

# Partikelbruch in der Fördertechnik: Prüfmethodik und Simulation mittels Diskrete Elemente-Methode

Dipl.-Ing. Michael Denzel, Leoben\*

**Kurzfassung:** Mechanische Belastungen während Transport-, Lager- und Aufbereitungsprozessen führen zur Schüttgutdegradation und zur Erzeugung von Feinmaterial. Dies kann in mehreren Anwendungen problematisch sein. In dieser Arbeit wird eine Prüfmethodik zur Analyse des Bruchverhaltens von bruchfähigen Schüttgut präsentiert. Diese basiert auf einem speziell entwickelten automatischen Prüfstand für Einzelpartikel-Prallversuche. Gängige Modelle zur Simulation des Partikelbruchs mittels der Diskrete Elemente Methode (DEM) werden hinsichtlich ihrer Eignung für hohe Massenströme evaluiert. Ein neues Bruchmodell für die DEM wird präsentiert. Dieses basiert auf einem probabilistischen „particle replacement“ mit vordefinierten Bruchmustern, welche mit dem Voronoi-Algorithmus tesselliert wurden. Dies gewährleistet Massen- und Volumenkonstanz und ermöglicht die Simulation von langen und komplexen Fördervorgängen mit hohen Massenströmen. Das Bruchmodell wurde mittels Shatter-Tests am Beispiel von Hochofensinter verifiziert und validiert.

Je nach Material und Belastung können Transport- und Lagerprozesse zur Schüttgutdegradation führen. Vor allem an Übergabestellen besitzt das Schüttgut aufgrund des Höhenunterschiedes und der Fördergeschwindigkeit der beteiligten Gurtbandförderer oft einen hohen Energieinhalt. Durch den Übergabevorgang kann das Schüttgut stark abgebremst werden, wodurch die Bewegungsenergie zum Großteil in Schüttgut- und Anlagenverschleiß umgewandelt wird. Des Weiteren können auch Aufbereitungsprozesse wie Sieben zu unerwünschtem Partikelbruch führen. Bei der Kohlenförderung ist beispielsweise Schüttgutdegradation aufgrund von Staubexplosionsgefahr und Luftverschmutzung zu vermeiden. Besonders kritisch ist der Kornzerfall auch bei Hochofensinter, weil für eine ausreichende Durchgasung im Hochofen eine bestimmte Mindestkorngröße benötigt wird. Feinmaterial muss erneut der Sinteranlage zugeführt werden und ist somit aufgrund des energieintensiven Sinterprozesses mit hohen Kosten und Emissionen verbunden.

Im Zuge des von der EU geförderten RFCS-Projektes MinSiDeg wird derzeit nach Lösungen gesucht, um den Sinterzerfall signifikant zu reduzieren und somit Emissionen und Energieaufwand zu senken [1]. Dabei wurde in der Arbeitsgruppe Fördertechnik und Konstruktionslehre am Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft der Montanuniversität Leoben eine Prüfmethodik zur Analyse der Bruchcharakteristik von Hochofensinter

und ein geeignetes Bruchmodell für die Diskrete Elemente-Methode (DEM) entwickelt, welches es ermöglichen soll, bestehende Anlagen zu simulieren und hinsichtlich Partikelbruchs zu optimieren. Die in diesem Beitrag beschriebene Vorgehensweise wurde am Beispiel von Hochofensinter durchgeführt, eignet sich aber ebenso für andere bruchfähige Schüttgüter.

## Prüfmethodik zur Analyse der Bruchcharakteristik

Zur Analyse des Bruchverhaltens werden mit einem eigens dafür entwickelten

Prüfstand Einzelpartikelprallversuche vorgenommen (siehe Bild 1; Konzept siehe Bild 2). Der Prüfstand besteht aus einer Vereinzlung mittels Schwingtopf, Wiegestation, Belademechanismus, Druckluftkanone sowie einer inkludierten Fragmentanalyse. Alle Module sind vollautomatisiert, womit eine zeiteffiziente Versuchsdurchführung (Dauer: 50-70 s) ermöglicht wird. Die Steuerung und Automation des Prüfstandes erfolgte aufgrund des niedrigen Budgets ausschließlich mit Arduinos (Softwareplattform).

Der Schwingtopf wird mit einer vorsortierten Schüttgutprobe beaufschlagt. Die Partikel werden hierbei vereinzelt und anschließend verwogen. Mit einem eigens konzipierten Belademechanismus [2] werden sie möglichst schonend in die Druckluftkanone geladen und anschließend mit einer definierten Geschwindigkeit gegen eine Prallplatte beschleunigt. Standardmäßig ist als Prallplatte eine 20 mm dicke Stahlplatte verbaut. Die Prallplatte ist jedoch einfach auszutauschen, um auch Interaktionen mit anderen Materialien untersuchen zu können. Die tatsächliche Aufprallgeschwindigkeit wird mittels Lichtschranken gemessen.

