

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Forschungsvereinigung: VDZ Technology gGmbH
Forschungseinrichtung 1: VDZ Technology gGmbH
Forschungsinstitut der Zementindustrie
IGF-Vorhaben-Nr.: 20656N
Bewilligungszeitraum 01.06.2019 – 31.05.2021

Forschungsthema:

Verbesserung der Energieeffizienz bei der Vermahlung von Kompositzementen mittels separater Feinstmahlung im semi-industriellen Maßstab

1 Ausgangssituation

In den vergangenen Jahren hat sich das Gesamtbild der Zementproduktion maßgeblich verändert. Die Nachfrage nach Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen ist aufgrund der Anforderungen moderner Bauwerke stark angestiegen [VDZ 2020b], gleichzeitig ist ein Trend zu Zementen mit höherer Festigkeitsklasse feststellbar (Bild 1-1) [VDZ 2019; Pal 2009]. Von dieser Entwicklung profitieren aktuell v.a. CEM II- und untergeordnet auch CEM III-Zemente, was aus verschiedenen Gründen wünschenswert ist. Beispielsweise erlaubt die Klinker-Substitutionsrate dieser Zementsorten eine Reduzierung der CO₂ – Emissionen pro Tonne Zement, zudem werden wertvolle Ressourcen geschont.

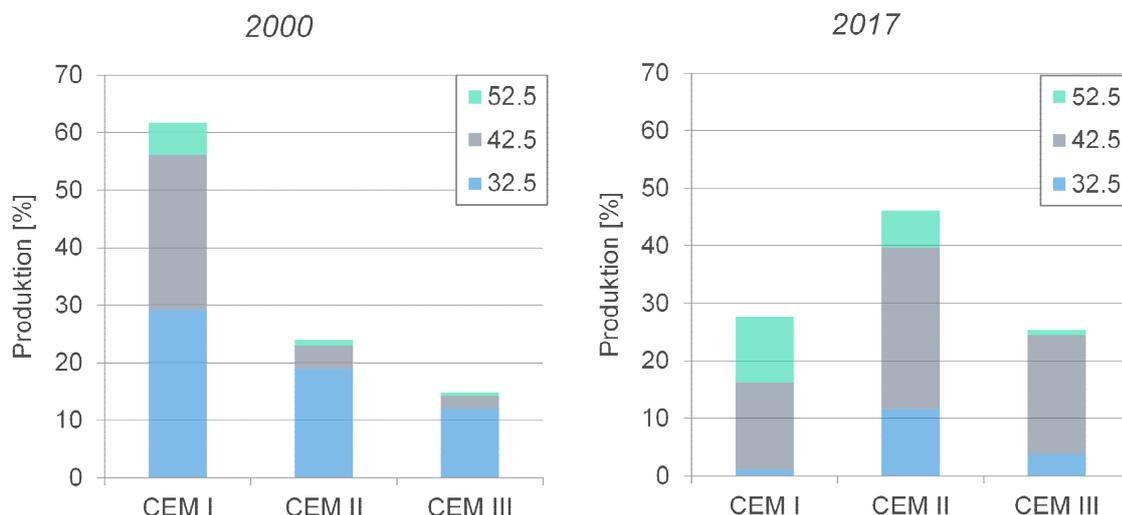


Bild 1-1 Produktion unterschiedlicher Zementarten und Festigkeitsklassen im Jahr 2000 und 2017 [VDZ 2019; Pal 2009].

