

14.03.2022

Kurzbericht

Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Abhängigkeit der Mahlbarkeit von Hüttensand von dessen Eigenschaften

Förderkennzeichen: AiF 20187 N

Bearbeitungszeitraum: 01.11.2018 - 31.07.2021

Projektpartner: FEhS - Institut für Baustoff-Forschung e.V., Duisburg
Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg

Hintergrund, Zielstellung, Projektkonzept

Die Mahlung von Hüttensand auf Zementfeinheit ist aufgrund seiner glasigen Struktur ein sehr energieintensiver Prozess. Daher ist es von hohem Interesse, sein Mahlverhalten in Abhängigkeit von verschiedenen Stoffparametern beschreiben zu können. Während im AiF-Projekt 12955 [1, 2] der Glasgehalt als wesentlich Einflussgröße identifiziert worden war, stand im Fokus des AiF-Projekts 20187 [3] die Kornporosität. Für das Zerkleinerungsverhalten (Bruch und Partikelerzeugung) von Hüttensand sollte ein numerisches Simulationsmodell auf Basis der Fragmentierung voneinander trennbarer Grundelemente entwickelt werden. Dieses Modell sollte an labortechnisch und industriell erzeugten Hüttensanden mit unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften verifiziert werden. Hierzu waren folgende Forschungsziele definiert worden:

- Quantitative, realistische Beschreibung der Porosität und Porengrößenverteilung von industriell erzeugten Hüttensanden mittels 3D-CT
- Aufklärung des Einflusses der Kornporosität und Porengrößenverteilung auf die benötigte Kraft bzw. Energie beim Mahlen
- Aufklärung des Einflusses der Kornporosität und Porengrößenverteilung auf die Fragmentgrößenverteilung beim Mahlen
- Verifizierung der Simulationsergebnisse
- Erarbeitung von Handlungsempfehlungen

Basierend auf den Zielstellungen gliederte sich das Projekt in 7 Arbeitspakete. 19 Hüttensande wurden im FEhS-Institut chemisch, physikalisch und mahltechnisch charakterisiert. Eine weitere wesentliche Aufgabe bestand aus der Charakterisierung der Kornstruktur mittels 3D-Computertomographie, die beim TPW-Prüfzentrum in Neuss durchgeführt wurde. Beim IWM erfolgten die Modellentwicklung für die Hüttensandzerkleinerung und numerische Simulationen der Hüttensandmahlung. In Laborgranulationsversuchen des FEhS-Instituts und in Technikumsmahlversuchen bei der Loesche GmbH in Neuss sollten die Simulationsergebnisse verifiziert werden, um abschließend Handlungsempfehlungen für die Hersteller von Granulations- und Mahlanlagen erstellen zu können.

Untersuchungsergebnisse

Es wurden 17 industriell nass mittels Wassergranulation sowie 2 trocken mittels "Rotating-Cup"-Verfahren erzeugte Hüttensande chemisch, physikalisch und mahltechnisch charakterisiert. Die Hüttensande wiesen u.a. eine sehr unterschiedliche Korngesamtporosität auf (1,5-31,2 Vol.-%). Die Ergebnisse des klassischen wie auch des erweiterten Zeiseltests, bei dem nach jedem Mahlschritt die Korngrößenverteilung des Mahlguts ermittelt wird und nicht nur sein Blainewert, zeigt Bild 1. Aufgrund der durchweg hohen Glasgehalte lag der Mahlenergiebedarf für eine zementtypische Feinheit (rd. 4200 cm²/g nach Blaine bzw. $d' \approx 16 \mu\text{m}$) vergleichs-

[1] Ehrenberg, A.: Die Mahlbarkeit von Hüttensand und ihre Beurteilung. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 12955 N, Duisburg, 2003
[2] Ehrenberg, A.: Untersuchungen zum Mahlverhalten von Hüttensand. ZKG International 56 (2003) 3, 70-81
[3] Ehrenberg, A., Bierwisch, C.: Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Abhängigkeit der Mahlbarkeit von Hüttensand von dessen Eigenschaften. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 20187, Duisburg, 2022

weise hoch bei 65-85 kWh/t. Für den weitestgehend kristallinen Standard-Portlandzementklinker des FEhS-Instituts betrug er nur rd. 55 kWh/t, für eine rein kristalline Hochofenstüchschlacke lediglich rd. 37 kWh/t. Es zeigte sich, dass der erweiterte Zeiseltest zum einen die Ergebnisse etwas besser differenzieren lässt und dass zum anderen der blainewertssteigernde Einfluss einer begrenzten Vorhydratation (hier beim HS P) eliminiert wird.

