrigerer Reaktivität. Wichtig hierbei ist die gesonderte Betrachtung der Eignung der Referenzkorngrößenverteilung für die jeweilige Festigkeitsklasse bezogen auf die Reaktivität des Klinkers. Bei niedrig reaktiven Klinkern ist besonders die Fraktion 8-3 μm von entscheidender Bedeutung für die Frühfestigkeitsentwicklung. Diese Fraktion der Korngrößenverteilung ist daher von größerem Interesse für die Zementeigenschaften als bislang bekannt. Für weitere Modellrechnungen wird empfohlen, diese Fraktion besonders zu gewichten. [Tre 2017]

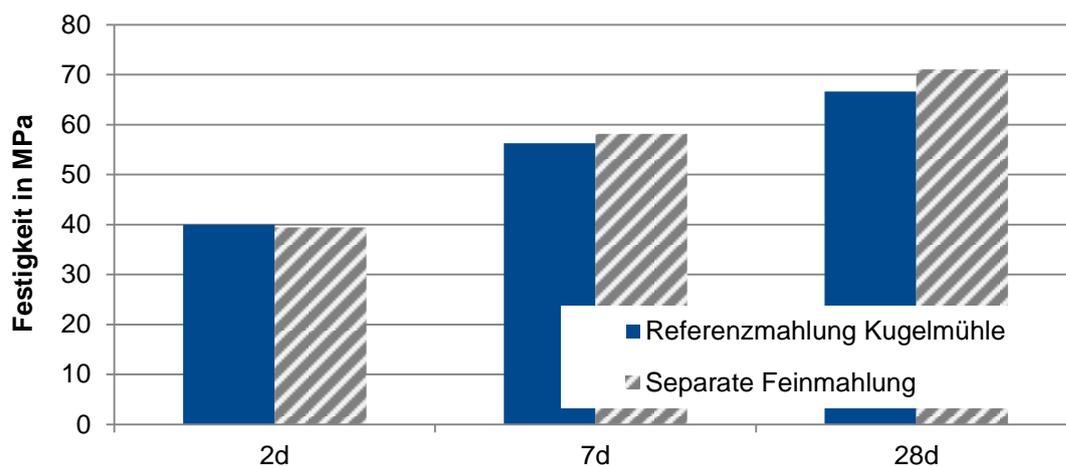


Bild 4-3 Vergleich der Festigkeitsentwicklung von Zementen aus separater Feinstmahlung und Kugelmühlen-Mahlung. [Tre 2017]

Der Wasseranspruch ist nicht durch die Abweichung der Mischung zu beschreiben, hier ist weiterhin die kombinierte Betrachtung von Steigungsmaß und spezifischer Oberfläche erforderlich. Die Mischungsrechnung kann besonders breite Korngrößenverteilungen auch in hohen Feinheitsbereichen erzeugen. Dies wirkt sich in den untersuchten Bereichen positiv auf den Wasseranspruch aus. [Tre 2017]

Bei der Bewertung des spezifischen Energiebedarfs der separaten Feinstmahlung ist zu beachten, dass die Vertikal-Wälzmühle im Labormaßstab einen skalierungsbedingt außergewöhnlich hohen spezifischen Energiebedarf aufweist. Der hohe Energiebedarf der Feinstmahlung ist daher in den meisten Fällen günstiger als die der kleintechnischen Vertikal-Wälzmühle (**Bild 4-4**). Dies ist auf die Überdimensionierung verschiedener Bauteile der Vertikal-Wälzmühle (z.B. Gebläse) zurückzuführen. Besonders bei hohen Zielfeinheiten profitieren die Mischungen von groben Zwischenprodukten aus der Vertikal-Wälzmühle, die mit ho-