2 Ziele des Forschungsvorhabens

Die wissenschaftlichen und verfahrenstechnischen Grundlagen zur separaten Feinstmahlung sind bereits im Vorgänger-Vorhaben (18853N) anhand von Portland-Zementen untersucht worden [Tre 2020]. Diese Grundlagen sowie die erarbeiteten wissenschaftlich fundierten Regeln zur Erzeugung von Zementen mittels separater Feinstmahlung sollten im Rahmen dieses Folgeprojektes anhand von Mahltechnologien im semi-industriellen Maßstab überprüft und angewandt werden. Zudem sollte der Ansatz der separaten Feinstmahlung auf die Herstellung und Nachbildung industrieller und mittels Kugelmühle erzeugter Kompositzemente erweitert werden. Dies umfasste neben der Verwendung und Mahlung der Zementklinker auch die Betrachtung weiterer Hauptbestandteile wie Kalkstein und Hüttensand. Durch den Einsatz semi-industrieller Mahlanlagen wie beispielsweise der Gutbett-Walzenmühle oder der vertikalen Rührwerkskugelmühle ist das Energieeinsparpotential der separaten Feinstmahlung im Vergleich zur industriellen Kugelmühle ableitbar. Dieses Einsparpotential sollte anhand eines Portland-Zements sowie mehrerer Portland-Komposit-Zemente aufgezeigt werden.

Darüber hinaus sollte der Einfluss der separaten Feinstmahlung auf die Zementeigenschaften der erzeugten Zementmischungen untersucht und bewertet werden. Die finale Beurteilung der separaten Feinstmahlung ergibt sich dabei aus der Gegenüberstellung der Ergebnisse der Zementeigenschaften sowie dem abgeleiteten Einsparpotential des spezifischen elektrischen Energiebedarfs.

3 Umfang der Untersuchungen

Die in diesem Vorhaben verwendeten Zement-Hauptbestandteile umfassen einen Klinker, einen Kalkstein und zwei Hüttensande. Diese Zement-Hauptbestandteile sowie die als Referenz-Zemente bezogenen Zementsorten wurden chemisch-mineralogisch untersucht. Der Klinker, Kalkstein, Hüttensand A und B wurden zusätzlich bezüglich ihrer Mahlbarkeit analysiert. Mit Ausnahme des Hüttensands A stammen alle Materialien aus demselben Referenz-Zementwerk. Als Aufgabegut für die semi-industriellen Mahlversuche wurden der Klinker, der Kalkstein sowie der Hüttensand A gewählt. Der Hüttensand B wird industriell mittels Vertikalwälmühle (VRM) getrocknet und gemahlen. Insgesamt werden auf der VRM zwei unterschiedliche Feinheiten erzeugt. Beide Produkte der VRM wurden auch für dieses Projekt verwendet, da sie bereits im industriellen Maßstab energetisch effizient hergestellt werden. Die chemisch-mineralogischen Untersuchung beider Hüttensande zeigen gute Übereinstimmung, auch ist die Mahlbarkeit nach Zeisel gut vergleichbar. Hüttensand-haltige Zement-Mischungen mit Hüttensand B können daher als Vergleich zu entsprechenden Mischungen aus der separaten Feinstmahlung herangezogen werden. Dadurch kann das Energieeinsparpotential der separaten Feinstmahlung sowohl mit einer Zement-Produktion mittels Kugelmühle, als auch mittels energieeffizienter Produktion der VRM gegenübergestellt werden.

Die Referenz-Zemente umfassen einen CEM I 42,5R, einen CEM I 52,5R, die Portland-Komposit-Zemente CEM II/A-LL 42,5N sowie CEM II/B-S 42,5N. Diese Zemente werden industriell mittels Kugelmühle (KM) produziert. Zusätzlich wurde ein CEM III/B 42,5N bezogen, welcher aus einem feinen Klinkermehl der Kugelmühle und dem Hüttensand B aus der VRM gemischt wird. Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die verwendeten Referenz-Zemente und deren Zusammensetzung [Kna 2023].

Tabelle 3-1 Ausgewählte Zemente aus dem Sortenportfolio des Referenz-Zementwerks mit Zusammensetzung der Hauptkomponenten und dem an der Zerkleinerung beteiligten Mahlaggregat [Kna 2023].