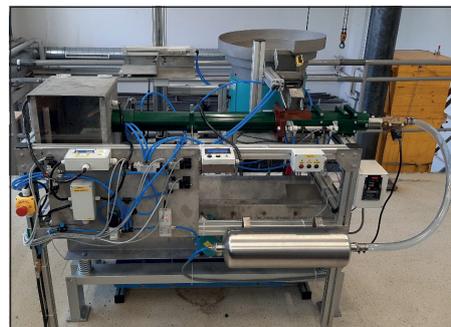


Bild 1: Automatischer Prüfstand für Einzelpartikelprallversuche

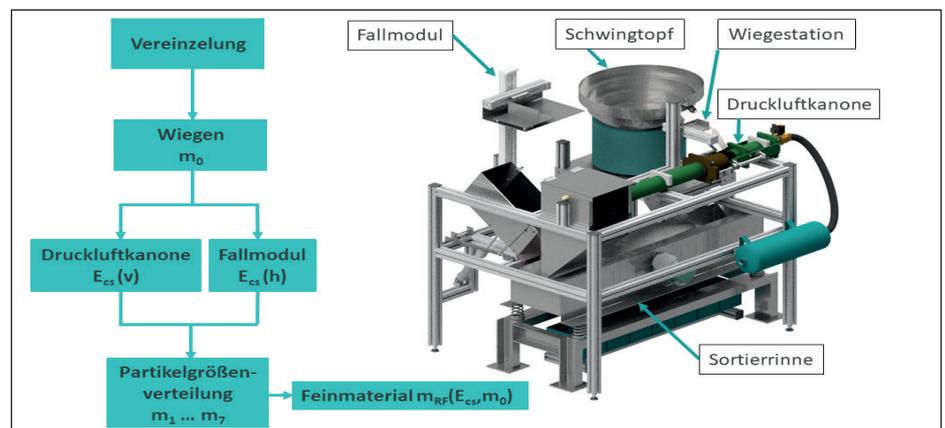
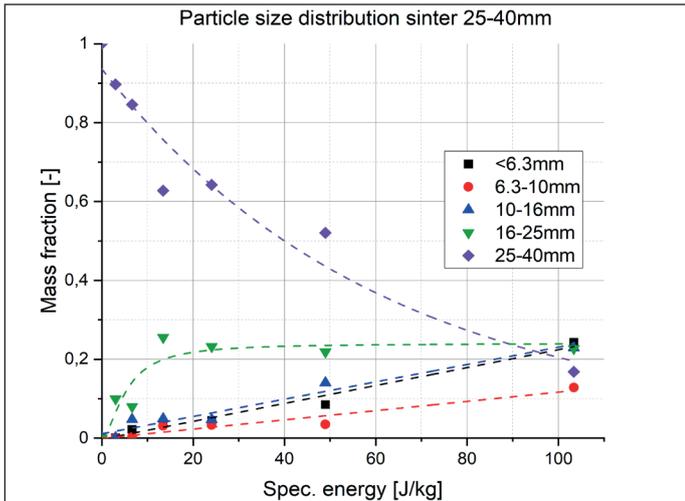


Bild 2: Konzept des automatischen Prüfstandes für Einzelpartikelprallversuche

\* Dipl.-Ing. Michael Denzel  
Senior Researcher  
Bergbaukunde - Fördertechnik  
und Konstruktionslehre  
Montanuniversität Leoben  
Franz-Josef-Straße 18  
8700 Leoben  
Tel.: +43 3842 402 2814  
Mobil: +43 664 80898 2814  
E-Mail Mail: michael.denzel@unileoben.ac.at



**Bild 3:** Partikelgrößenverteilung von Hochofensinter der Größenfraktion 25-40 mm nach dem Bruch in Abhängigkeit der massenspezifischen Aufprallenergie

Nach dem Aufprall werden die Fragmente schonend in die eigens dafür entwickelte Sortierrinne geleitet. Die Sortierrinne ist eine mit zwei Unwuchtmotoren angetriebene, V-förmige Schwingrinne mit stufenweise größer werdendem Spalt. Es ist zu beachten, dass es sich hierbei um eine eindimensionale Sortiermethode handelt und diese somit nicht direkt mit konventionellen Sieben vergleichbar ist. Deshalb sollte auch die Schüttgutprobe mit derselben Sortierrinne vorsortiert werden. Unterhalb der Sortierrinne sind Auffangboxen auf Wägeeinheiten platziert. So kann die massenmäßige Partikelgrößenverteilung nach dem Bruch festgestellt werden. Die Anfangsmasse des Partikels, die Aufprallgeschwindigkeit und die Fragmentmassen werden erfasst und als CSV-Datei auf einer SD-Karte gespeichert. Der Prüfstand ist in [3] näher beschrieben.

Mit dem hier beschriebenen Prüfstand können Partikelgrößen bis 50 mm Korn Durchmesser und spezifische Energien im Bereich von 8-338 J/kg (Aufprallgeschwindigkeiten 4-26 m/s) mittels der Druckluftkanone geprüft werden. Versuche mit grö-

ßeren Partikeln (> 50 mm) und kleineren Energieniveaus (< 8 J/kg) können mit dem Fallmodul (300-1000 mm Fallhöhe bzw. 3-10 J/kg) durchgeführt werden.