hen Anteilen von nachgemahlenem Produkt gemischt werden. Im industriellen Maßstab arbeiten Vertikalmühlen oder Gutbettwalzenmühlen deutlich effizienter als Kugelmühlen. Somit könnte trotz energieintensiver Feinstmahlung ein günstiger Energiebedarf bei den Mischungen erzielt werden. Die mehrstufige Zerkleinerung mittels separater Feinstmahlung ist technisch realisierbar und liefert gezielt gleichwertige oder bessere Produkteigenschaften. Damit besitzt die Technologie grundsätzlich das Potential zum Einsatz in der Zementproduktion. Es wird daher empfohlen, in einem Folgeprojekt zum einen die Praxistauglichkeit des Verfahrens zu untersuchen und zum anderen die Beeinflussung des spezifischen Energiebedarfs in der Praxis zu beurteilen. [Tre 2017]

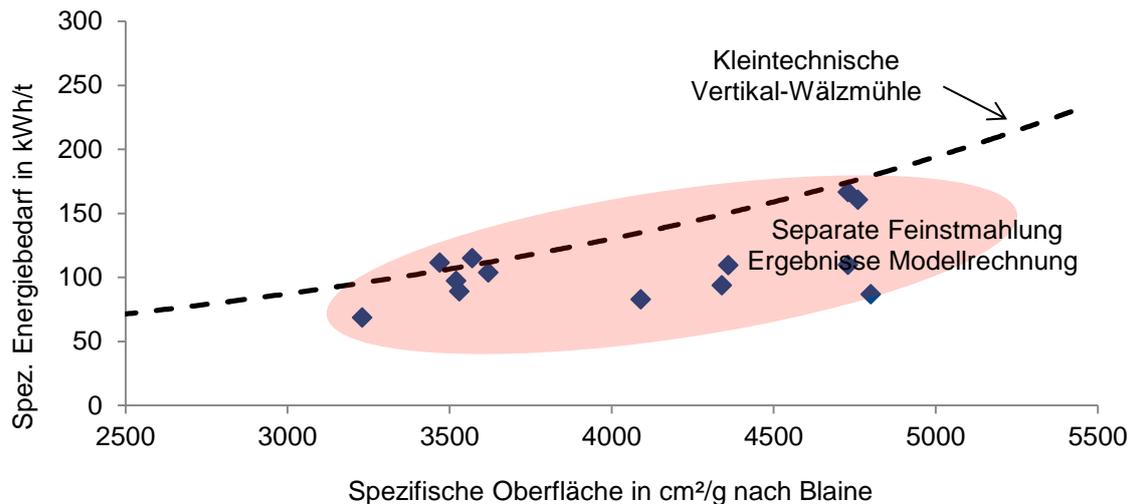


Bild 4-4 Spezifischer Energiebedarf der Vertikal-Wälzmühle im Vergleich zur separaten Feinstmahlung. [Tre 2017]

Gegenüber dem bisherigen Stand der Technik besteht durch das Forschungsprojekt ein deutlich besseres Verständnis des Einflusses der Korngrößenverteilung, insbesondere des Feinanteils, auf die Zementeigenschaften. Durch fehlende Möglichkeiten der Skalierung der verwendeten kleintechnischen Anlagen auf industriell verwendete Baugrößen ist eine abschließende Bewertung der Auswirkungen der separaten Feinstmahlung auf den spezifischen Energiebedarf nur bedingt möglich. Hierzu werden weiterführende Untersuchungen aufgezeigt und empfohlen.

5 Literatur

- [Tre 2017] Treiber, Kevin. *Dissertation, bislang unv.* 2017
- [VDZ 2011] VDZ. *Arbeitsgruppe Sekundärstoffe Datenerhebung*. Düsseldorf: 2011
- [VDZ 2016] VDZ. *Zahlen und Daten: 2016 ; Stand: August 2016 ; Zementindustrie in Deutschland*. Düsseldorf: Verein Deutscher Zementwerke, VDZ 2016

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 18853 N der Forschungsvereinigung VDZ gGmbH Forschungsinstitut der Zementindustrie wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.