Mahlstrategie	Zementart	Klinker	Kalkstein	Hüttensand	Mahlaggregat
Gemeinsame Vermahlung	CEM I 42,5R	100 %	-	-	KM
	CEM I 52,5R	100 %	-	-	KM
	CEM II/A-LL 42,5N	~80 %	~18 %	-	KM
	CEM II/B-S 42,5N	~70 %	-	~30 %	KM
Getrennte Vermahlung	CEM III/B 42,5N	~30 %	-	-	KM
		-	-	~70 %	VRM

Die Umsetzung der semi-industriellen separaten Feinstmahlung erfolgte im 1. Mahlschritt anhand einer Gutbett-Walzenmühle (GBWM) und im 2. Mahlschritt anhand einer vertikalen Rührwerkskugelmühle (vRWKM), wie in Bild 1-2 dargestellt. Im 1. Mahlschritt wurde für jeden Zement-Hauptbestandteil jeweils 4 unterschiedlich feine Zwischenprodukte aufgemahlen. Im 2. Mahlschritt wurden der Klinker und der Hüttensand A nachträglich auf jeweils 3 unterschiedlich hochfeine Produkte vermahlen. Bild 3-1 zeigt die verwendeten Mahlanlagen des 1. und 2. Mahlschritts im Technikumsmaßstab.



Bild 3-1 Links: Mahlanlage mit Gutbett-Walzenmühle für die Erzeugung grober Zwischenprodukte des 1. Mahlschritts. Rechts: Vertikale Rührwerkskugelmühle, die für die Nachmahlung und Herstellung der Zwischenprodukte aus dem 2. Mahlschritt verwendet wurde [Kna 2023].

Um den Einfluss der separaten Feinstmahlung auf den spezifischen Energiebedarf und die Zementeigenschaften korrekt zu bewerten, ist es notwendig die Korngrößenverteilungen (KGV) der Referenz-Zemente möglichst genau nachzubilden. Die Nachbildung erfolgte, wie auch schon im Vorgänger-Vorhaben, mittels Mischungsrechnung. Der nichtlineare, iterative Berechnungsansatz des Vorgänger-Projektes wurde entsprechend auf Zemente mit mehre-

ren Hauptbestandteilen erweitert. Dabei wurden die Mischungsanteile errechnet, die für eine möglichst präzise „optimale“ Nachbildung der Referenz-Korngrößenverteilungen notwendig sind. Der Begriff der „optimalen Mischung“ soll hierbei so verstanden werden, dass eine möglichst geringe Abweichung der Mischung aus der SFM und der Referenz-KGV besteht. Insgesamt konnte für alle Referenz-Zemente eine optimale Mischung aus den Zwischenprodukten der separaten Feinstmahlung erzeugt und im Labormaßstab nachgemischt werden.

Die durch die Zwischenprodukte der SFM erzeugten Labormischungen wurden nachträglich einer Bestimmung der Zementeigenschaften unterzogen. Darunter wurden die Biegezug- und Druckfestigkeiten nach 2- und 28-Tagen geprüft, der erforderliche Wasseranspruch bestimmt und der Erstarrungsbeginn bzw. dessen –ende ermittelt. Die Ergebnisse der Zementeigenschaften wurden dem Energieeinsparpotential der SFM gegenüber gestellt.

4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die mittels Mischungsberechnung identifizierten optimalen Mischungsanteile der einzelnen Zwischenprodukte wurden unter Laborbedingungen gemischt und mittels Lasergranulometrie analysiert. Die Abweichung der Labormischung hinsichtlich der jeweiligen Referenz-KGV ist in allen untersuchten Fällen für die gewählten Zemente als gering einzuschätzen. Bild 4-1 zeigt exemplarisch die KGV des Referenz-Zements CEM I 52,5R und dessen Mischung aus der SFM (CEM I_M2.1). Die beiden KGV sind nur in wenigen Stützstellen inkongruent und zeigen sonst gute Übereinstimmung.