Im vorliegenden Beitrag wurde Hochofensinter der Größenfraktion 25-40 mm untersucht. Dabei wurden insgesamt 180 Partikel auf sechs verschiedenen, spezifischen Energieniveaus geprüft. Da Hochofensinter sehr heterogene Eigenschaften aufweist, wurden jeweils 30 Versuche pro spezifischem Energieniveau vorgenommen. Bei homogeneren Materialien kann die Versuchsanzahl dementsprechend reduziert werden. Die Ergebnisse sind in Bild 3 dargestellt. Dabei repräsentiert jeder Datenpunkt das arithmetische Mittel von 30 Versuchen. Mit zunehmender spezifischer Aufprallenergie nimmt der Massenanteil der Initialfraktion 25-40 mm exponentiell ab. Die kleineren Fraktionen 0-16 mm folgen annähernd einem linearen Trend. Weitere Ergebnisse und Erkenntnisse zum Bruchverhalten von Hochofensinter sind in [3], [4] und [5] angeführt, wobei mehrere Größenfraktionen unterschiedlicher Hersteller untersucht wurden.

## Bruchmodelle in der DEM

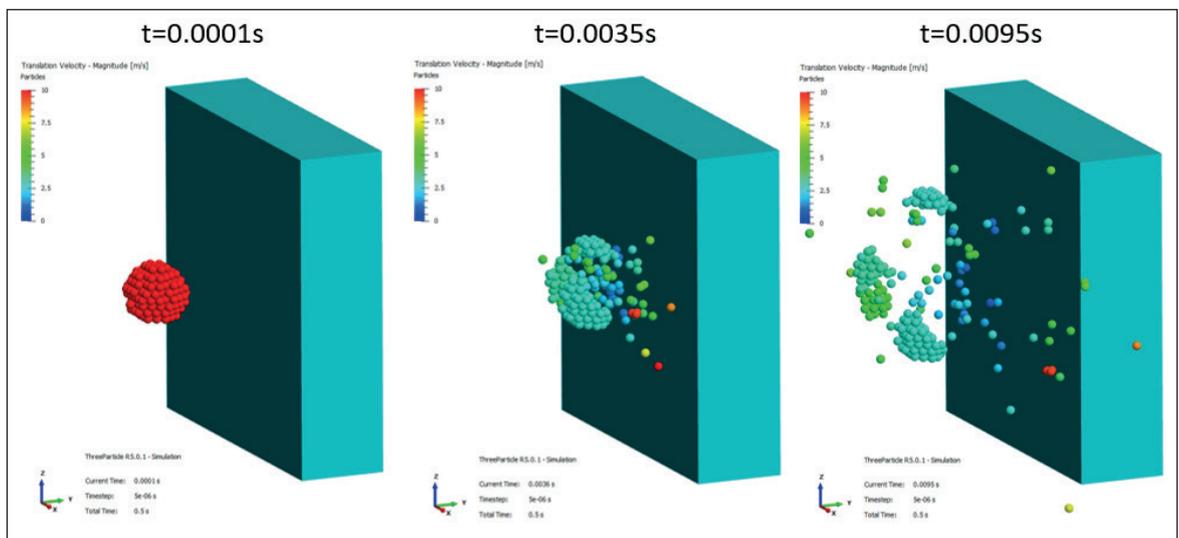
### Evaluierung der maximalen Kontaktkräfte

Eine relativ einfache Methode zur Prognose des Partikelbruchs ist die Evaluierung der maximalen Kontaktkräfte im post-processing. Dabei wird die Kontaktkraft jedes einzelnen Partikels über die gesamte Förderdauer evaluiert und das Maximum für jeden Partikel ermittelt. Mittels Simulation des Prallversuchs wird der Zusammenhang zwischen maximaler Kontaktkraft und Aufprallgeschwindigkeit festgestellt. Anhand dieses Zusammenhangs und der Ergebnisse der Bruchversuche kann somit eine Vorhersage der zu erwartenden Partikelgrößenverteilung nach dem Bruch getroffen werden. Eine detaillierte Beschreibung dieser Methodik und ein Vergleich mit Versuchsergebnissen ist in [4] und [5] ersichtlich, wobei teilweise zufriedenstellende Simulationsergebnisse erzielt wurden. Nachteilig bei dieser Methode ist allerdings, dass ein Partikel nach dem Bruch nicht als gebrochen berücksichtigt wird. Dies ist zwar bei einfachen Fördervorgängen vernachlässigbar, ist jedoch weniger geeignet für komplexere Fördervorgänge. Des Weiteren ist es nur bedingt geeignet für größere Massenströme, da ein aufwändiges post-processing erforderlich ist und aufgrund der kleinen Speicherintervalle (um die Kontaktkraft ausreichend genau abzubilden) ein großer Speicherbedarf entsteht. Deshalb wird vor allem auch für den Transport von Hochofensinter nach einem Bruchmodell verlangt, welches in der Lage ist, den Partikelbruch selbst zu simulieren und eventuell bruchfähige Fragmente generieren kann.

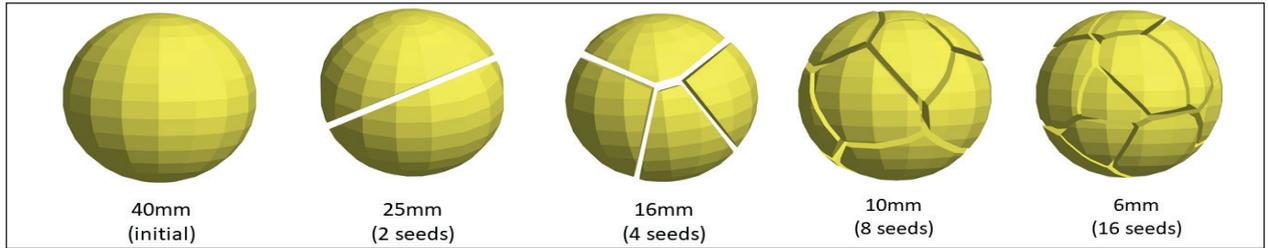
### Bonded particle model

Beim bonded particle model [6] wird ein Partikel aus vielen kleinen Partikeln aufgebaut, welche mit einem virtuellen Zylinder

**Bild 4:** Simulation des Sinterbruchs mittels bonded particle model



**Bild 5: Voronoi-Fragmentierung an einem vernetzten, kugelförmigen Partikel (Explosionsansicht zur besseren Darstellung)**



miteinander verbunden sind. Bei mechanischem Versagen dieses virtuellen Zylinders, welcher sowohl auf Zug/Druck als auch auf Biegung beansprucht werden kann, kommt es zum Bruch (Bild 4). Entscheidend dafür ist die Definition einer kritischen Normalspannung. Das bonded particle model ist bereits relativ etabliert und wurde beispielsweise in [7] zur Simulation von Gestein in einem Kegelbrecher verwendet.

Um den Bruch von Hochofensinter zu simulieren, wurde folgender Ansatz gewählt:

Ein Sinterpartikel wird aus Subpartikeln der kleinsten vorkommenden Fragmentgröße aufgebaut und die kritische Normalspannung mit dem Schussversuch kalibriert. Dabei wird die kritische Normalspannung so lange variiert, bis die Partikelgrößenverteilung nach dem Bruch mit den Versuchsergebnissen übereinstimmt. Hierbei ist das Bruchverhalten in der Simulation nicht nur vom Wert der kritischen Spannung abhängig, sondern auch vom E-Modul des virtuellen Zylinders. Weil im Gegensatz zu [6] und [7] Subpartikel gleicher Größe verwendet wurden, wurde die kritische Normalspannung einzelner bonds zusätzlich einer Normalverteilung folgend definiert. Die Auswertung der Partikelgrößenverteilung nach dem Bruch erfolgte mit einer MATLAB-Routine im post-processing, welche die zusammenhängenden Cluster anhand annähernd gleicher Translationsgeschwindigkeit erkennt und mittels der Positionen der Subpartikel den maximalen Korndurchmesser berechnet.

Mit recht hohem Kalibrationsaufwand konnten nur mäßig zufriedenstellende Ergebnisse erzielt werden. Des Weiteren wird aufgrund der hohen Partikelanzahl und der vielen bonds eine hohe Rechenleistung benötigt, weshalb sich dieses Bruchmodell für die Simulation großer Massenströme und somit für den Transport von Hochofensinter weniger eignet.

**Particle replacement model**

Erstmals vorgestellt in [8], werden beim particle replacement model Partikel beim Überschreiten einer kritischen Kontaktkraft durch mehrere kleinere Partikel ersetzt. Die Folgepartikel erhalten die gleiche Geschwindigkeit wie der Initialpartikel, was eine grobe Näherung darstellt. Vorteilhaft bei diesem Modell ist, dass, im Vergleich zum bonded particle model, viel weniger

Rechenleistung benötigt wird, weil erst ab dem Bruchereignis kleinere Fragmente simuliert werden und keine rechenintensiven bonds (Bindungen) existieren. Ein weiterer großer Vorteil ist, dass durch die Vorgabe der Folgepartikel die Partikelgrößenverteilung nach dem Bruch definiert werden kann, womit eine höhere Genauigkeit erzielt wird und der Kalibrationsaufwand der Bindungen (bonds) entfällt.

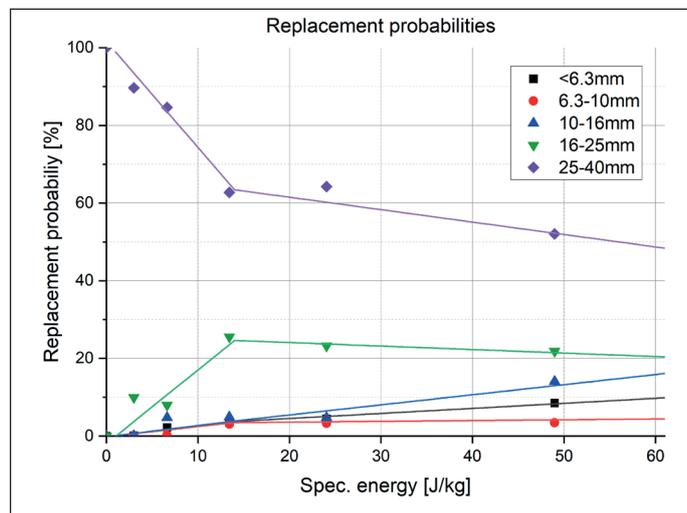
Ein Vergleich zwischen bonded particle model und particle replacement model wurde in [9] angestellt. Nachteilig bei diesem Modell ist allerdings der Volumenverlust, wenn eine große Kugel durch viele kleinere ersetzt wird. Um Massenkonzanz zu gewährleisten, wurde in [10] die Dichte der Folgepartikel dementsprechend erhöht. Dies ist zwar irrelevant bei Mühlen und Brechern, ist jedoch weniger geeignet für Schüttgutsimulationen mit großen Massenströmen, weil Fließverhalten und Belastungen an Förderanlagen verfälscht würden. In [11] wird dies umgangen, indem sich die Folgepartikel anfangs überschneiden und für die folgenden Zeitschritte kleinere Reaktionskräfte definiert werden, um Explosionen zu vermeiden. Allerdings kommt es dadurch zu einem Volumenzuwachs und einem unnatürlichen Auseinanderdriften der Fragmente, welches für die Simulation des Transports von Hochofensinter weniger geeignet ist.

**Neues Bruchmodell: Probabilistisches Particle-Replacement mit Voronoi-Fragmenten**

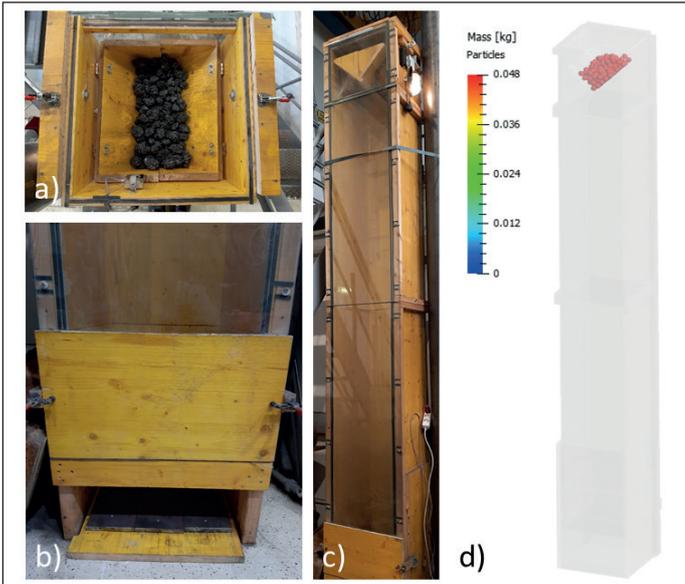
Um den Partikelbruch mit hoher Genauigkeit und auch bei größeren Massenströmen simulieren zu können, wurde ein neues Partikelbruchmodell entwickelt. Das Bruchmodell basiert auf der particle replacement method [8], wobei – ähnlich wie in [11] – je nach Belastung die Initialpartikel probabilistisch durch unterschiedliche Folgepartikel ersetzt werden. Im Gegensatz zu [11] werden als Folgepartikel aber keine Kugeln verwendet, da hierbei keine Massen- und Volumenkonstanz gegeben wäre. Stattdessen wird der Initialpartikel durch ein Bruchmuster ersetzt. Hierbei ist der Folgepartikel ein Partikel gleicher Form und Masse, der mithilfe des Voronoi-Algorithmus [12-14] tesseliert wird (siehe Bild 5).

Bei der Voronoi-Fragmentierung werden im Volumen zufällig verteilte Punkte definiert, sogenannte seeds. Anschließend wird jeweils auf halber Distanz zwischen zwei benachbarten seeds das Volumen geteilt. Somit ergeben sich je nach Anzahl der seeds mehr oder weniger feine Fragmente, dessen Form kantig und zufällig bestimmt ist. Dies bietet den großen Vorteil, dass Volumen- und Massenkonzanz gewährleistet werden.

Im hier angewandten Fall für Hochofensinter werden vier verschiedene Folgepartikel definiert (6 / 10 / 16 / 25 mm). Die Folgepartikel sind jeweils so fein tesseliert, dass die durchschnittliche Fragmentmasse annähernd der durchschnittlichen Masse eines Partikels der erwünschten Größenfraktion entspricht (Bild 6). Das Feinmaterial (< 6.3 mm) wird allerdings aus



**Bild 6: Wahrscheinlichkeiten für Folgepartikel beim Bruch aus stückweiser linearer Regression der Bruchversuchsergebnisse**



**Bild 7: Fallschacht – a) Gutaufgabe in Klappe; b) Prallplatte aus Stahl am Boden; c) Frontansicht; d) DE-Simulation mit ThreeParticle**

rechenstechnischen Gründen in der Simulation größer dargestellt. Je nach Belastung wird der Initialpartikel beim Bruch vollständig durch Fragmente einer kleineren Größenfraktion ersetzt. Die Wahrscheinlichkeit, durch welchen tesselierten Folgepartikel der Initialpartikel beim Bruch ersetzt wird, wird anhand der Bruchversuche definiert. Dazu wird basierend auf den Versuchsergebnissen (Bild 3) eine stückweise lineare Regression vorgenommen. Das Bruchmodell wird in der DE-Software ThreeParticle mithilfe der Particle-Replacement-API (Application Programming Interface) implementiert. Hierbei werden die Geradengleichungen für die Bruchwahrscheinlichkeiten im API hinterlegt. Der Zusammenhang zwischen Kontaktkraftmaximum und Aufprallgeschwindigkeit wurde mittels Simulation des Schussversuchs ermittelt. Bei jedem Kontaktkraftmaximum wird mithilfe des API eine korrespondierende spezifische Energie berechnet und mittels Zufallsvariable, im Falle eines Bruchs, der bereits vordefinierte tesselierte Folgepartikel bestimmt. Die Wahrscheinlichkeiten für jeden Folgepartikel entsprechen der durchschnittlichen Partikelgrößenverteilung für den jeweiligen Belastungsfall. Sollte der Partikel laut Zufalls-

generator nicht brechen, wird der Partikel nicht ersetzt. Somit stellt sich bei ausreichend großer Partikelanzahl im Durchschnitt die richtige Partikelgrößenverteilung in der gesamten Schüttgutprobe ein.