Eine Korrelation mit der aus Rein- und Rohdichten berechneten Gesamtporosität mit dem Mahlenergiebedarf bestand in geringerer Ausprägung als erwartet. Ursache hierfür dürfte ein in Abhängigkeit von der chemischen Zusammensetzung und der thermischen Vorgeschichte unterschiedlich hoher Mahlwiderstand des Hüttensandglases sein. Dieser ist zumindest teilweise unabhängig von der Kornstruktur.

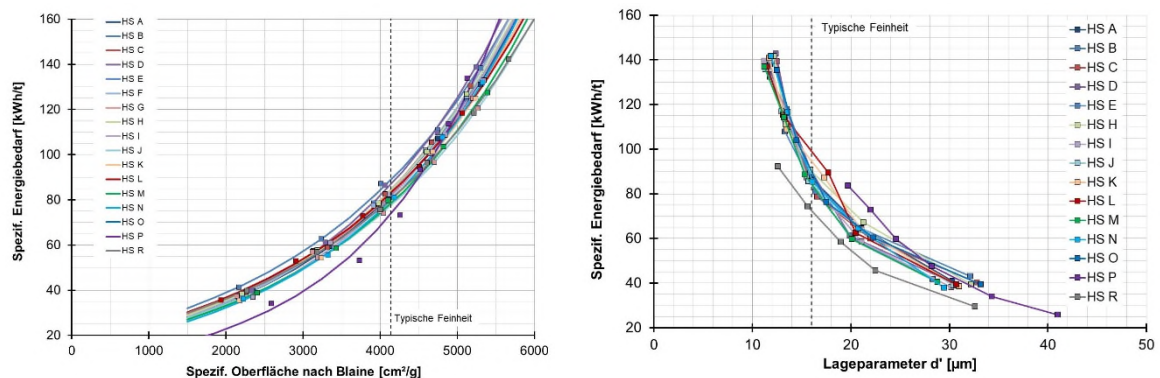


Bild 1: Mahlenergiebedarf von Hüttensand (Originalkörnung) in Abhängigkeit vom Blaine-Wert bzw. vom Lageparameter d' der RRSB-Korngrößenverteilung

Basis für die Simulationsrechnungen waren umfangreiche 3D-CT-Analysen, die an sich in Küvetten befindlichen Hüttensandschüttungen vorgenommen wurden. Das messtechnische Prinzip wird z.B. in [4] erläutert. Soweit bekannt, wurden zum ersten Mal zahlreiche Hüttensande auf diese Weise eingehend charakterisiert. Der analysierte Küvettenabschnitt enthielt, je nach Sieblinie der Hüttensande, zwischen 112 (relativ grober HS R) und 26.825 (HS P) Partikel. Beispielhaft zeigt Bild 2 einen Küvettenquerschnitt für den Hüttensand A, wobei die Farben unterschiedliche Volumina wiedergeben. Aus den 3D-CT-Aufnahmen lassen sich einzelne Körner separieren. Die Analysendaten erlaubten es u.a., die Korn- und Porensphäritäten und die Porengrößenverteilungen zu berechnen. Wie zu erwarten war betrug die Sphärität der nass erzeugten, splittrigen Hüttensande lediglich 0,11-0,42, wohingegen sie bei den trocken erzeugten Partikeln bei 0,60 lag. Für die oft kugeligen Poren betrug sie nahezu einheitlich 0,61-0,65.