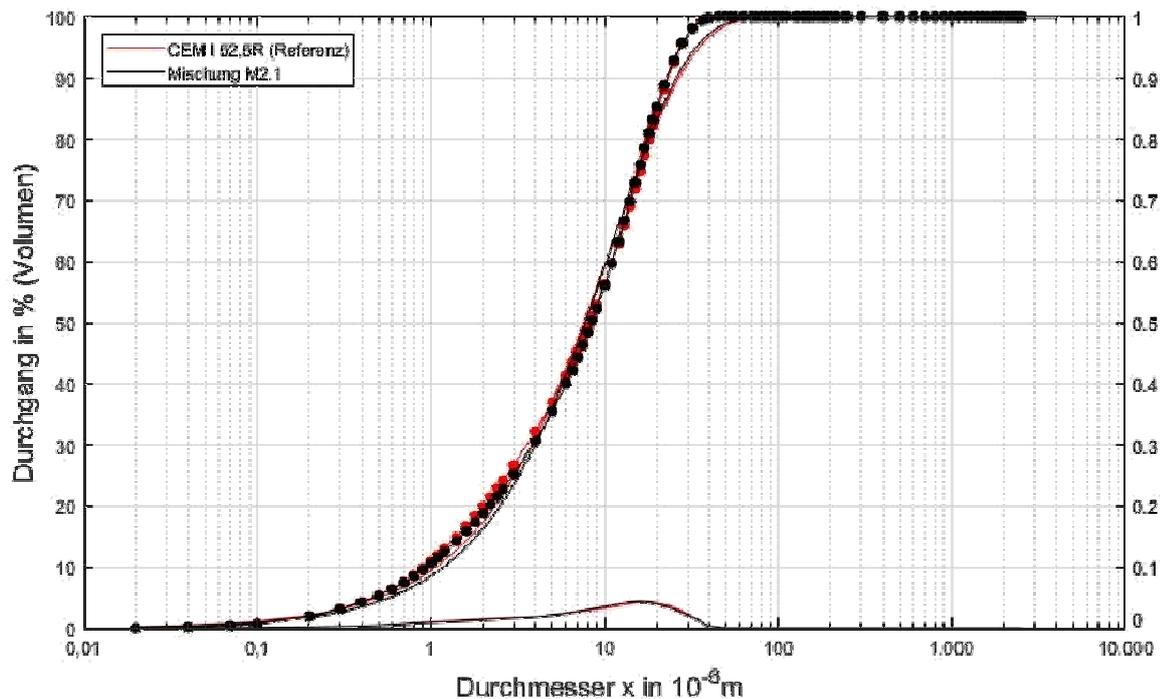


Bild 4-1 Vergleich der beiden KGV des Referenz-Zements CEM I 52,5R (rot) und der im Labor hergestellten Mischung aus der SFM (schwarz) [Kna 2023].

Der für die Herstellung der SFM-Mischungen notwendige spezifische Energiebedarf setzt sich aus den jeweiligen Mischungsanteilen, dem Gehalt an Sulfatträgern sowie dem zur Mischung und Homogenisierung erforderlichen Energiebedarf zusammen. In Bild 4-2 ist die jeweilige Differenz des spezifischen Energiebedarfs aus der SFM und der industriellen Produktion dargestellt. Ein negatives ΔE verweist darauf, dass mittels SFM im direkten Ver-

gleich zur industriellen Produktion Energie eingespart werden kann. Für die Hüttensandhaltigen Zemente CEM II/B-S und CEM III/B wurden jeweils zwei Mischungen aus der SFM erzeugt. Die Mischungen M4.1 und M5.1 bestehen aus Klinkermehlen der SFM und dem Hüttensand B der industriellen VRM. M4.2 und M5.2 sind jeweils reine Mischungen aus der SFM, gemischt mit Hüttensand A.