### Verifizierung & Validierung

Das Bruchmodell wurde mittels Shatter-Test verifiziert. Hierbei wurde ein Fallschacht mit schnell auslösender Klappe aus [15] verwendet (Bild 7). Der Fallschacht hat eine Fallhöhe von 3,8 m und das Schüttgut prallt am Boden auf eine Stahlplatte. Die Klappe wird von einem Elektromagneten verschlossen und kann per Knopfdruck geöffnet werden. Es fanden drei Versuche mit 7,5 kg und einer mit 5,7 kg Hochofensinter der Größenfraktion 25-40 mm statt. Aufgrund von Materialmangel konnten nicht mehr Versuche durchgeführt werden. Die Schüttgutprobe wurde jeweils vor und nach dem Versuch mit der bereits beschriebenen Sortierrinne analysiert. Der Versuch wurde mittels der DE-Software ThreeParticle mit dem zuvor erklärten neuen Bruchmodell simuliert. Dabei wurde ein Zeitschritt von  $5 \times 10^{-6}$  s verwendet. Diverse Material- und Interaktionsparameter für die Simulation wurden in

[16] und [17] festgestellt. In Bild 8 ist der Aufprall der Schüttgutprobe auf der Stahlplatte zu verschiedenen Zeitpunkten ersichtlich. Die Farbskala beschreibt dabei die Partikelmasse (blau = 0 g, rot = 48 g). Hierbei ist der Partikelbruch in der Simulation deutlich zu erkennen.

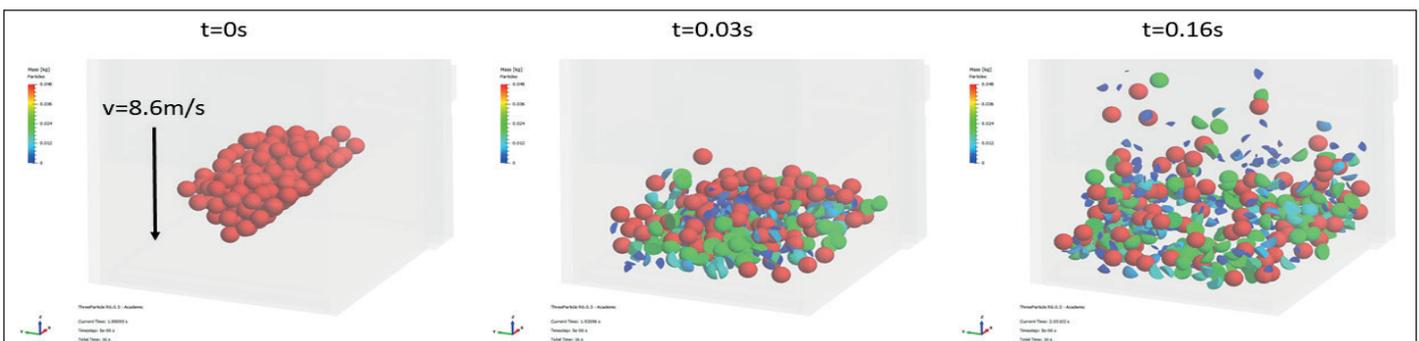
Weil das Bruchmodell auf Wahrscheinlichkeiten basiert, ist eine ausreichend genaue Simulation des Partikelbruchs nur mit entsprechend hoher Partikelanzahl möglich. Die in der Simulation verwendete Schüttgutprobe von 7.52 kg entspricht bei einer Partikelmasse von 47 g 160 Partikeln. Aufgrund der geringen Partikelanzahl wurde die Simulation 25 Mal durchgeführt und das arithmetische Mittel aller Simulationsergebnisse berechnet. Hierbei wurde zusätzlich evaluiert, wie viele Partikel benötigt werden, um mit der beschriebenen Methode ein ausreichend genaues Simulationsergebnis zu erzielen. Dabei wurde für jede Größenfraktion der kumulative Mittelwert des Massenanteils gebildet und jeweils das Fehlerquadrat ( $R^2$ ) zum Mittelwert der Versuche nach Formel 1 (siehe unten) berechnet.