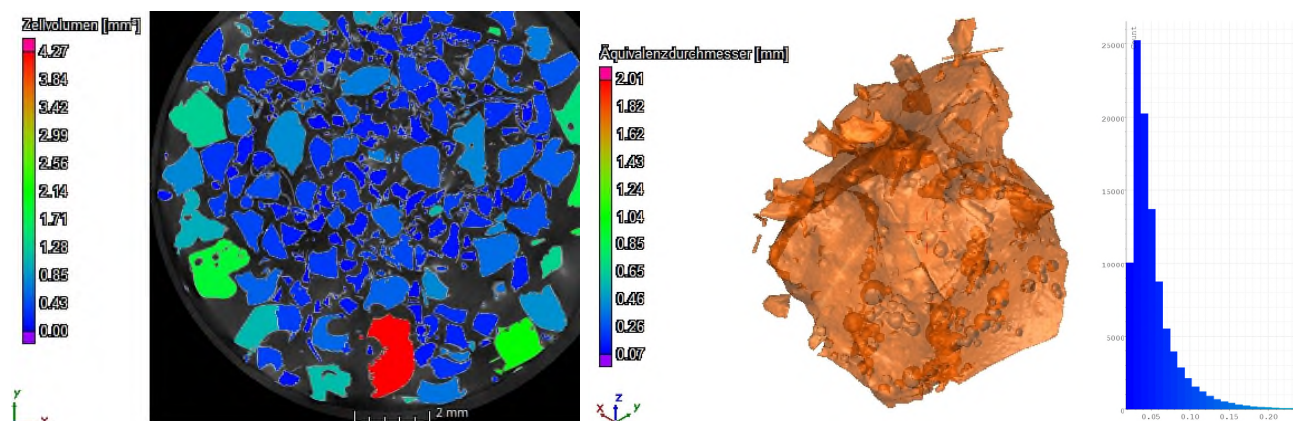


Bild 2: Küvettenquerschnitt mit Hüttensand A, selektiertes Einzelkorn und Porengrößenverteilung (Porenanzahl über Porendurchmesser in mm)

Die Simulationsrechnungen des IWM wurden zum einen mit Modell-Hüttensandkörnern (Kugel, Ellipsoid, Würfel, Quader) durchgeführt, bei denen die Gesamtporosität (0-10 Vol.-%) und die Porendurchmesser (20 µm und 60 µm) variiert und Fremdeinschlüsse (kristalline Anteile) oder Risse berücksichtigt wurden. Zum anderen

[4] Kleinteich, T.: Prüfung von Pulversubstraten zur additiven Fertigung mittels hochauflösender industrieller Computertomographie. In: Moninger, G. (Hrsg.): Werkstoffe und Bauteile auf dem Prüfstand, Bad Neuenahr, 2018

wurden für eine realistische Zerkleinerungssimulation jeweils drei Einzelkörner (klein, mittel, groß) aus den 3D-CT-Analysen der Schüttungen der Hüttensande J, M, N und R mit unterschiedlicher Porosität ausgewählt. Für diese wurden STL-Dateien erzeugt, die dann Eingang in die Simulationsrechnungen fanden (Bild 3).

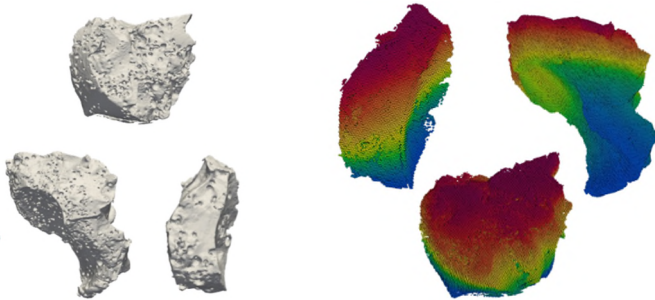


Bild 3:
Beispielhafte Körner des Hüttensands N als 3D-CT-Volumenkörper (links) und als Modell für die Partikelsimulation (rechts)

Aus den Simulationsrechnungen für Modell-Hüttensandkörner (Bild 4) ergab sich, dass der Einfluss der Porosität am größten ist. Schon bei 5 Vol.-% Porosität sinkt die Bruchkraft im Mittel auf 70 % des Ausgangswertes ab. Bei 10 Vol.-% Porosität beträgt die Bruchkraft nur noch 50 % des Referenzwertes für ein vollständig dichtes Korn. Man kann bei den Modellkörnern demnach den reduzierenden Einfluss auf die benötigte Bruchkraft wie folgt gliedern: Gesamtporosität >> Einschlüsse > Risse

Entsprechend eines theoretischen Modells nach Katchanov sollte die relative Bruchkraft proportional zum Feststoffanteil innerhalb des Kornes sein, also beispielsweise bei 10 Vol.-% Porosität auf 90 % der Bruchkraft eines dichten Kornes absinken. Die Simulationen zeigen allerdings, dass der Effekt der Porosität weitaus größer und nichtlinear ist!