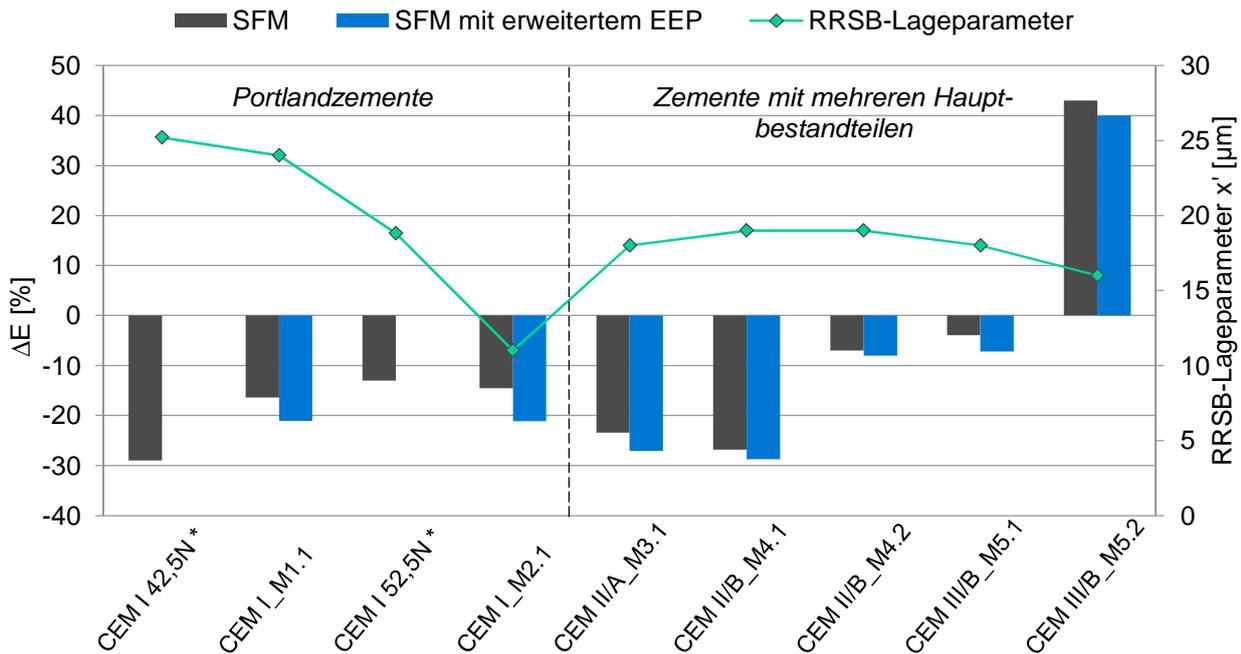


Bild 4-2 Einsparung des spezifischen elektrischen Energiebedarfs zur Herstellung von Zementen mittels separater Feinstmahlung. Der CEM I 42,5N* und CEM I 52,5N* wurde aus [Tre 2020] entnommen. EEP = Energieeinsparpotential [Kna 2023].

Wie in Bild 4-2 dargestellt, zeigt sich, dass sowohl bei den Portland-Zementen, als auch bei den Portland-Komposit-Zementen ein Energieeinsparpotential zwischen 15 und 25 % durch die Herstellung mittels SFM möglich ist, was die Ergebnisse aus [Tre 2020] bestätigt. Eine Ausnahme findet sich bei der Mischung M5.2, die zu großen Teilen aus schwer mahlbarem Hüttensand besteht, welcher sich im Wesentlichen aus energieintensiven Zwischenprodukten des 2. Mahlschritts zusammensetzt. Gegenüber der industriellen Produktion – hauptsächlich mittels energieeffizienter VRM – kann sich die SFM nicht als energiesparende verfahrenstechnische Lösung anbieten, solange die effizienten Produkte aus der VRM als Mischungsanteile überwiegen. Im direkten Vergleich zu KM-Zementen jedoch ist unter Berücksichtigung des Einsatzes von Mahlhilfen (SFM mit erweitertem EEP in Bild 4-2, blaue Balken) ein recht hohes Energieeinsparpotential von bis zu 30 % ableitbar [Kna 2023].