#### Formel 1 zur Berechnung des Fehlerquadrates zum Mittelwert der Versuche:

- $R_i$  – Residuum,
- $T_i$  – Mittelwert der Massenanteile nach den Shatter-tests,
- $S_i$  – Kumulativer Mittelwert der Massenanteile in der Simulation,
- $i$  – Größenfraktionen <6.3 mm (1) bis 25-40 mm (Bild 5).

$$\text{Formel 1: } \sum_{i=1}^s R_i^2 = \sum_{i=1}^s (T_i - S_i)^2$$

Die Summe der Fehlerquadrate aller Größenfraktionen in Abhängigkeit der Partikelanzahl und der ausgeführten Simulationen ist in Bild 9 ersichtlich. Die Genauigkeit der Simulation nähert sich hierbei asymptotisch einer konstanten Abweichung von den Versuchen an. In diesem Fall wird ab 3.000-4.000 Partikeln keine signifikante Änderung der Simulationsergebnisse mehr festgestellt. Daher wird der Schluss gezogen, dass mindestens 3.000 Partikel benötigt werden, um mit dieser



**Bild 8: Aufprall der Schüttgutprobe in der DE-Simulation mit ThreeParticle**

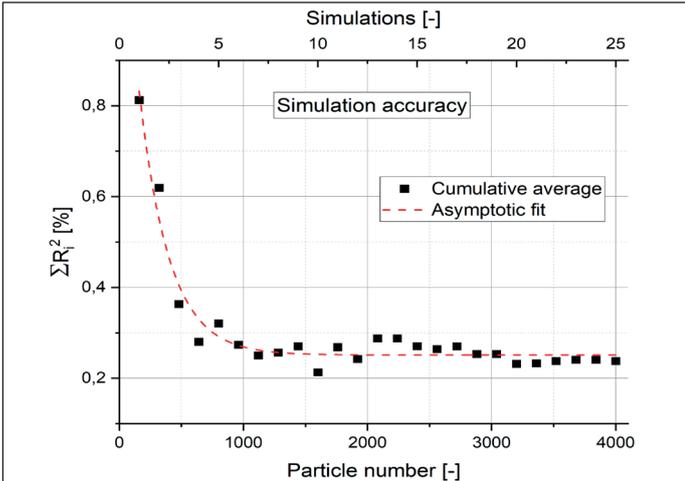


Bild 9: Evaluierung der Simulationsgenauigkeit in Abhängigkeit der Partikelanzahl und der durchgeführten Simulationen

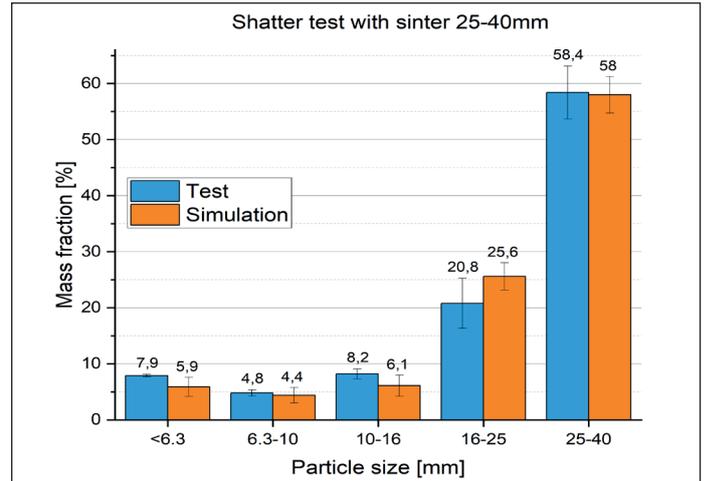


Bild 10: Vergleich der Versuchsergebnisse mit der Simulation des Shatter-Tests

Methode ausreichend genaue Simulationsergebnisse zu erzielen.

Der Vergleich der Versuchsergebnisse mit der Simulation ist in 10 ersichtlich. Hierbei werden jeweils die Massenanteile nach dem Aufprall für jede Größenfraktion dargestellt (vor dem Versuch 100 % 25-40 mm). Ein eventueller Massenverlust wurde als Feinmaterial (< 6.3 mm) gewertet. Dabei wird jeweils das arithmetische Mittel aus den vier Versuchen 25 Simulationsergebnissen mit Standardabweichungen gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt eine zufriedenstellende Übereinstimmung der Simulation mit den Versuchsergebnissen. Somit kann das neu entwickelte Bruchmodell bei Kenntnis der Material- und Interaktionsparameter und bei ausreichend hoher Partikelanzahl zur Vorhersage des Partikelbruchs und der resultierenden Partikelgrößenverteilung von Hochofensinter und anderen bruchfähigen Schüttgütern verwendet werden.

## Zusammenfassung

Es wurde eine Methodik zur Analyse der Bruchcharakteristik bruchfähigen Schüttgutes mithilfe eines speziell entwickelten Prüfstandes erarbeitet. Hierbei werden Einzelpartikel-Prallversuche mithilfe einer Druckluftkanone auf mehreren Energieniveaus durchgeführt und die Fragmente der Größe nach sortiert und gewogen. Zusätzlich wird die Anfangsmasse des Partikels und die Aufprallgeschwindigkeit gemessen. Der Prüfstand kann mit einer Schüttgutprobe beschickt werden und ist vollautomatisiert. Prüfmethodik und Ergebnisse werden am Beispiel von Hochofensinter gezeigt.

Um den Partikelbruch mittels Diskrete Elemente-Methode (DEM) simulieren zu können, wurden zwei bereits etablierte Bruchmodelle (bonded particle method und particle replacement method) evaluiert. Beide Bruchmodelle wurden für die

Simulation großer Massenströme, wie zum Beispiel beim Transport von Hochofensinter, für weniger geeignet befunden. Teilweise akzeptable Ergebnisse zur Prognose des Partikelbruchs wurden mit einer post-processing-Methode mittels Evaluierung der Kontaktkräfte jedes einzelnen Partikels erzielt, wobei auch diese Methode aufgrund des hohen Speicherbedarfs und der Beschränkung auf einfache Fördervorgänge als weniger geeignet befunden wurde.

Um den Partikelbruch selbst bei größeren Massenströmen mit hoher Genauigkeit effizient simulieren zu können, wurde ein neues Bruchmodell für die DEM mithilfe einer API (Application Programming Interface), der Simulations-Software „ThreeParticle“, entwickelt. Dieses basiert auf einem probabilistischen „particle-replacement“, wobei die Partikel beim Bruch durch Folgepartikel gleicher Form ersetzt und diese mit dem Voronoi-Algorithmus tesseliert werden. Somit ist Massen- und Volumenkonstanz gewährleistet. Ein weiterer Vorteil dieses Bruchmodells ist, dass auch Fragmente, die erneut brechen können, generierbar sind. Somit sind auch längere und komplexere Fördervorgänge simulierbar. Weil dieses Bruchmodell auf Wahrscheinlichkeiten basiert, ist für ausreichend genaue Simulationsergebnisse eine Mindestanzahl von Partikeln nötig. In dem hier beschriebenen Fall werden mindestens 3.000 Partikel benötigt. Die Bruchwahrscheinlichkeiten werden anhand der Ergebnisse der Einzelpartikel-Prallversuche definiert.

Das Bruchmodell wurde anhand einer Versuchsreihe von Shatter-Tests mit Hochofensinter verifiziert. Die Simulationsergebnisse weichen nur geringfügig von den Versuchsergebnissen ab. Somit bietet das hier entwickelte Bruchmodell, vor allem in Kombination mit der beschriebenen Prüfmethodik, eine effiziente Methode zur Prognose des Partikelbruchs bruchfähiger Schüttgüter auch in größeren Massenströmen.

## Quellenverzeichnis:

- [1] Denzel M, Prenner M (2021) Minimierung des Sinterzerfalls mittels DEM. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte (BHM)* 166(2):76–81. doi:10.1007/s00501-021-01081-7
- [2] Waidbacher B (2022) Automatische Beschickung eines Prüfstandes für Hochofensinter. Masterarbeit, Montanuniversität Leoben
- [3] Denzel M, Prenner M, Sifferlinger NA (2022): Development of an automated single particle impact tester for iron ore sinter. *Minerals Engineering* 175: 107291. doi: 10.1016/j.mineng.2021.107291.
- [4] Denzel M, Prenner M (2021): Dynamisches Übergabesystem zur Reduktion des Partikelbruchs. 25. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2021: 233-242. doi: 10.25673/36794.
- [5] Denzel M, Prenner M (2022): Partikelbruchvorhersage an einem dynamischen Übergabesystem und Vergleich mit einer herkömmlichen Schurre mittels DEM. *Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 167 (2): 66-75. doi: 10.1007/s00501-022-01197-4.
- [6] Potyondy DO, Cundall PA (2004): A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 41 (8): 1329-1364. doi: 10.1016/j.ijrmms.2004.09.011.
- [7] Quist J, Evertsson CM (2016): Cone crusher modeling and simulation using DEM. *Minerals Engineering* 85: 92-105. doi: 10.1016/j.mineng.2015.11.004.
- [8] Cleary P (2001): Modelling comminution devices using DEM. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.* 25 (1): 83-105. doi: 10.1002/1096-9853(200101)25:1<83::AID-NAG120>3.0.CO;2-K.
- [9] Jiménez-Herrera N, Barrios GK, Tavares LM (2017): Comparison of breakage models in DEM in simulating impact on particle beds. *Advanced Powder Technology* 29 (3): 692-706. doi: 10.1016/j.apt.2017.12.006.
- [10] Sousani M, Chagas A, Saxena A, Yang Y (2019): Simulation of Surface Damage and Body Breakage by using DEM.
- [11] Tavares LM, das Chagas AS (2021): A stochastic particle replacement strategy for simulating breakage in DEM. *Powder Technology* 377:222–232. doi: 10.1016/j.powtec.2020.08.091.
- [12] Kumar S, Kurtz SK (1994): Simulation of material microstructure using a 3D voronoi tessellation: Calculation of effective thermal expansion coefficient of polycrystalline materials. *Acta Metallurgica et Materialia* 42 (12): 3917-3927. doi: 10.1016/0956-7151(94)90170-8.
- [13] Kumar S, Kurtz SK (1993): Properties of a two-dimensional Poisson-Voronoi tessellation: A Monte-Carlo study. *Materials Characterization* 31 (1): 55-68. doi: 10.1016/1044-5803(93)90045-V.
- [14] Riedinger R, Habar M, Oelhafen P, Güntherodt H (1988): About the Delaunay-Voronoi tessellation. *Journal of Computational Physics* 74 (1): 61-72. doi: 10.1016/0021-9991(88)90068-X.
- [15] Grübler C (2020): Evaluierung ausgewählter passiver Staubreduktionsmaßnahmen beim Schüttgutumschlag an fördertechnischen Anlagen. Dissertation, Montanuniversität Leoben.
- [16] Brugger M (2021): Rücksprungverhalten von Hochofensinter. Bachelorarbeit, Montanuniversität Leoben.
- [17] Prenner M (2018): Simulationsparameterstudie – Sinterbunker. Projektbericht, Montanuniversität Leoben.