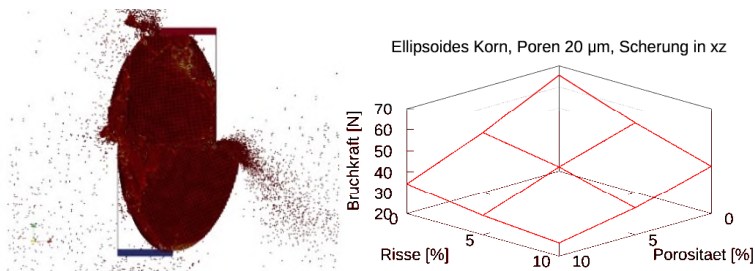


Bild 4:
Auf tretende maximale Bruchkräfte bei der Scherung ellipsoider Modellkörner mit Poren mit dem Durchmesser 20 µm

Für die Berechnungen auf Basis realer Körner wurden diese in der extrem rechenzeitintensiven Simulation unter uniaxialer Kompression bzw. unter Scherung bis zum Bruch belastet. Bild 5 zeigt eine Reihe von Schnappschüssen aus exemplarischen Druck- bzw. Scher-Simulationen. Die Spannung ist darin farbkodiert dargestellt, wobei hellere Farbtöne einer größeren Spannung entsprechen. Am feinen Staub, der beim Bruch entsteht, lässt sich die feine räumliche Auflösung der numerischen Simulationen erkennen.

Die aus den Simulationen erhaltenen Kraft-Weg-Diagramme wurden in Darstellungen des spezifischen Mahlergiebedarfs in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche überführt (Bild 6). Diese Oberfläche wurde bestimmt, indem die gesamte Oberfläche des Kornes bzw. der Kornfragmente zu jedem Zeitpunkt der Belastung algorithmisch berechnet und mit der Kornmasse normalisiert wurde. Dieser Wert ist also nicht mit dem Wert zu verwechseln, der mit der Blaine-Methode messtechnisch ermittelt wird. Vergleicht man die beiden Belastungsarten, so wird offenbar, dass unterschiedliche Regimes der Mahlung adressiert werden. Während unter Kompression bis zu einer spezifischen Oberfläche von mehr als 1000 cm²/g zerkleinert wird, entsteht unter Scherung nur eine spezifische Oberfläche von gut 300 cm²/g. Entsprechend erreicht auch der spezifische Mahlergiebedarf unter Kompression wesentlich höhere Werte, verglichen mit der Situation unter Scherung. Hinsichtlich des Einflusses der Porosität lieferten die Simulationsergebnisse keinen eindeutigen Trend. Hüttensand M mit der geringsten Porosität zeigte zwar über weite Bereiche den größten Energiebedarf für eine gegebene spezifische Oberfläche. Jedoch sank der Energiebedarf nicht monoton mit steigender Porosität der weiteren Hüttensande. Hieraus wird das Fazit für die geometrisch komplexen (geringe Sphärizität), realen Hüttensandkörner gezogen, dass der allein durch die Porosität verursachte Einfluss auf die Bruchfestigkeit durch weitere Einflussgrößen (z.B. die Glasstruktur) überdeckt werden kann.