Die Ergebnisse zum Energieeinsparpotential müssen im Kontext der Zementeigenschaften bewertet werden. Exemplarisch sind in Bild 4-3 die Druckfestigkeiten nach 2- und 28-Tagen zusammengestellt. Mit Ausnahme der Mischung M4.2 weisen alle Mischungen aus der SFM geringere Druckfestigkeiten nach 2- und 28-Tagen auf. Die Mischungen M4.2 und M5.2 sind jedoch aufgrund der unterschiedlichen Herkunft der Hüttensande nicht mit den Zementeigenschaften der jeweiligen Referenz-Zemente vergleichbar. Dies gilt auch trotz der Tatsache, dass die chemisch-mineralogische Analyse der Hüttensande A und B gut vergleichbar sind.

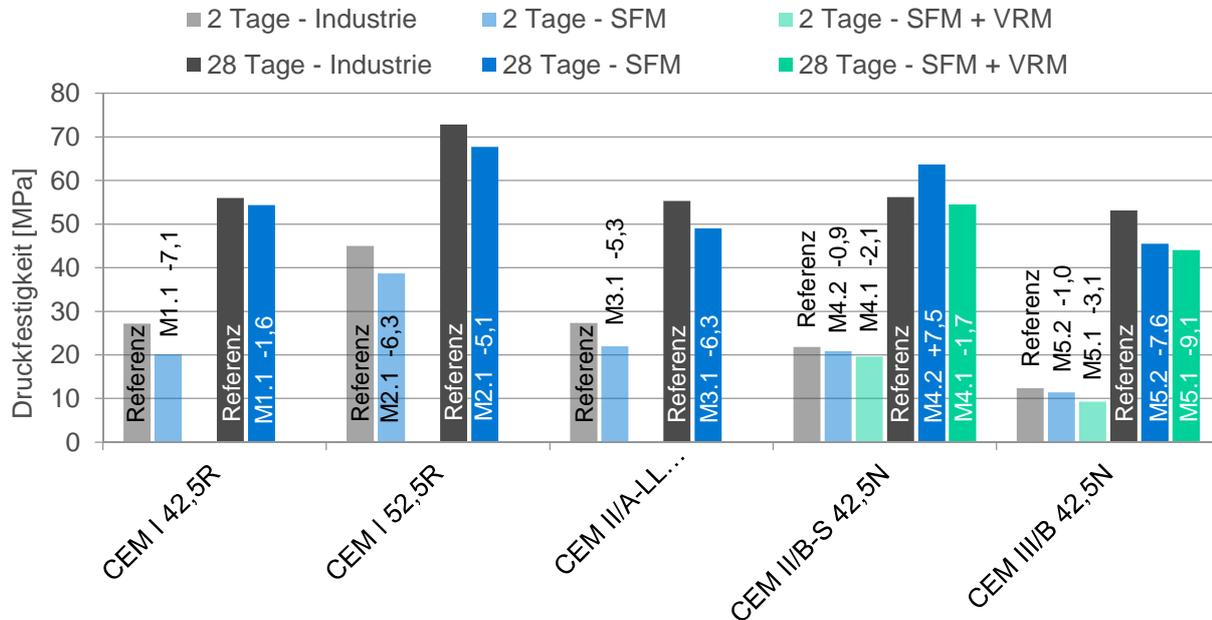


Bild 4-3 Gegenüberstellung der Druckfestigkeiten der Referenz-Zemente und der entsprechenden Mischungen nach 2 und 28 Tagen [Kna 2023].

Bleibt die möglicherweise unterschiedliche Reaktivität der beiden verwendeten Hüttensände unberücksichtigt, könnte die Steigerung der Druckfestigkeit nach 28-Tagen von Mischung M4.2 (etwa + 13%) auch auf eine innere Kornbandlücke im Hüttensandmehl zurückführbar sein. Als Kornbandlücke wird hierbei eine Lücke in der KGV verstanden, die aufgrund des Mischens stark unterschiedlich feiner Zwischenprodukte entsteht. Dadurch ist ein Kornbandbereich innerhalb der KGV unterrepräsentiert. Mischung M4.2 zeigt näherungsweise eine Kornbandlücke des Hüttensandmehls. Ehrenberg in [Ehr 2005] hat bereits anhand von Untersuchungen Hüttensand-haltiger Zemente nachgewiesen, dass sich die Zementeigenschaften – insbesondere die Druckfestigkeit – durch das Erzeugen von Kornbandlücken im Hüttensandanteil verbessern lassen. Eine Steigerung der Druckfestigkeit von ca. 13 % könnte folglich auch auf der inneren Korngrößenverteilung des Hüttensandmehls beruhen. Hierzu sind jedoch weiterführende, systematische Untersuchungen erforderlich.

Aus den Untersuchungsergebnissen lässt sich abschließend ableiten, dass das Verständnis des Einflusses der separaten Feinstmahlung auf das Energieeinsparpotential und die Zementeigenschaften weiter ausgebaut werden konnte. Das Ziel, das Energieeinsparpotential der SFM anhand der Herstellung von Portland-Komposit-Zementen nachzuweisen, wurde in vollem Umfang erreicht. Die Druckfestigkeiten der SFM-Mischungen sind allerdings nicht in allen Fällen mit denjenigen der industriellen Referenz-Zemente vergleichbar. Unter Verwendung der SFM lässt sich jedoch eine Optimierung der Zementeigenschaften in Aussicht stellen, wenn der in [Ehr 2005] beschriebene Ansatz zur Mischung von Ausfallkörnungen des Hüttensands verfolgt wird. Hierzu ist derzeit ein weiteres Folgeprojekt beantragt worden, in welchem dieses Potential unter Verwendung von klinkereffizienten und CO₂-reduzierten Zementen untersucht werden soll.

5 Literatur

- [Ehr 2005] Ehrenberg, A. (2005): *Hohe Frühfestigkeit bei Zementen mit Hüttensand – (K)ein Widerspruch?* – Beton Informationen 2, Verlag Bau + Technik, S. 22 - 51.
- [Kna 2023] Knappert, J.: [*Herstellung und Optimierung klinkereffizienter Zemente mittels separater Feinstmahlung*]. Arbeitstitel, Dissertation, in Vorbereitung, voraussichtlich 2023.
- [Pal 2009] Palm, S. (2009): *Optimierung der Raumausfüllung und der Komponentenverteilung vom Multikompositzementen*. Dissertation TU Clausthal.
- [Tre 2021] Treiber, K., Knappert, J., Fleiger, P.M., Seemann, S. (2021): *Separate Feinstmahlung von Zementen zur Verbesserung des Energiebedarfs und der Zementeigenschaften*. Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppen Mechanische Flüssigkeitsabtrennung, Zerkleinern und Klassieren sowie Agglomerations- und Schüttguttechnik 2021
- [Tre 2020] Treiber, K. (2020): *Herstellung von Zementen mit separater Feinstmahlung: Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften*. Technische Universität Clausthal.
- [VDZ 2020a] VDZ (2020a): *Merkblatt Vt18 - Zerkleinerung*. Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.).
- [VDZ 2020b] VDZ (2020b): *Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien*. Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.).
- [VDZ 2019] VDZ (2019): *Zahlen und Daten - Zementindustrie in Deutschland 2019*. Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.).
- [18853N] AiF-Forschungsvorhaben 18853N (2018): *Untersuchung der separaten Feinstmahlung zur Zementherstellung zur Verbesserung der Energieeffizienz und der Zementeigenschaften*. Abschlussbericht, unveröffentlicht.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 20656N 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 Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.