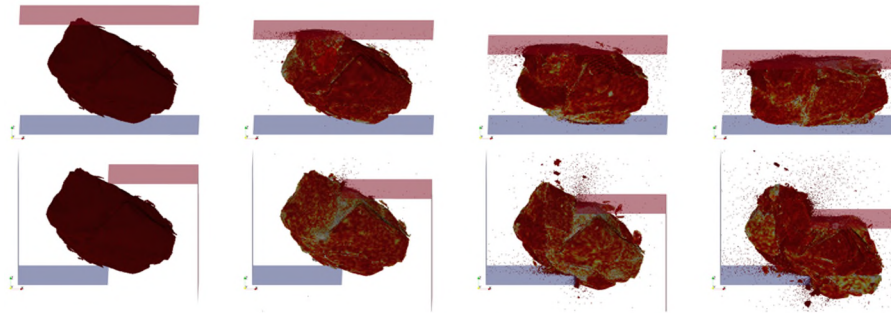


Bild 5: Simulation der Kompression (oben) und der Scherung (unten) eines realen Modellkorns des Hüttensands M mit farbkodierter Spannungsverteilung

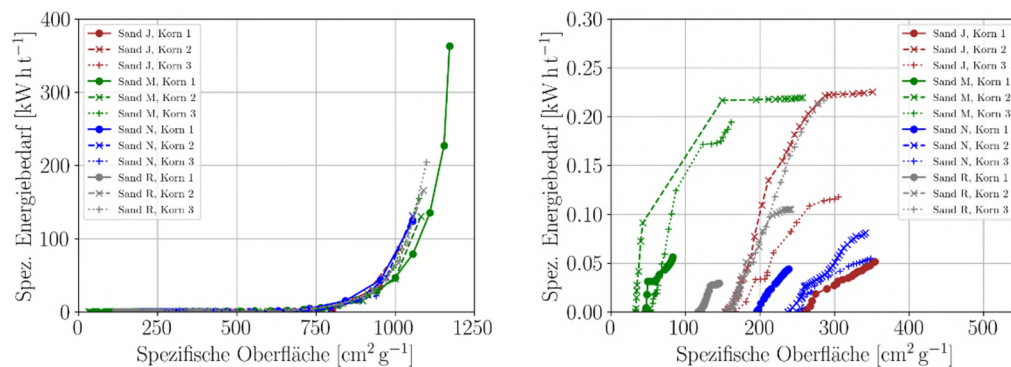


Bild 6: Spezifischer Mahlenergiebedarf in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche aus der Simulation der Kompression (links) bzw. Scherung (rechts) ausgewählter 3D-Modelle realer Hüttensande

Die Laborgranulation zur gezielten Herstellung von Hüttensanden mit unterschiedlicher Porosität und Porengrößenverteilung erwies sich als untauglich, da es trotz erheblicher Variation der Hochofenschlacke stets zu sehr ähnlichen, dichten Hüttensandkornstrukturen kam, so dass eine Überprüfung der an industriellen Hüttensanden gewonnenen Ergebnisse nicht möglich war.

Für Anlagenbauer konnten konkrete Handlungsempfehlungen erarbeitet werden. Hinsichtlich der gezielten Einstellung höherer Kornporositäten sind den Betreibern von Granulationsanlagen allerdings metallurgisch bedingte Grenzen gesetzt. Darüber hinaus kann hinsichtlich der Porositätseinstellung ein Zielwiderspruch zwischen reduziertem Mahlenergiebedarf auf der einen Seite und höherem, mit erhöhtem Trocknungsaufwand verbundenem Restfeuchtegehalt auf der anderen Seite bestehen. Ein Ergebnis der Zerkleinerungssimulationen einzelner Hüttensandkörner ist ein wesentlich geringerer spezifischer Mahlenergiebedarf im Vergleich zu typischen Laborwerten bei der Mahlung von Hüttensandschüttungen. Dieser Befund legt nahe, dass der Mahlprozess an sich Potential zur Optimierung bietet. Ziel wäre hierbei, die aufgewendete Energie stärker auf die Mahlung einzelner Körner zu konzentrieren und auftretende Energieverluste – beispielsweise durch innere Reibung im Schüttgut – zu minimieren.

Kontakt

Eine ausführlichere Darstellung des Projekts wird im "Report" des FEhS-Instituts Nr. 1/2022 erscheinen.

Dr.-Ing. A. Ehrenberg a.ehrenberg@fehs.de Dr. C. Bierwisch claas.bierwisch@iw.fraunhofer.de

Dank

Das IGF-Vorhaben Nr. 20187 N des FEhS-Instituts für Baustoff-Forschung e.V. 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. Die Autoren danken für diese Unterstützung.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages